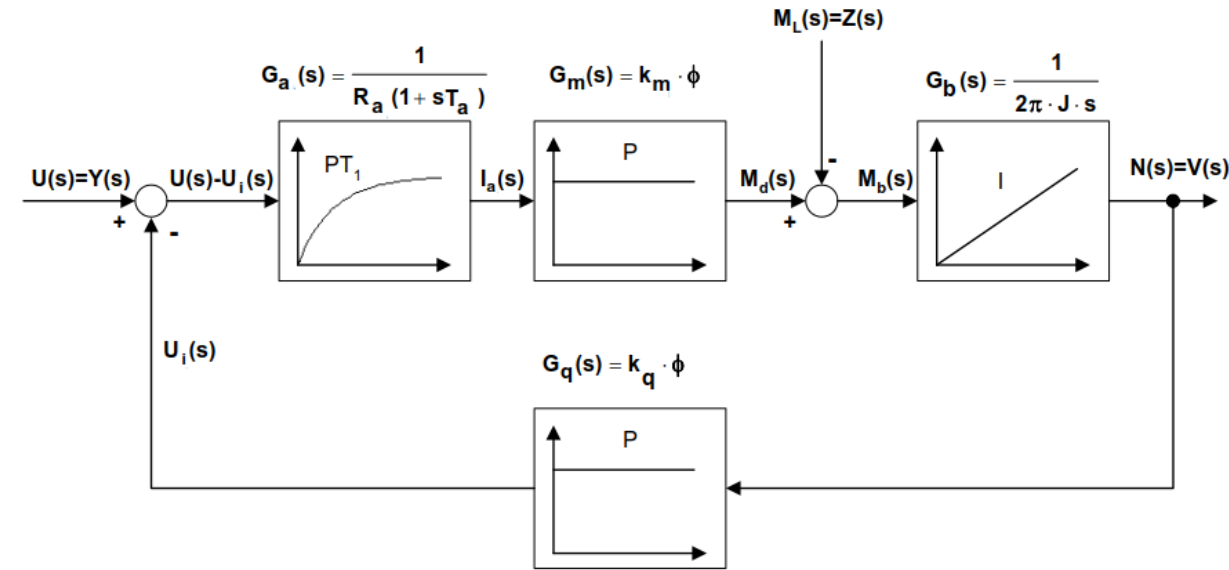
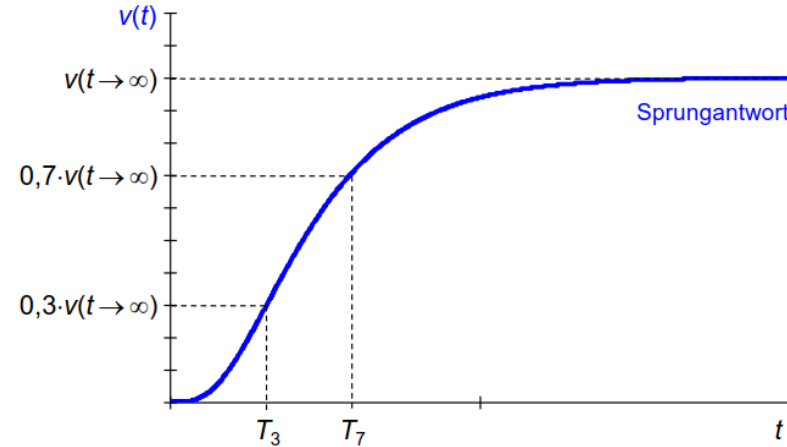
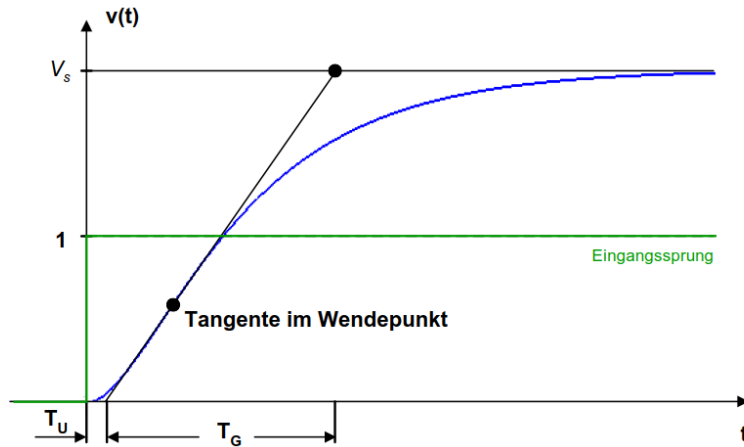


Regelungstechnik

für BEI4, BMEI4 und IBT

Prof. Dr. B. Wagner



$$T_1 = \frac{T_7}{2,4} + \frac{T_3 + T_7}{1,2} \cdot \sqrt{0,45 - \frac{T_3}{T_7}}$$

$$G_S(s) = \frac{V_S}{(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_3)\dots(1+sT_n)} = \frac{V_S}{1+s(\underbrace{T_1+T_2+T_3+\dots+T_n}_{\text{Summen-zeitkonstante } T_\Sigma}) + s^2(\underbrace{T_1T_2+\dots}_{\text{wird vernachlässigt}}) + \dots} \approx \frac{V_S}{1+sT_\Sigma}$$

Kap. 4 Modellbildung von Regelstrecken

Schritte einer Regelungsentwicklung:

1. Definition der Regelungsaufgabe

- Zuordnung Stellgrößen / Regelungsgrößen
- Spezifikation der Anforderungen

2. Systemanalyse

- Modellbildung
- Modellansatz und Parametrierung

3. Reglerentwurf

- Auswahl des Regelungskonzepts / des Reglertyps
- Reglerparametrierung
- Simulationsstudie

4. Reglerimplementierung und –inbetriebnahme

- Programmierung
- Unit-Test
- Integration in Zielplattform (SPS oder Microcontroller ...)
- Inbetriebnahme / Parametrierung / Test & Optimierung an der Anlage

Aufgabe: Erstelle ein mathematisches Modell eines Vorgangs

⇒ **Das Modell soll relevantes Verhalten des Vorgangs abbilden**

⇒ **Das Modell soll möglichst einfach und verständlich sein**

⇒ **Das Modell soll übertragbar und skalierbar sein**

Möglichkeit 1: theoretische Modellbildung

basierend auf Gleichungen der Physik

(Knoten- / Maschengleichungen, Bewegungsgesetze...)

Vorteile: übertragbar, vor Aufbau der Anlage verfügbar

Beispiel: Gleichstrommotor

Möglichkeit 2: experimentelle Modellbildung

basierend auf Messungen

Häufig Sprungantworten der unregelten Strecke

Vorteile: in vielen Fällen geringerer Aufwand

Beispiele: Wendetangente, Strejc-Verfahren

=> häufig wird eine Kombination von theoretischer und experimenteller Modellierung angewandt <=

Basierend auf physikalischen Grundgleichungen („first principles“)

Vom Charakter her Zustands-Modelle

Zustandsgrößen: Speichergleichungen, z. B. ...

magnetische Energie in einer Induktivität (Strom)

elektrische Feldenergie in einer Kapazität (Spannung)

potentielle und kinetische Energie in der Mechanik (Position und Geschw.)

Druck in fluidischen Systemen (Pneumatik, Hydraulik)

Bilanzgleichungen, z. B. ...

Kirchhoff-sche Gesetze (Knoten-/Maschengleichung) in der Elektrotechnik

Kräfte-/Momentengleichgewichte in der Mechanik

Statische Gleichungen, z. B. ...

Ohm-sches Gesetz, Diodenkennlinien etc. in der Elektrotechnik

Kräftegleichungen in der Mechanik

Nutze Modellannahmen / Vereinfachungen

Siehe auch „Modellbildung und Simulation“ im 5. Semester – systematische Modellerstellung

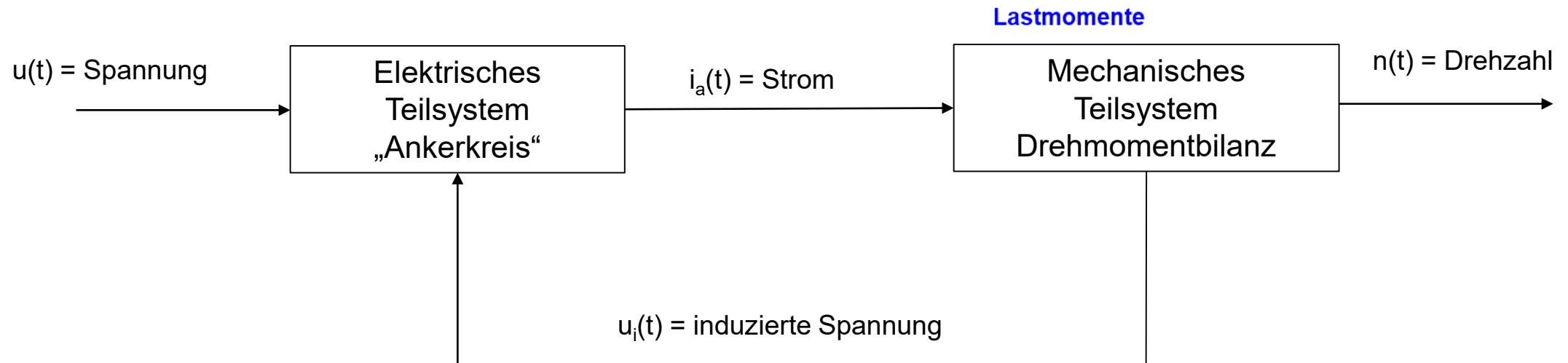
Früher Standardmotor

Heute eher im Bereich kleiner Leistungen anzutreffen (z. B. Fensterheber)

Lässt sich sehr gut über physikalische Gleichungen modellieren

Parameterwerte: aus Datenblättern entnehmen / aus Messungen ermitteln

Modellstruktur:



Gleichstrommotor-Modellierung

Elektrisches Teilsystem „Ankerkreis“

$$u(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} + u_i(t)$$

Laplace:

$$U(s) = R_a \cdot I_a(s) + L_a \cdot s \cdot I_a(s) + U_i(s)$$

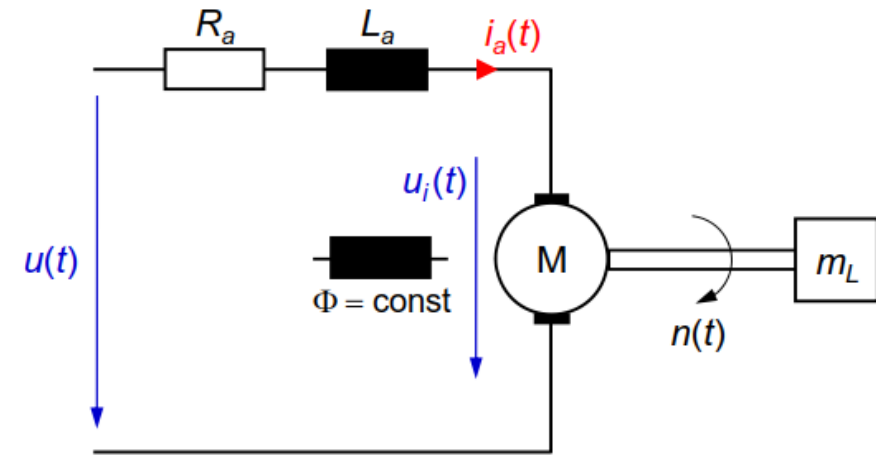
auflösen nach:

$$I_a(s) = (U(s) - U_i(s)) / (R_a + L_a \cdot s) = (1/R_a) / (1 + s \cdot (L_a/R_a)) \cdot (U(s) - U_i(s))$$

--> PT1

--> Ankerzeitkonstante

$$L_a/R_a = T_a \text{ (ca. 1 msec)}$$



Einfaches Ersatzschaltbild des Gleichstrom-Nebenschluss-Motors

$u(t)$	Eingangsspannung (entspricht der Stellgröße $y(t)$)
$n(t)$	Drehzahl (entspricht der Regelgröße $v(t)$)
$m_L(t)$	Lastmoment (entspricht der Störgröße $z(t)$)
$i_a(t)$	Ankerstrom
R_a	ohmscher Ankerwiderstand
L_a	Ankerinduktivität
Φ	Erregerfluss
$u_i(t)$	Induzierte Spannung (Gegen-EMK)

Gleichstrommotor-Modellierung

Mechanisches Teilsystem

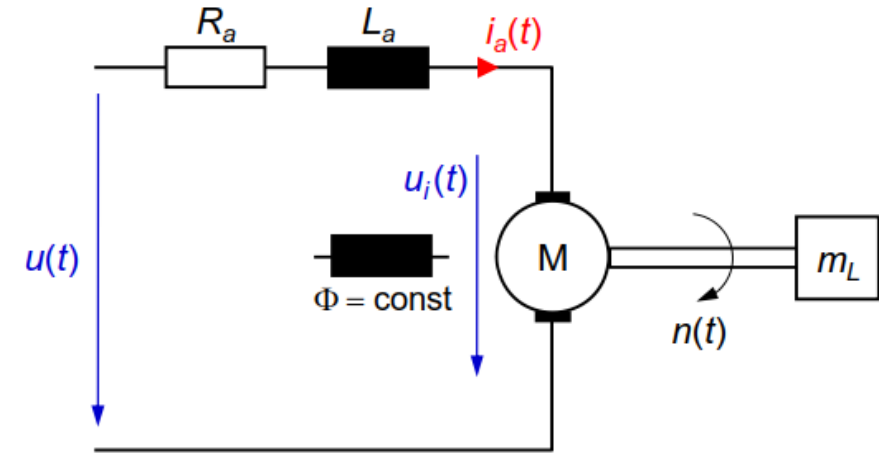
Drehmoment: $m_d(t) = i_a(t) * \phi * k_m$ (manchmal: $k_T = \phi * k_m$)

Laplace:
 $M_d(s) = I_a(s) * \phi * k_m$

Drehmomentbilanz:
 beschleunigendes Moment: $m_b(t) = m_d(t) - m_L(t)$
 --> $M_b(s) = M_d(s) - M_L(s)$

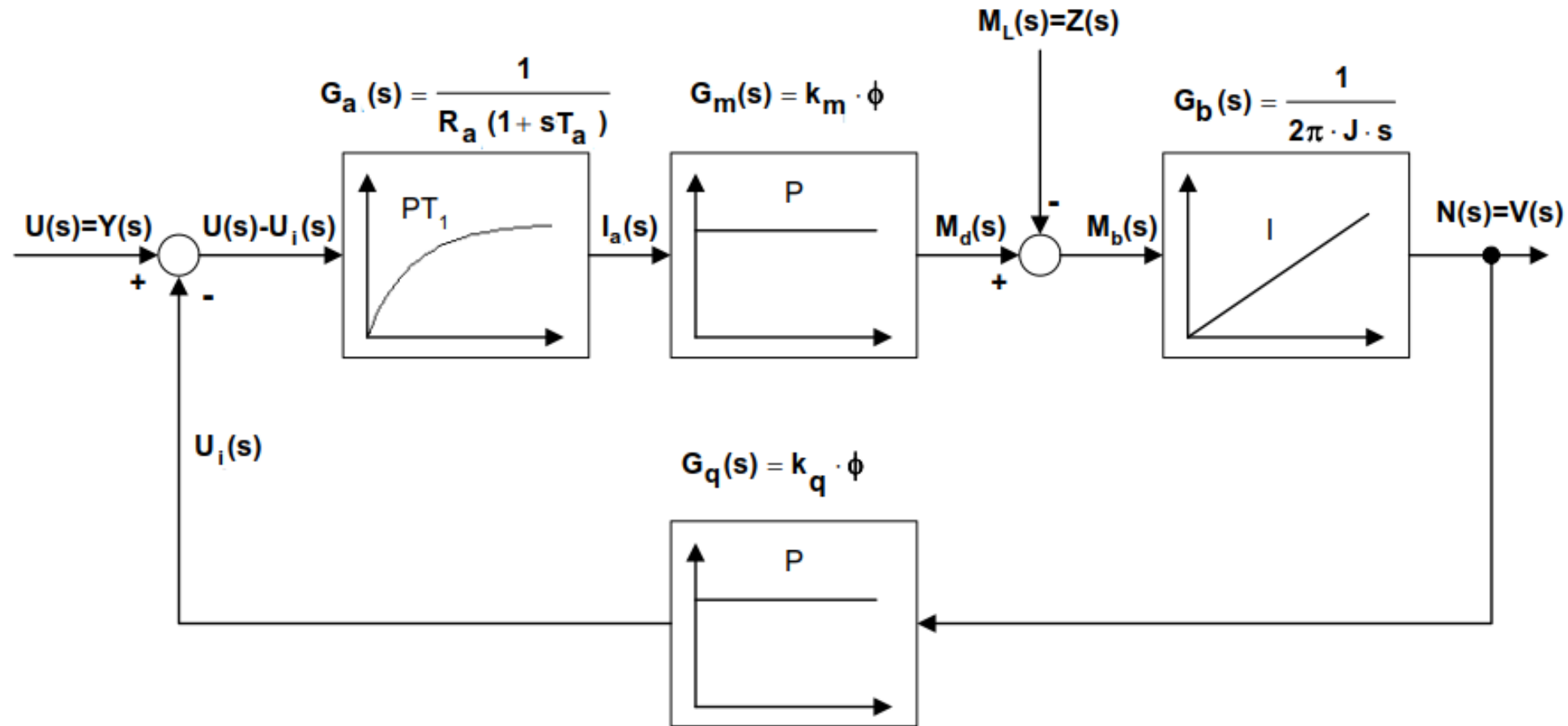
Drehzahl $n(t) = 1/2\pi \int m_b(t) dt$ (S = Integral)
 --> $N(s) = 1/2\pi \int 1/s * M_b(s)$

induzierte Spannung: $u_i(t) = \phi * k_q * n(t)$



Einfaches Ersatzschaltbild des Gleichstrom-Nebenschluss-Motors

$u(t)$	Eingangsspannung (entspricht der Stellgröße $y(t)$)
$n(t)$	Drehzahl (entspricht der Regelgröße $v(t)$)
$m_L(t)$	Lastmoment (entspricht der Störgröße $z(t)$)
$i_a(t)$	Ankerstrom
R_a	ohmscher Ankerwiderstand
L_a	Ankerinduktivität
Φ	Erregerfluss
$u_i(t)$	Induzierte Spannung (Gegen-EMK)



Minus-Zeichen
bremst Drehmoment

$$G_{SY}(s) = \frac{V(s)}{Y(s)} =$$

$$G_{SZ}(s) = \frac{V(s)}{Z(s)} =$$

$$G_{SY}(s) = \frac{\frac{1}{R_a(1+sT_a)} k_m \Phi \frac{1}{2\pi J s}}{1 + \frac{1}{R_a(1+sT_a)} k_m \Phi \frac{1}{2\pi J s} k_q \Phi} = \frac{k_m \Phi}{s^2 T_a R_a 2\pi J + s R_a 2\pi J + k_m k_q \Phi^2} = \frac{\frac{1}{k_q \Phi}}{s^2 T_a \frac{R_a 2\pi J}{k_m k_q \Phi^2} + s \frac{R_a 2\pi J}{k_m k_q \Phi^2} + 1}$$

$$G_{SZ}(s) = \frac{-\frac{1}{2\pi J s}}{1 + \frac{1}{R_a(1+sT_a)} k_m \Phi \frac{1}{2\pi J s} k_q \Phi} = \dots = \frac{-\frac{R_a}{k_q k_m \Phi^2} (1+sT_a)}{s^2 T_a \frac{R_a 2\pi J}{k_m k_q \Phi^2} + s \frac{R_a 2\pi J}{k_m k_q \Phi^2} + 1} =$$

T_M = mechan. Zeitkonstante (~ 100 msec)

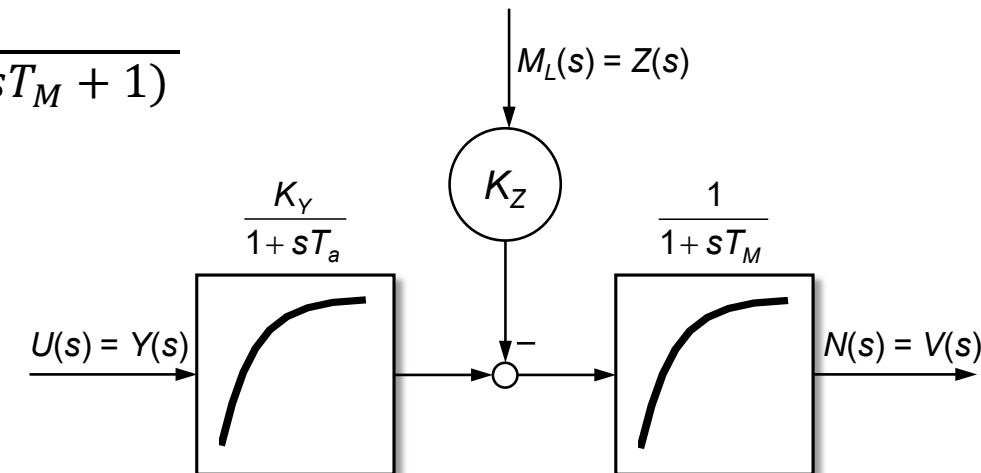
Systemtypen?!

Weitere Vereinfachung ⇔ bei Gleichstrommotoren gilt meist $T_a \ll T_M$

2x PT1 in Reihe

$$G_{SY}(s) = \frac{K_Y}{s^2 T_a T_M + s T_M + 1} \approx \frac{K_Y}{s^2 T_a T_M + s(T_M + T_a) + 1} = \frac{K_Y}{(s T_a + 1)(s T_M + 1)}$$

$$G_{SZ}(s) \approx \frac{-K_Z(1+sT_a)}{s^2 T_a T_M + s(T_M + T_a) + 1} \approx \frac{-\cancel{K_Y} (1+sT_a)}{(s T_a + 1)(s T_M + 1)} \approx \frac{-K_Z}{(s T_M + 1)}$$



Zusammenfassen von Zeitkonstanten (Wiederholung)

- ⇒ Nur kleine Zeitkonstanten zusammenfassen – Zweck: Komplexitätsreduktion für Reglerentwurf – Kapitel 7
- ⇒ Alle Zeitkonstanten zusammenfassen – Zweck: grobe Abschätzung der Einschwingdauer der Sprungantwort
- ⇒ Ein paar Übungsaufgaben

Vorüberlegungen zu experimenteller Modellbildung

- ⇒ Anregungssignale (Sprung, Impuls, Sinus, Rauschen)
- ⇒ Näherung im Frequenzbereich „gemessenes Bode-Diagramm“

Zeitbereichsmethoden mit Anregung der Regelstrecke mit Sprung

- ⇒ PT2-Schwingfall (Wiederholung)
- ⇒ PT2-Schwingfall mit zusätzlicher Totzeit (also PT2Tt)

1. Variante: Fasse „kleine“ Zeitkonstanten zusammen (~ Faktor ca. 5)

$$G(s) = (3,7 * e^{-s}) / ((1+s9)(1+s2)(1+s1)) \quad \rightarrow PT3Tt$$

$$\text{Summe der kleinen Zeitkonstanten: } T_{\text{sigma}} = 1 + 2 + 1 = 4 \quad (\text{inkl. Totzeit} = 1)$$

$$\rightarrow G(s) \approx 3,7 / ((1+s9)(1+s4))$$

2. Variante: Fasse alle Zeitkonstanten zusammen

$$G_S(s) = \frac{V_S}{(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_3)\dots(1+sT_n)} = \frac{V_S}{1+s\underbrace{(T_1+T_2+T_3+\dots+T_n)}_{\text{Summen - zeitkonstante } T_{\Sigma}} + \underbrace{s^2(T_1T_2+\dots)}_{\text{wird vernachlässigt}} + \dots} \approx \frac{V_S}{1+sT_{\Sigma}}$$

=> Abschätzung der Einschwingdauer:

$$T_{\text{Sigma}} = 9 + 2 + 1 + 1 = 13 \quad \rightarrow 3-5 * T_{\text{Sigma}} \approx 4 * T_{\text{Sigma}} = 52$$

$$G(s) \approx 3,7 / (1+s13)$$

Beispiel 1: (aus dem Praktikum)

$$G(s) = \frac{0,0755}{1s^2 + 0,575s + 0.0441}$$

Schätzen Sie die Einschwingdauer ab!

$$G(s) = 0,0755 / ((s+0,09)(s+0,48)) = 0,0755 / ((11s+1)(2s+1))$$

$$\rightarrow T_{\text{Sigma}} \approx 13 \quad \rightarrow \text{Einschwingdauer} \approx 52$$

$$\text{Alternativ: Normierung auf } a_0 = 1 \rightarrow T_{\text{Sigma}} = 0,575 / 0,0441 = 13$$

Beispiel 2:
$$G(s) = \frac{5}{(1+s)(1+3s)(1+25s)(1+5s)^2(1+35s)}$$

**Vereinfachen Sie die Übertragungsfunktion durch
Zusammenfassen der kleinen Zeitkonstanten!**

$$T_{\text{sigma}} = 1 + 3 + 5 + 5 = 14 \quad \rightarrow G(s) = 5 / ((1+s14)(1+s25)(1+s35))$$

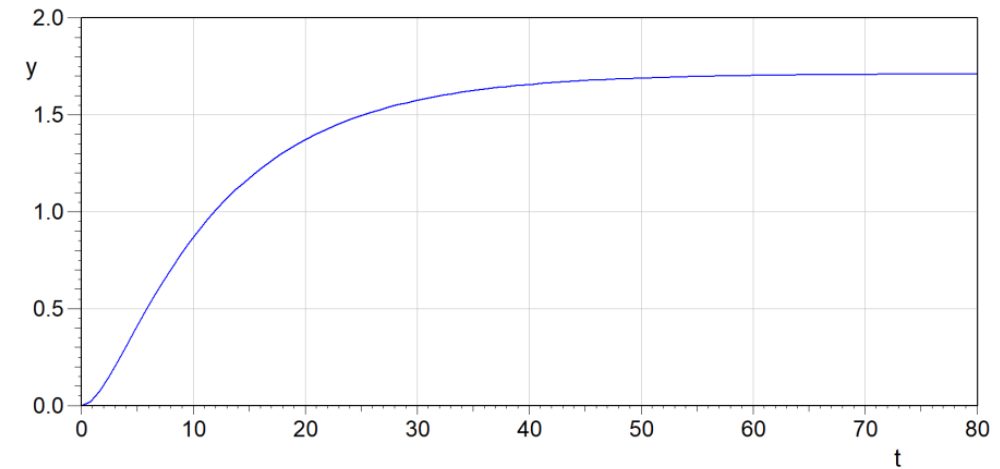
**Schätzen Sie die Einschwingdauer des Systems
mittels der Summenzeitkonstante ab (d. h. PT₁-Näherung)!**

$$T_{\text{Sigma}} = 14 + 25 + 25 = 74 \quad \rightarrow G(s) = 5 / (1+s74)$$

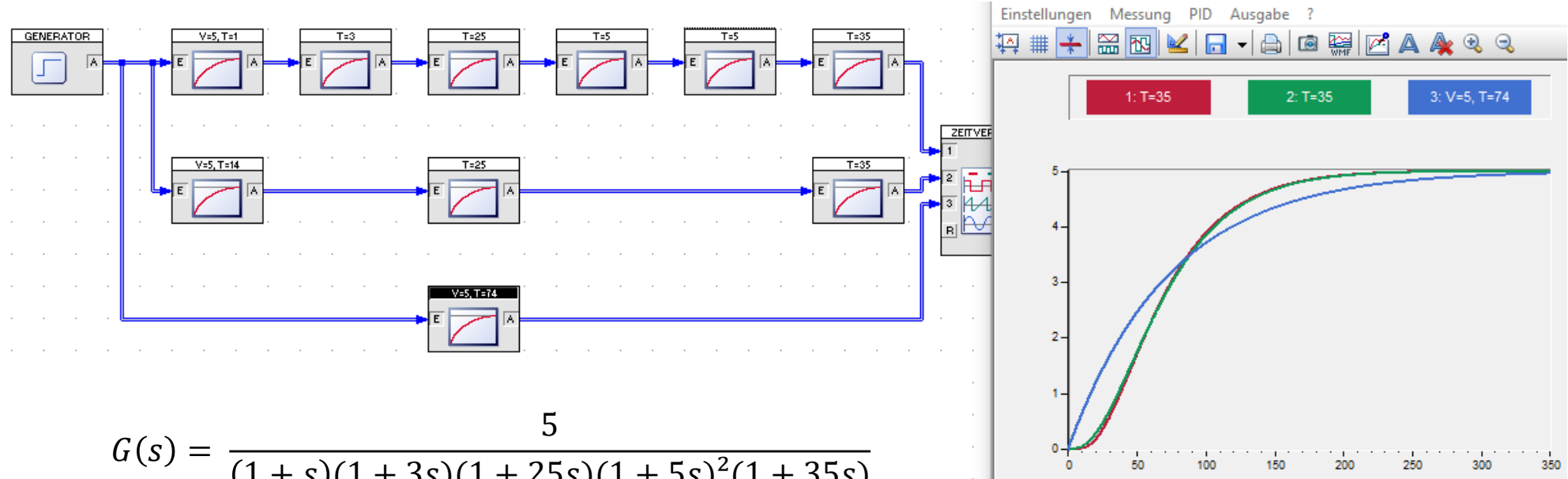
$$\text{Einschwingdauer} = 74 * 4 = 296$$

Simulieren Sie alle drei Modelle (Original, vereinfacht, PT₁)!

Beispiel 1 (aus dem Praktikum) Simulierte Sprungantwort



Beispiel 2 (PT6)



$$G(s) = \frac{5}{(1+s)(1+3s)(1+25s)(1+5s)^2(1+35s)}$$

Welche Testsignale eignen sich für eine Identifikation?

Sprung	Vorteil:	+ sehr einfach zu erzeugen + bei vielen Strecken zulässig	Nachteil:	- nur geringe Anregung bei hohen Freq. - nicht im laufenden Betrieb
Impuls	Vorteil:	+ Anregung bei allen Frequenzen	Nachteil:	- benötigte Stellamplitude zu hoch - hohe mechanische Belastung - nicht im laufenden Betrieb
Sinus	Vorteil:	+ einfach zu erzeugen + bei vielen Strecken zulässig	Nachteil:	- Anregung bei nur einer Frequenz pro Mess. viele Messpunkte nötig => lange Dauer! - nicht im laufenden Betrieb
Rauschen	Vorteil:	+ Anregung bei kleiner Amplitude + Identifikation im laufenden Betrieb + sehr breitbandige Anregung	Nachteil:	- Auswertung mathematisch anspruchsvoll (Korrelationsverfahren)

Als Rauschsignal häufig „PRBS Pseudo-Random Binary Signal“

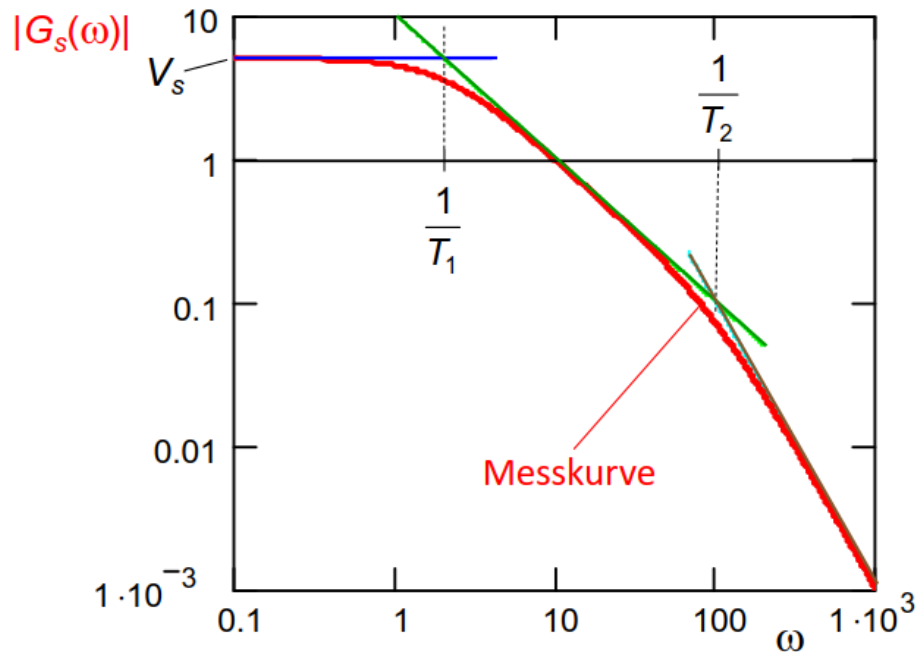
- ⇒ **Gute Ausnutzung der gegebenen Amplitude**
- ⇒ **Einfach zu erzeugen**
- ⇒ **Definierte stochastische Eigenschaften**

Frequenzgangmessung meist mit ...

... Sinus-Anregung (extrem lange Messdauer, da bei jedem Messpunkt eingeschwungenen Zustand abwarten!)

... oder mit (Pseudo-)Rauschsignal

Approximation der Frequenzgangpunkte durch Asymptoten



$$G_S(s) \approx \frac{V_S}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)}$$

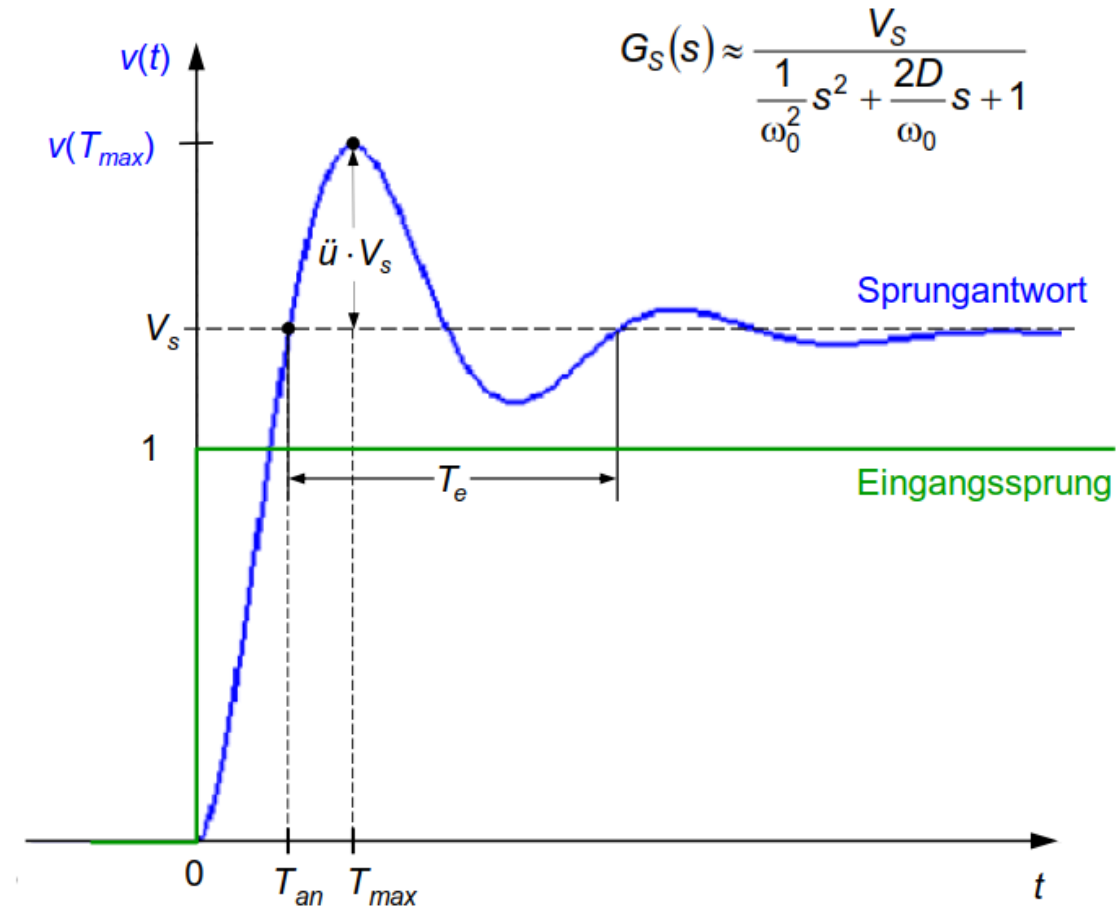
Aus Kapitel 2 bekannte Formeln:

$$D = \frac{-\ln(\ddot{u})}{\sqrt{\pi^2 + (\ln(\ddot{u}))^2}}$$

$$\omega_0 = \frac{\arccos(-D)}{T_{an} \sqrt{1-D^2}}$$

$$\omega_0 = \frac{\pi}{T_{max} \sqrt{1-D^2}}$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_e \sqrt{1-D^2}} \quad .$$



Achtung: nur gültig für „reines“ PT2-System

Erweiterung des PT2-schwingfähig-Verfahrens um eine zusätzliche Verzögerung / Totzeit

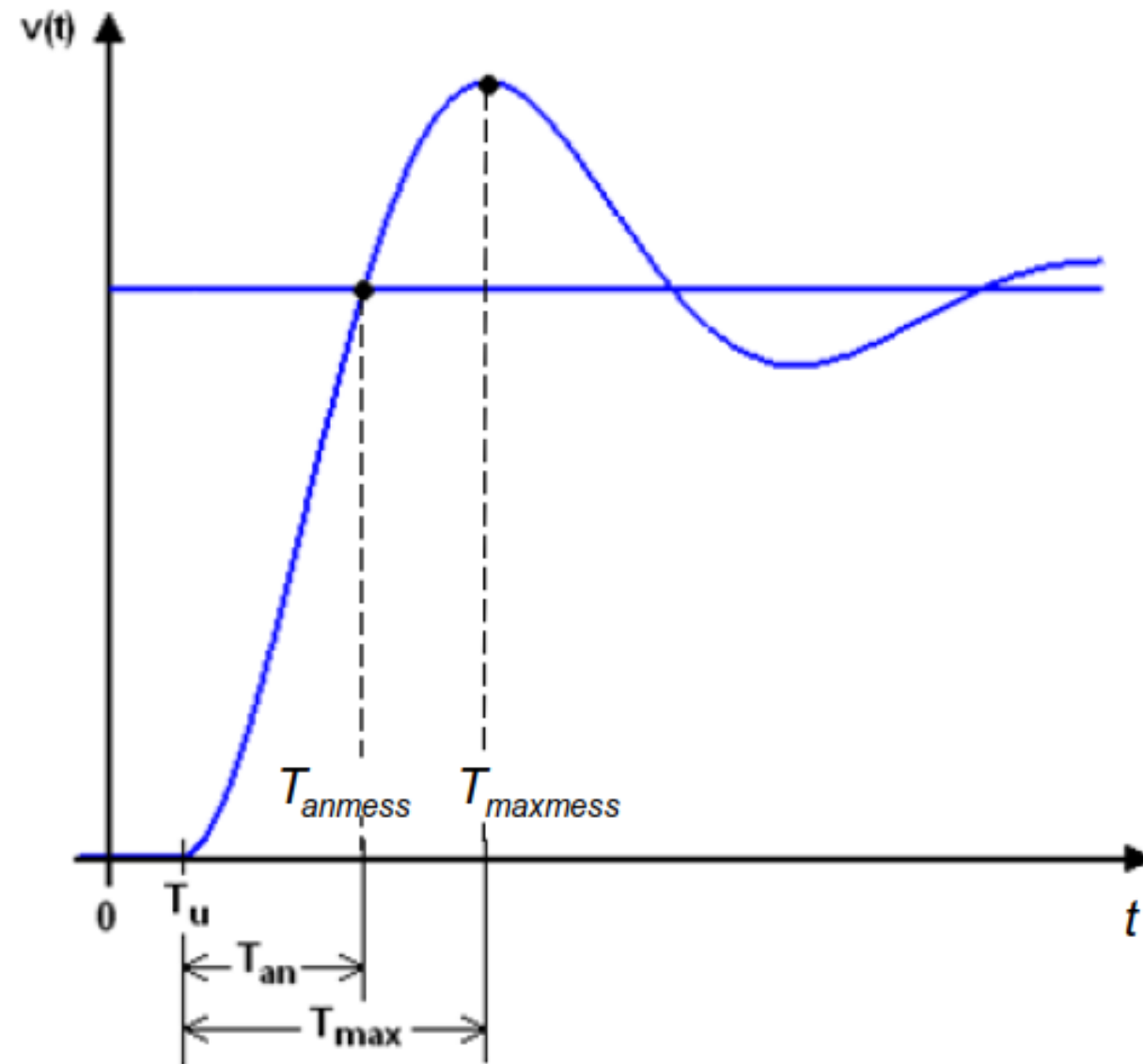
Modellansatz:
$$G_s(s) \approx \frac{V_s}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{2D}{\omega_0}s + 1} \cdot e^{-sT_U}$$

Idee:

- Einfach ablesbare Werte: $T_{an,mess}$ und $T_{max,mess}$
- Ermittle zunächst D aus \ddot{u} (bekannte Formel)
- Totzeit T_U ermitteln aus Rechnung
- $T_{an} = T_{an,mess} - T_U$ berechnen (um Totzeit bereinigt)
- Mit T_{an} und D den Wert von ω_0 ermitteln mit bekannter Formel

Herleitung der Formel für T_U im Skript!

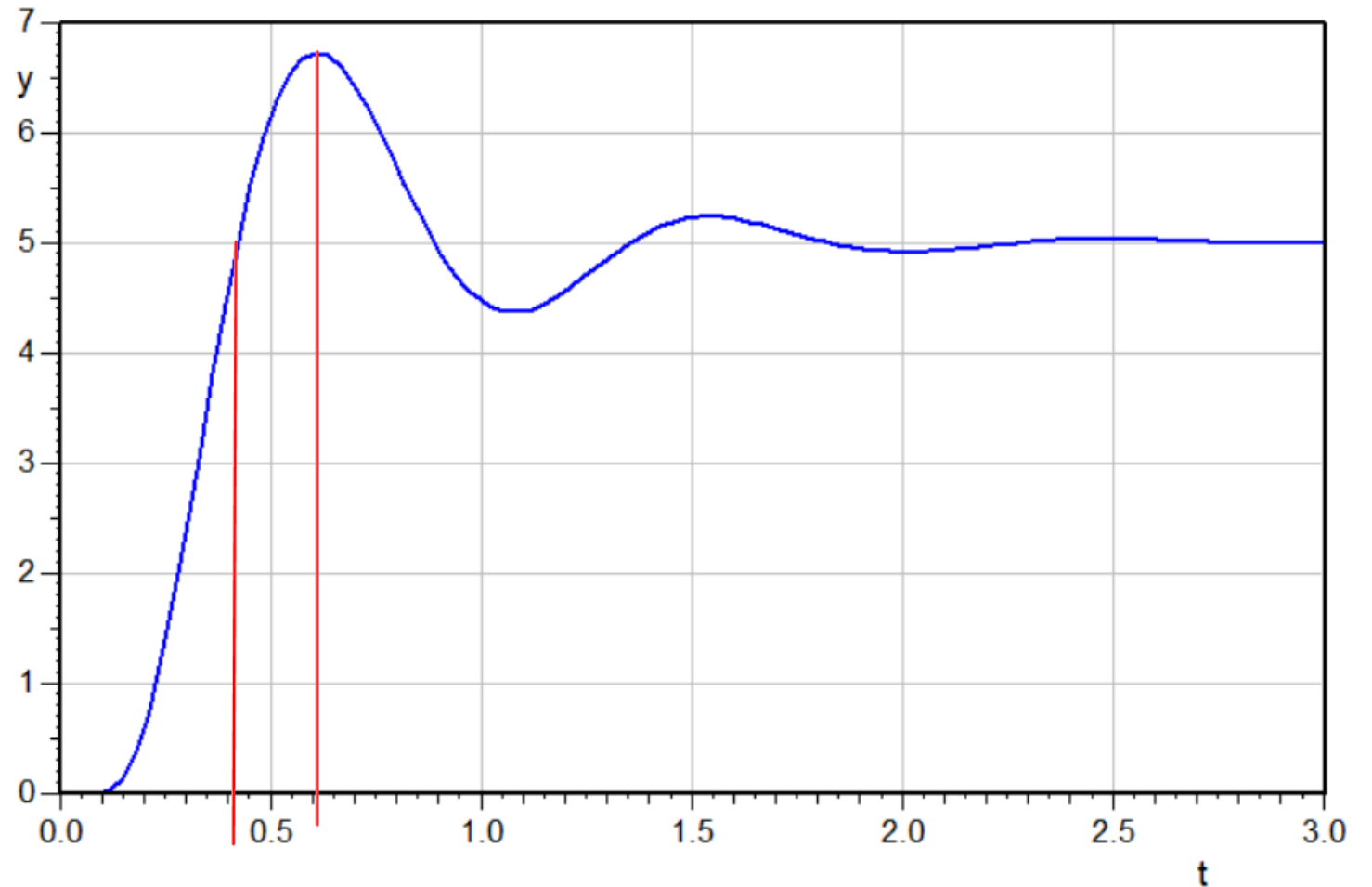
$$\underline{\underline{T_U = \frac{T_{maxmess} \cdot \arccos(-D) - T_{anmess} \cdot \pi}{\arccos(-D) - \pi}}}$$



Beispiel:

Geg.: Sprungantwortmessung:

Bestimmen Sie das PT_2T_t -Modell!



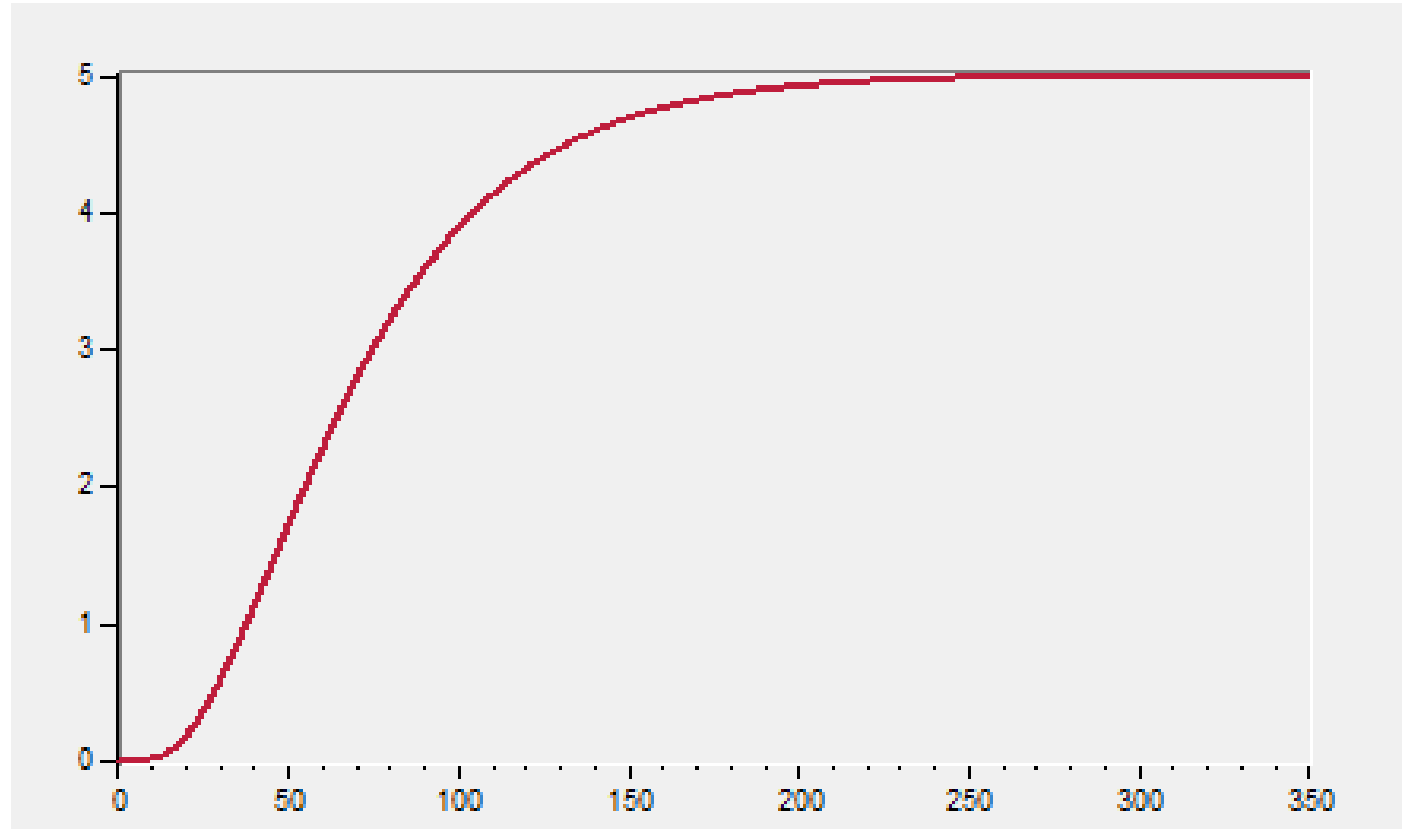
$$G(s) = \frac{5}{(1+s\frac{2\cdot 0,3}{7}+s^2\frac{1}{7^2})(1+0,05s)} e^{-s0,1}$$

Häufig z. B. bei Temperatur-Regelstrecken

$$PT1Tt: (V / (1+sTG)) * e^{-sTU}$$

$$PT2: V / ((1+sT1)(1+sT2))$$

$$PTn: V / (1+sT)^n \quad \text{bzw} \quad V / ((1+sT)^n (1+sTn))$$



Teil 4c: Identifikation aperiodischer PT_n -Strecken

Was sind aperiodische PT_n -Strecken?

Identifikation von PT_1 -Strecken (Wiederholung aus Kapitel 2)

Näherungen basierend auf der **Wendetangente**

⇒ Wie findet man die Wendetangente?

⇒ Näherungsmodelle: PT_1T_t , PT_2 , PT_n mit gleichen Zeitkonstanten

Die Methode der **Zeitprozentkennwerte** / das Verfahren von **Strejc**

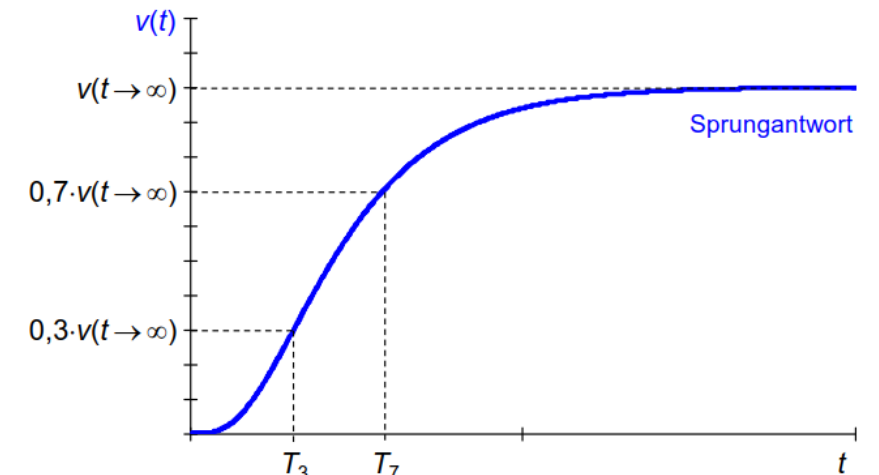
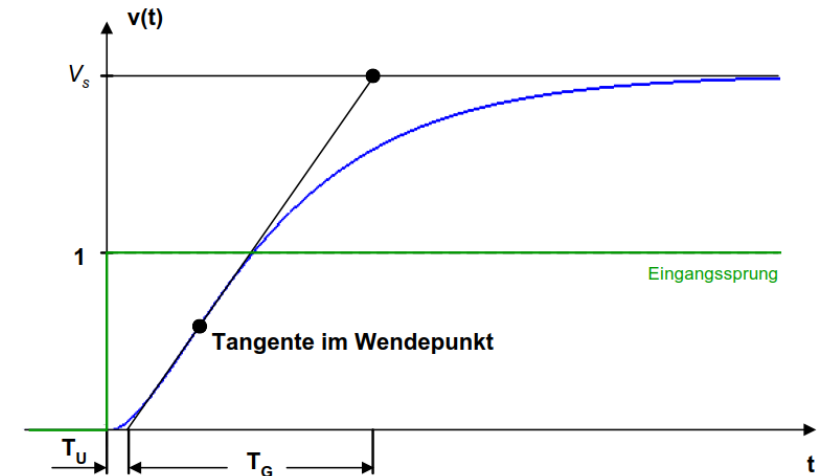
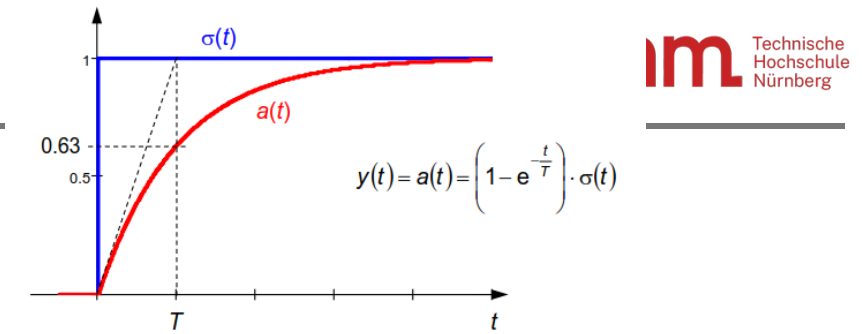
⇒ Was sind Zeitprozentkennwerte?

⇒ Näherungsmodelle: PT_1T_t , PT_2 , PT_2 mit gleichen Zeitkonstanten

⇒ Herleitung der Gleichungen für das PT_1T_t -Modell

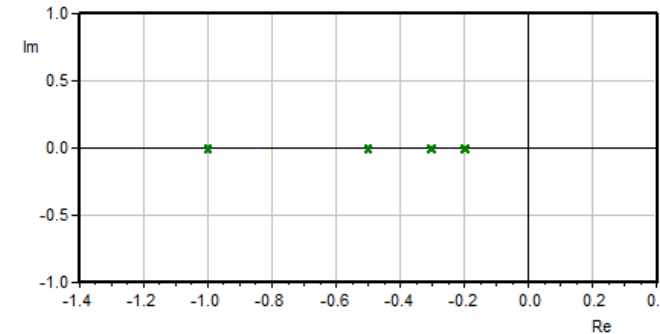
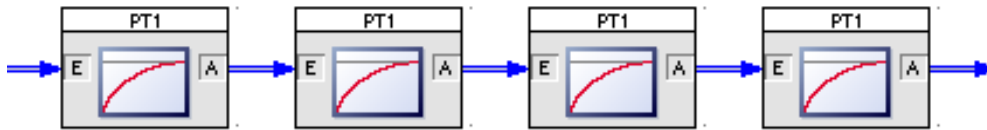
⇒ Ausblick: Weitere Zeitprozentkennlinien-Ansätze

Und auch noch: Parameter-Identifikation für IT_n -Strecken



Aperiodisch \Leftrightarrow ohne Sinus-Anteil \Leftrightarrow n rein reelle Pole \Leftrightarrow als Reihenschaltung von n PT₁-Strecken darstellbar

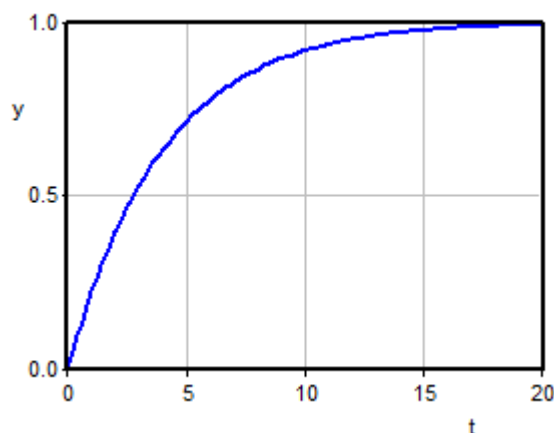
$$G_S(s) = \frac{V_S}{(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_3)\dots(1+sT_n)}$$



Je höher die Ordnung n, um so langsamer ist die anfängliche Systemreaktion:

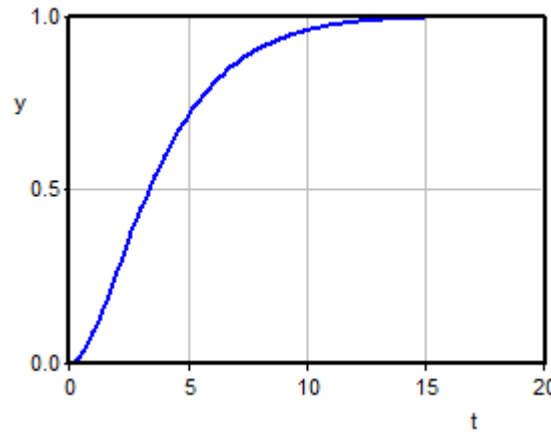
PT₁ mit Summenzeitkonst. T_Σ=4:

$$G_1(s) = \frac{1}{1+4s}$$



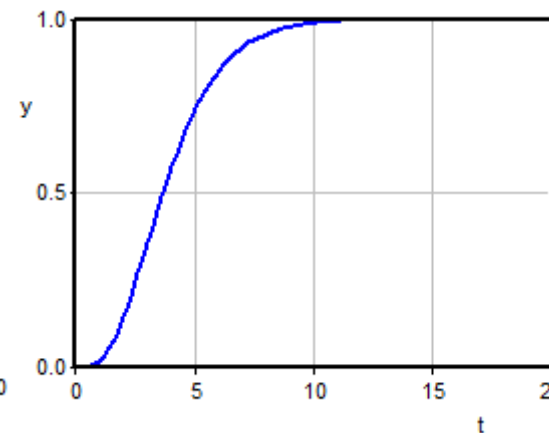
PT₂ mit T_Σ=4:

$$G_2(s) = \frac{1}{(1+2s)^2}$$



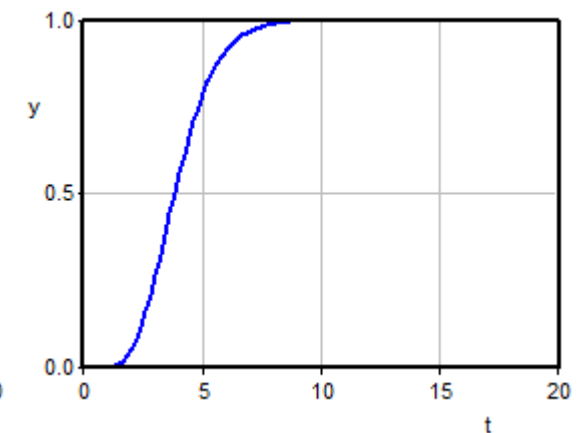
PT₄ mit T_Σ=4:

$$G_4(s) = \frac{1}{(1+s)^4}$$



PT₈ mit T_Σ=4:

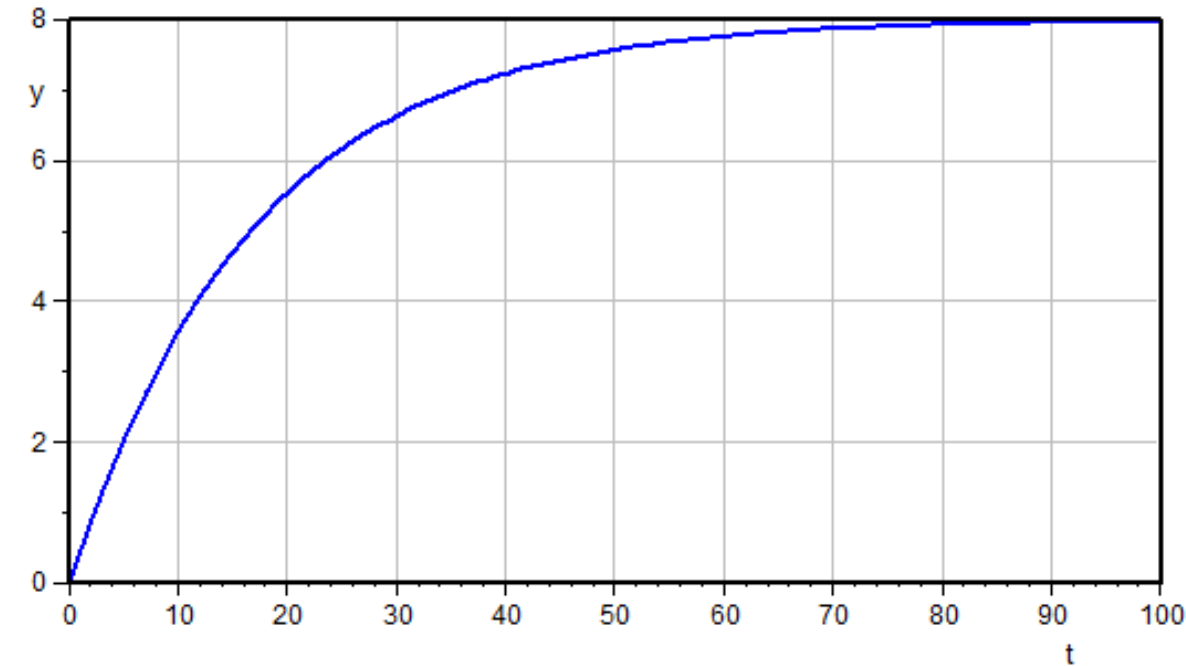
$$G_8(s) = \frac{1}{(1+0.5s)^8}$$



$$G(s) = \frac{V}{(1 + sT)}$$

Siehe Kapitel 2 sowie Versuch 1 des RT-Praktikums

Beispiel: Lesen Sie die Übertragungsfunktionsparameter V und T eines PT_1 -Modells ab



Gegebene Sprungantwort:

Gesucht: Übertragungsfunktion

Idee 1: Wendetangente

⇒ Tangente mit maximaler Steigung

⇒ Der Wendepunkt selbst ist unwichtig!

⇒ Lese zwei ZEITWERTE ab:

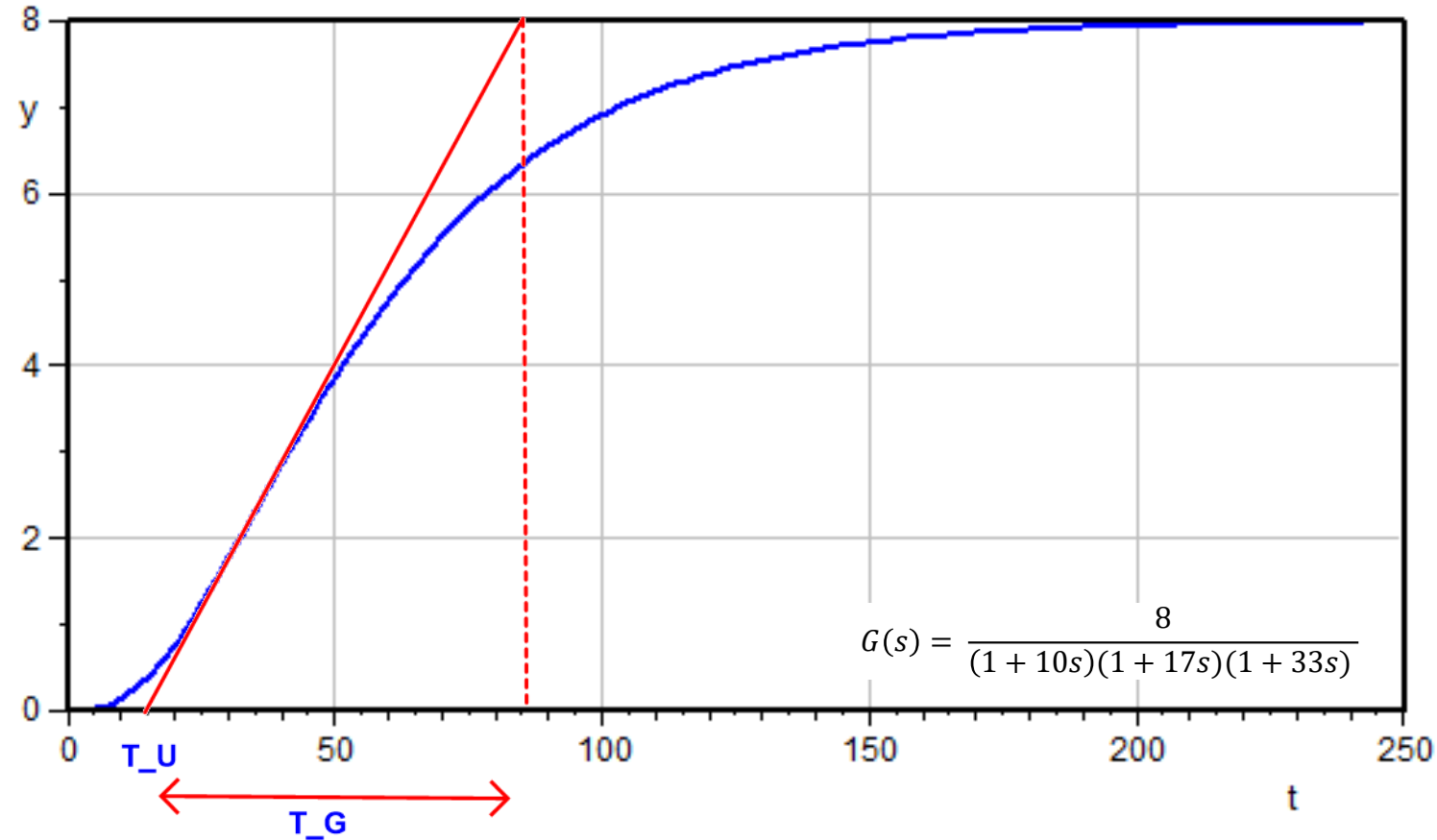
⇒ T_U „Verzugszeit“ 15

⇒ T_G „Zeitkonstante“ $89 - 15 = 74$

⇒ Verwende Ersatzmodell mit der selben Wendetangente

⇒ Einfachstes Modell: PT_1T_t -Näherung

verwende Wendetangente als Starttangente des PT_1 -Anteils



Trage Tangente ein

Lese zwei ZEITWERTE ab:

⇒ T_U „Verzugszeit“ 15

⇒ T_G „Zeitkonstante“ $89 - 15 = 74$

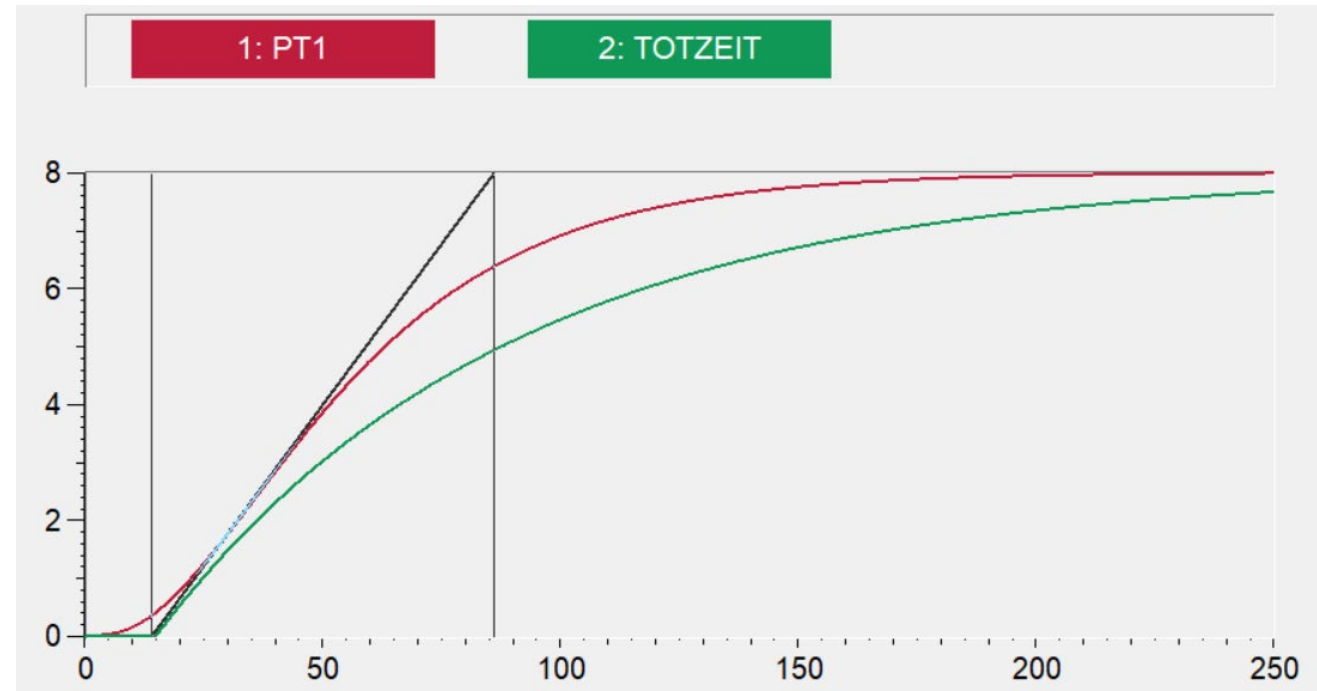
⇒ PT_1T_t -Näherung: $G(s) \approx (8 / (1+s74)) * e^{-s15}$

Vorteile:

extrem einfach in Anwendung
geht in allen Fällen aperiodischer PT_n - Strecken

Nachteil:

grobe Näherung (zu langsam)



Beispiel : $T_U = 0,15 \text{ msec}$; $T_G = 2,5 \text{ msec}$.

=> Auswertung anhand Grafik 4-13:

1. $T_U/T_G = 0,06$ --> eintragen
2. ablesen: 0,14
3. ablesen: 1,4

--> $T_1 = T_G / 1,4 = 1,8 \text{ msec}$.

--> $T_2 = T_1 * 0,14 = 0,25 \text{ msec}$.

--> $G(s) = V / ((1+s0,0018)(1+s0,00025))$

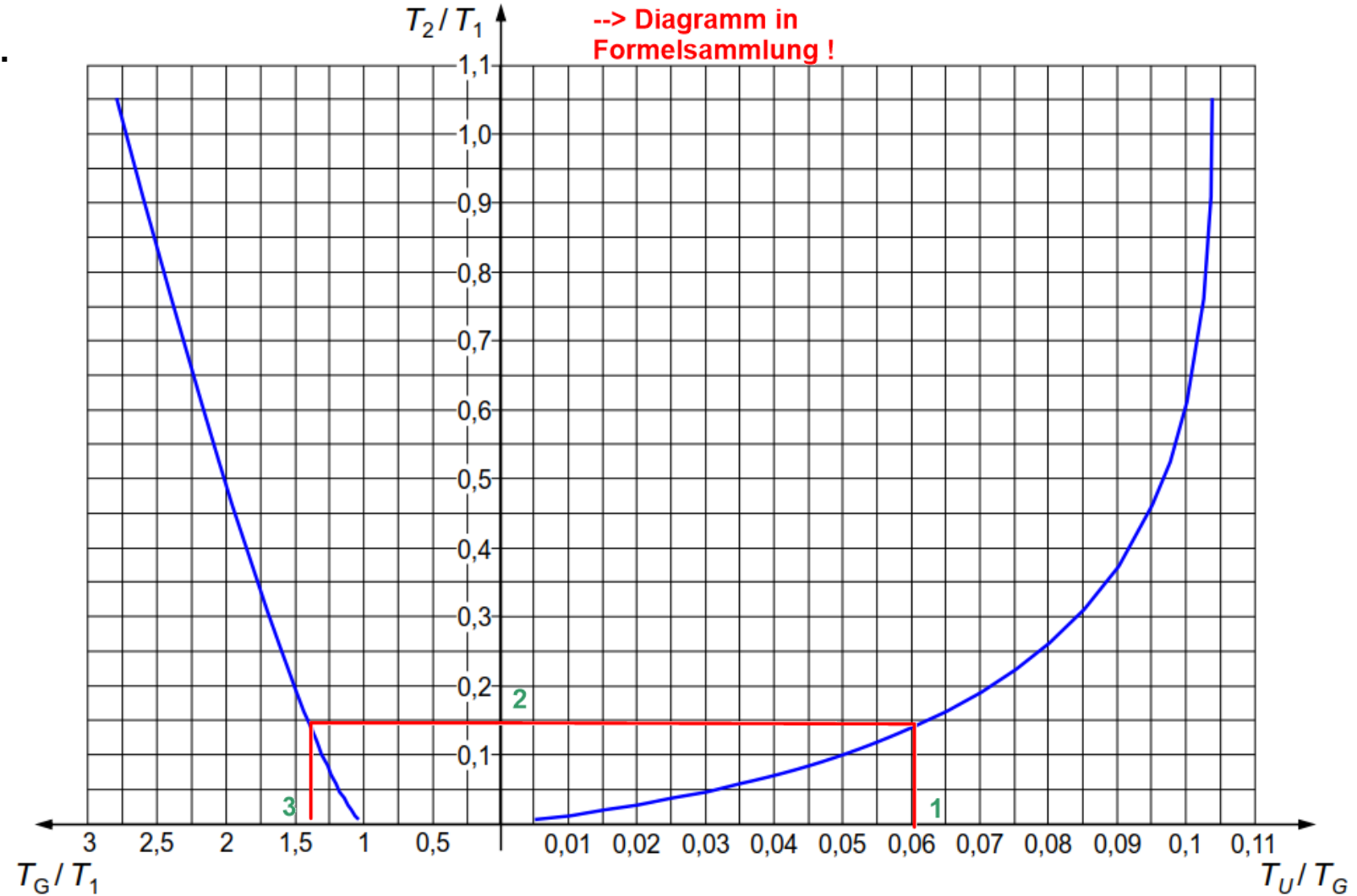


Bild 4-13: Zusammenhang verschiedener Kenngrößen beim PT₂-Glied

Beispiel $T_U = 3117 \text{ sec}$, $T_G = 14155 \text{ sec}$

=> Auswertung anhand Grafik 4-13:

1. $T_U/T_G = 0,22$

--> nicht approximierbar

--> es gibt kein PT2 mit $T_U/T_G > 0,104$!

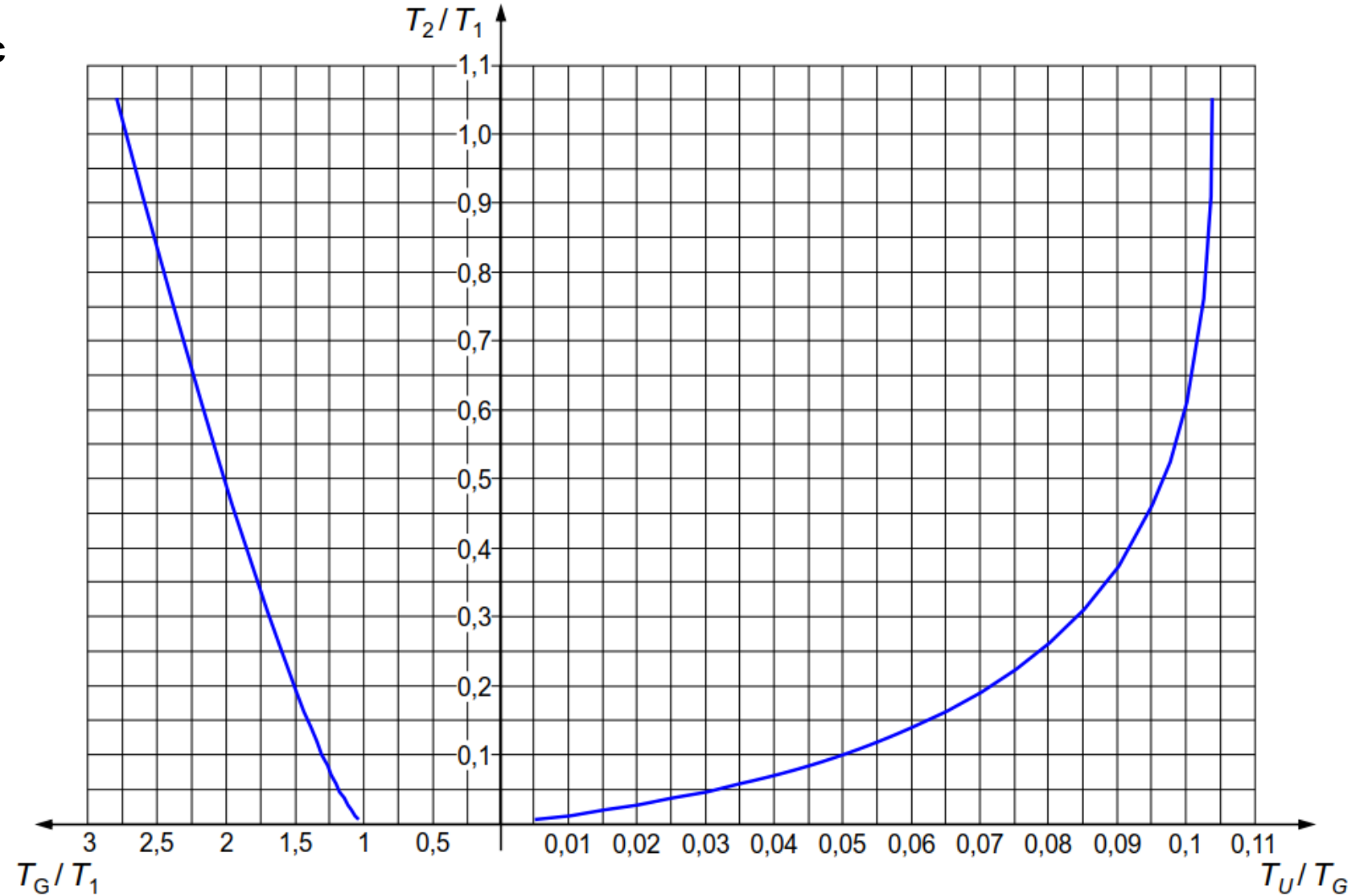


Bild 4-13: Zusammenhang verschiedener Kenngrößen beim PT₂-Glied

Beispiel $T_U = 3117$ sec, $T_G = 14155$ sec

=> Auswertung anhand Grafik 4-14 :

1. $T_U/T_G = 0,22$
2. $n = 3$
3. $T_G/T = 3,7$

--> $T = T_G/3,7 = 3825$

--> $G(s) = V / (1+s3825)^3$

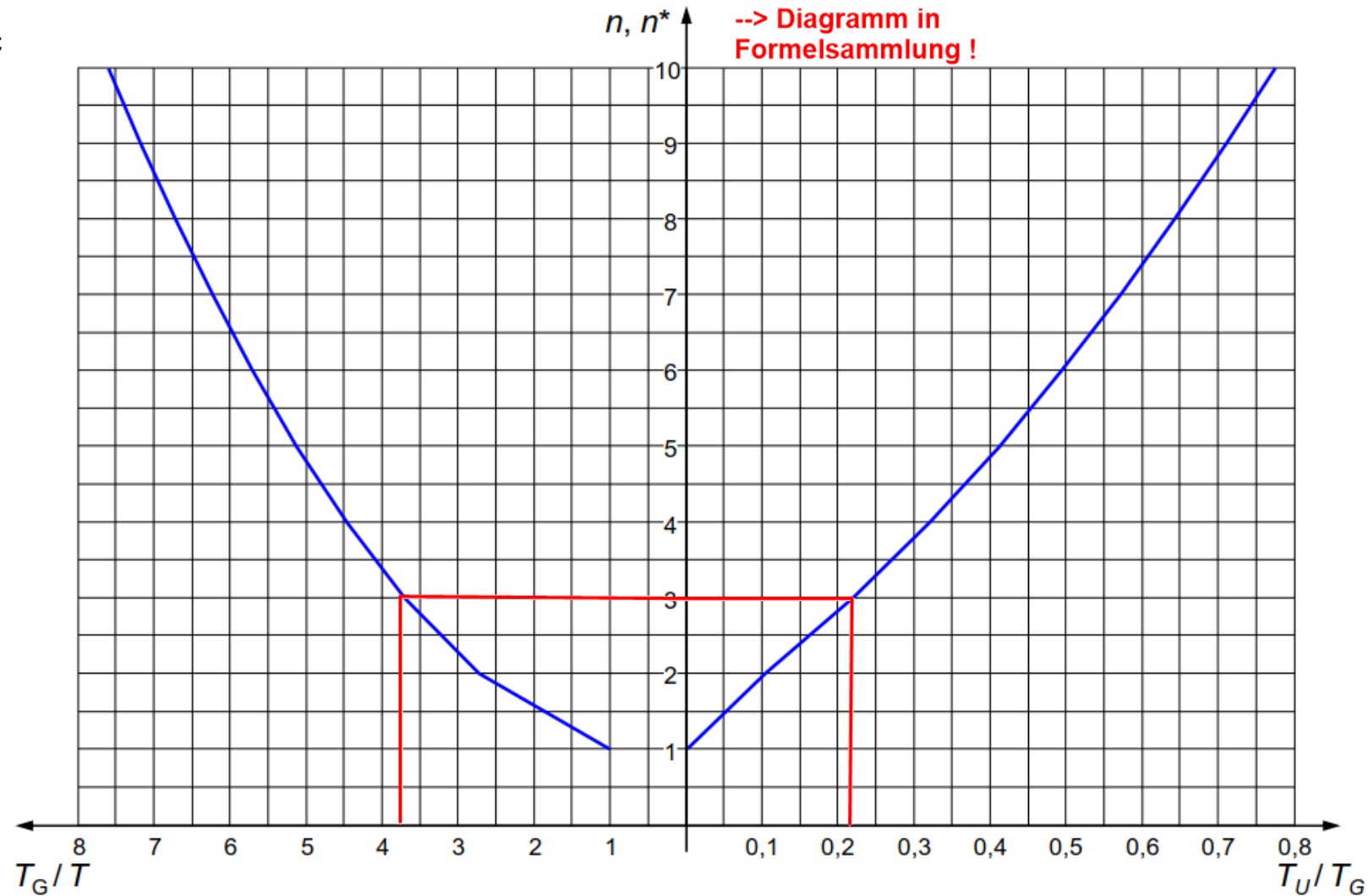


Bild 4-14: Zusammenhang verschiedener Kenngrößen beim PT_n -Glieder

Beispiel von vorhin:

$$T_U = 15, T_G = 74$$

=> Auswertung anhand Grafik 4-14 :

$$T_U/T_G = 0,2$$

$$\rightarrow n^* = 2,7$$

--> 1. Lösung aufrunden --> nicht so gut

$$\rightarrow G(s) = V / (1+s\tau)^3$$

--> 2. Lösung: Teil-Zeitkonstante u. n abrunden

--> siehe nächste Seite

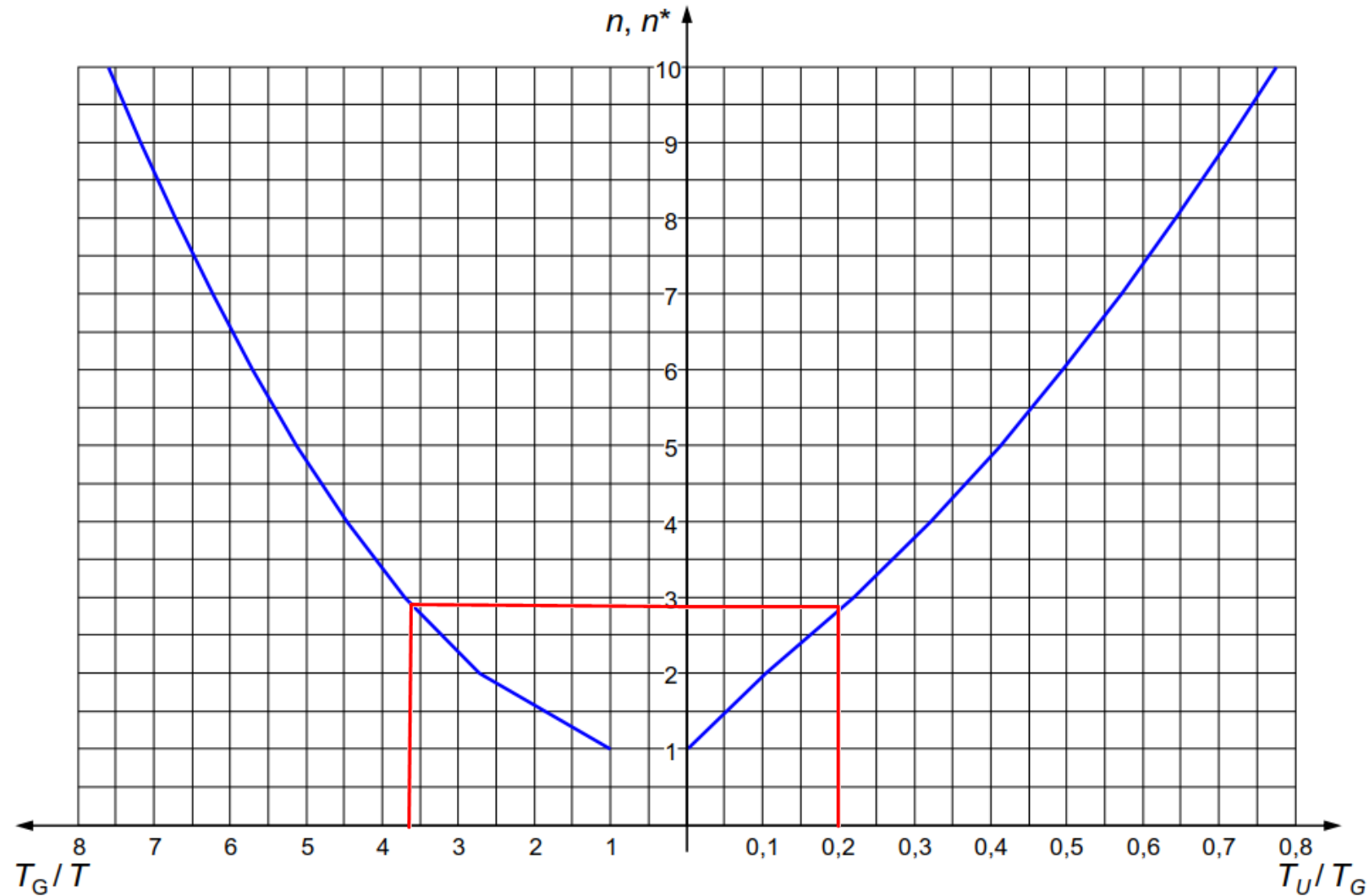


Bild 4-14: Zusammenhang verschiedener Kenngrößen beim PT_n -Glied

--> Fortsetzung

trage n^* ein (2,7)

--> Ablesewert: 0,58

--> aus Sprungantwort ablesen: Zeitwert T^* , bei dem 0,58 * Endwert erreicht wird

--> $v(T^*) = 4,6$ bei $T^* = 59$ (siehe Sprungantwort auf S.24)

--> Modellparameter:

$$T = T^*/n^* = 59/2,7 = 22$$

$$T_n = T^* - n^*T = 59 - 2 \cdot 22 = 15 \quad (\text{mit } n = \text{abgerundeter Ordnung})$$

$$\text{--> } G(s) = 8 / ((1+s22)^2 (1+s15))$$

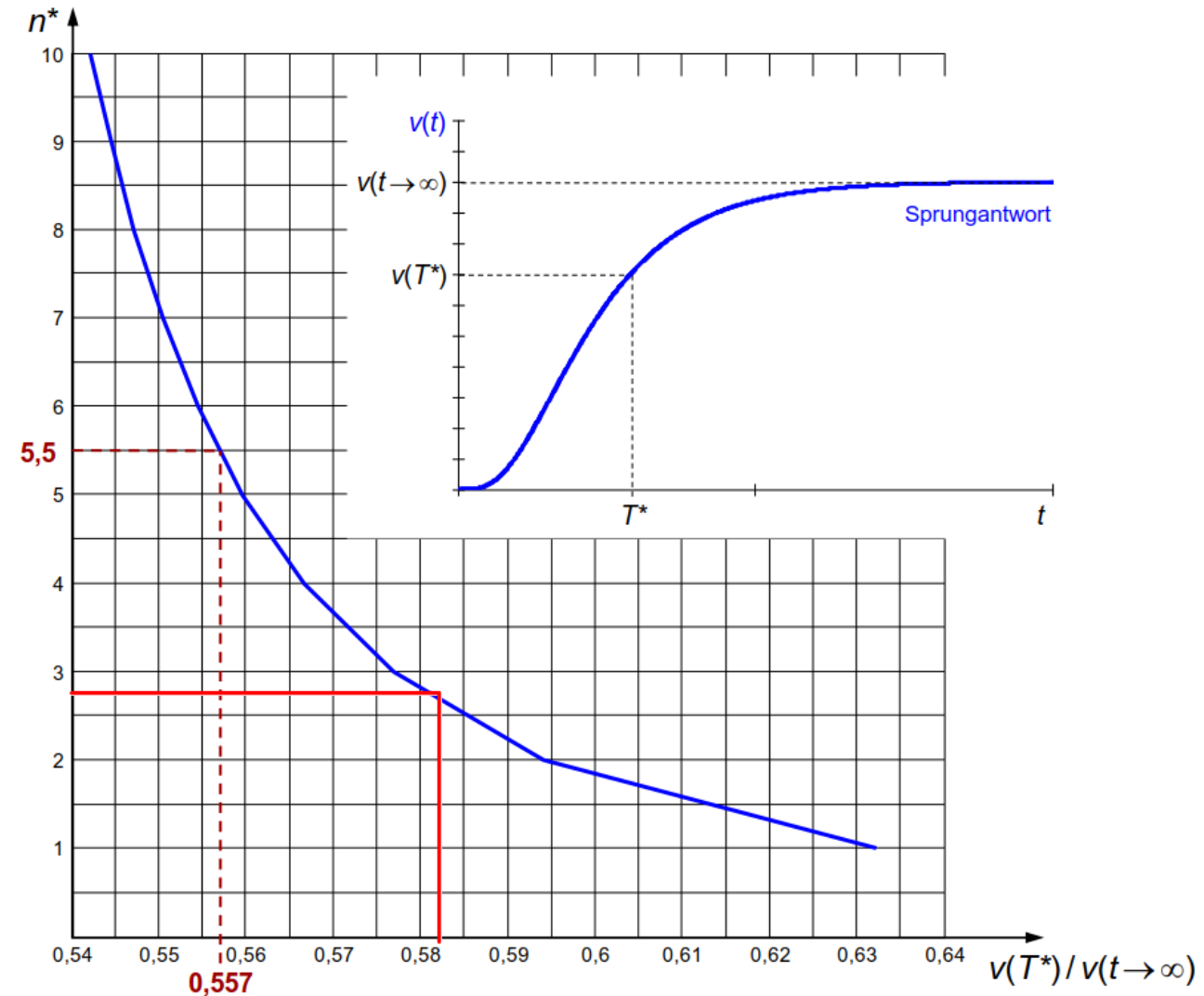


Bild 4-15: Verhältnisse bei PT_n -Strecken mit gleicher Zeitkonstante und „Teilzeitkonstante“

- ⇒ Trage Wendetangente ein
- ⇒ Lese Zeitwerte ab T_U und T_G
- ⇒ PT_1T_t -Modell ist immer möglich, aber in vielen Fällen ungenau
- ⇒ Genauere Näherung mit PT_2 -Modell für $T_U / T_G < 0,104$
- ⇒ Genauere Näherung mit PT_n -Modell mit gleichen Zeitkonstanten, ggf. plus Teil-Zeitkonstante für $T_U / T_G > 0,104$

Warum? Vermeide Fehler beim Finden der Wendetangente

Z. B. bei automatisierter Auswertung im Rechner

Idee:

⇒ zwei Stützpunkte vermessen

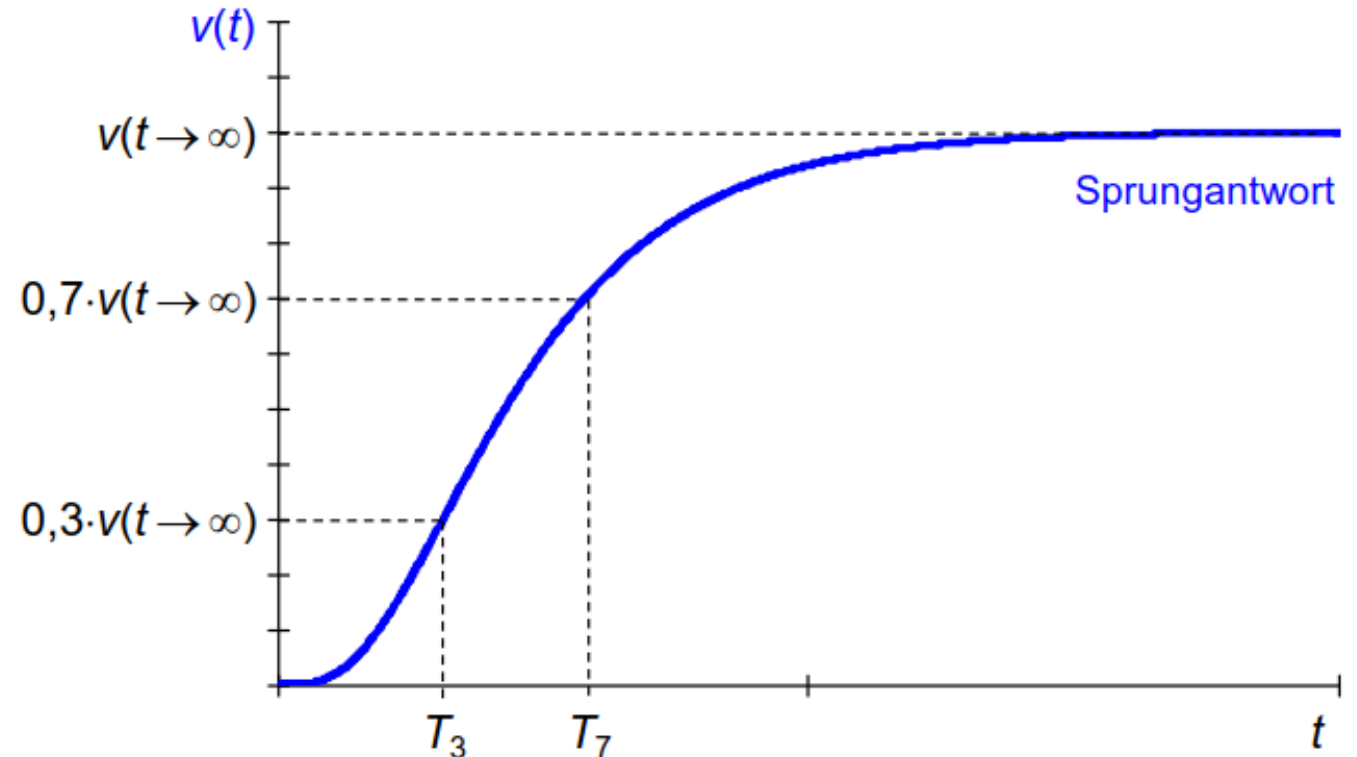
⇒ Modell mit zwei Parametern bedaten

$$G_s(s) \approx \frac{V_s}{1 + sT} \cdot e^{-sT_U}$$

$$T = \frac{T_7 - T_3}{0,84}$$

$$T_U = \frac{T_3 - 0,3 \cdot T_7}{0,7}$$

gerne als
Klausuraufgabe
verwendet



Nochmal das Beispiel von oben

Gegebene Sprungantwort:

Gesucht: Übertragungsfunktion

⇒ v_{∞} ablesen = 8

⇒ Referenzpunkte eintragen

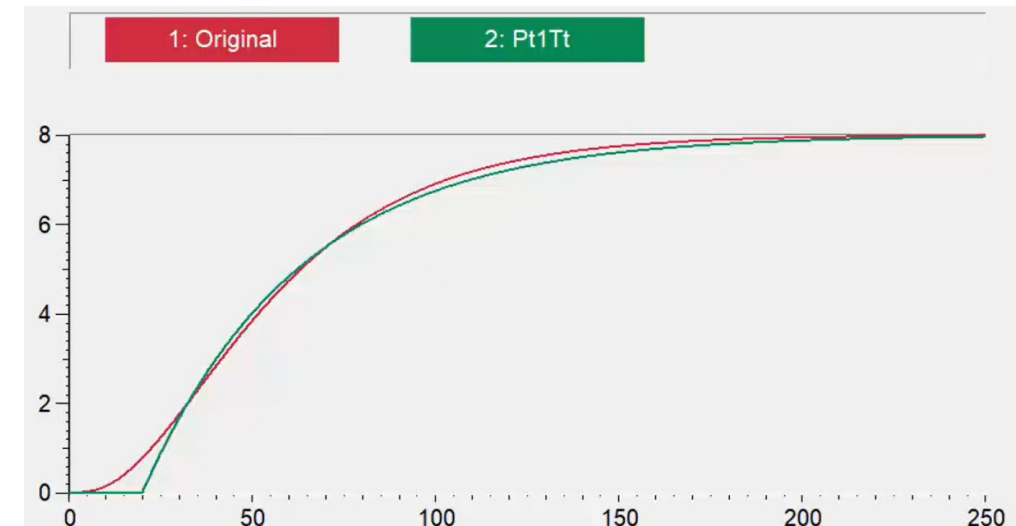
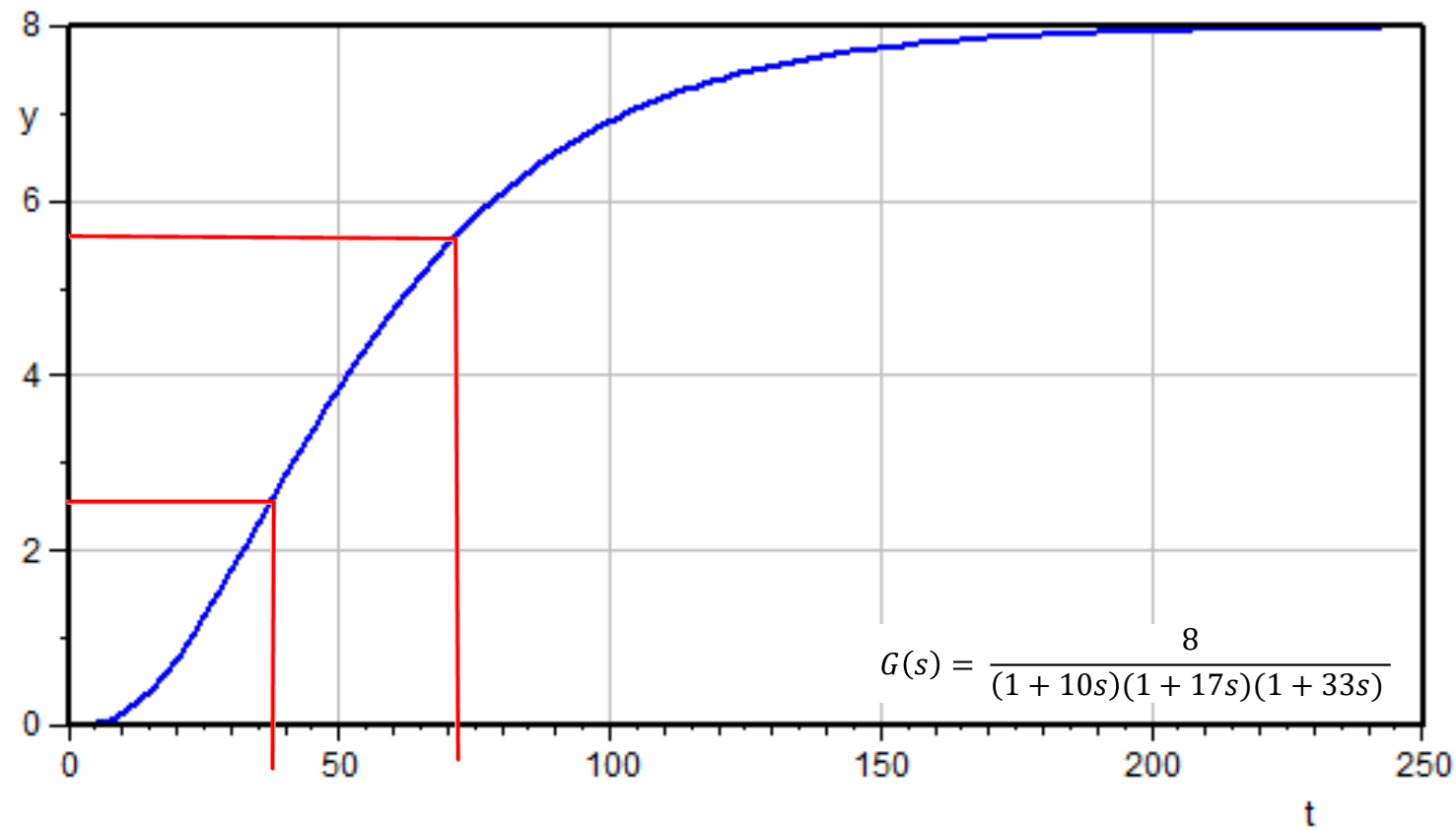
$$0,3 \cdot 8 = 2,4 \quad \rightarrow T_3 = 35$$

$$0,7 \cdot 8 = 5,6 \quad \rightarrow T_7 = 71$$

⇒ Einsetzen in Formeln

$$T = \frac{T_7 - T_3}{0,84} = 42,86 \quad T_U = \frac{T_3 - 0,3 \cdot T_7}{0,7} = 19,57$$

$$\Rightarrow G_s(s) \approx \frac{V_s}{1 + sT} \cdot e^{-sT_U}$$



Wie kommt man auf $T = \frac{T_7 - T_3}{0,84}$ und $T_U = \frac{T_3 - 0,3 \cdot T_7}{0,7}$???

1) Näherung durch PT₂-Strecke

$$G_s(s) \approx \frac{V_s}{(1+sT_1)(1+sT_2)}$$

T_1 und T_2 sind folgendermaßen zu berechnen.

$$T_1 = \frac{T_7}{2,4} + \frac{T_3 + T_7}{1,2} \cdot \sqrt{0,45 - \frac{T_3}{T_7}} \quad T_2 = \frac{T_7}{2,4} - \frac{T_3 + T_7}{1,2} \cdot \sqrt{0,45 - \frac{T_3}{T_7}}$$

Formelsammlung !

Ist der Radikand negativ, müssen die weiteren Möglichkeiten verwendet werden.

2) Näherung durch PT₁T_t-Strecke

$$G_s(s) \approx \frac{V_s}{1+sT} \cdot e^{-sT_U}$$

T und T_U sind folgendermaßen zu berechnen.

$$T = \frac{T_7 - T_3}{0,84} \quad T_U = \frac{T_3 - 0,3 \cdot T_7}{0,7}$$

3) Näherung durch PT₂T_t-Strecke mit gleichen Zeitkonstanten

$$G_s(s) \approx \frac{V_s}{(1+sT)^2} \cdot e^{-sT_U}$$

T und T_U sind folgendermaßen zu berechnen.

$$T = \frac{T_7 - T_3}{1,32} \quad T_U = \frac{T_3 - 0,45 \cdot T_7}{0,55}$$

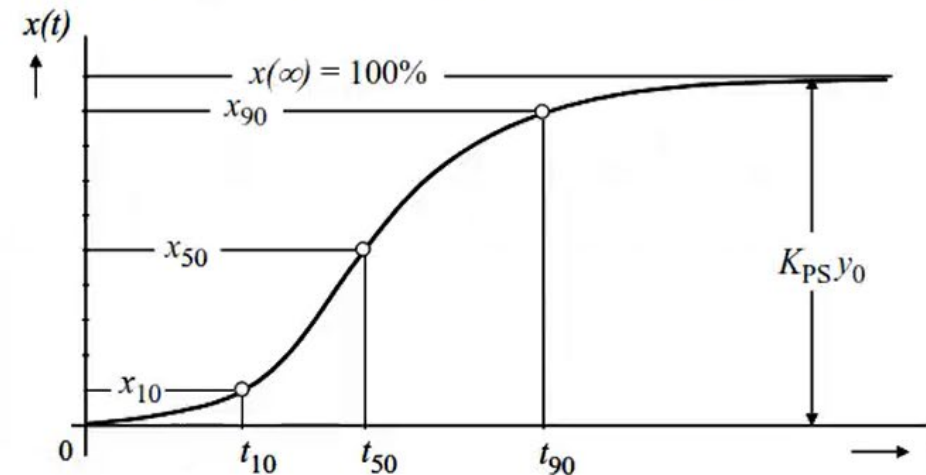
nur für Zähler > 0 gültig ($T_3/T_7 > 0,45$) --> sonst nicht kausal

2 Zeitprozentkennwert-Verfahren

Die Sprungantwort der Regelstrecke ist im Bild unten gegeben. Bestimmen wir daraus die Zeitpunkte t_{10} , t_{50} und t_{90} , bei denen die Regelgröße 10%, 50% und 90% ihres stationären Wertes $x(\infty)$ erreicht.

Die Regelstrecke wird als P-T_n-Glied mit n gleichen Zeitkonstanten approximiert.

Die Ordnungszahl n der Regelstrecke wird aufgrund der Kennzahl μ bestimmt: $\mu = \frac{t_{10}}{t_{90}}$



Danach wendet man sich an die Tabelle unten

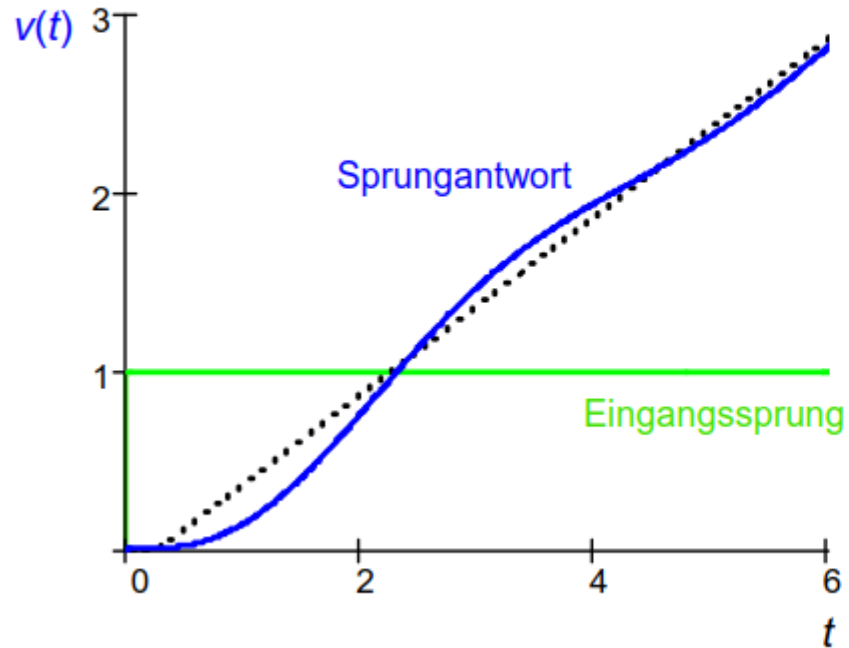
μ	n	α_{10}	α_{50}	α_{90}
0,137	2	1,880	0,596	0,257
0,174	2,5	1,245	0,460	0,216
0,207	3	0,907	0,374	0,188
0,261	4	0,573	0,272	0,150
0,304	5	0,411	0,214	0,125
0,340	6	0,317	0,176	0,108
0,370	7	0,257	0,150	0,095
0,396	8	0,215	0,130	0,085
0,418	9	0,184	0,115	0,077
0,438	10	0,161	0,103	0,070

Mit Hilfe der drei weiteren Kennzahlen α_{10} , α_{50} und α_{90} für bereits bestimmten μ oder n wird die Zeitkonstante T der Regelstrecke ermittelt:

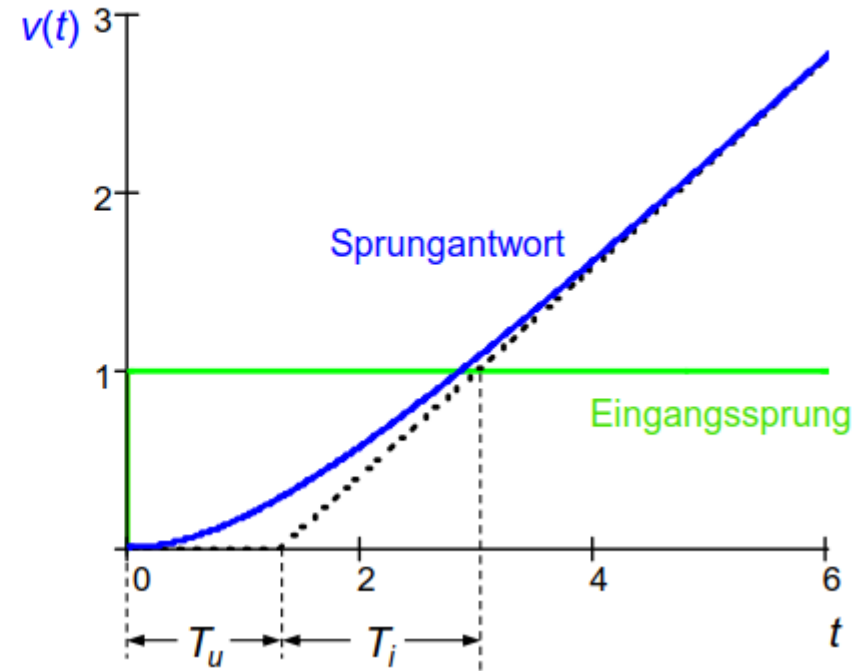
$$T = \frac{\alpha_{10}t_{10} + \alpha_{50}t_{50} + \alpha_{90}t_{90}}{3}$$

Die Übertragungsfunktion der Strecke ist: $G_S(s) = \frac{K_{PS}}{(1+sT)^n}$

Schwingfall



aperiodischer Fall



IT_t-Näherung: $G_S(s) \approx \frac{1}{sT_I} e^{-sT_U}$

IT₁-Näherung: $G_S(s) \approx \frac{1}{sT_I(1+sT_U)}$