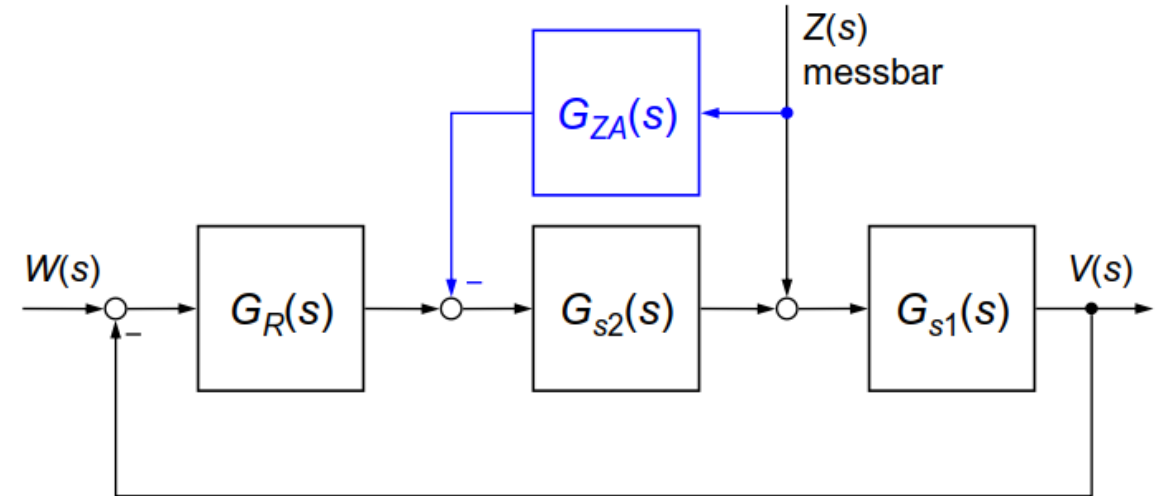
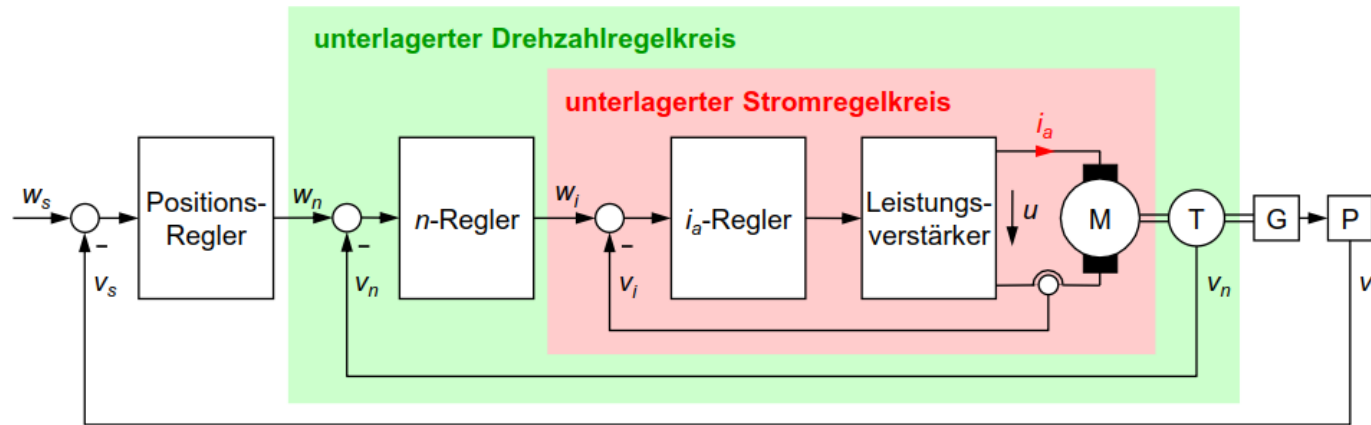


Regelungstechnik

für BEI4, BMEI4 und IBT

Prof. Dr. B. Wagner



$$\underline{\underline{V(s) = \frac{G_{R1}(s) \cdot G_{R2}(s) \cdot G_{S1}(s) \cdot G_{S2}(s)}{1 + G_{R2}(s) \cdot G_{S2}(s) + G_{R1}(s) \cdot G_{R2}(s) \cdot G_{S1}(s) \cdot G_{S2}(s)} \cdot W(s)}}$$

Kapitel 8: Erweiterungen des einfachen Regelkreises: Störgrößenaufschaltung, Vorfilter, Kaskadenregelung

Gutes Führungsverhalten

- ⇒ **Schnelle Übergänge ohne zu großen Überschwinger**
- ⇒ **Dämpfung des Regelkreises nicht zu klein,**
- ⇒ **Phasenreserve ca. 60° ... 90°**

Gutes Störverhalten

- ⇒ **Schnelles Ausregeln von Störungen bei kleiner Amplitude**
- ⇒ **größere Reglerverstärkung \Leftrightarrow kleinere Dämpfung**
- ⇒ **Phasenreserve ca. 30° ... 50°**

In Kapitel 5: welche Regler gibt es? (P, PI, PIDT1, ...)

In Kapitel 6: tiefere Einblicke in die Stabilität und Dynamik von Regelkreisen

In Kapitel 7: optimierte Reglereinstellung für gutes Führungs- oder Störverhalten

Nun in Kapitel 8: Wie kann man das Verhalten von Regelkreisen weiter verbessern?

- ⇒ **Störgrößenaufschaltung**
 - ⇒ **Führungsgrößenformung / Vorfilter**
 - ⇒ **Kaskadenregelung**
- } **Strukturelle Maßnahmen (auf Blockschaltbildebene)**

Die heizbare Heckscheibe ... aus regelungstechnischer Sicht



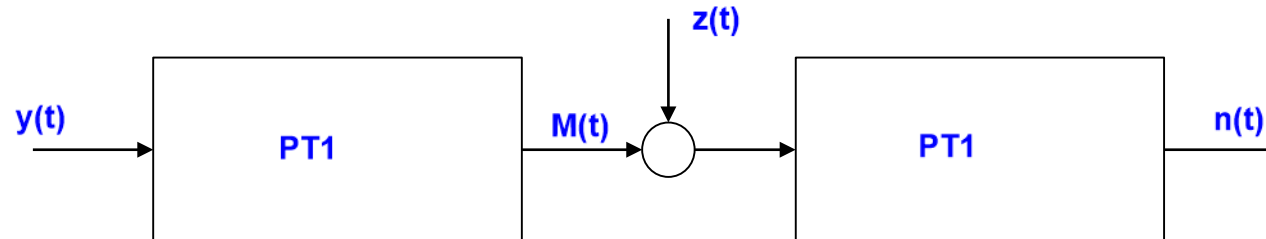
Die Leerlauf-Drehzahl-Strecke

Ausgangssignal: Motordrehzahl

Eingangssignal: $y(t)$ Benziner: Drosselklappenwinkel+Zündwinkel; Diesel: Einspritzmenge

Störgrößen: Lastmoment der Lichtmaschine, Kupplung, ...

Streckenmodell:



In Kleinwagen der 80-er-Jahre: Gesteuerte Leerlaufdrehzahl

Die heizbare Heckscheibe ... aus regelungstechnischer Sicht



Leerlaufdrehzahl-Regelung

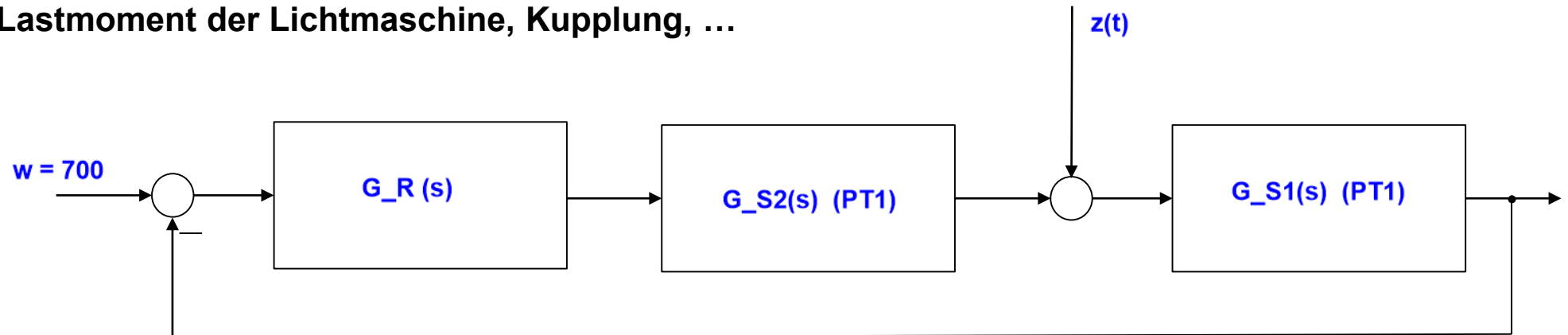
Regelgröße $v(t)$: Motordrehzahl soll konstant auf niedrigem Wert gehalten werden (\Rightarrow senkt Spritverbrauch im Stand)

Sollwert $w(t)$: Solldrehzahl, z. B. 700 U/min

Stellgröße $y(t)$: Benziner: Drosselklappenwinkel + Zündwinkel; Diesel: Einspritzmenge

Störgrößen $z(t)$: Lastmoment der Lichtmaschine, Kupplung, ...

Regelkreis:

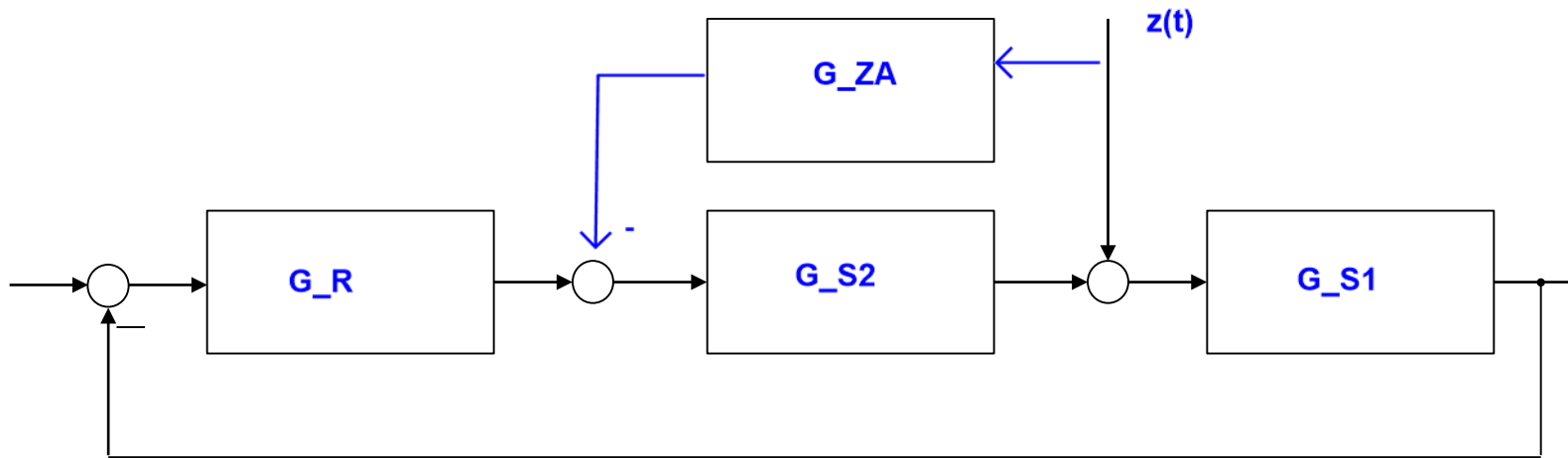


Regler: PI-Regler oder PIDT1-Regler

Störung wirkt sich am Ausgang aus (Leerlaufdrehzahl sinkt), der Regler reagiert verzögert

Dass es zum Drehzahleinbruch kommt, ist abzusehen und der Zeitpunkt ist auch bekannt

⇒ Idee der Störgrößenaufschaltung ⇔ Wenn Störung kommt, kann gleich das Stellsignal erhöht werden:



Dimensionierung der Aufschaltung? --> Wahl von G_{ZA} ?

$$G_z(s) = \frac{G_{S1}(s)(1 - G_{ZA}(s) \cdot G_{S2}(s))}{1 + G_R(s) \cdot G_{S2}(s) \cdot G_{S1}(s)}$$

--> für Störunterdrückung muss Zähler = 0 werden

(nahezu) ideale Störunterdrückung:

bzw. $G_{ZA}(s) = \frac{1}{G_{S2}(s)} \cdot \frac{1}{1+sT_x}$ (mit $T_x < T_{Strecke}$)

$G_{ZA}(s) = \frac{1}{G_{S2}(s)}$ --> meist nicht realisierbar

asymptotische Störunterdrückung

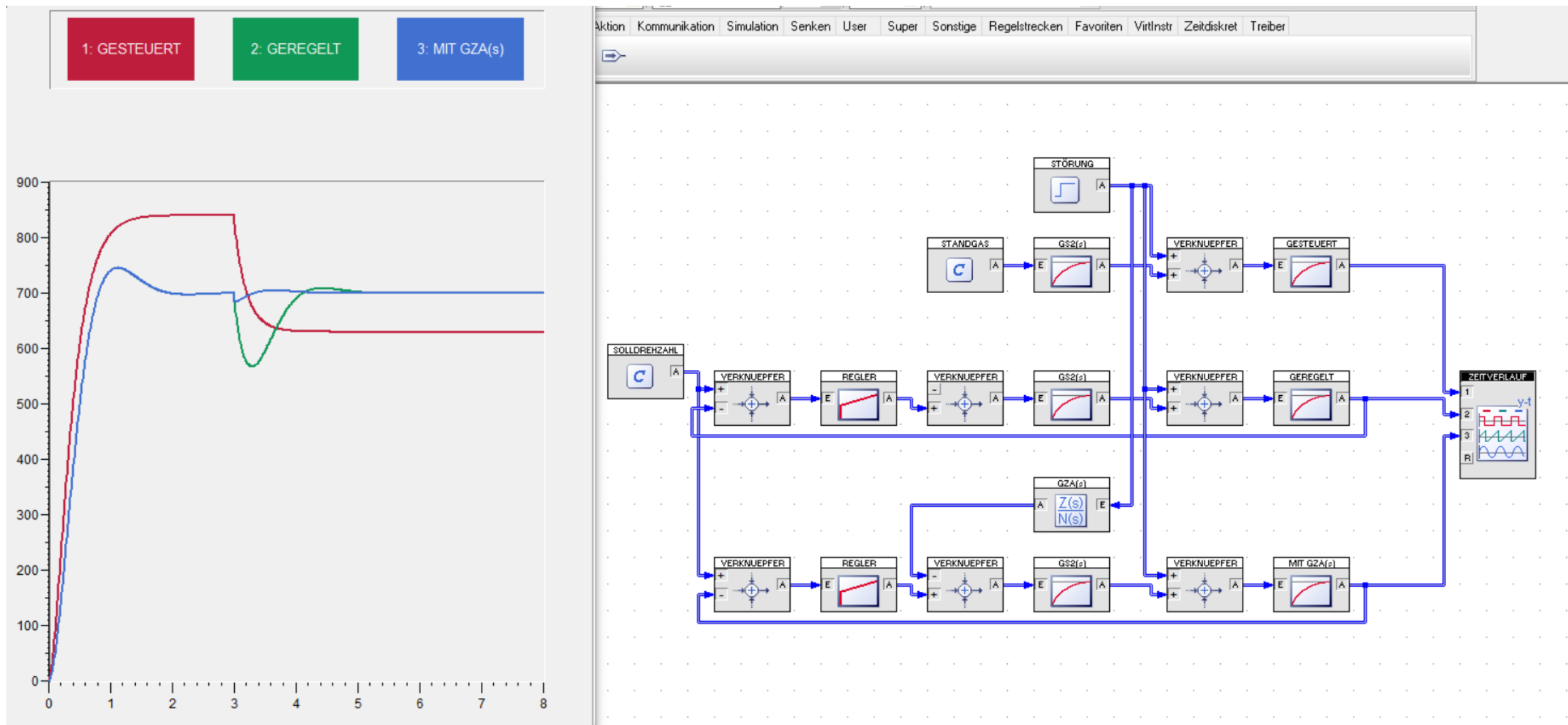
$G_{ZA}(s) = \frac{1}{G_{S2}(0)}$

Aufgabe:

1. Bauen Sie in BORIS ein Simulationsmodell der Regelstrecke auf mit $G_{s2}(s) = \frac{4}{1+0,2s}$, $G_{s1}(s) = \frac{70}{1+0,2s}$
2. Simulieren Sie den gesteuerten Betrieb mit Eingangssignal $y(t) = 3$ und einem Störsprung der Höhe -3 ab $t=3$. Bewerten Sie das Störverhalten der Regelung.
3. Nun soll die Leerlaufdrehzahl geregelt werden auf den Sollwert $w(t) = 700$ mit dem PI-Regler $G_R(s) = 0,002 \frac{(1+0,2s)}{0,2s}$ (noch ohne Störgrößenaufschaltung).

Ergänzen Sie das BORIS-Modell, simulieren und bewerten Sie die Leerlaufdrehzahlregelung.

4. Dimensionieren Sie eine Störgrößenaufschaltung $G_{ZA}(s)$. Ergänzen Sie das BORIS-Modell, simulieren und bewerten Sie die Leerlaufdrehzahlregelung.
- $$G_{ZA}(s) = \frac{1}{G_{s2}(s)} = \frac{1 + 0,2s}{4 \cdot (1 + 0,02s)}$$
- ↑
Realisierbarkeit



Zweck:

⇒ Verbesserung der Störunterdrückung

Voraussetzung:

⇒ **Störung kann gemessen werden** (direkt oder indirekt)

Maßnahme:

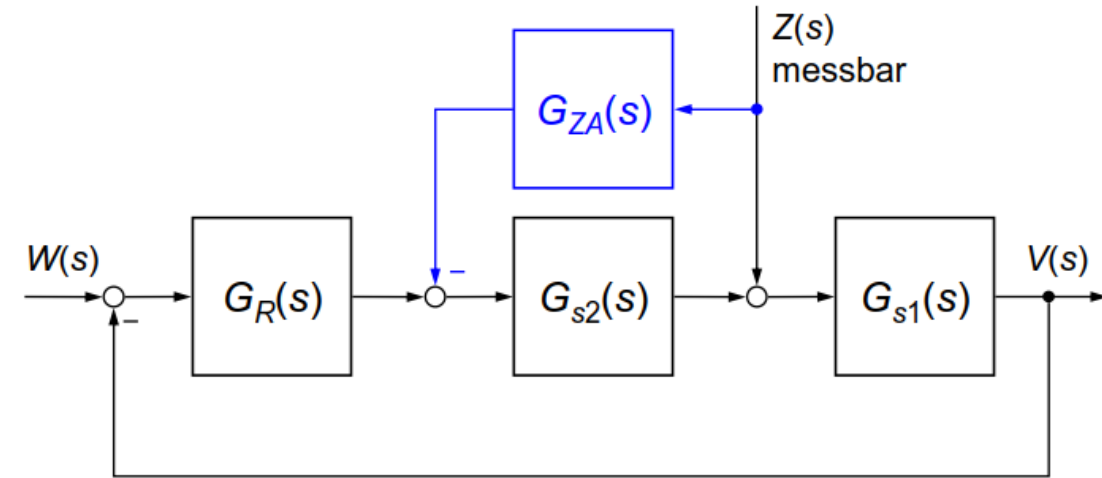
⇒ Aufschaltung der Störung über $G_{ZA}(s)$ aufs Stellsignal

Dimensionierung

⇒ Ideale Aufschaltung: $G_{ZA}(s) = 1 / G_{s2}(s)$

⇒ ggf. zusätzliche Pole für Realisierbarkeit ergänzen!

⇒ Variante: statische Störgrößenaufschaltung: $G_{ZA}(s) = 1 / G_{s2}(0)$ also ist $G_{ZA}(s)$ ein Proportionalglied



Ziel:

⇒ Verbesserung des Führungsverhaltens

Hintergrund: Will man gutes Führungs- UND Störverhalten ...

⇒ **Einstellung des Reglers auf das gewünschte Störverhalten**

⇒ Anpassung des Führungsverhaltens durch zusätzliche Blöcke außerhalb des Regelkreises

Maßnahme:

⇒ Zusätzliches Filter VOR dem Regelkreis [vgl. Übung 6.3 oder PT1-Vorfilter \(symmetrisches Optimum\)](#)

⇒ Verändert das Störverhalten nicht!

⇒ „Zwei-Freiheitsgrade-Struktur“ (1. Regler, 2. Vorfilter)

⇒ Mehrere Strukturen existieren

⇒ Vgl. Praktikumsversuch 3 (Rampengenerator) und Übungsaufgabe 6.3 (Vorfilter) und symmetrisches Optimum (PT1-Vorfilter mit Glättungszeitkonstante T_G)

1. Möglichkeit: Zwei-Freiheitsgrade-Struktur mit Vorfilter

Regler $G_R(s)$ wird auf gutes Störverhalten eingestellt.

Ergänzung eines Vorfilters $G_V(s)$ außerhalb der Regelkreis-Schleife

Als Führungsübertragungsfunktion berechnet man: $G_W(s) = G_V(s) \frac{G_R(s)G_S(s)}{1+G_R(s)G_S(s)}$

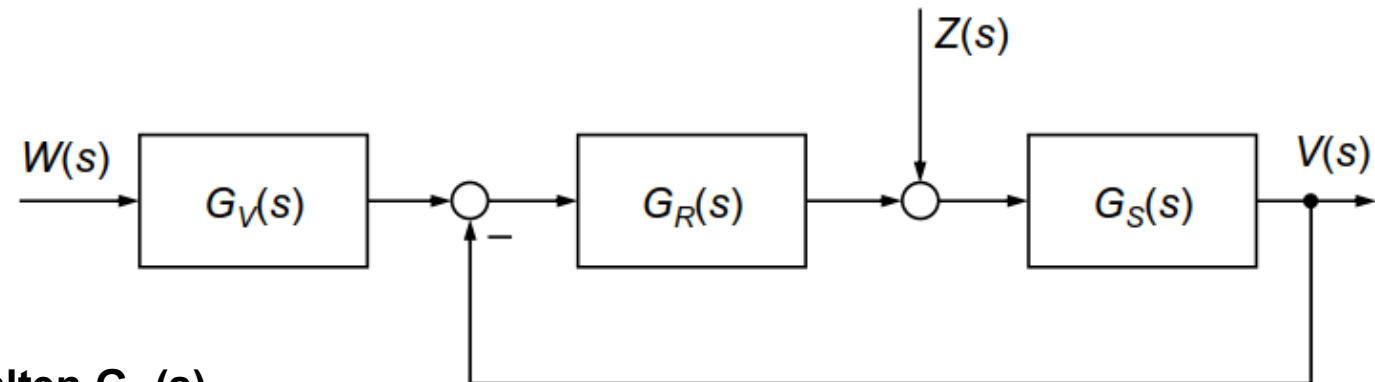
Dimensionierung durch Vorgabe eines gewünschten Führungsverhaltens $G_W(s)$

=> Berechne daraus $G_V(s)$ durch Umstellen:

$$G_V(s) = G_{W_{soll}}(s) \frac{1+G_R(s)G_S(s)}{G_R(s)G_S(s)}$$

$G_W(s)$ muss so vorgegeben werden, dass $G_V(s)$ realisierbar ist (ausreichende Anzahl von Polen!)

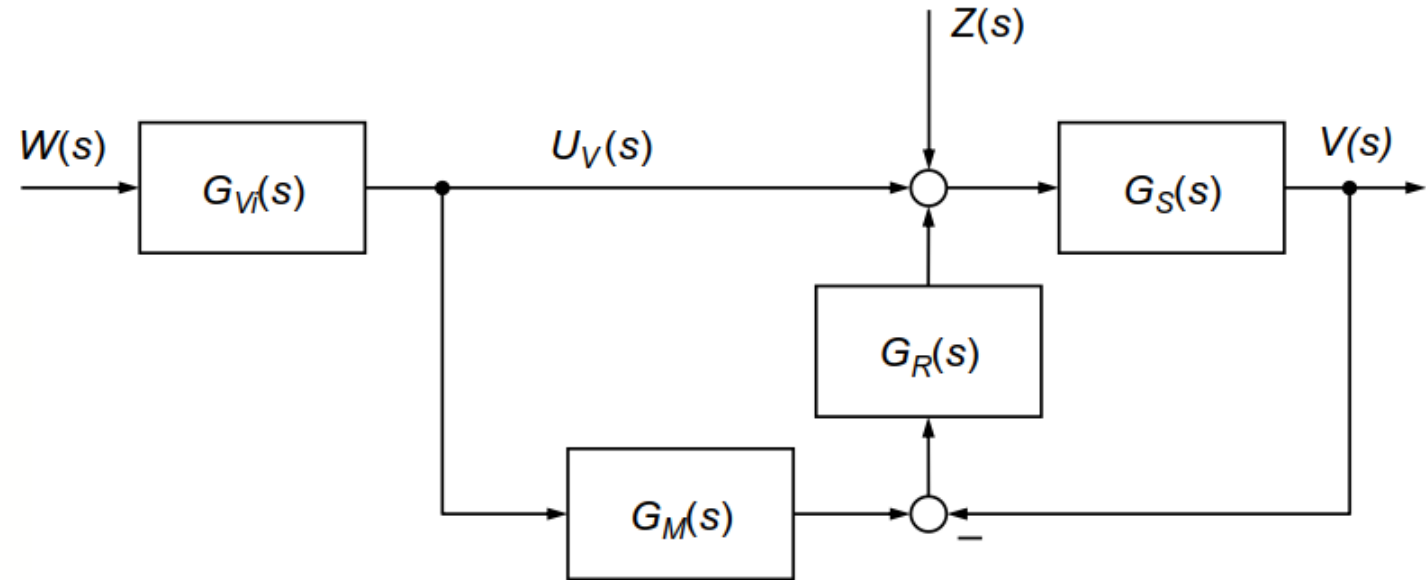
Somit sind Störverhalten $G_Z(s)$ und Führungsverhalten $G_W(s)$ unabhängig voneinander einstellbar!



Ein „kleiner“ Nachteil: Wenn Regler $G_R(s)$ geändert wird, muss man $G_V(s)$ anpassen => 2. Möglichkeit vermeidet dies!

$$G_W = \frac{G_{Vi} \cdot (1 + G_M \cdot G_R) \cdot G_S}{1 + G_S \cdot G_R}$$

$$G_Z = \frac{G_S}{1 + G_S \cdot G_R}$$



2. Möglichkeit: Zwei-Freiheits-Grade-Struktur mit Vorfilter und Streckenmodell (1)

Regler $G_R(s)$ wird auf gutes Störverhalten eingestellt \Leftrightarrow unabhängig vom Führungsverhalten!

Ergänzung eines Vorfilters $G_{Vi}(s)$ außerhalb der Regelkreis-Schleife und eines Streckenmodells

$$G_M(s) = G_S(s) \quad \text{--> in } G_W \text{ Kürzen möglich}$$

Als Führungsübertragungsfunktion berechneten wir auf der letzten Folie:

$$G_W(s) = G_{Vi}(s) \frac{(1+G_R(s)G_M(s))G_S(s)}{1+G_R(s)G_S(s)}$$

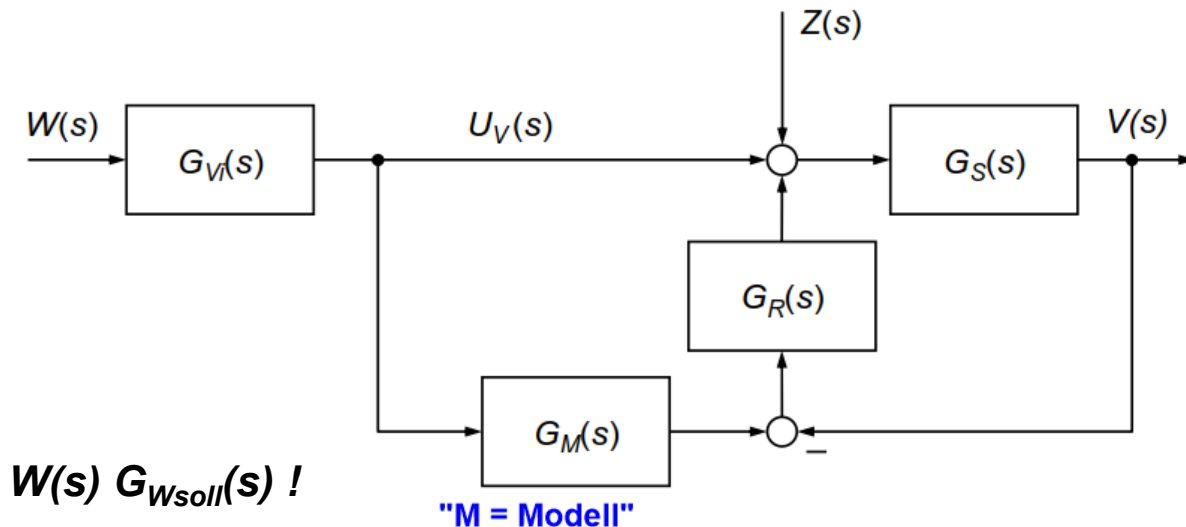
Dimensionierung des Vorfilters \Leftrightarrow unabhängig vom Regler!

$$G_{Vi}(s) = \frac{G_{W_{soll}}(s)}{G_S(s)}$$

Index „i“ steht für Inversion der Regelstrecke

$G_{W_{soll}}(s)$ so vorgegeben werden, dass $G_{Vi}(s)$ realisierbar ist

Regler $G_R(s)$ sieht nur die Abweichungen vom idealen Verlauf $W(s)$ $G_{W_{soll}}(s)$!



Ziel: Verbesserung des Führungsverhaltens ohne Kompromisse beim Störverhalten

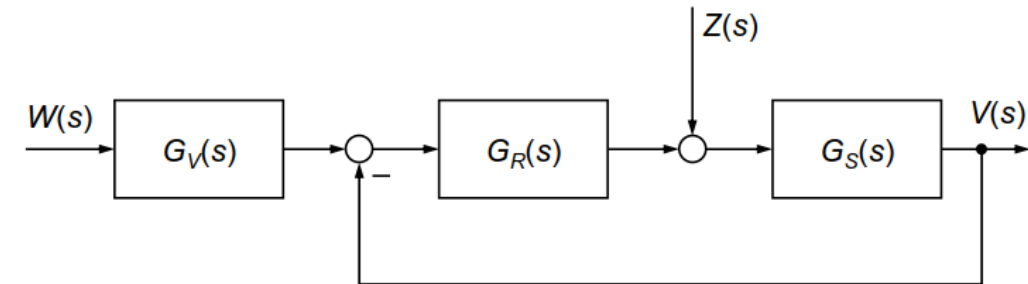
Methode:

⇒ **Einstellung des Reglers auf das gewünschte Störverhalten**

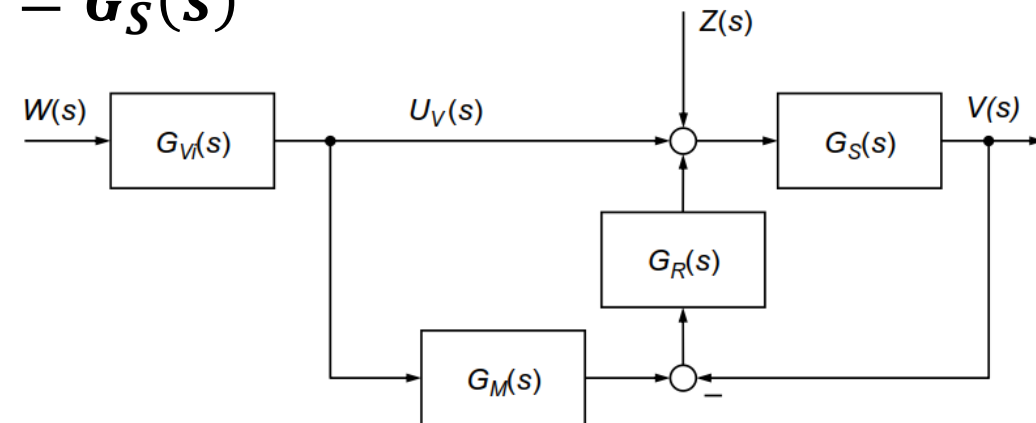
⇒ **Anpassung des Führungsverhaltens durch zusätzliche Blöcke außerhalb des Regelkreises**

⇒ **Zwei Möglichkeiten für „Zwei-Freiheitsgrade-Strukturen“:**

1. Vorfilter $G_V(s) = G_{W_{soll}}(s) \frac{1+G_R(s)G_S(s)}{G_R(s)G_S(s)}$



2. Vorfilter $G_{Vi}(s) = \frac{G_{W_{soll}}(s)}{G_S(s)}$ und Streckenmodell $G_M(s) = G_S(s)$



⇒ **Unabhängigkeit von Führungs- und Störverhalten ist erreichbar**

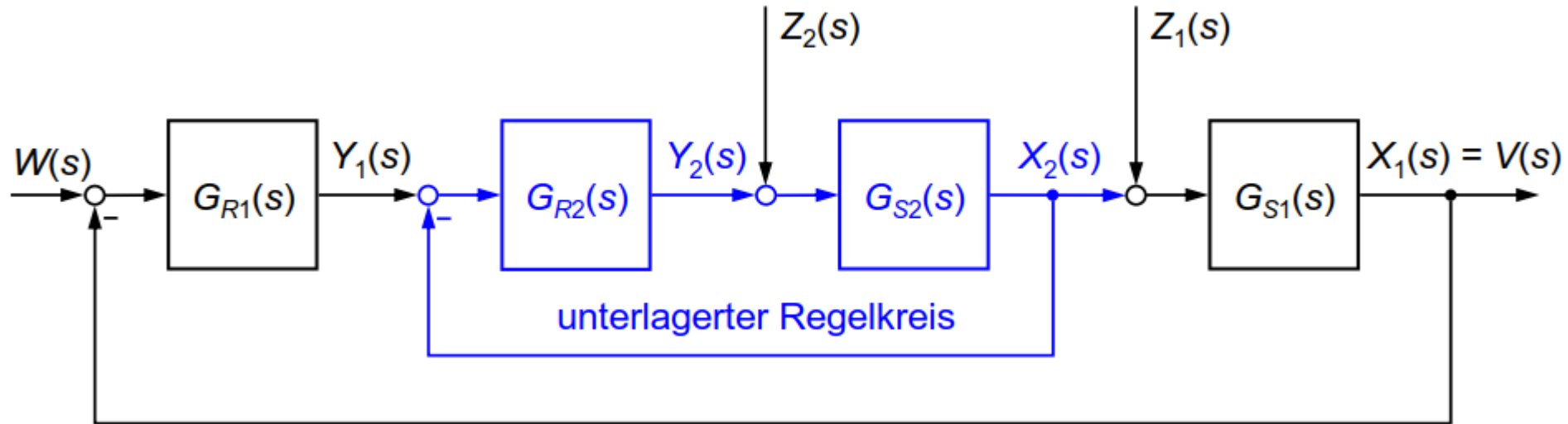
Regelstrecke besteht aus mehreren Blöcken $G_{S2}(s)$, $G_{S1}(s) \Leftrightarrow$ Verzögerung höherer Ordnung

Regelung mit Regler höherer Ordnung ist denkbar, aber ggf. zu empfindlich gegenüber Parameterschwankungen

Idee: unterlagerte Regelung einer zusätzlichen Messgröße $X_2(s)$ im Inneren der Regelstrecke

Voraussetzung: Zusätzliche Messgröße $X_2(s)$ muss vorliegen

=> Siehe auch Praktikumsversuch 5



Zunächst Dimensionierung des unterlagerten Regelkreises...

... für die Regelstrecke: $G_{S2}(s)$ $\rightarrow G_{W2}(s) = \frac{X_2(s)}{Y_1(s)} = \frac{G_{R2} \cdot G_{S2}}{1 + G_{R2} \cdot G_{S2}}$ --> als kleine Zeitkonstante für Entwurf von GR1 angenähert

Danach Dimensionierung des äußeren Regelkreises ...

... für die Regelstrecke: $G_{S1}(s) \cdot G_{W2}(s)$
 große kleine Zeitkonstante

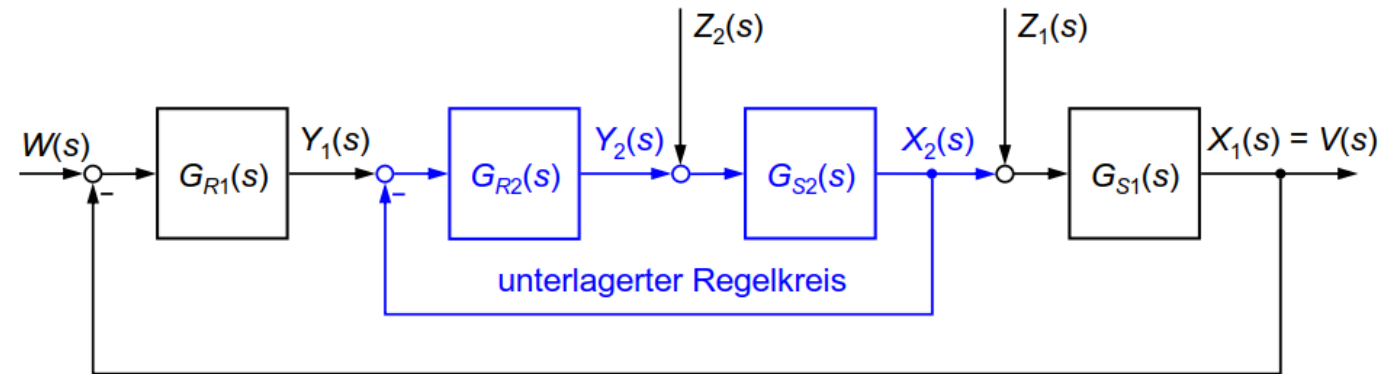
⇒ Das Ausgangssignal des äußeren Reglers $G_{R1}(s)$ ist der Sollwert des inneren Regelkreises

⇒ Dadurch können Grenzwerte für $X_2(s)$ einfach eingehalten werden

⇒ Einstellung der Regler „von innen nach außen“

⇒ Liefert sehr gute Resultate, wenn innerer Systemteil $G_{S2}(s)$ schneller ist als äußerer $G_{S1}(s)$

⇒ Störung $Z_2(s)$ auf $G_{S2}(s)$ wird in innerer Schleife unterdrückt und wirkt sich weniger auf $V(s)$ aus



--> innerer Kreis liefert
kleine Zeitkonstante

Nahezu alle elektrischen Antriebe werden in Kaskadenregelung betrieben. Beispiel 1: Drehzahl geregelter Antrieb:

Innere Schleife: $G_{W2}(s)$ ist die Stromregelstrecke (PT_1)

$Y_2(s)$ = Motorspannung

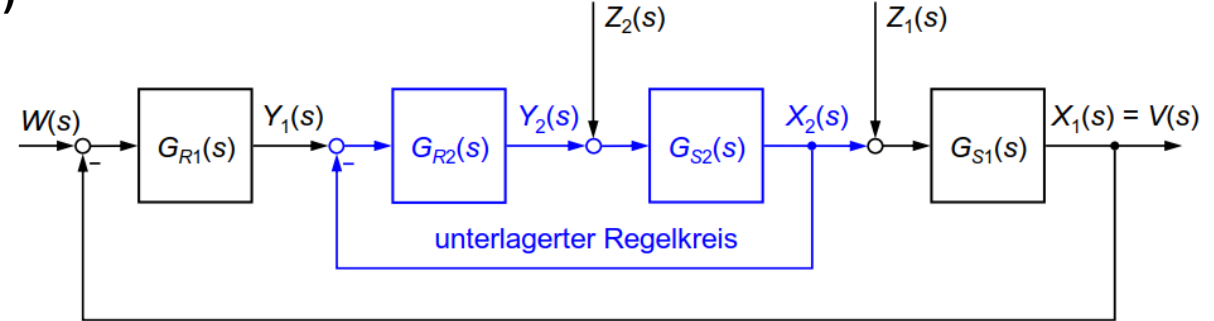
$X_2(s)$ = Motorstrom (innere Messgröße)

$Y_1(s)$ = Sollstrom

$Z_2(s)$ = z. B. Fehlerspannungen (Verluste)
im Umrichter

$X_1(s) = V(s)$ = Drehzahl

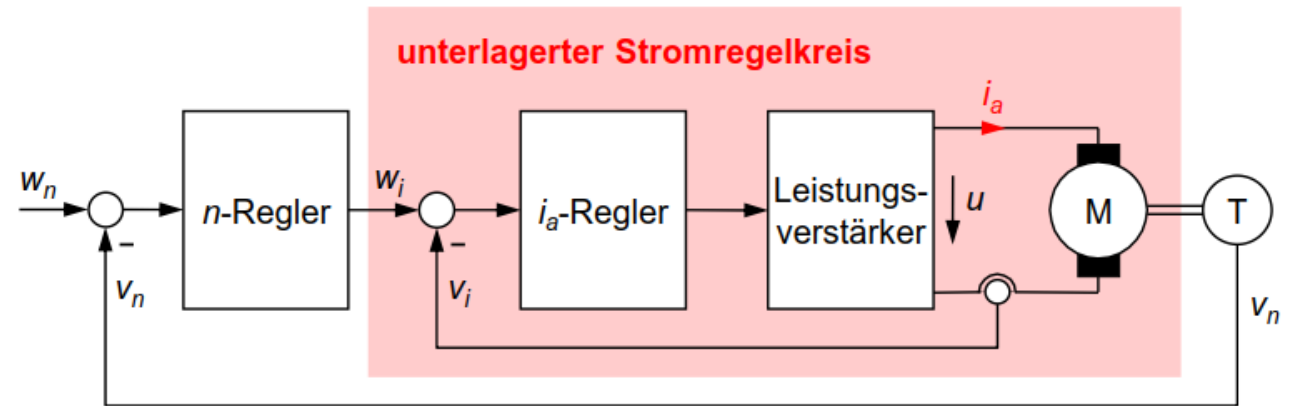
$W(s)$ = Solldrehzahl



Bei elektrischen Antrieben:

Stromregelstrecke $G_{S2}(s)$ schnell
($T \sim 1 \dots 10$ msec)

Drehzahlregelstrecke $G_{S1}(s)$ langsamer
($T \sim 0,1 \dots 1$ sec)



w_n : Führungsgröße für Drehzahl

w_i : Führungsgröße für Strom

i_a -Regler meist nach BO eingestellt
n-Regler meist nach SO eingestellt

Nahezu alle elektrischen Antriebe werden in Kaskadenregelung betrieben. Beispiel 2: Positionsgeregelter Antrieb:

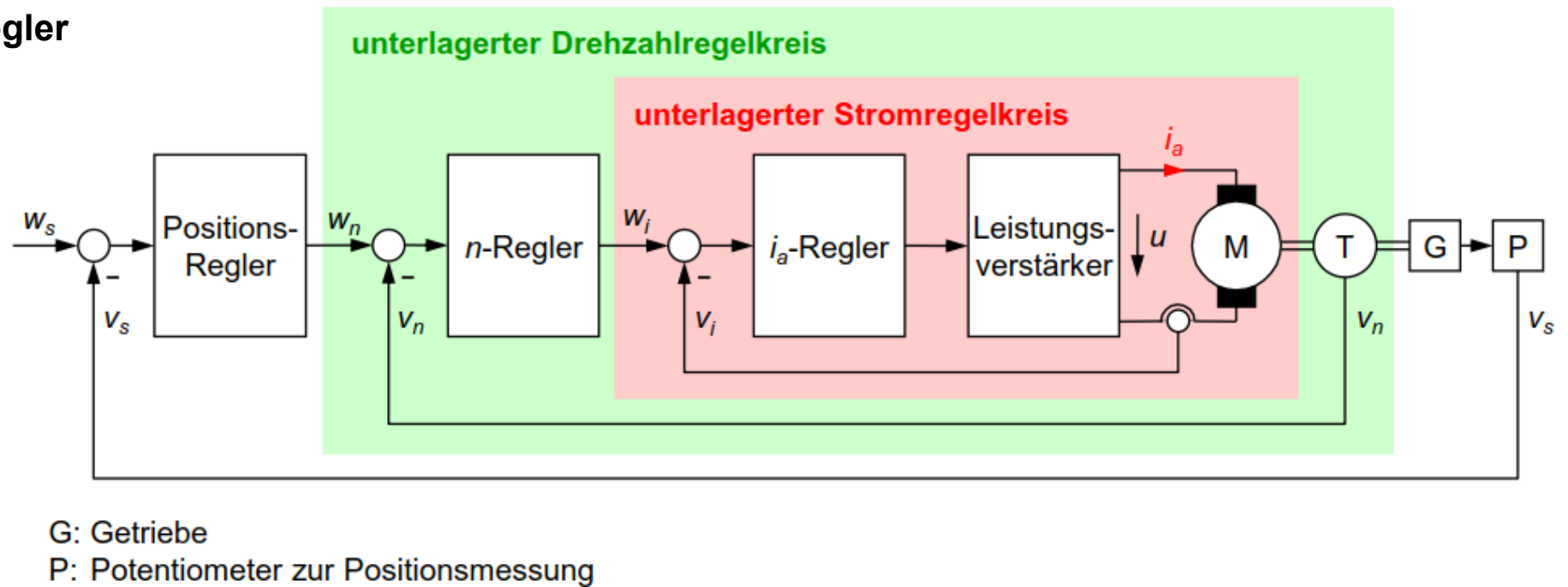
Zweifach-Kaskadierung:

Innere Schleife: $G_{W2}(s)$ ist die Stromregelstrecke (PT_1)

Mittlere Schleife: Drehzahlregelung

Äußere Schleife: Positionsregler

Großer Vorteil:
Grenzwerte der inneren
Messgrößen (Strom und
Drehzahl) werden einge-
halten!



Zusammenfassung Kaskadenregelung

Verschachtelung von Regelkreisen ineinander

Zusätzliche Messgrößen erforderlich

Funktioniert gut, **wenn innere Schleifen schneller als äußere Schleifen**

Erleichtert das Einstellen der Regler („von innen nach außen“)

Einhaltung von Grenzwerten der inneren Größen

