

Elektrische Netze

Regelleistung -
Frequenzregelung

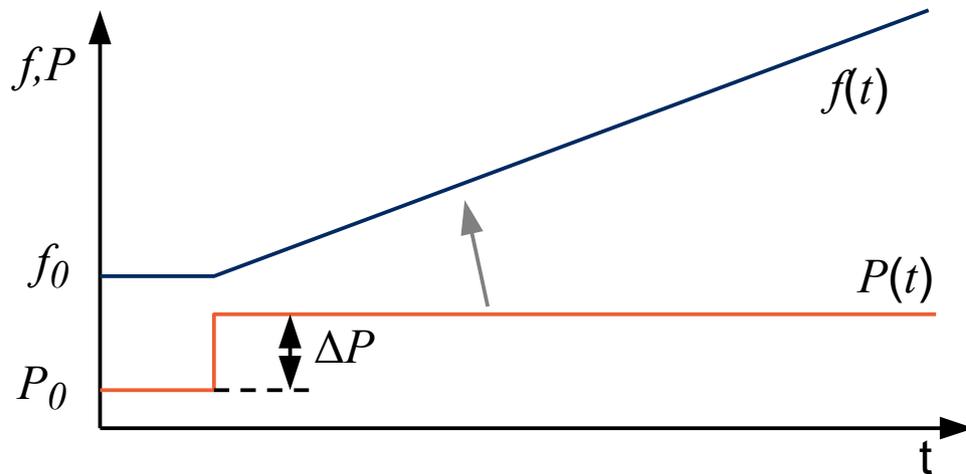
**Prof. Dr. Eberhard
Waffenschmidt
TH-Köln 2022**



Frequenzregelung

- Welche Netzfrequenzen stellen sich ein?
- Berechnung der Systemreaktionen von
 - Momentanreserve
 - Selbstregeleffekt
 - Primärregelung
 - Gesamtsystem

Momentanreserve: Reaktion Generator



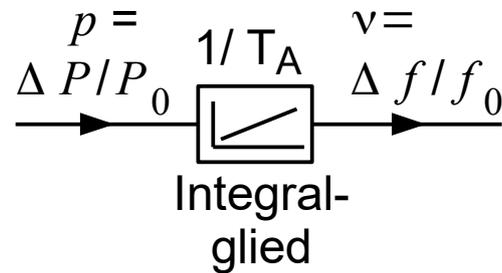
Definiere:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = v \quad \frac{\Delta P}{P_0} = p$$

$$v = \frac{1}{T_A} \cdot \int p \cdot dt$$

T_A = Anlauf-Zeitkonstante

Regelkreis-Darstellung:

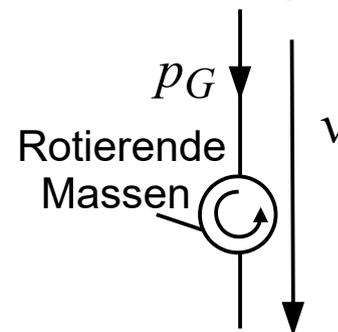


Reaktions-Frequenzbereich:

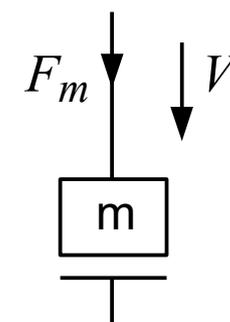
$$v = \frac{1}{j\omega \cdot T_A} \cdot p$$

Achtung! Nicht 50 Hz Netzfrequenz, sondern „Reaktions-“ Frequenz

Symbolische Darstellung

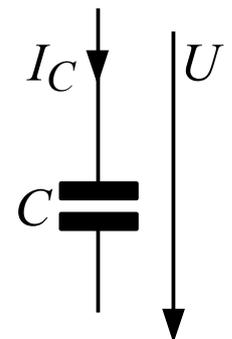


Mechanisches Analogon



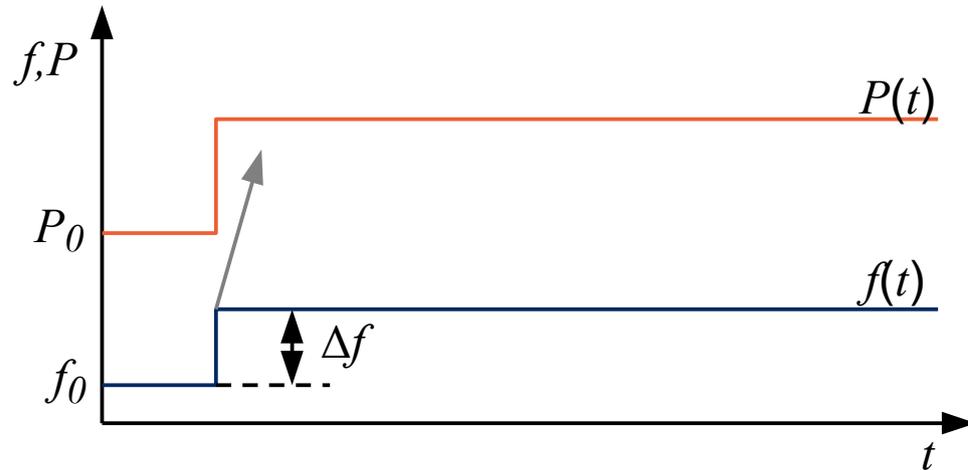
$$V = \frac{1}{m} \cdot \int F_m \cdot dt$$

Elektrisches Analogon



$$U = \frac{1}{C} \cdot \int I_C \cdot dt$$

Reaktion der Lasten

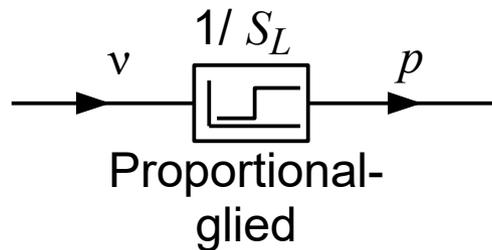


$$p = \frac{1}{S_L} \cdot v \quad S_L = \text{„Last-Statik“}$$

Auch definiert:
Selbststreckeffekt α_L :

$$p = \alpha_L \cdot f_0 \cdot v \quad S_L = \frac{1}{\alpha_L \cdot f_0}$$

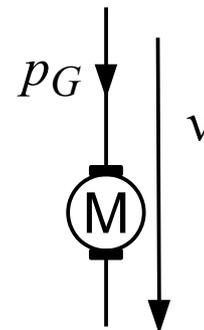
Regelkreis-Darstellung:



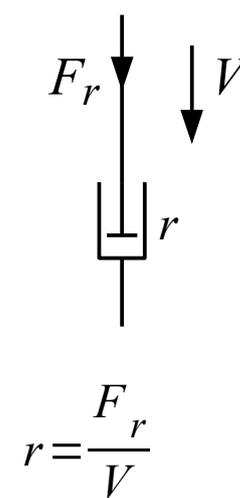
Reaktions-Frequenzbereich:

$$p = \frac{1}{S_L} \cdot v$$

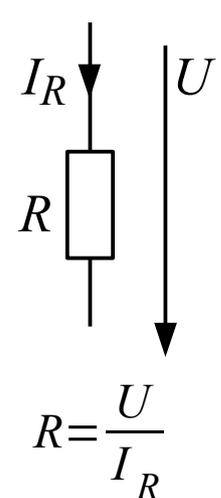
Symbolische Darstellung



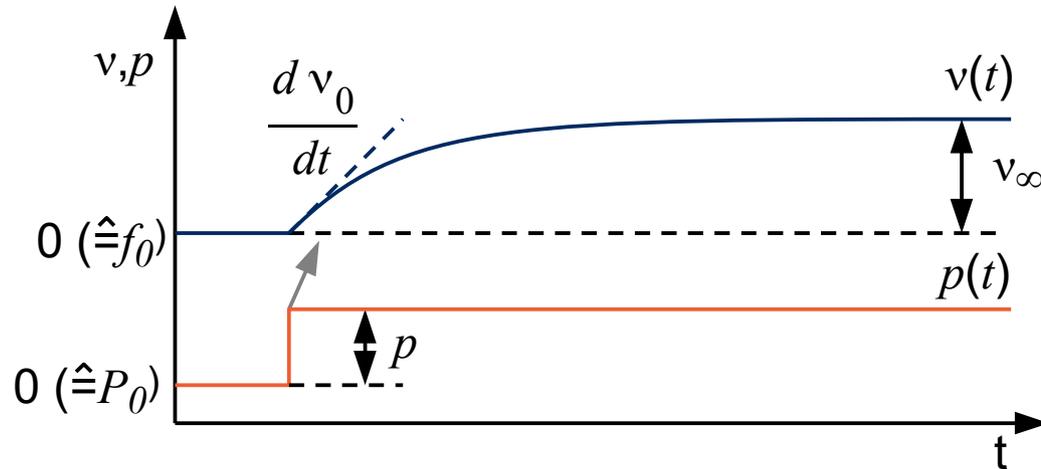
Mechanisches Analogon



Elektrisches Analogon



Kombination von Generator und Last



Sprungreaktion:

$$v = v_{\infty} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

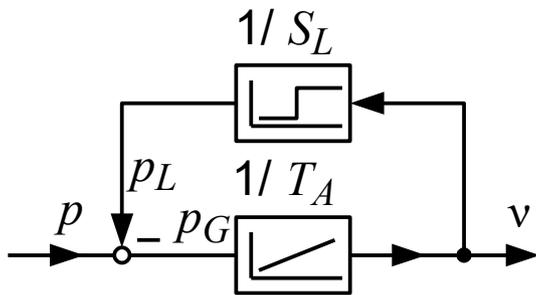
mit

$$v_{\infty} = S_L \cdot p$$

$$\tau = T_A \cdot S_L$$

$$\frac{dv_0}{dt} = \frac{p}{T_A}$$

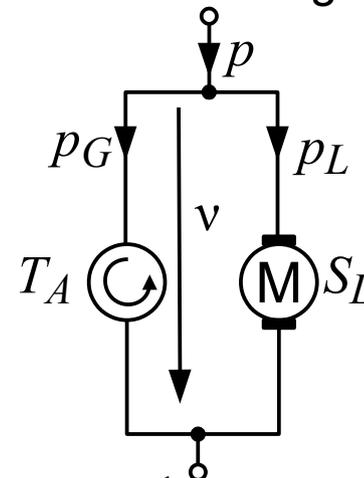
Regelkreis-Darstellung:



Reaktions-Frequenzbereich:

$$v = \frac{S_L}{1 + j\omega \cdot S_L \cdot T_A} \cdot p$$

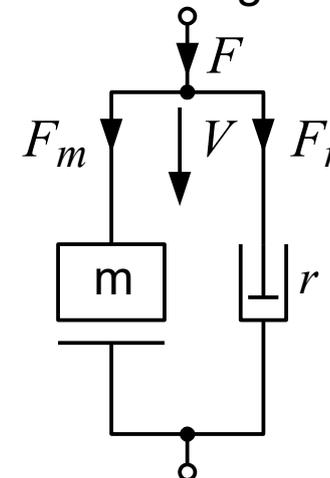
Symbolische Darstellung



$$v = \frac{1}{T_A} \cdot \int p_G dt$$

$$v = S_L \cdot p_l$$

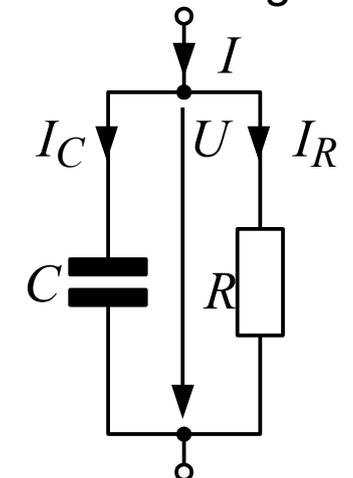
Mechanisches Analogon



$$m \hat{=} T_A$$

$$1/r \hat{=} S_L$$

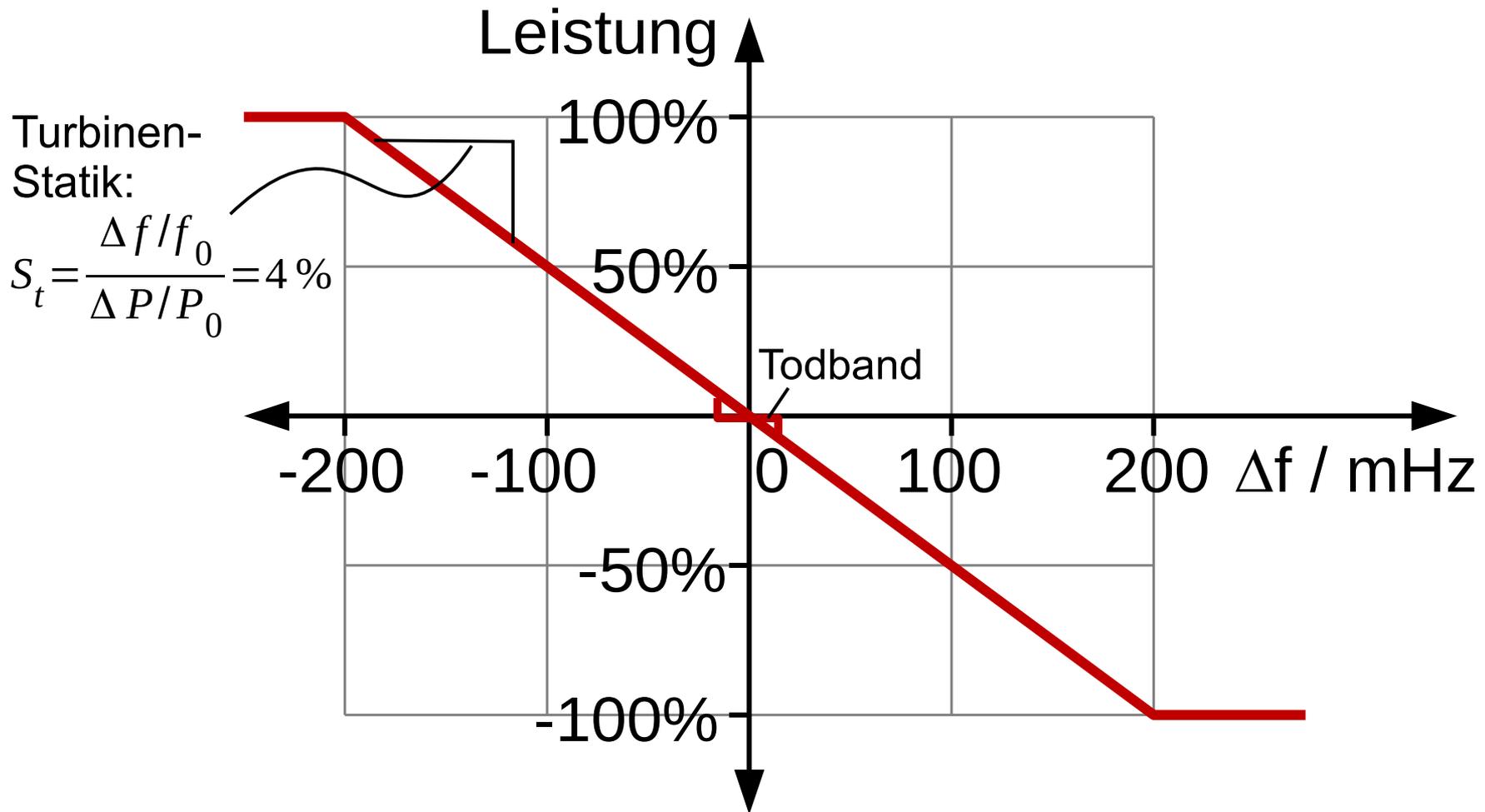
Elektrisches Analogon



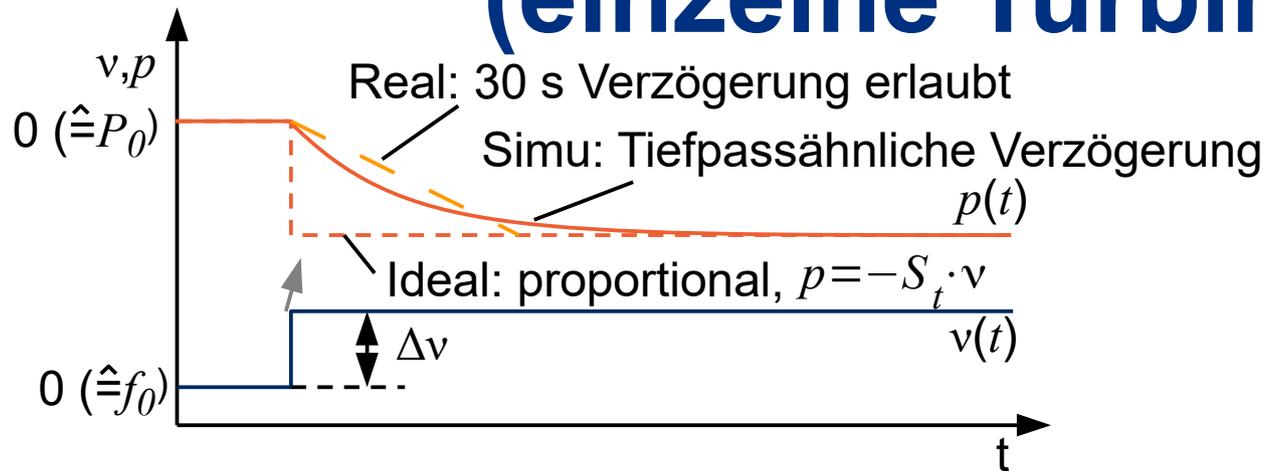
$$C \hat{=} T_A$$

$$R \hat{=} S_L$$

Statik bei Primärregelung



Reaktion der Primärregelung (einzelne Turbine)

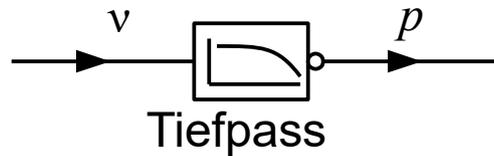


Definiere:

S_t = Turbinen-Primärregelungs-
Statik = 4%

T_t = Turbinen-Primärregelungs-
Zeitkonstante

Regelkreis-Darstellung:



Reaktions-Frequenzbereich:

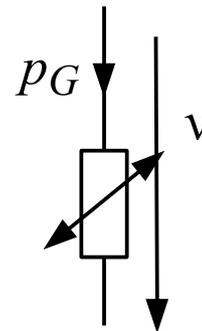
$$-p = \frac{1}{S_t} \cdot \frac{1}{1 + j\omega T_t} \cdot v$$

$$-v = S_t \cdot p + j\omega S_t \cdot T_t \cdot p$$

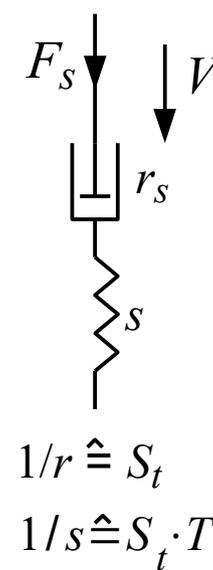
$$U = R \cdot I + j\omega L \cdot I$$

$$V = 1/r \cdot F + j\omega 1/s \cdot F$$

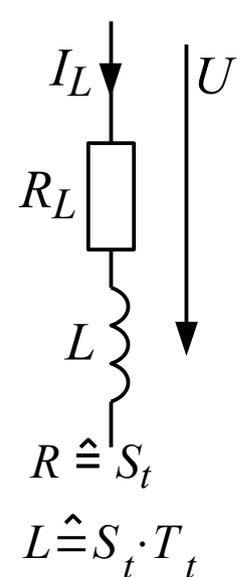
Symbolische
Darstellung



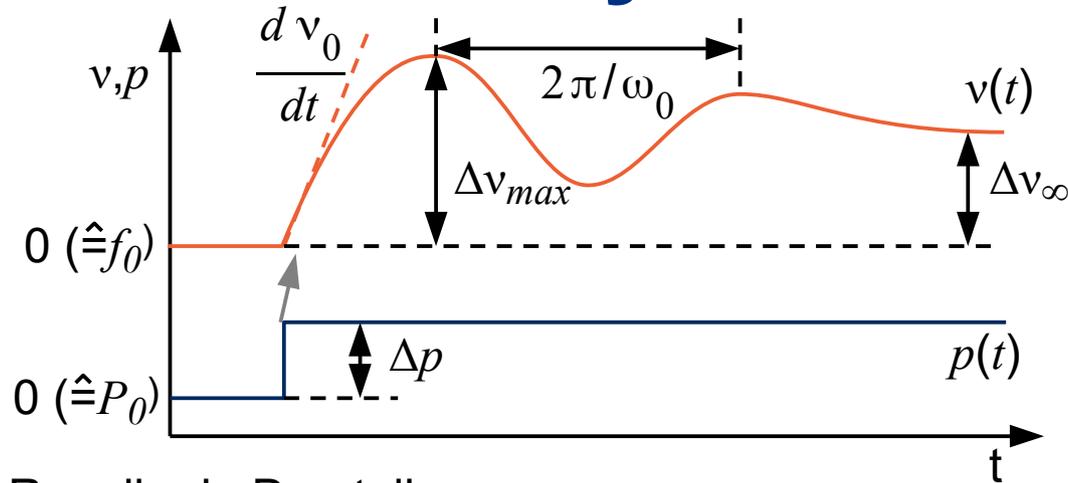
Mechanisches
Analogon



Elektrisches
Analogon



Systemreaktion



Definiere:

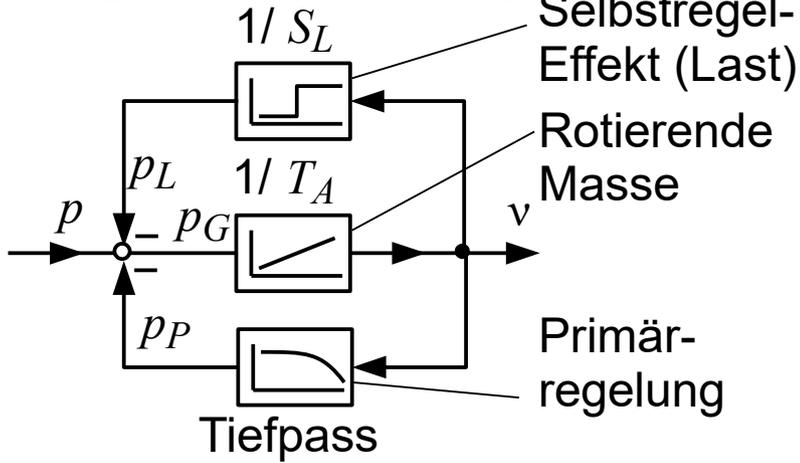
$$\text{Netzstatik } S_N = S_L \parallel S_T$$

$$v_\infty = S_N \cdot p$$

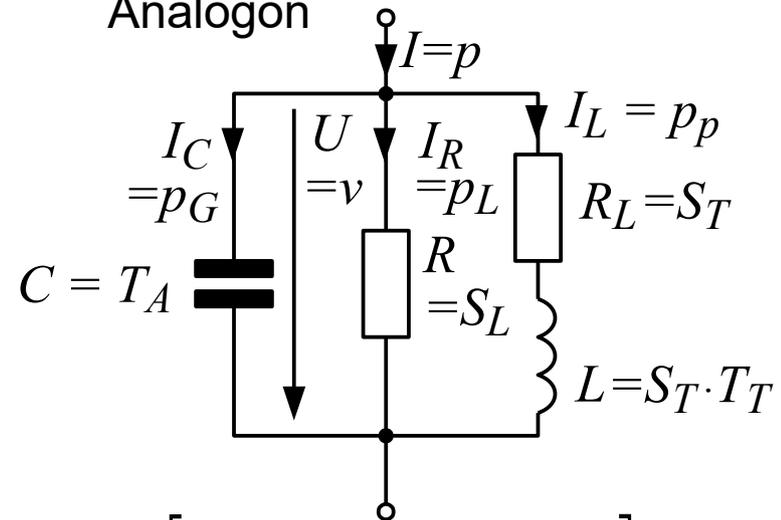
$$v_{max} = \sqrt{\frac{S_N \cdot T_T}{T_A}} \cdot p$$

$$\frac{dv_0}{dt} = \frac{1}{T_A} \cdot p \quad \omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{T_A \cdot S_T \cdot T_T}}$$

Regelkreis-Darstellung:



Elektrisches Analogon



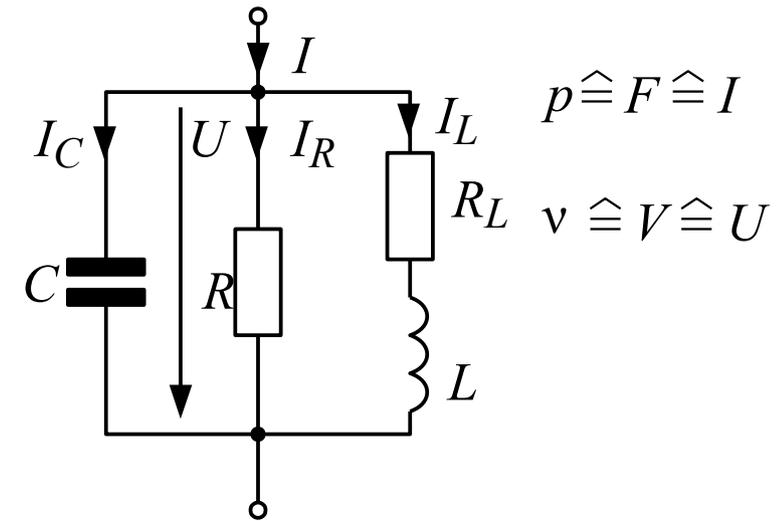
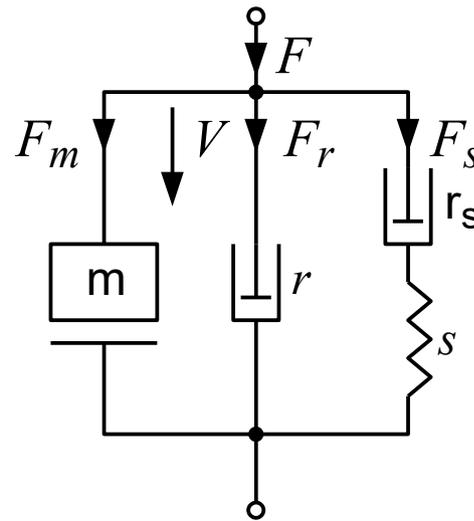
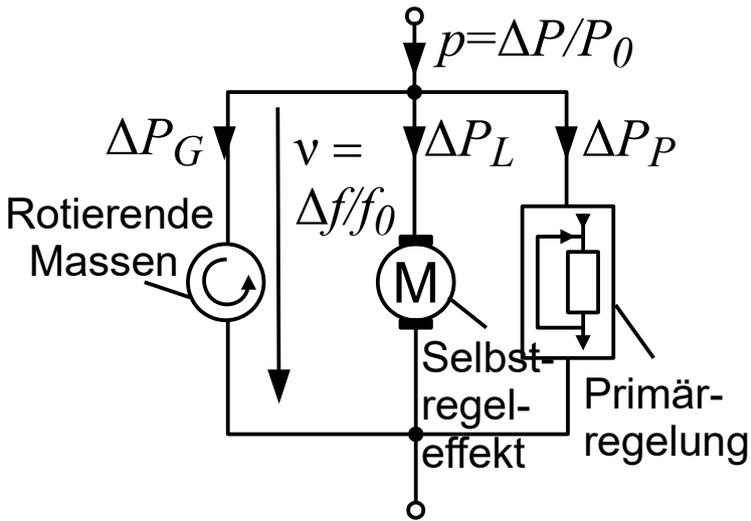
Reaktions-Frequenzbereich:

$$v = \left[\frac{1}{j\omega T_A} \parallel S_L \parallel (S_T + j\omega S_T \cdot T_T) \right] \cdot p$$

$$U = \left[\frac{1}{j\omega C} \parallel R \parallel (R_L + j\omega L) \right] \cdot I \quad \omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

Mechanische und elektrische Analogie

Übersicht



$$\Delta f = \frac{1}{T_A} \cdot \frac{f_0}{P_0} \cdot \int \Delta P_G dt$$

$$\Delta f = S_L \cdot \frac{f_0}{P_0} \cdot \Delta P_L$$

$$\Delta f = S_p \cdot \frac{f_0}{P_0} \cdot \Delta P_P + S_p \cdot T_p \cdot \frac{f_0}{P_0} \frac{d \Delta P_P}{dt}$$

$$V = \frac{1}{m} \cdot \int F_m dt$$

$$V = \frac{1}{r} \cdot F_r$$

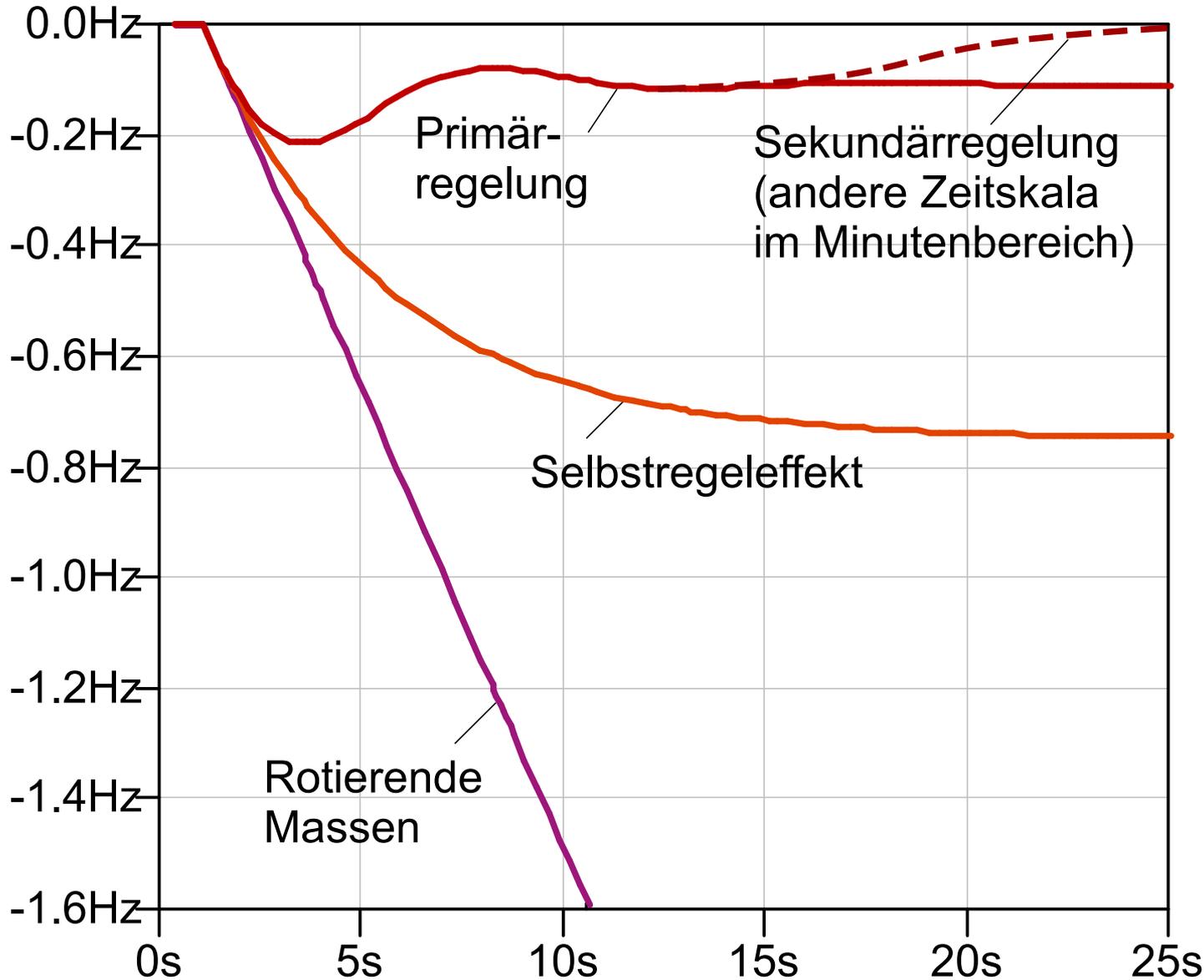
$$V = \frac{1}{r} \cdot F_s + \frac{1}{s} \cdot \frac{dF_s}{dt}$$

$$U = \frac{1}{C} \cdot \int I_C dt$$

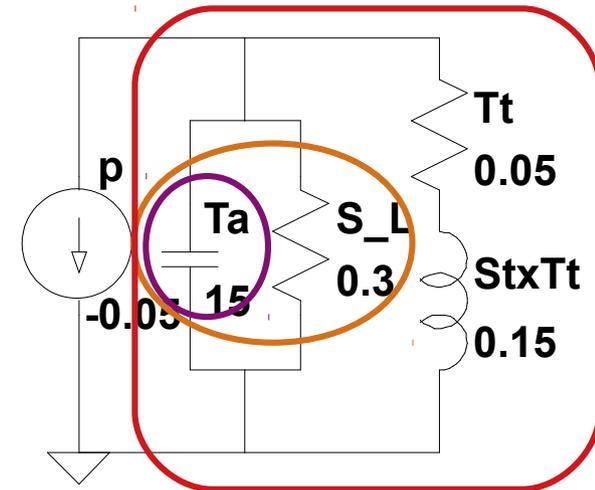
$$U = R \cdot I_R$$

$$U = R_L \cdot I_L + L \cdot \frac{dI_L}{dt}$$

Zusammenfassung Regelmechanismen



Ersatzschaltbild zur Simulation mit LT-SPICE



Kontakt

Prof. Dr. Eberhard Waffenschmidt

Professur Elektrische Netze

Fakultät für Informations-, Medien- und Elektrotechnik (F07)

Technische Hochschule Köln

Betzdorferstraße 2, Raum ZO 9-19

50679 Köln, Deutschland

Tel. +49 221 8275 2020

eberhard.waffenschmidt@th-koeln.de

<https://www.th-koeln.de/personen/eberhard.waffenschmidt/>

Lizenzbedingungen:

Diese Präsentation zur Vorlesung *Elektrische Netze* wird veröffentlicht von Eberhard Waffenschmidt unter der

Common Creatives Lizenz cc by nc sa



Sie dürfen:

- Das Material teilen und bearbeiten

Unter folgenden Bedingungen:

- Namensnennung
- Nicht für kommerzielle Zwecke
- Weitergabe unter gleichen Bedingungen

Details siehe:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/>

