

Autonome Systeme in der Medizintechnik

Kooperative und autonome Systeme in der Medizintechnik

- Biomed. Engineering
- Zielsetzung:
 - Entwurf, Entwicklung und Bereitstellung von technischen Methoden und Geräten für die Medizin
 - Lösung biologischer und medizinischer Fragestellungen mit ingenieurwissenschaftlicher Methodik

Prinzipien biologischer Regulationssysteme

- Inneres Milieu des menschlichen Organismus hat einen dynamischen Gleichgewichtszustand
- Regulationssysteme (Zell-, Organ-, ...)
- Feedback = Negative Rückkopplung
- Sensoren und Rezeptoren: Thermo-, Pressure-, Chemosensoren
- Physiologische Regulationssysteme sind außerordentlich vielseitig und komplex: nichtlinear, adaptiv, vernetzt, örtlich verteilt, Mehrebenensysteme

Wiederherstellung motorischer Funktionen

Klassische Motorik - Willkürmotorik (1)

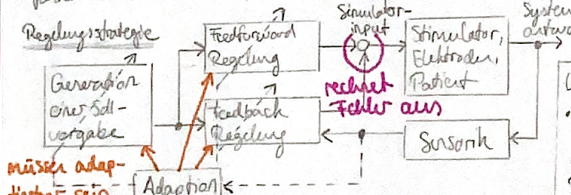
- in besonderen Strukturen des Großhirns und im limbischen System
- Motorischer Kortex: Impulsgeber zur Aktivierung der Muskulatur
- Bewegungsplanmole: Motorischer Kortex → Rückenmark → Motoneuron → Innervierung der Muskeln
- Bewegungsrezeptoren erfassen die Bewegung
- Information an das ZNS

Spinale Motorik (Natürliche Bewegungsregulation) (2)

- Rückenmark leitet Signale des Großhirns in die Peripherie und besitzt autonome Funktionen
- Monosynaptische Reflexe * Kleinhirn: Fein- & Ziel-
- Polysynaptische Reflexe (z.B. Flexorreflex) * motorik, Hand-Auge-Koordination
- * Feedback Regelung | * im ZNS |
- * Auch spinale Bewegungsvorgänge werden so geregelt, aber ohne kortikalen Beitrag | * Motorischer Kortex: Feedforward-Strategien | Bewegungsplanung (Willkür)
- * Rückenmark: Muskeltonus, Eigen- & Fremdreize, periodische Aktivierungsmuster

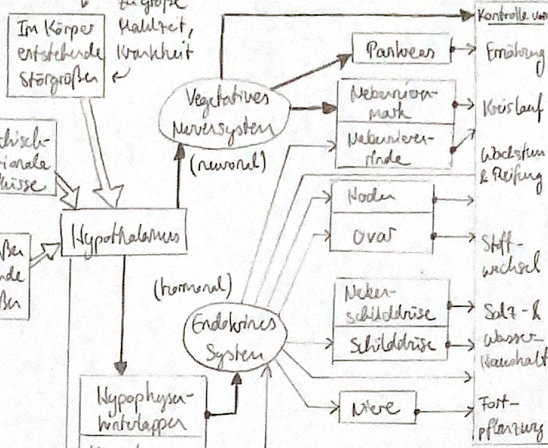
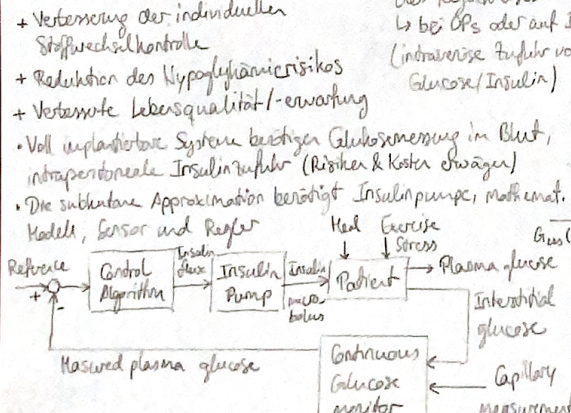
Motorische Neuropathien

- Funktionelle Elektrostimulation zur Wiederherstellung motorischer, sensorischer und vegetativer Funktionen bei Schädigungen im ZNS
- Erhöhung der Lebensqualität, Selbstständigkeit, Verringerung der Schweregradkomplikationen
- Neue Entwicklungen in der Bereich der Bewegungsregulation, Datenverarbeitung, Vernetzung und Implantattechnik | Herausforderungen: Regelungs- und Medizintechnik, Biomedizinische Technik
- Funktionsprinzip: Bewegungsmuster des ZNS können nicht zu der Zielmuskulatur weitergeleitet werden, die betroffenen Extremitäten sind gelähmt, die verloren gegangenen Bewegungsfunktionen können mithilfe künstlicher, elektrischer Reize teilweise wiederhergestellt werden



Artificialer Pancreas

Biologischer Ersatz der Pankreasfunktion:
→ Ziel: künstlicher Pankreas aufbauend des Krankheitszustands



Hormonale Regulation

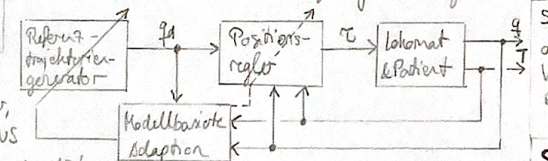
- Endokrines System in enger Abstimmung mit vegetativem System
- Botenstoffe sind Hormone
- Umsetzen von neuronalen Signalen in hormonale Signale findet im Hypothalamus statt
- Psychisch-emotionaler Einfluss: das neuroendokrine Steuerungssystem Hypothalamus unterliegt der Kontrolle des limbischen Systems
- Beispiele: Glucosehaushalt, Temperatur, weibl. Zyklus
- ⇒ Steuerung autonomer Körperfunktionen über autonomes vegetatives Nervensystem & das endokrine System

Bewegungswiederherstellung

- ZNS: Regeneration
- Peripheres NS: Geschädigte Axone regenerieren
- Muskel- und Skelettsystem: Selbstheilung (begrenzt)
- Technische Methoden der Bewegungswiederherstellung: Prothetik, Orthetik, Substitution
- Exoprothesen, Krücken, Fußschere, Sprachengabe als Alternative
- Endoprothesen, Rollstuhl, als Alternative

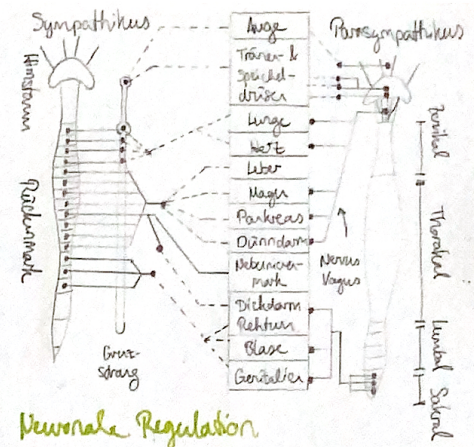
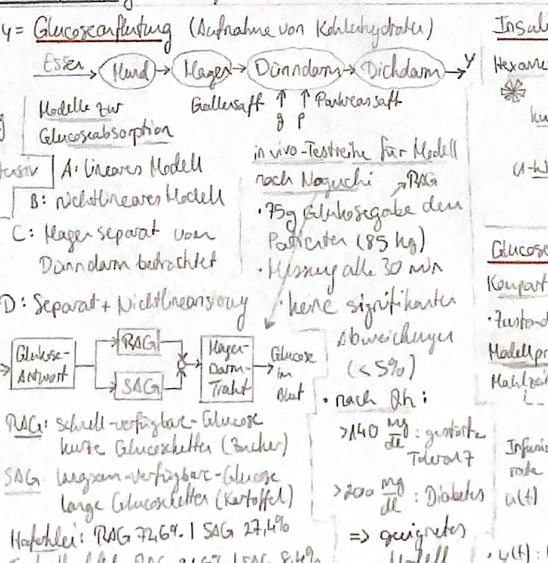
Techniken der klinischen Bewegungstherapie zur nach. Rehabilitation

- Manuelles Laufbandtraining vs. automatisiertes Ganganalyse
- Prinzip der modellbasierten Kraftregelung beim Gangtraining



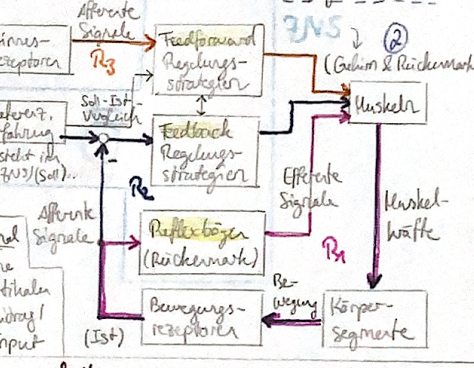
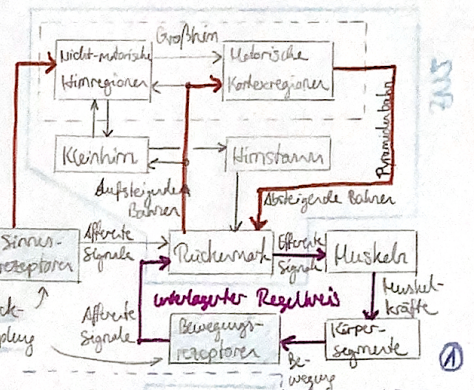
State-of-the-Art der Insulintherapie

- Bereitstellung & Verabreichung
- Unvollständigkeit der Zufuhr: Subcutane Verabreichung, Bolus, Dosisanpassung anhand einzelner Glucosebestimmungen
- Modifizierte Insulinpräparate: NPH, Glargine, Lispro, Aspart, ...
- Pharmakodynamik
- Art & Ort der Wirkung eines Arzneimittels: Wie entwickelt sich die Glucose im Körper beim Spritzen von Insulin?
- Welche Effekte treten auf? Welche Organe werden beeinflusst?
- Dosis-Wirkungs-Prinzip: Welche Dosis wirkt? ...
- Ab welcher Dosis treten Effekte auf? Welche Dosis wirkt? ...
- Dosisanpassung: Nahrungsaufnahme, Körperliche Aktivität, Stress, aktueller Glucosewert, verzögerte Dynamik



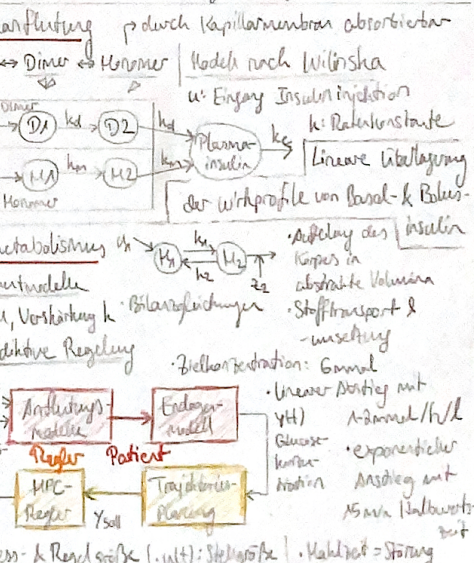
Neuronale Regulation

- durch autonomes vegetatives Nervensystem (ANS)
- Informationsübertragung mittels Acetylcholin und Noradrenalin
- Sympathikus und Parasympathikus



State-of-the-Art der Insulintherapie

- Subcutane Verabreichung, Bolus, Dosisanpassung anhand einzelner Glucosebestimmungen
- Pharmakokinetik (LSDME) Prozesse des Arzneimittels
- Liberation (Freisetzung)
- Resorption (Aufnahme)
- Distribution (Verteilung im Körper)
- Metabolisierung (Um- & Abbau)
- Excretion (Ausscheidung)
- [Wie verhält sich das Insulin im Körper?]



Stabilität

$(sI - A) = \begin{pmatrix} s - a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & s - a_{22} \end{pmatrix}$
 $\det(sI - A) = 0$
 $\operatorname{Re}(s_{1,2}) < 0 \Rightarrow$ asymptotisch stabil
 $\operatorname{Re}(s) = 0 \Rightarrow$ grenzstabil
 $\operatorname{Re}(s) > 0 \Rightarrow$ instabil
 Hurwitz: Prüfer auf as $\frac{1}{ad-bc} \cdot \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}$
 $G(s) = \frac{Z(s)}{N(s)} = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0$
 2. Ordnung: nur VFB; $a_2, a_1, a_0 > 0$
 3. Ordnung: VFB + BWB; $a_2 \cdot a_1 - a_0 \cdot a_3 > 0$

Steuertbarkeit

(meistens nicht B schon)
 $P = (B \ AB \ A^2 B \ \dots)$ Steuertbarkeitsmatrix
 muss vollen Rang(n) haben

Reduzierter Beobachter

Voraussetzung: $\operatorname{rg}(C) = q$
 I. Aufheben & Umsortieren der Zustände
 $\dot{\tilde{x}} = \tilde{A} \tilde{x} + \tilde{B} u \quad y = \tilde{C} \tilde{x}$
 $\tilde{x} = \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{pmatrix}$ r: Zustände r kommen nicht im Ausgang vor
 $\tilde{y}$: Zustände, die man ablesen kann
 q : Anzahl Lin. Zeilen / Spalten in C
 $\tilde{x} = \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} \\ \tilde{A}_{21} & \tilde{A}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tilde{B}_1 \\ \tilde{B}_2 \end{pmatrix} u \quad y = \begin{pmatrix} \tilde{C}_1 & \tilde{C}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{pmatrix}$

Beobachter

II. Beobachter muss nur für r entworfen werden, da y bekannt ist
 $\tilde{x} = P x = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} x = \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \end{pmatrix}$ mit $r = x_1 \quad y = \begin{pmatrix} x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$
 $P = \begin{pmatrix} p_1 & p_2 & p_3 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left\{ \begin{pmatrix} p_1 x_1 + p_2 x_2 + p_3 x_3 \\ x_2 + 2x_3 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \right\}$ LGS lösen

Auftreten von y im hinteren Term vermeiden

→ Einführung eines neuen Zustands $\tilde{y} = \hat{y} - Ly$
 $\dot{\tilde{y}} = A_{\tilde{y}} \tilde{y} + B_{\tilde{y}} u + Y_{\tilde{y}} y$
 $\tilde{y} = \begin{pmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_2 \end{pmatrix}$ mit $A_{\tilde{y}} = \tilde{A}_{11} - L \tilde{A}_{21}$
 $B_{\tilde{y}} = \tilde{B}_1 - L \tilde{B}_2$
 $Y_{\tilde{y}} = A_{\tilde{y}} L + \tilde{A}_{22} - L \tilde{A}_{22}$
 Fehlerdynamikmatrix: $A - LC$

Wähle L so, dass n-q EW der Matrix $A_{\tilde{y}}$ die gewünschten Positionen in der komplexen Ebene einnehmen

$\det(sI - A_{\tilde{y}}) = \det(sI - \tilde{A}_{11} + L \tilde{A}_{21}) \stackrel{n-q}{=} \prod (s - \lambda_i)$
 Luenberger-Beobachter: $L = P(A) \cdot \frac{1}{\alpha}$ → letzte Spalte von Q^{-1}
 $\hat{x} = C_{\tilde{y}} \tilde{y}(t) + D_{\tilde{y}} y(t) = P^{-1} \cdot (\tilde{y} + Ly)$
 $\tilde{y}(t) = \begin{pmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_2 \end{pmatrix} \quad y(t) = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}$

2-DOT-Regelung

gewünschtes Führungsverhalten
 reiner Steueranteil: $y = G_F \cdot V_F \cdot y_d \quad (k=0)$
 Realisierbar, wenn $\lim_{s \rightarrow 0} G_F y_d \rightarrow$ ideal: $G_F y_d = 1$
 $\rightarrow V_F^* = G^{-1}$
 1. Relativer Grad = 0
 (Anzahl Pole = Anzahl NS)
 2. keine instabile NS in G
 oft nicht realisierbar, wegen
 1. Akausalität: ggf. mit schnellem PTA-Glied $\left(\frac{1}{T \cdot s + 1}\right)$ erweitern → Annäherung möglich
 $T = \frac{1}{\omega}$
 2. Instabile Pole: Instabile NS in V_F sind zulässig, wenn die Instabilität durch Regler ausgeglichen wird
 3. Instabile NS: Instabile Pole in V_F ungeeignet
 → stattdessen mit reifem Allpass erweitern
 Störverhalten über Regler K: Stabilität hängt nicht von V_F ab!
 Wähle K so, dass
 1. Störverhalten gut ist
 2. geschlossener Kreis stabil (Pole $1 + G \cdot K = 0$)

Übertragungsfunktion

$G_1 \rightarrow G_2 \rightarrow G = G_1 \cdot G_2$
 $G = \frac{G_1}{1 + G_1 \cdot G_2} \rightarrow \frac{G_1}{1 + G_1 \cdot G_2}$
 $G(s) = C \cdot (sI - A)^{-1} \cdot B + D$
 nicht verkoppelt = G(s) ist Diagonalmatrix
 → erster Eingang wirkt nur auf ersten Ausgang usw.

Vollr-Rang

(wenn quadratisch)
 $\hat{=} \det \neq 0$

Störgrößen

$Bu + Ez = 0$
 Fall 1: Störgröße z ist messbar
 Kompensation mit Störgrößenaufschaltung
 $u_2 = -(B^T B)^{-1} \cdot B^T \cdot E \cdot z$
 → kompensiert Störung vollständig (oder minimiert den Störinfluss)
 Fall 2: Störgröße nicht messbar, aber Struktur bekannt
 $\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & E \cdot C_s \\ 0 & A_s \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ x_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix} u$
 $y = (C \ 0) \cdot \begin{pmatrix} x \\ x_s \end{pmatrix}$
 x_s : nie bekannt (Störzustand)

Asymptotische Folgerelung

Vorfilter: $K = (C \cdot (BR - A)^{-1} \cdot B)^{-1} \cdot u(v)$
 $u(v) = \frac{1}{C \cdot A^{r-1} \cdot B} \cdot [v(t) - C \cdot A^r \cdot x]$
 Sollpolynom: $(s - \lambda_1)(s - \lambda_2) = s^2 - (\lambda_1 + \lambda_2)s + \lambda_1 \lambda_2$
 $v(t) = y_d^{(n)} + \sum_{k=0}^{r-1} p_k \cdot (y_d - C \cdot A^k \cdot x)$
 bspw. $\rightarrow$ Vorsteuerung Stabilisierung $\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$
 $= \ddot{y}_d + p_1 \cdot (\dot{y}_d - a_1 x_1 - b_1 x_2) + p_0 \cdot (y_d - x_1)$
 $= \ddot{y}_d + p_1 \cdot (\dot{y}_d - a_1 x_1 - b_1 x_2) + p_0 \cdot (y_d - x_1)$
 $K(\omega(t)) = K(\ddot{y}_d, \dot{y}_d, y_d)$

Reglerentwurf im Frequenzbereich

$P: G_R = K_P$
 $I: G_R = \frac{1}{s} \cdot K_P$
 $PI: G_R = \frac{K_P}{s} \cdot (1 + T \cdot s)$
 $PID: G_R = \frac{K_P}{s} \cdot (1 + T_R \cdot s) \cdot (1 + T_I \cdot s)$
 $TR_1 > TR_2 > T_I$
 $\rightarrow$ verstärkt rauschen
 wenn I-Anteil bereits in Strecke vorhanden ODER instabil
 D-Regler akausal

Entkopplung Falb-Wolovich

I. Kopplungsmatrix $D^* = \begin{pmatrix} C_1^T \cdot A^{n_1-1} \cdot B \\ \vdots \\ C_p^T \cdot A^{n_p-1} \cdot B \end{pmatrix}$
 p : Anzahl Eingänge
 r_p : Relativgrad
 II. Prüfen auf Entkoppelbarkeit: $\det(D^*) \neq 0$
 III. Definition der Sollpolynome
 $N_i(s) = s^{r_i} + \dots + q_{i1}s + q_{i0}$
 $M_i(s) = q_{i0} + q_{i1}s + s^2$
 IV. Entwerfen des Vorfilters M und der Rückführmatrix R
 $K = (D^*)^{-1} \cdot \operatorname{diag}(N_i(0)) = \begin{pmatrix} q_{10} & 0 \\ 0 & q_{10} \end{pmatrix}$
 $R = (D^*)^{-1} \cdot \begin{pmatrix} C_1^T \cdot M_1(A) \\ \vdots \\ C_p^T \cdot M_p(A) \end{pmatrix}$
 Entkoppelndes Regelgesetz: $u = -Rx + Kw$

Beobachtbarkeit

$\operatorname{rg}(Q) = n$
 $Q = \begin{pmatrix} CA \\ \vdots \\ CA^n \end{pmatrix}$ voller Rang $\Rightarrow$ beobachtbar
 Regler-entwurf nach Ackermann
 $R = t_p \cdot P(A)$ ← char. Polynom der geschlossenen Kreise (vorgegeben)
 durch $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n$
 Geschlossener Regelkreis $y(s) = G(s) \cdot w(s)$
 $\dot{x} = (A - BR)x + BM \cdot w$ (DGL) $G(s)$ sollte diagonal sein
 $G(s) = C \cdot (sI - A + BR)^{-1} \cdot BM$
 $= C \cdot (sI - (A - BR))^{-1} \cdot BM$

erweitertes Streckenmodell

$\dot{x}_s = A_s \cdot x_s \rightarrow C_s$
 $\dot{x} = Ax + Bu + Ez$
 $u =$ Vorsteuerung + Regler + Störgrößenkompensation
 $= u(v) + u_2$
 Reglergleichung zsm mit Kompensation:
 $u(t) = \frac{-1}{C \cdot A^{r-1} \cdot B} \cdot \left(\sum_{k=0}^r p_k \cdot C \cdot A^k \cdot x \right) + \frac{1}{C \cdot A^{r-1} \cdot B} \cdot \sum_{k=0}^r p_k \cdot y_d^{(k)}(t)$
 $K(\omega(t)) = K(\ddot{y}_d, \dot{y}_d, y_d)$

2-DOT-Regelung

gewünschtes Führungsverhalten
 reiner Steueranteil: $y = G_F \cdot V_F \cdot y_d \quad (k=0)$
 Realisierbar, wenn $\lim_{s \rightarrow 0} G_F y_d \rightarrow$ ideal: $G_F y_d = 1$
 $\rightarrow V_F^* = G^{-1}$
 1. Relativer Grad = 0
 (Anzahl Pole = Anzahl NS)
 2. keine instabile NS in G
 oft nicht realisierbar, wegen
 1. Akausalität: ggf. mit schnellem PTA-Glied $\left(\frac{1}{T \cdot s + 1}\right)$ erweitern → Annäherung möglich
 $T = \frac{1}{\omega}$
 2. Instabile Pole: Instabile NS in V_F sind zulässig, wenn die Instabilität durch Regler ausgeglichen wird
 3. Instabile NS: Instabile Pole in V_F ungeeignet
 → stattdessen mit reifem Allpass erweitern
 Störverhalten über Regler K: Stabilität hängt nicht von V_F ab!
 Wähle K so, dass
 1. Störverhalten gut ist
 2. geschlossener Kreis stabil (Pole $1 + G \cdot K = 0$)

Reglerentwurf im Frequenzbereich

$P: G_R = K_P$
 $I: G_R = \frac{1}{s} \cdot K_P$
 $PI: G_R = \frac{K_P}{s} \cdot (1 + T \cdot s)$
 $PID: G_R = \frac{K_P}{s} \cdot (1 + T_R \cdot s) \cdot (1 + T_I \cdot s)$
 $TR_1 > TR_2 > T_I$
 $\rightarrow$ verstärkt rauschen
 wenn I-Anteil bereits in Strecke vorhanden ODER instabil
 D-Regler akausal

Relativgrad

SISO : nur ein y_1
 $y(t) = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} x(t) \leftarrow \operatorname{MIMO}$ Relativgrad 1
 $x(t) = \begin{pmatrix} -2 & 0 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} u(t)$ Relativgrad 2
 $y_1 = x_1 - x_2$
 $y_2 = x_1$
 Ableiten 1. Mal → abhängig von u
 $\dot{y}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_2 = -2x_1 + u_1 + 2u_2 \dots$
 $\dot{y}_2 = \dot{x}_1 = -2x_1 + u_1 + 2u_2$
 $\Rightarrow r_1 = 1; r_2 = 1$
 $r_{\text{ges}} = r_1 + r_2 = 1 + 1 = 2$

Beobachtbarkeit

$\operatorname{rg}(Q) = n$
 $Q = \begin{pmatrix} CA \\ \vdots \\ CA^n \end{pmatrix}$ voller Rang $\Rightarrow$ beobachtbar
 Regler-entwurf nach Ackermann
 $R = t_p \cdot P(A)$ ← char. Polynom der geschlossenen Kreise (vorgegeben)
 durch $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n$
 Geschlossener Regelkreis $y(s) = G(s) \cdot w(s)$
 $\dot{x} = (A - BR)x + BM \cdot w$ (DGL) $G(s)$ sollte diagonal sein
 $G(s) = C \cdot (sI - A + BR)^{-1} \cdot BM$
 $= C \cdot (sI - (A - BR))^{-1} \cdot BM$

erweitertes Streckenmodell

$\dot{x}_s = A_s \cdot x_s \rightarrow C_s$
 $\dot{x} = Ax + Bu + Ez$
 $u =$ Vorsteuerung + Regler + Störgrößenkompensation
 $= u(v) + u_2$
 Reglergleichung zsm mit Kompensation:
 $u(t) = \frac{-1}{C \cdot A^{r-1} \cdot B} \cdot \left(\sum_{k=0}^r p_k \cdot C \cdot A^k \cdot x \right) + \frac{1}{C \cdot A^{r-1} \cdot B} \cdot \sum_{k=0}^r p_k \cdot y_d^{(k)}(t)$
 $K(\omega(t)) = K(\ddot{y}_d, \dot{y}_d, y_d)$

2-DOT-Regelung

gewünschtes Führungsverhalten
 reiner Steueranteil: $y = G_F \cdot V_F \cdot y_d \quad (k=0)$
 Realisierbar, wenn $\lim_{s \rightarrow 0} G_F y_d \rightarrow$ ideal: $G_F y_d = 1$
 $\rightarrow V_F^* = G^{-1}$
 1. Relativer Grad = 0
 (Anzahl Pole = Anzahl NS)
 2. keine instabile NS in G
 oft nicht realisierbar, wegen
 1. Akausalität: ggf. mit schnellem PTA-Glied $\left(\frac{1}{T \cdot s + 1}\right)$ erweitern → Annäherung möglich
 $T = \frac{1}{\omega}$
 2. Instabile Pole: Instabile NS in V_F sind zulässig, wenn die Instabilität durch Regler ausgeglichen wird
 3. Instabile NS: Instabile Pole in V_F ungeeignet
 → stattdessen mit reifem Allpass erweitern
 Störverhalten über Regler K: Stabilität hängt nicht von V_F ab!
 Wähle K so, dass
 1. Störverhalten gut ist
 2. geschlossener Kreis stabil (Pole $1 + G \cdot K = 0$)

Reglerentwurf im Frequenzbereich

$P: G_R = K_P$
 $I: G_R = \frac{1}{s} \cdot K_P$
 $PI: G_R = \frac{K_P}{s} \cdot (1 + T \cdot s)$
 $PID: G_R = \frac{K_P}{s} \cdot (1 + T_R \cdot s) \cdot (1 + T_I \cdot s)$
 $TR_1 > TR_2 > T_I$
 $\rightarrow$ verstärkt rauschen
 wenn I-Anteil bereits in Strecke vorhanden ODER instabil
 D-Regler akausal

Autonome Systeme in der Medizintechnik

Regenerative und autonome Systeme in der Medizintechnik

- Biomedizinische Engineering
- Zielsetzungen:
 - Entwurf, Entwicklung und Bereitstellung von technischen Methoden und Geräten für die Medizin
 - Lösung biologischer und medizinischer Fragestellungen mit ingenieurwissenschaftlicher Methodik

Prinzipien biologischer Regulationssysteme

- Inneres Milieu des menschlichen Organismus hat einen dynamischen Gleichgewichtszustand
- Regulationssysteme (Zellkern, Organismus, ...)
- Feedback = Negative Rückkopplung
- Sensoren und Rezeptoren: Thermo-, Pressure-, Chemosensoren
- Physiologische Regulationssysteme sind außerordentlich vielseitig und komplex: nichtlinear, adaptiv, vernetzt, örtlich verteilt, Mehrerebenen-systeme

Wiederherstellung motorischer Funktionen

Kürschliche Motorik - (Willkürmotorik) ①

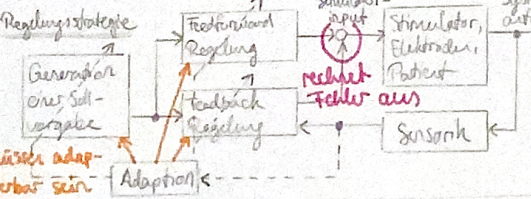
- in besonderen Strukturen des Großhirns und im limbischen System
- Motorischer Kortex: Impulsmuster zur Aktivierung der Muskulatur
- Bewegungsbefehle: Motorischer Kortex → Rückenmark → Motoneuronen → Innervierung der Muskeln
- Bewegungseffektoren erfassen die Bewegung → Information an das ZNS

Spinale Motorik (Natürliche Bewegungsregulation) ②

- Rückenmark leitet Signale des Großhirns in die Peripherie und steuert autonome Funktionen
- Monosynaptische Reflexe * Kleinhirn: Fein- & Ziel-
- Polysynaptische Reflexe (z.B. Flexorreflex) motorik
- * Feedback Regelung | * im ZNS | Hand-Auge-Koordination
- * Auch spinale Bewegungsvorgänge werden so geregelt, aber ohne kortikalen Beitrag * Motorischer Kortex:
- * Feedforward-Strategien | Bewegungsplanung (Willkür)
- * Rückenmark: Muskeltonus, Eigen- & Fremdreflexe, periodische Aktivierungsmuster

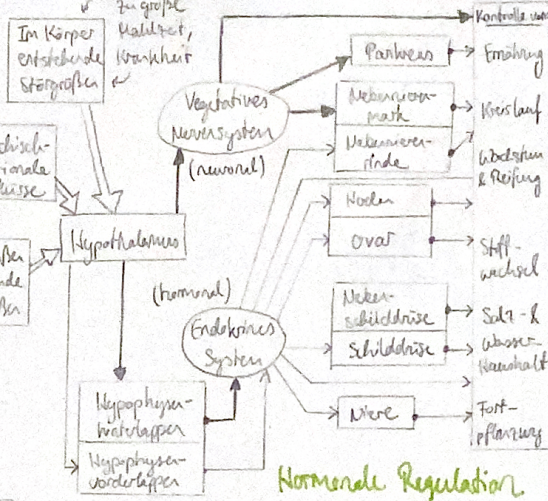
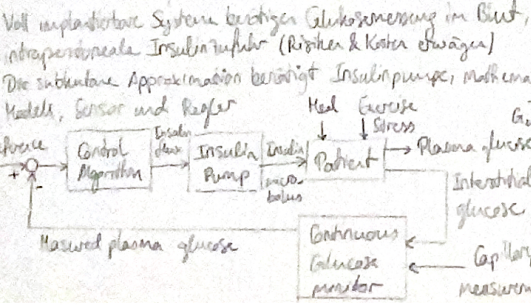
Motorische Neuroprothesen

- Funktionelle Elektrostimulation zur Wiederherstellung motorischer, sensorischer und vegetativer Funktionen bei Schädigungen im ZNS
- Erhöhung der Lebensqualität, Selbstständigkeit, Verringerung der Sekundärkrankheitsrisiken
- Neue Entwicklungen in den Bereichen Bewegungsregulation, Datenverarbeitung, Miniaturisierung und Implantationstechniken
- Herausforderungen: Regelungstechnik, Restriktionen, Biokompatibilität, ...
- Funktionsprinzip: Bewegungsbefehle des ZNS können nicht zu der Zielmuskulatur weitergeleitet werden, die betroffenen Extremitäten sind gelähmt, die weiteren geeigneten Bewegungsfunktionen können mithilfe künstlicher, elektrischer Reize teilweise wiederhergestellt werden



Artificialer Pankreas

- Biologischer Ersatz der Pankreasfunktion:
 - Ziel: technischer Pankreas außerhalb des Krankenhauses
 - + Verbesserung der individuellen Stoffwechselkontrolle
 - + Reduktion des Hypoglykämierisikos
 - + Verbesserte Lebensqualität/-erwartung
- Voll implantierbare Systeme benötigen Glukosemessung im Blut, intraperitoneale Insulinzufuhr (Pompe & Katheter) (intrauterine Zufuhr von Glukose/Insulin)
- Die subkutane Approximation benötigt Insulinpumpe, mathemat. Modell, Sensor und Regler

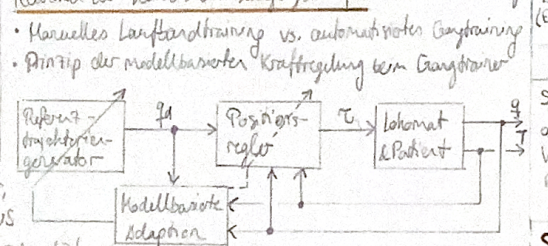


Hormonale Regulation

- Endokrines System in enger Abstimmung mit vegetativem Nsysten
- Botenstoffe sind Hormone - langsam & global
- Umsetzen von neuronalen Signalen in hormonale Signale findet im Hypothalamus statt
- Psychisch-emotionaler Einfluss: das neuroendokrine Steuerungszentrum Hypothalamus unterliegt der Kontrolle des limbischen Systems
- Beispiele: Glukosehaushalt, Temperatur, weibl. Zyklus
- => Steuerung autonomer Körperfunktionen über autonomes vegetatives Nervensystem & das endokrine System

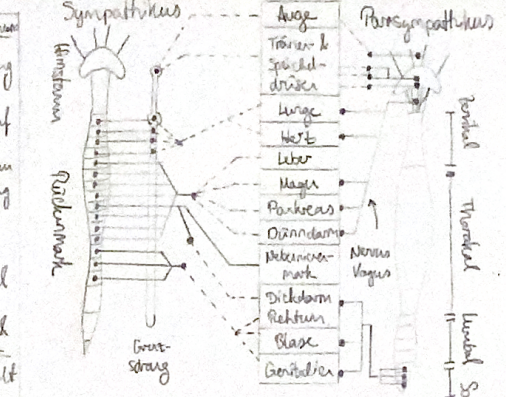
Bewegungswiederherstellung

- ZNS: Regeneration
- Peripheres NS: Geschädigte Axone regenerieren
- Muskel- und Skelettsystem: Selbstheilung (begrenzt)
- Technische Methoden der Bewegungswiederherstellung:
 - Prothetik: Exoprothesen, Endoprothesen
 - Orthetik: Krücken, Fußschere, Rollstuhl
 - Substitution: Sprachengabe als Alternative
- Techniken der klinischen Bewegungstherapie zur mehr. Rehabilitation
- Manuelles Laufbandtraining vs. automatisierten Ganganalyse
- Prinzip der modellbasierten Kraftregelung beim Gangtraining



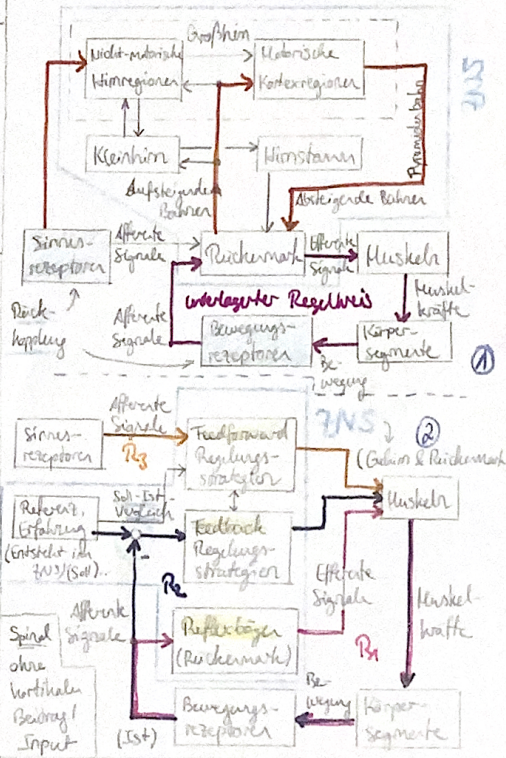
Bereitstellung & Verabreichung

- Unzulänglichkeiten der Zufuhr: Subkutane Verabreichung, Bolus, Dosisanpassung anhand einzelner Glukosekonzentrationen
- Modifizierte Insulinpräparate: NPH, Glargine, Lispro, Aspart, ...
- Pharmakodynamik:
 - Art & Ort der Wirkung eines Arzneimittels: Wie entwickelt sich die Glukose im Körper beim Spritzen von Insulin?
 - Welche Effekte treten auf? Welche Organe werden beeinflusst?
 - Dosis-Wirkungs-Prinzip: Welche Dosis wirkt? ...
 - Ab welcher Dosis treten Effekte auf? Welche Dosis tödlich? ...
 - Dosisanpassung: Nahrungsaufnahme, Körperliche Aktivität, Stress, Alkohol, Hormone, Verzögerte Dynamik



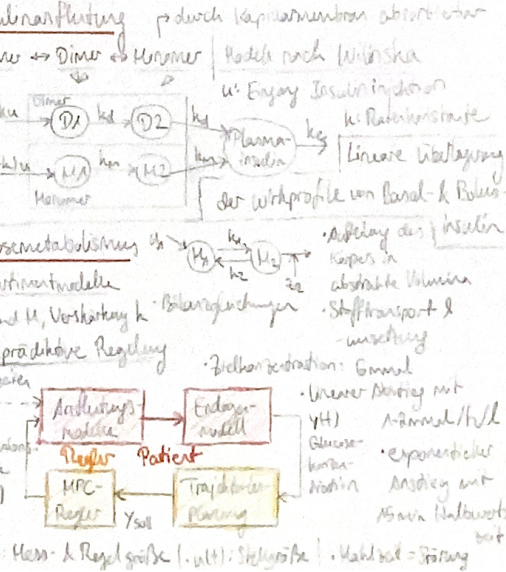
Neuronale Regulation

- durch autonomes vegetatives Nervensystem (ANS)
- Informationsübertragung mittels Acetylcholin und Noradrenalin - schnell & gezielt
- Sympathikus und Parasympathikus



State-of-the-Art der Insulintherapie

- Subkutane Verabreichung, Bolus, Dosisanpassung anhand einzelner Glukosekonzentrationen
- Pharmakokinetik (LADME) Prozesse des Arzneimittels:
 - Liberation (Freisetzung)
 - Resorption (Aufnahme)
 - Distribution (Verteilung im Körper)
 - Metabolisierung (Um- & Abbau)
 - Exkretion (Ausscheidung)
- [Wie verhält sich das Insulin im Körper?]



Stabilität

$(sI-A) = \begin{pmatrix} s-a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & s-a_{22} \end{pmatrix}$
 $\det(sI-A) = 0$
 $\operatorname{Re}(s_{1,2}) < 0 \Rightarrow$ asymptotisch stabil
mind 1 $\operatorname{Re}(s) = 0 \Rightarrow$ grenzstabil
mind 1 $\operatorname{Re}(s) > 0 \Rightarrow$ instabil
Hurwitz: Prüfen auf as $\begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}$
 $G(s) = \frac{Z(s)}{N(s)} = \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}{\dots}$

2. Ordnung: nur VFB; $a_2, a_1, a_0 > 0$
3. Ordnung: VFB + BWB; $a_3, a_2, a_1, a_0 > 0$
4. Ordnung: $a_4, a_3, a_2, a_1, a_0 > 0$

Steuertbarkeit (meistens reicht B schon)

$P = (B \ AB \ A^2 B \ \dots)$ Steuertbarkeitsmatrix
muss vollen Rang(n) haben

Reduzierter Beobachter

Voraussetzung: $\operatorname{rg}(C) = q$
I Auftrennen & Umsortieren der Zustände
 $\dot{\tilde{x}} = \tilde{A} \tilde{x} + \tilde{B} u + \tilde{C} y$
 $\tilde{A} = A - L C$ transponierte
 $\tilde{B} = B$ Systemmatrix
 $\tilde{C} = C$
 $\tilde{x} = \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} \\ \tilde{A}_{21} & \tilde{A}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tilde{B}_1 \\ \tilde{B}_2 \end{pmatrix} u + \begin{pmatrix} \tilde{C}_1 \\ \tilde{C}_2 \end{pmatrix} y$
 $y = (0 \ I_{q \times q}) \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{pmatrix}$

II Beobachter muss nur für r entworfen werden, da y bekannt ist

$\tilde{x} = P x = \begin{pmatrix} z \\ c \end{pmatrix} x = \begin{pmatrix} r \\ y \end{pmatrix}$ mit $r = x_1$ | $y = \begin{pmatrix} x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$
 $P = \begin{pmatrix} P_1 & P_2 & P_3 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left\{ \begin{array}{l} P_1 x_1 + P_2 x_2 + P_3 x_3 \\ x_2 + 2x_3 \\ x_3 \end{array} \right\} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$ LGS lösen

III Auftreten von y im hinteren Term vermeiden

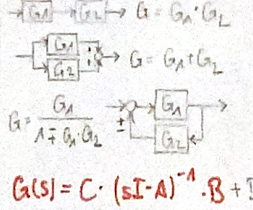
$\dot{\tilde{x}} = A_f \tilde{x} + B_f u + Y_f y$
 $\tilde{x} = \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{pmatrix}$ mit $A_f = \tilde{A}_{11} - L \tilde{A}_{21}$
 $B_f = \tilde{B}_1 - L \tilde{B}_2$
 $Y_f = A_f L + \tilde{A}_{12} - L \tilde{A}_{22}$
Fehldynamikmatrix: $A - LC$

IV Wähle L so, dass n-q EW der Matrix A_f die gewünschten Positionen in der komplexen Ebene einnehmen

$\det(sI - A_f) = \det(sI - \tilde{A}_{11} + L \tilde{A}_{21}) = \prod_{i=1}^{n-q} (s - \lambda_i)$
Luenberger-Beobachter: $L = p(A) \cdot \frac{1}{\det(A)}$ letzte Spalte von Q^{-1}
für λ_1, λ_2 dann A einsetzen! $\rightarrow$ char. Polynom der Fehldynamikmatrix

$\hat{x} = C_f g(t) + D_f y(t) = P^{-1} (J + L y)$
 $g(t) = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \end{pmatrix} y(t) = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}$

Übertragungsfunktion



$G(s) = C \cdot (sI - A)^{-1} \cdot B + D$

Verkopplung

nicht verkopelt = G(s) ist Diagonalmatrix
 $\Rightarrow$ erster Eingang wirkt nur auf ersten Ausgang usw.

voller Rang (wenn quadratisch)
 $\hat{=} \det \neq 0$

Entkopplung Falb-Wolovich

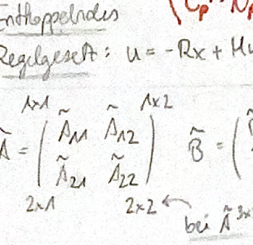
I Kopplungsmatrix $D^* = \begin{pmatrix} C_1^T \cdot A^{n-1} \cdot B \\ \vdots \\ C_p^T \cdot A^{n-1} \cdot B \end{pmatrix}$
p: Anzahl Eingänge
 r_p : Relativgrad
II Prüfen auf Entkopplbarkeit: $\det(D^*) \neq 0$
III Definition der Solipolynome
 $N_i(s) = s^{r_i} + \dots + q_{i1}s + q_{i0}$

$M_i(s) = q_{i0} + q_{i1}s + s^2$

IV Entwerfen des Vorfilters M und der Reachmatrix R

$M = (D^*)^{-1} \cdot \operatorname{diag}(N_i(0)) = \begin{pmatrix} q_{10} & 0 \\ 0 & q_{10} \end{pmatrix}$
 $R = (D^*)^{-1} \cdot \begin{pmatrix} C_1^T \cdot M_1(A) \\ \vdots \\ C_p^T \cdot M_p(A) \end{pmatrix}$

Entkopplungsindex
Regelgesetz: $u = -R x + w$



Relativgrad

$y(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} u(t)$
 $\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} u(t)$
 $y_1 = x_1 - x_2$
 $y_2 = x_1$
Ableiten 1. Mal $\rightarrow$ abhängig von u
 $\dot{y}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_2 = -2x_1 + u_1 + 2x_2 - \dots$
 $\dot{y}_2 = \dot{x}_1 = -2x_1 + u_1 + 2x_2$
 $\Rightarrow r_1 = 1; r_2 = 1$
 $r_{\text{ges}} = r_1 + r_2 = 1 + 1 = 2$

Beobachtbarkeit

$Q = \begin{pmatrix} C \\ C A \\ \vdots \\ C A^{n-1} \end{pmatrix}$ voller Rang $\Rightarrow$ beobachtbar

Regler-entwurf nach Ackermann

$R = t_p \cdot p(A)$ char. Polynom des geschlossenen Kreises (vorgewiesen)
durch $\lambda_1, \lambda_2, \dots$

Geschlossener Regelkreis

$\dot{x} = (A - BR)x + BM \cdot w$ (DGL)
 $G(s) = C \cdot (sI - A + BR)^{-1} \cdot BM$ sollte diagonal sein
 $= C \cdot (sI - (A - BR))^{-1} \cdot BM$

Störgrößen

$Bu + Ez = 0$
Fall 1: Störgröße z ist messbar
Kompensation mit Störgrößenaufschaltung
 $u_2 = -(B^T B)^{-1} \cdot B^T \cdot E \cdot z$
 $\rightarrow$ kompensiert Störung vollständig (oder minimiert den Störeinfluss)

Fall 2: Störgröße nicht messbar, aber Struktur bekannt

$\begin{pmatrix} \dot{x}_s \\ x_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & E C_s \\ 0 & A_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_s \\ x_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix} u$
 x_s : nie bekannt (Störzustand)
 $y = (C \ 0) \cdot \begin{pmatrix} x_s \\ x_s \end{pmatrix}$
erweitertes Streckenmodell
* = Störgrößenkompensation

Asymptotische Folgeregelung

Vorfilter: $K = (C(BR - A)^{-1}B)^{-1} \cdot u(v)$
 $u(v) = \frac{1}{C A^{r-1} B} \cdot [v(t+1) - C A^r x]$
Solipolynom: $(s - \lambda_1)(s - \lambda_2) = s^2 - (\lambda_1 + \lambda_2)s + \lambda_1 \lambda_2$
 $v(t) = y_d + \sum_{k=0}^{r-1} p_k (y_d - C A^k x)$
bzw. $y_d + p_1 (y_d - (a_1 x_1 + a_2 x_2)) + p_0 (y_d - x_1)$
 $= y_d + p_1 (y_d - a_1 x_1 - a_2 x_2) + p_0 (y_d - x_1)$
 $u(w(t)) = M(\ddot{y}_d, \dot{y}_d, y_d)$

2-Dof-Regelung

reiner Steueranteil: $y = G_F \cdot V_F \cdot y_d$ ($k=0$)
Realisierbar, wenn $\lim_{s \rightarrow 0} G_F y_d \rightarrow \text{ideal}$ $G_F y_d = 1$
1. Relativer Grad = 0 (Anzahl Pole = Anzahl NS)
2. keine instabile NS in G
Off nicht realisierbar, wegen

1. Akausalität: ggf. mit schnellerem PT1-Glied

erweitern $\rightarrow$ Annäherung möglich
 $T = \frac{1}{\omega}$

2. Instabile Pole: Instabile NS in V_F sind

tolerant, wenn die Instabilität durch Regler ausgeglichen wird

3. Instabile NS: Instabile Pole in V_F ungeeignet

$\rightarrow$ stattdessen mit regularem Allpass erweitern

Störverhalten über Regler K:

Wähle K so, dass

1. Störverhalten gut ist

2. geschlossener Kreis stabil (Pole $1 + G \cdot K = 0$)

Regelentwurf im Frequenzbereich

$P: G_R = K_P$
 $I: G_R = \frac{1}{s} \cdot K_P$
 $PI: G_R = \frac{K_P}{s} \cdot (1 + T \cdot s)$
 $PID: G_R = \frac{K_P}{s} \cdot (1 + T_1 s) (1 + T_2 s)$

Kaskaden-Regelung

1. Entwurf des inneren Reglers (Strom);
2. Ein-fassen des inneren geschlossenen Kreises in einen Block ($G=1$)
3. Entwurf des äußeren Regelkreises (Ordnung) w

Veranschaulichungen: $\rightarrow$ Regelgrößen müssen messbar sein
 $\omega_{\text{inner}} \gg \omega_{\text{außen}}$ (Drehzahl) $\gg$ 12 ausser (innerer Kreis schneller)

Gleichstrom Motor: Proportional-Regler K_P
 $\rightarrow$ Vorfilter V
 $\rightarrow$ stationäre Verstärkung $1 \Rightarrow i^* = i$

innerer Strecken $\rightarrow$ $\frac{1}{s}$ $\rightarrow$ $\frac{1}{s}$ $\rightarrow$ $\frac{1}{s}$
äußerer Strecken $\rightarrow$ $\frac{1}{s}$ $\rightarrow$ $\frac{1}{s}$ $\rightarrow$ $\frac{1}{s}$

Kreisfrequenz $\omega_s: s = j\omega_s$
Verstärkung $A: G(1) \hat{=} 1$

Regelentwurf im Frequenzbereich

$T_{R1} > T_{R2} > T_N$ D-Regler akausal
 $\rightarrow$ verstärkt rauschen

$\frac{1}{s} \rightarrow$ wenn I-Anteil bereits in Strecke vorhanden ODER instabil

$\frac{1}{s} \rightarrow$ wenn I-Anteil bereits in Strecke vorhanden ODER instabil

$\frac{1}{s} \rightarrow$ wenn I-Anteil bereits in Strecke vorhanden ODER instabil

$\frac{1}{s} \rightarrow$ wenn I-Anteil bereits in Strecke vorhanden ODER instabil

Regelentwurf im Frequenzbereich

$L = P(A) \cdot t_p$
 $= p_0 \cdot t_p + p_1 \cdot A \cdot t_p + A^2 \cdot t_p$
mit $p(s) = p_0 + p_1 s + s^2$
 $R = t_p \cdot P(A)$
 $= t_p \cdot p_0 + t_p \cdot p_1 \cdot A + t_p \cdot A^2$

Dynamisches Regelgesetz ($R + Beobachter$)
 $\Sigma_R: \begin{cases} \dot{\hat{x}} = A \hat{x} + B u + L(y - C \hat{x}) \\ u = -R \hat{x} \end{cases}$

Störgröße nicht messbar (Bsp.)
 $z = \sin(\omega t + \phi) \rightarrow \ddot{z} = -\omega^2 \sin(\omega t + \phi)$
 $\rightarrow \ddot{z} = -\omega^2 z \sin(\omega t + \phi) \Rightarrow \ddot{z} = -\omega^2 z$

TRD: $x_s = \begin{pmatrix} z \\ \dot{z} \end{pmatrix} | \dot{x}_s = \begin{pmatrix} \dot{z} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{z} \\ -\omega^2 z \end{pmatrix}$
 $z_s = u(0) x_s$ Störmatrix $\rightarrow A_s$

Anfangsbedingungen: $x_s(0) = \begin{pmatrix} z(0) \\ \dot{z}(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(\omega t) \\ \omega \cos(\omega t) \end{pmatrix}$

2-Dof-Regelung

gewünschtes Führungsverhalten

$y = G_F \cdot V_F \cdot y_d$ ($k=0$)

Realisierbar, wenn $\lim_{s \rightarrow 0} G_F y_d \rightarrow \text{ideal}$ $G_F y_d = 1$

1. Relativer Grad = 0 (Anzahl Pole = Anzahl NS)

2. keine instabile NS in G

Off nicht realisierbar, wegen

1. Akausalität: ggf. mit schnellerem PT1-Glied

erweitern $\rightarrow$ Annäherung möglich

$T = \frac{1}{\omega}$

2. Instabile Pole: Instabile NS in V_F sind

tolerant, wenn die Instabilität durch Regler ausgeglichen wird

3. Instabile NS: Instabile Pole in V_F ungeeignet