



# Kybernetisches Denken

## Eine Einführung ohne mathematisches Bla Bla

Dani

Finsterberg Akademie, Zamonien

2025-12-27



# Outline

**Um was geht es?**

**Metafragen zur Kybernetik**

**Dynamische Systeme**

**Weitführende Inhalte**

**Beispiel: U-Boot Tiefenregelung**

**Weitere Konzepte**

**Abstraktion**

**Systemanalyse**

**Beobachter**

**Relevanz / Zukunft**



# Outline

**Um was geht es?**

Metafragen zur Kybernetik

Dynamische Systeme

Weitführende Inhalte

Beispiel: U-Boot Tiefenregelung

Weitere Konzepte

Abstraktion

Systemanalyse

Beobachter

Relevanz / Zukunft



# Was ist Kybernetik?

Was ist Kybernetik? Einfach mal googeln:



# Was ist Kybernetik?



# Was ist Kybernetik?

# Was ist Kybernetik?

Was ist Kybernetik? Einfach mal googeln:

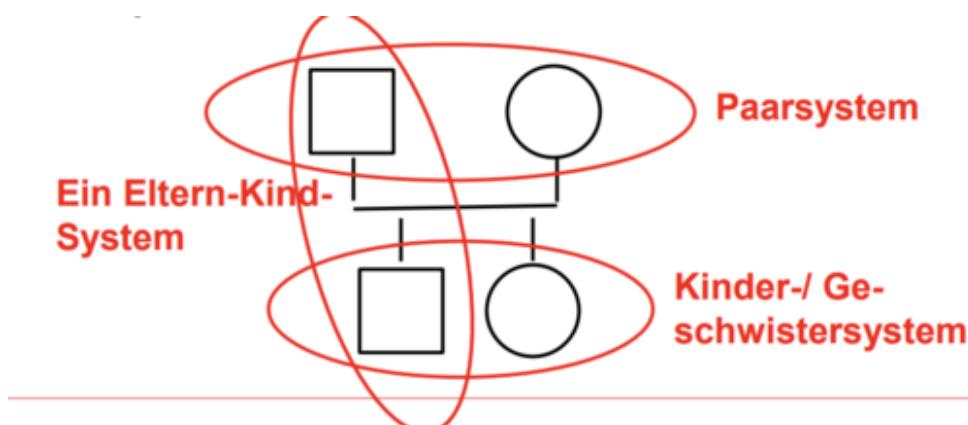


Figure 1: <https://o.quizlet.com/HPMRT3dpudKi1Ua3AOXmaw.png>



Figure 2: <https://datascientest.com/de/kybernetik-alles-wissen>

# Was ist Kybernetik?

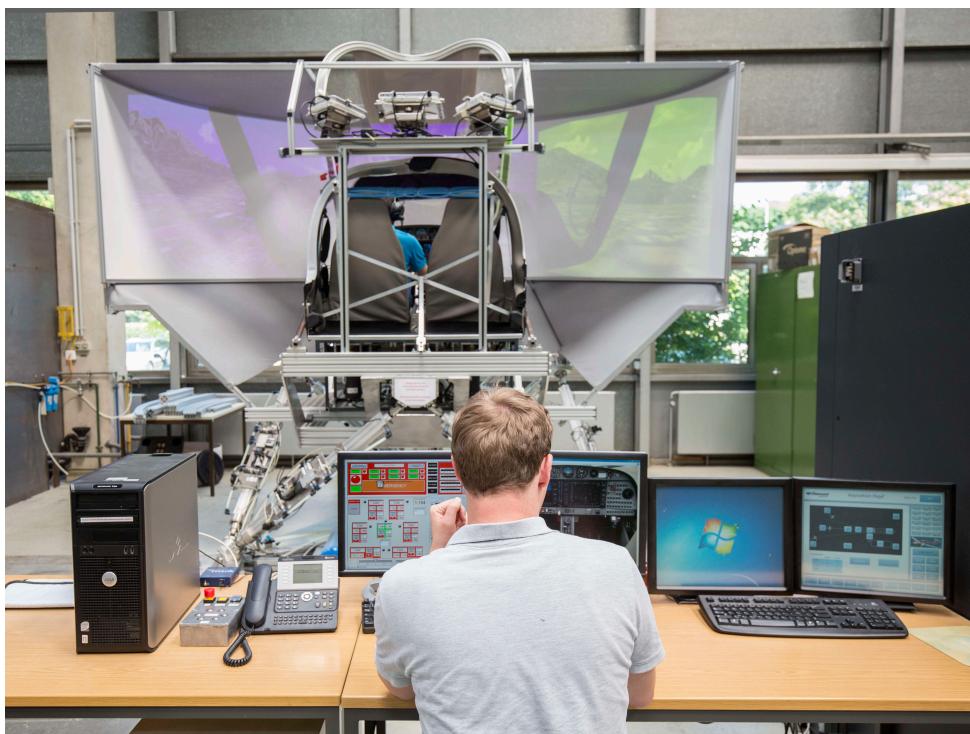


Figure 3: <https://studieren.de/technische-kybernetik-uni-stuttgart.studienprofil.t-0.a-456.c-34710.html>



Figure 4: <https://pictures.abebooks.com/inventory/30771070339.jpg>

# Was ist Kybernetik?



**Ok das war noch nicht sehr hilfreich!**

Figure 5: <https://www.gkm.uni-stuttgart.de/techkyb/.content/img/kybhand.jpg>



# Kybernetik: Definition

*Die Kybernetik ist die Wissenschaft von Kontrolle und Information, gleichgültig, ob es sich über lebendige Wesen oder Maschinen handelt – Norbert Wiener*



# Dieser Vortrag: Thema

Schwerpunkt des heutigen Vortrags:

- Regelung technischer Systeme
- Ausblick zu verschiedenen Methoden und Herausforderungen in der Kybernetik



# Dieser Vortrag: Darreichungsform

- Kybernetik ist eine sehr mathematiklastige Disziplin

Beispiel:

$$\mathcal{L}\{f\}(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

Unnötige mathematische  
Ausführungen für  
unangenehme Besserwisser





# Dieser Vortrag: Darreichungsform

- Kybernetik ist eine sehr mathematiklastige Disziplin
  - Um die gezeigten Zusammenhänge mathematisch präzise darzustellen, ist viel Vorwissen nötig
  - 
  - 
  -

Beispiel:

$$\mathcal{L}\{f\}(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

Unnötige mathematische Ausführungen für unangenehme Besserwisser



# Dieser Vortrag: Darreichungsform

- Kybernetik ist eine sehr mathematiklastige Disziplin
  - Um die gezeigten Zusammenhänge mathematisch präzise darzustellen, ist viel Vorwissen nötig
  - Hier werden die Zusammenhänge und Ideen intuitiv, ohne mathematische Grundvoraussetzungen dargestellt
  -



Beispiel:

$$\mathcal{L}\{f\}(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

Unnötige mathematische Ausführungen für unangenehme Besserwisser



# Dieser Vortrag: Darreichungsform

- Kybernetik ist eine sehr mathematiklastige Disziplin
  - Um die gezeigten Zusammenhänge mathematisch präzise darzustellen, ist viel Vorwissen nötig
  - Hier werden die Zusammenhänge und Ideen intuitiv, ohne mathematische Grundvoraussetzungen dargestellt
  - *Rechte Spalte: Mathematische Darstellungen für Fans, nicht nötig fürs Verständnis*



Beispiel:

$$\mathcal{L}\{f\}(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

Unnötige mathematische Ausführungen für unangenehme Besserwisser



# Dieser Vortrag: Darreichungsform

- Kybernetik ist eine sehr mathematiklastige Disziplin
  - Um die gezeigten Zusammenhänge mathematisch präzise darzustellen, ist viel Vorwissen nötig
  - Hier werden die Zusammenhänge und Ideen intuitiv, ohne mathematische Grundvoraussetzungen dargestellt
  - *Rechte Spalte: Mathematische Darstellungen für Fans, nicht nötig fürs Verständnis*
- Anschauliche Demos praktischer Anwendung

Beispiel:

$$\mathcal{L}\{f\}(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

Unnötige mathematische Ausführungen für unangenehme Besserwisser



# Outline

Um was geht es?

Metafragen zur Kybernetik

Dynamische Systeme

Weitführende Inhalte

Beispiel: U-Boot Tiefenregelung

Weitere Konzepte

Abstraktion

Systemanalyse

Beobachter

Relevanz / Zukunft



# Was ist ein dynamisches System?



# Was ist ein dynamisches System?

- Wird durch Eingänge beeinflusst
- 
-



# Was ist ein dynamisches System?

- Wird durch Eingänge beeinflusst
- Informationen aus Ausgängen sichtbar
-



# Was ist ein dynamisches System?

- Wird durch Eingänge beeinflusst
- Informationen aus Ausgängen sichtbar
- Hat einen internen Zustand, der sein Verhalten beeinflusst



# Outline

Um was geht es?

Metafragen zur Kybernetik

Dynamische Systeme

Weitführende Inhalte

**Beispiel: U-Boot Tiefenregelung**

Weitere Konzepte

Abstraktion

Systemanalyse

Beobachter

Relevanz / Zukunft



# U-Boot Tiefenregelung: Problemstellung

- U-Boot Tiefe soll vorgegebener Linie folgenden
- Vertikale Kraft kann beeinflusst werden



# U-Boot Tiefenregelung: Problemstellung

- U-Boot Tiefe soll vorgegebener Linie folgenden
- Vertikale Kraft kann beeinflusst werden



**Demo:** *Simulation mit manueller Steuerung (Pfeiltasten)*



# U-Boot Tiefenregelung: Regelung via Feedback

- Ziel: Automatische Regelung der Tiefe

## Feedback

Bestimme Steuerungskraft (ehem. bestimmt durch Tastendruck) basierend auf aktuellem Fehler

- Wie Steuerungssignal berechnen? -> **PID Regler**
  - **Proportionaler Anteil (P)**: Reagiert auf aktuellen Fehler
  - **Integraler Anteil (I)**: Reagiert auf aufsummierten Fehler über Zeit
  - **Differentieller Anteil (D)**: Reagiert auf Änderungsrate des Fehlers

Verstärkungen der einzelnen Anteile **P, I, D** müssen gewählt werden! **Demo:**

*Simulation mit geregelter Steuerung (PID Regler)*

- Feedback: Aktuelle Tiefe wird gemessen und mit gewünschter Tiefe verglichen



# Outline

Um was geht es?

Metafragen zur Kybernetik

Dynamische Systeme

Weitführende Inhalte

Beispiel: U-Boot Tiefenregelung

Weitere Konzepte

Abstraktion

Systemanalyse

Beobachter

Relevanz / Zukunft



# Warum nicht Feierabend?

## Kritische Selbsthinterfragung

Das war ja sehr einfach? Warum soll man dann eine ganze Wissenschaft draus machen?

Gute Gründe:

- Betrachtet wurde ein sehr, sehr einfaches Beispiel
- In der Praxis sind Systeme oft viel komplexer
- Störungen, Unsicherheiten, Verzögerungen sind in der Praxis unvermeidbar
- Auch scheinbar sinnvolle Regelungen können kontraproduktiv sein



# Gefahr: Instabilität!



**Demo:** *Simulation mit kontraproduktiv eingestelltem Regler (hohe P Anteile)*

# U-Boot Tiefenregelung: Darstellung im Blockdiagramm

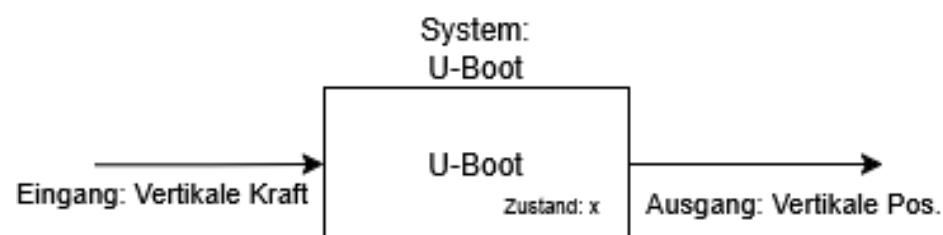


Figure 1: Submarine: Open Loop

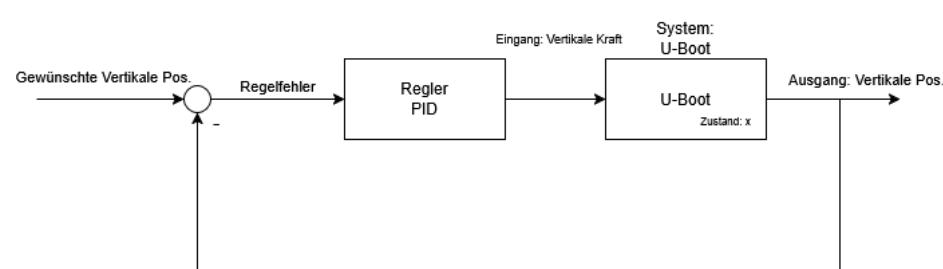


Figure 2: Submarine: Closed Loop

# U-Boot Tiefenregelung: Darstellung im Blockdiagramm

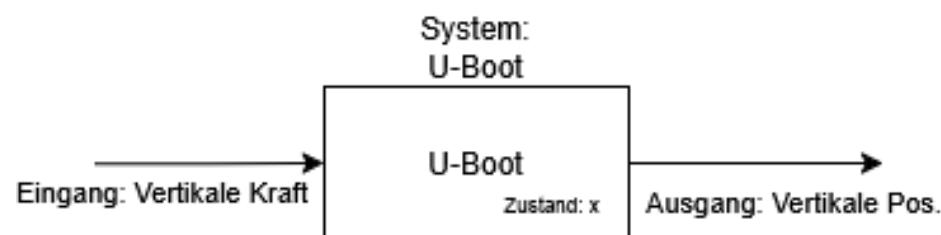


Figure 3: Submarine: Open Loop

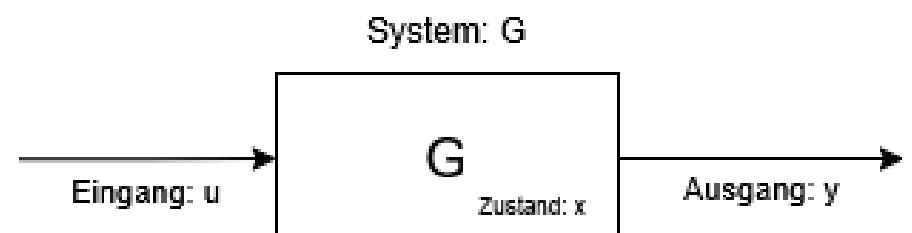


Figure 4: General: Open Loop

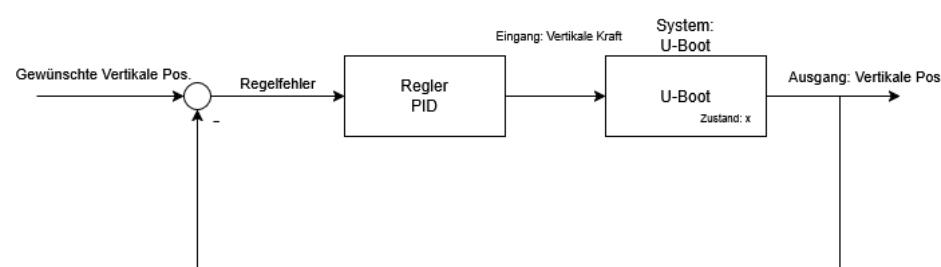
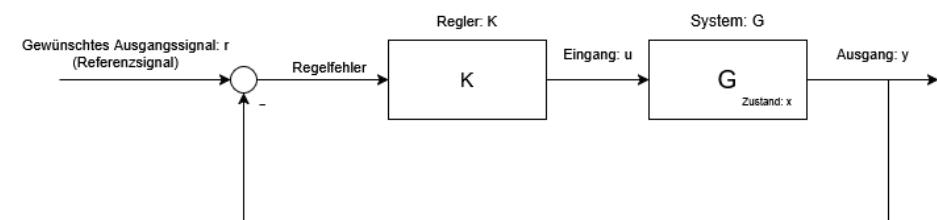
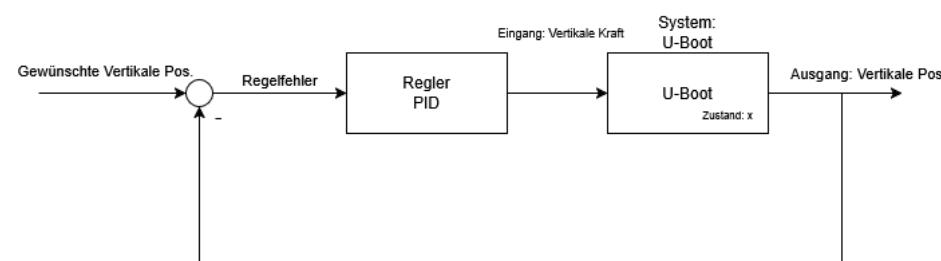
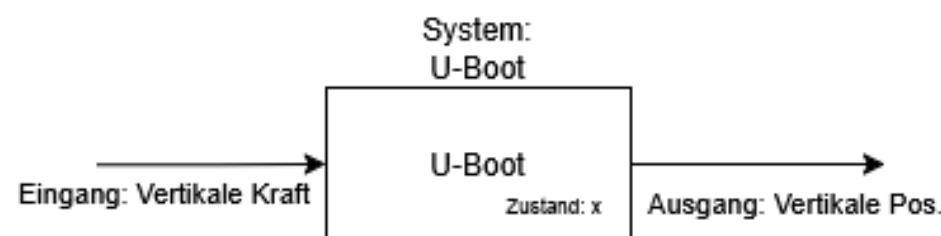


Figure 5: Submarine: Closed Loop

# U-Boot Tiefenregelung: Darstellung im Blockdiagrammdback





# Outline

Um was geht es?

Metafragen zur Kybernetik

Dynamische Systeme

Weitführende Inhalte

Beispiel: U-Boot Tiefenregelung

Weitere Konzepte

Abstraktion

Systemanalyse

Beobachter

Relevanz / Zukunft



# Warum Abstraktion?

- Systeme können durch mathematische Modelle abstrahiert werden
-



# Warum Abstraktion?

- Systeme können durch mathematische Modelle abstrahiert werden
- Erlaubt große Vielfalt von Anwendungsgebieten



# Warum Abstraktion?

- Systeme können durch mathematische Modelle abstrahiert werden
- Erlaubt große Vielfalt von Anwendungsgebieten
  - Tatsächlich U-Boot Steuerung [1], [2]
  - 
  - 
  - 
  - 
  - 
  - 
  -



# Warum Abstraktion?

- Systeme können durch mathematische Modelle abstrahiert werden
- Erlaubt große Vielfalt von Anwendungsgebieten
  - Tatsächlich U-Boot Steuerung [1], [2]
  - Flugzeug / Raketensteuerung
  - 
  - 
  - 
  - 
  -



# Warum Abstraktion?

- Systeme können durch mathematische Modelle abstrahiert werden
- Erlaubt große Vielfalt von Anwendungsgebieten
  - Tatsächlich U-Boot Steuerung [1], [2]
  - Flugzeug / Raketensteuerung
  - Chemische Reaktoren [1]
  - 
  - 
  - 
  -



# Warum Abstraktion?

- Systeme können durch mathematische Modelle abstrahiert werden
- Erlaubt große Vielfalt von Anwendungsgebieten
  - Tatsächlich U-Boot Steuerung [1], [2]
  - Flugzeug / Raketensteuerung
  - Chemische Reaktoren [1]
  - Wirtschaftssysteme
  - 
  - 
  -



# Warum Abstraktion?

- Systeme können durch mathematische Modelle abstrahiert werden
- Erlaubt große Vielfalt von Anwendungsgebieten
  - Tatsächlich U-Boot Steuerung [1], [2]
  - Flugzeug / Raketensteuerung
  - Chemische Reaktoren [1]
  - Wirtschaftssysteme
  - Verkehrswesen (zB. Verkehrsflussregelung)
  - 
  -



# Warum Abstraktion?

- Systeme können durch mathematische Modelle abstrahiert werden
- Erlaubt große Vielfalt von Anwendungsgebieten
  - Tatsächlich U-Boot Steuerung [1], [2]
  - Flugzeug / Raketensteuerung
  - Chemische Reaktoren [1]
  - Wirtschaftssysteme
  - Verkehrswesen (zB. Verkehrsflussregelung)
  - Biologische Systeme (zB. Medizintechnik, Erhalt von Ökosystemen [3])
  -



# Warum Abstraktion?

- Systeme können durch mathematische Modelle abstrahiert werden
- Erlaubt große Vielfalt von Anwendungsgebieten
  - Tatsächlich U-Boot Steuerung [1], [2]
  - Flugzeug / Raketensteuerung
  - Chemische Reaktoren [1]
  - Wirtschaftssysteme
  - Verkehrswesen (zB. Verkehrsflussregelung)
  - Biologische Systeme (zB. Medizintechnik, Erhalt von Ökosystemen [3])
  - Soziale Systeme (zB. Epidemiekontrolle: Analyse von Covid-Ausbreitung via Model Predictive Control, Uni Stuttgart [4])



# Warum Abstraktion?

- Sobald die Modellierung steht, können kybernetisch bewanderte Personen alle diese Systeme regeln, ohne Detailwissen auf den einzelnen Gebieten
- Kybernetik als “Universalwerkzeug” für viele Anwendungsgebiete



# Modellbasierte Regelung

- Finde ausreichend akkurate Modell des Systems
- 
-



# Modellbasierte Regelung

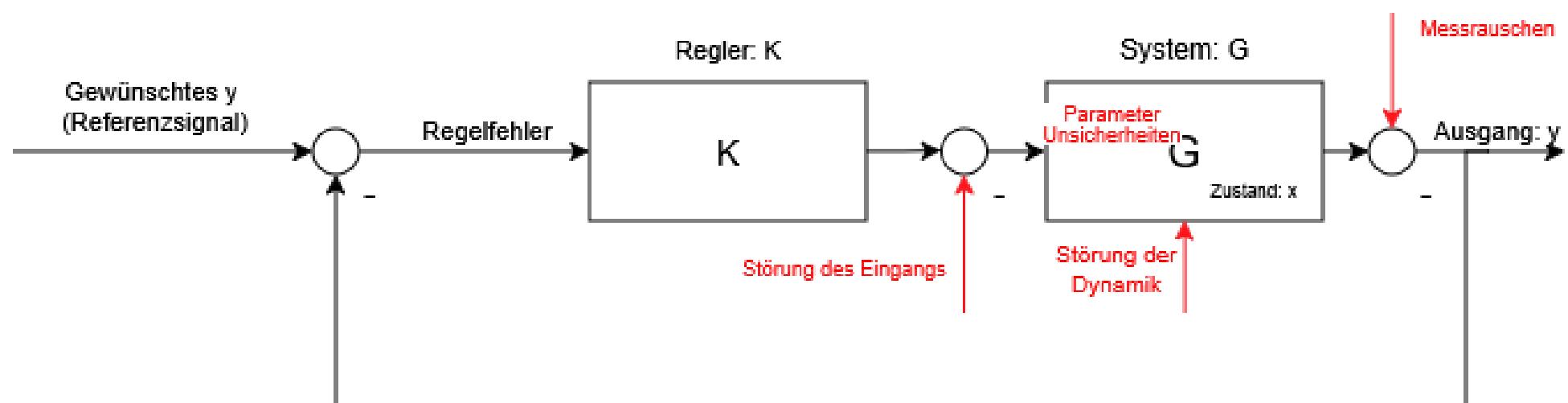
- Finde ausreichend akkurate Modell des Systems
- *“Alle Modelle sind falsch, aber manche sind nützlich” – George Box, Statistiker*
-



# Modellbasierte Regelung

- Finde ausreichend akkurate Modell des Systems
- *“Alle Modelle sind falsch, aber manche sind nützlich” – George Box, Statistiker*
- Modellierung:
  - Was muss modelliert werden (Physikalische Zusammenhänge, Logische Implikationen, etc.)
  - Welcher Detailgrad ist nötig?
  - Was kann/muss vernachlässigt werden?
  - Was muss berücksichtigt werden (Störungen, Unsicherheiten, etc.)

# Regelkreis mit Störungen





# Outline

Um was geht es?

Metafragen zur Kybernetik

Dynamische Systeme

Weitführende Inhalte

Beispiel: U-Boot Tiefenregelung

Weitere Konzepte

Abstraktion

Systemanalyse

Beobachter

Relevanz / Zukunft



# Systemidentifikation

- Wie finde ich ein Modell für ein reales System?
- 
-



# Systemidentifikation

- Wie finde ich ein Modell für ein reales System?
- Was berücksichtige ich, was nicht?
-



# Systemidentifikation

- Wie finde ich ein Modell für ein reales System?
- Was berücksichtige ich, was nicht?
- Gibt es Unsicherheiten:
  - Parameter Unsicherheiten (zB. Masse des U-Boots variiert je nach Beladung)
  - Modell Unsicherheiten (zB. Nicht modellierte Effekte wie Strömungswiderstand)
  - Messrauschen (zB. Sensoren haben begrenzte Genauigkeit)
  - ...



# Linearität

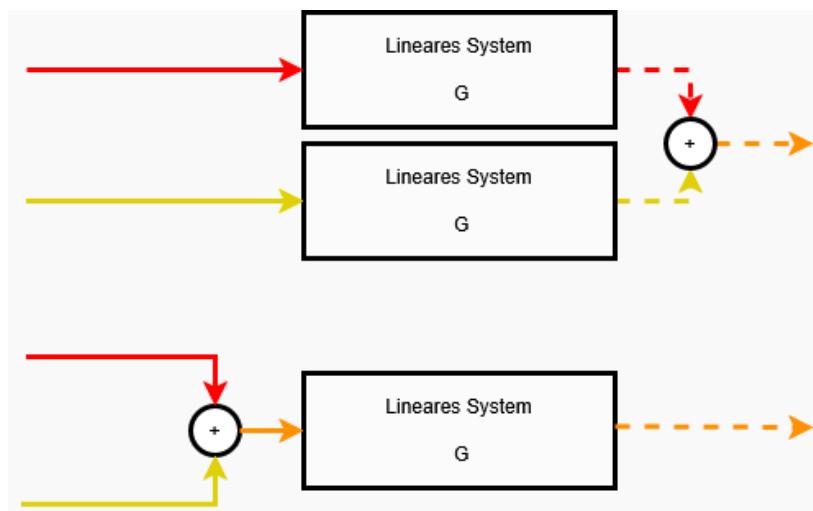
## Definition

Ein System ist **linear**, wenn es die folgenden 2 Eigenschaften erfüllt:

1. **Superposition**
2. **Homogenität**

# Linearität

**Superposition:** 2 Signale addieren und in das System einspeisen = Beide Signale jeweils einzeln ins System einspeisen und die Ergebnisse addieren

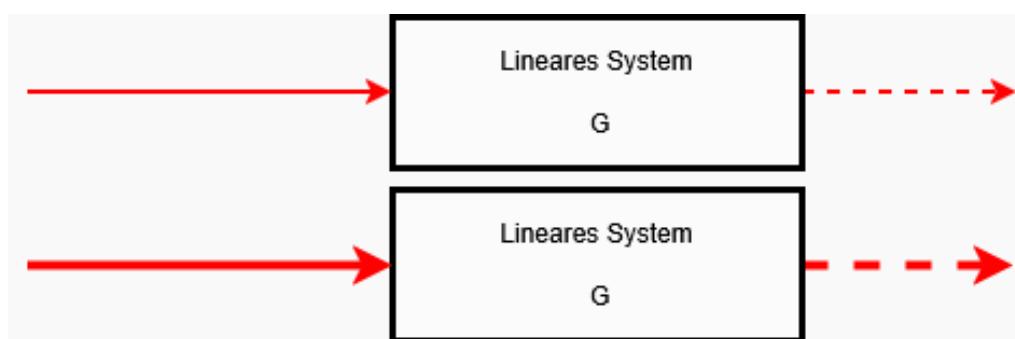


$$G(x + y) = G(x) + G(y)$$

für alle input signale  $x, y$

# Linearität

**Homogenität:** Ein Signal mit einem Faktor multiplizieren und in das System einspeisen = Das Signal ins System einspeisen und das Ergebnis mit dem Faktor multiplizieren



$$G(\alpha \cdot x) = \alpha \cdot G(x)$$

für alle input signale  $x$   
und Skalare  $a$



# Stabilität

- Gleichgewichtszustände (engl. *Equilibria*)



# Stabilität

- Gleichgewichtszustände (engl. *Equilibria*)
  - Stabil (System verbleibt in der Nähe / Strebt zurück wenn abgelenkt)
  - 
  -



# Stabilität

- Gleichgewichtszustände (engl. *Equilibria*)
  - Stabil (System verbleibt in der Nähe / Strebt zurück wenn abgelenkt)
  - Nicht Stabil (System entfernt sich weiter, wenn abgelenkt)
  -



# Stabilität

- Gleichgewichtszustände (engl. *Equilibria*)
  - Stabil (System verbleibt in der Nähe / Strebt zurück wenn abgelenkt)
  - Nicht Stabil (System entfernt sich weiter, wenn abgelenkt)
  - Grenzstabil (System bleibt in der Nähe, zB auf periodischer Bahn)



# Steuerbarkeit / Beobachtbarkeit

- Welche System Zustände können durch Eingänge beeinflusst werden?
- Welche System Zustände können durch Ausgänge gemessen werden?

Für **Lineare Systeme**: Kriterien, die (für Computer) leicht zu überprüfen sind (Kalman Matrix Rang kriterien)

**Beobachtbare** Größen können manchmal nicht direkt gemessen werden, aber dennoch rekonstruiert: Beobachter



# Outline

Um was geht es?

Metafragen zur Kybernetik

Dynamische Systeme

Weitführende Inhalte

Beispiel: U-Boot Tiefenregelung

Weitere Konzepte

Abstraktion

Systemanalyse

**Beobachter**

Relevanz / Zukunft



# Größen nicht zu messen: Was tun?

Beispiele:

- Brenntemperatur in Motor / Raketendüse
- Aktuelle nicht modellierte Störungen (zB. turbulente Luftströmungen)
- Lastmassen (zB. Passagiere in Flugzeug, Roboterarm mit Greifer)



# Beobachter: Idee

1. Rate Anfangszustand
2. Rechne simulierte systemdynamik “nebenher”
3. Berechne, was der Ausgang des simulierten Systems sein müsste
4. Vergleiche mit gemessenem Ausgang
5. Korrigiere Zustandsschätzung basierend auf Differenz



# Beobachter: Anschauliche Erklärung als Dialog

Lineares System:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

Beobachter-Simulator:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu$$

$$\hat{y} = C\hat{x} + Du$$

Abgleich, wie gut die Schätzung ist:  $|\hat{y} - y| = 0$ ?

Führe Korrektur ein:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y})$$

Mit L so gewählt, dass die Fehlerdynamik  $\dot{e} = \dot{y} - \dot{\hat{y}}$  stabile Eigenwerte hat



# Beobachter: Anschauliche Erklärung als Dialog

Hi, ich bin der Beobachter!

Lineares System:  
 $\dot{x} = Ax + Bu$

$$y = Cx + Du$$

Beobachter-Simulator:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu$$

$$\hat{y} = C\hat{x} + Du$$

Abgleich, wie gut die Schätzung ist:  $|\hat{y} - y| = 0$ ?  
Führe Korrektur ein:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y})$$

Mit  $L$  so gewählt, dass die Fehlerdynamik  $\dot{e} = \dot{y} - \dot{\hat{y}}$  stabile Eigenwerte hat



# Beobachter: Anschauliche Erklärung als Dialog

Hi, ich bin der Beobachter!

Moin, ich bin das System!

Lineares System:  
 $\dot{x} = Ax + Bu$

$y = Cx + Du$

Beobachter-Simulator:

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu$

$\hat{y} = C\hat{x} + Du$

Abgleich, wie gut die Schätzung ist:  $|\hat{y} - y| = 0$ ?  
Führe Korrektur ein:

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y})$

Mit L so gewählt, dass die Fehlerdynamik  $\dot{e} = \dot{y} - \dot{\hat{y}}$  stabile Eigenwerte hat



# Beobachter: Anschauliche Erklärung als Dialog

Hi, ich bin der Beobachter!

Moin, ich bin das System!

Was ist die Düsentemperatur?

Lineares System:  
 $\dot{x} = Ax + Bu$

$$y = Cx + Du$$

Beobachter-Simulator:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu$$

$$\hat{y} = C\hat{x} + Du$$

Abgleich, wie gut die Schätzung ist:  $|\hat{y} - y| = 0$ ?  
Führe Korrektur ein:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y})$$

Mit  $L$  so gewählt, dass die Fehlerdynamik  $\dot{e} = \dot{y} - \dot{\hat{y}}$  stabile Eigenwerte hat



# Beobachter: Anschauliche Erklärung als Dialog

Hi, ich bin der Beobachter!

Moin, ich bin das System!

Was ist die Düsentemperatur?

Ich rate mal: 1500 °C

Lineares System:  
 $\dot{x} = Ax + Bu$

$y = Cx + Du$

Beobachter-Simulator:

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu$

$\hat{y} = C\hat{x} + Du$

Abgleich, wie gut die Schätzung ist:  $|\hat{y} - y| = 0$ ?

Führe Korrektur ein:

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y})$

Mit  $L$  so gewählt, dass die Fehlerdynamik  $\dot{e} = \dot{y} - \dot{\hat{y}}$  stabile Eigenwerte hat



# Beobachter: Anschauliche Erklärung als Dialog

Hi, ich bin der Beobachter!

Moin, ich bin das System!

Was ist die Düsentemperatur?

Ich rate mal: 1500 °C

Angenommen, das würde stimmen, was wäre  
dann der Ausgangswert des Systems?

Lineares System:  
 $\dot{x} = Ax + Bu$

$y = Cx + Du$

Beobachter-Simulator:

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu$

$\hat{y} = C\hat{x} + Du$

Abgleich, wie gut die  
Schätzung ist:  $|\hat{y} - y| = 0$ ?  
Führe Korrektur ein:

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y})$

Mit  $L$  so gewählt, dass die  
Fehlerdynamik  $\dot{e} = \dot{y} - \dot{\hat{y}}$   
stabile Eigenwerte hat



# Beobachter: Anschauliche Erklärung als Dialog

Hi, ich bin der Beobachter!

Moin, ich bin das System!

Was ist die Düsentemperatur?

Ich rate mal: 1500 °C

Angenommen, das würde stimmen, was wäre  
dann der Ausgangswert des Systems?

Das wäre dann 500 000 N

Lineares System:  
 $\dot{x} = Ax + Bu$

$y = Cx + Du$

Beobachter-Simulator:

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu$

$\hat{y} = C\hat{x} + Du$

Abgleich, wie gut die  
Schätzung ist:  $|\hat{y} - y| = 0$ ?  
Führe Korrektur ein:

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y})$

Mit L so gewählt, dass die  
Fehlerdynamik  $\dot{e} = \dot{y} - \dot{\hat{y}}$   
stabile Eigenwerte hat



# Beobachter: Anschauliche Erklärung als Dialog

Lineares System:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

Beobachter-Simulator:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu$$

$$\hat{y} = C\hat{x} + Du$$

Abgleich, wie gut die

Schätzung ist:  $|\hat{y} - y| = 0$ ?

Führe Korrektur ein:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y})$$

Mit L so gewählt, dass die

Fehlerdynamik  $\dot{e} = \dot{y} - \dot{\hat{y}}$   
stabile Eigenwerte hat



# Beobachter: Anschauliche Erklärung als Dialog

Der Echte Ausgangswert ist aber nur 450 000 N

Lineares System:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

Beobachter-Simulator:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu$$

$$\hat{y} = C\hat{x} + Du$$

Abgleich, wie gut die

Schätzung ist:  $|\hat{y} - y| = 0$ ?

Führe Korrektur ein:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y})$$

Mit L so gewählt, dass die

Fehlerdynamik  $\dot{e} = \dot{y} - \dot{\hat{y}}$   
stabile Eigenwerte hat



# Beobachter: Anschauliche Erklärung als Dialog

Der Echte Ausgangswert ist aber nur 450 000 N

Ok, aus dem Unterschied (50 000N) berechne ich  
eine Korrektur

Lineares System:  
 $\dot{x} = Ax + Bu$

$y = Cx + Du$

Beobachter-Simulator:

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu$

$\hat{y} = C\hat{x} + Du$

Abgleich, wie gut die  
Schätzung ist:  $|\hat{y} - y| = 0$ ?  
Führe Korrektur ein:

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y})$

Mit L so gewählt, dass die  
Fehlerdynamik  $\dot{e} = \dot{y} - \dot{\hat{y}}$   
stabile Eigenwerte hat



# Beobachter: Anschauliche Erklärung als Dialog

Der Echte Ausgangswert ist aber nur 450 000 N

Ok, aus dem Unterschied (50 000N) berechne ich eine Korrektur

Wenn ich berechne, was mittlerweile passiert sein muss, komme ich auf eine Düsentemperatur von 1450 °C. Das würde einen Ausgangswert von 473 000 N ergeben

Lineares System:  
 $\dot{x} = Ax + Bu$

$$y = Cx + Du$$

Beobachter-Simulator:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu$$

$$\hat{y} = C\hat{x} + Du$$

Abgleich, wie gut die Schätzung ist:  $|\hat{y} - y| = 0$ ?

Führe Korrektur ein:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y})$$

Mit L so gewählt, dass die Fehlerdynamik  $\dot{e} = \dot{y} - \dot{\hat{y}}$  stabile Eigenwerte hat



# Beobachter: Anschauliche Erklärung als Dialog

Der Echte Ausgangswert ist aber nur 450 000 N

Ok, aus dem Unterschied (50 000N) berechne ich eine Korrektur

Wenn ich berechne, was mittlerweile passiert sein muss, komme ich auf eine Düsentemperatur von 1450 °C. Das würde einen Ausgangswert von 473 000 N ergeben

Der echte Ausgangswert liegt momentan bei 460 000 N. Deine Schätzung wurde also schon besser

Lineares System:  
 $\dot{x} = Ax + Bu$

$y = Cx + Du$

Beobachter-Simulator:

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu$

$\hat{y} = C\hat{x} + Du$

Abgleich, wie gut die Schätzung ist:  $|\hat{y} - y| = 0$ ?  
Führe Korrektur ein:

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y})$

Mit L so gewählt, dass die Fehlerdynamik  $\dot{e} = \dot{y} - \dot{\hat{y}}$  stabile Eigenwerte hat



# Beobachter: Anschauliche Erklärung als Dialog

Der Echte Ausgangswert ist aber nur 450 000 N

Ok, aus dem Unterschied (50 000N) berechne ich eine Korrektur

Wenn ich berechne, was mittlerweile passiert sein muss, komme ich auf eine Düsentemperatur von 1450 °C. Das würde einen Ausgangswert von 473 000 N ergeben

Der echte Ausgangswert liegt momentan bei 460 000 N. Deine Schätzung wurde also schon besser

Ok, ich passe die Schätzung die Schätzung durch eine weitere Korrektur an

Lineares System:  
 $\dot{x} = Ax + Bu$

$y = Cx + Du$

Beobachter-Simulator:

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu$

$\hat{y} = C\hat{x} + Du$

Abgleich, wie gut die Schätzung ist:  $|\hat{y} - y| = 0$ ?

Führe Korrektur ein:

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y})$

Mit L so gewählt, dass die Fehlerdynamik  $\dot{e} = \dot{y} - \hat{y}$  stabile Eigenwerte hat



# Beobachter: Anschauliche Erklärung als Dialog

Der Echte Ausgangswert ist aber nur 450 000 N

Ok, aus dem Unterschied (50 000N) berechne ich eine Korrektur

Wenn ich berechne, was mittlerweile passiert sein muss, komme ich auf eine Düsentemperatur von 1450 °C. Das würde einen Ausgangswert von 473 000 N ergeben

Der echte Ausgangswert liegt momentan bei 460 000 N. Deine Schätzung wurde also schon besser

Ok, ich passe die Schätzung die Schätzung durch eine weitere Korrektur an

... usw ...

Lineares System:  
 $\dot{x} = Ax + Bu$

$y = Cx + Du$

Beobachter-Simulator:

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu$

$\hat{y} = C\hat{x} + Du$

Abgleich, wie gut die Schätzung ist:  $|\hat{y} - y| = 0$ ?

Führe Korrektur ein:

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y})$

Mit L so gewählt, dass die Fehlerdynamik  $\dot{e} = \dot{y} - \hat{y}$  stabile Eigenwerte hat



# Outline

Um was geht es?

Metafragen zur Kybernetik

Dynamische Systeme

Weitführende Inhalte

Beispiel: U-Boot Tiefenregelung

Weitere Konzepte

Abstraktion

Systemanalyse

Beobachter

Relevanz / Zukunft



# Jetzt haben wir KI: Brauchen wir noch Kontrolltheorie?

- **Vorteile von KI Methoden:**

- Lernen aus großen Mengen von Daten. Mechanismen / Modelle müssen nicht mehr von Menschen verstanden werden
- Computertechnologie hat potentielle Anwendungsgebiete stark ausgeweitet -> “Probleme mit Rechenpower erschlagen”
- Kontrolltheoretische Methoden wurden in manchen Bereichen durch KI abgelöst
  - Computer Vision
  - Autonomes Fahren “*End to End*”

# Jetzt haben wir KI: Brauchen wir noch Kontrolltheorie?

- Machine Learning / LLM Modelle sind meistens “Black Boxen”
- KI Algorithmen sind oft sehr **unrobust** gegenüber Störungen. Beispiel: Bilderkennung [5]

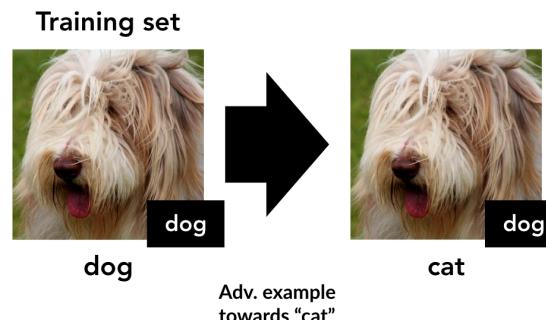


Figure 1: Kleine Störung, große Wirkung, von: <https://gradientscience.org/adv/>

- Schwächen der KI Algorithmen oft schwer vorrauszusagen
- KI Integrität / Sicherheit oft schwer zu garantieren (“*Dieser Flug wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 98% nicht abstürzen*”)



# Also doch Kontrolltheorie

- Kontrolltheorie über vernetzte Systeme kann zu robustem KI Design beitragen
- KI braucht riesige Datenmengen für Training, Kontrolltheorie kann helfen, Daten effizienter zu nutzen
  - Bsp. Individuelle Krebsbehandlung [6])
    - Medikation muss individuell auf jeden Patienten angepasst werden
    - Unmöglich, für jeden Patienten riesige Datenmengen zu sammeln
    - Kontrolltheoretische Methoden der Konvexen Optimierung [7] können helfen, verbesserte Behandlungsstrategien zu finden
  - Optimierungsisierte Algorithmen z.B. im reinforcement Learning Neuronaler Netze



# Outline

Um was geht es?

**Metafragen zur Kybernetik**

Dynamische Systeme

Weitführende Inhalte

Beispiel: U-Boot Tiefenregelung

Weitere Konzepte

Abstraktion

Systemanalyse

Beobachter

Relevanz / Zukunft



# Metafragen zur Kybernetik



# Metafragen zur Kybernetik

- Löst Kybernetik alle Probleme?
- 
-



# Metafragen zur Kybernetik

- Löst Kybernetik alle Probleme?
- Ist alles gut, was kybernetisch geregelt ist / wo Kybernetik draufsteht?
-



# Metafragen zur Kybernetik

- Löst Kybernetik alle Probleme?
- Ist alles gut, was kybernetisch geregelt ist / wo Kybernetik draufsteht?
- Kann man alles als Kybernetisches System modellieren? Hilft das?



# Outline

Um was geht es?

Metafragen zur Kybernetik

Dynamische Systeme

Weitführende Inhalte

Beispiel: U-Boot Tiefenregelung

Weitere Konzepte

Abstraktion

Systemanalyse

Beobachter

Relevanz / Zukunft



# Wo kann ich mehr dazu finden?

- Einstiegsthema: Lineare Kontrolltheorie / linear control
- Vorlesung Uni Washington: **Linear Systems (UW ME 547)**, <https://faculty.washington.edu/chx/teaching/me547/>
- Youtube Video Serie **Control Systems in Practice**, Mathworks: <https://youtu.be/ApMz1-MK9IQ?si=CdSrJPCsdLwsGXnT>
- Podcast **inControl**, Alberto Padoan, Interviews mit führenden Experten über deren jeweiliges Spezialgebiet: <https://www.incontrolpodcast.com/>



# Quellen

## Bibliography

- [1] W. LOHMILLER and J.-J. E. SLOTINE, “On Contraction Analysis for Non-linear Systems,” *Automatica*, vol. 34, no. 6, pp. 683–696, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(98\)00019-3](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(98)00019-3).
- [2] E. Fiorelli, N. E. Leonard, P. Bhatta, D. A. Paley, R. Bachmayer, and D. M. Fratantoni, “Multi-AUV Control and Adaptive Sampling in Monterey Bay,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 935–948, 2006, doi: [10.1109/JOE.2006.880429](https://doi.org/10.1109/JOE.2006.880429).
- [3] A. J. Lotka, “ELEMENTS OF PHYSICAL BIOLOGY,” *Science Progress in the Twentieth Century (1919-1933)*, vol. 21, no. 82, pp. 341–343, 1926, Accessed: Dec. 19, 2025. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/43430362>



# Quellen

- J. Köhler, L. Schwenkel, A. Koch, J. Berberich, P. Pauli, and F. Allgöwer, “Robust and [4] optimal predictive control of the COVID-19 outbreak,” *Annual Reviews in Control*, vol. 51, pp. 525–539, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.11.002>.
- A. Ilyas, S. Santurkar, D. Tsipras, L. Engstrom, B. Tran, and A. Madry, “Adversarial [5] Examples Are Not Bugs, They Are Features.” [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1905.02175>
- G. Giordano, A. Rantzer, and V. D. Jonsson, “A convex optimization approach to cancer treatment to address tumor heterogeneity and imperfect drug penetration in [6] physiological compartments,” in *2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control, CDC 2016*, United States: IEEE - Institute of Electrical, Electronics Engineers Inc., Dec. 2016, pp. 2494–2500. doi: <10.1109/CDC.2016.7798636>.
- [7] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.

# Software



- python: <https://www.python.org/>
- pymunk: <https://pymunk.org/>
- pygame: <https://www.pygame.org/>
- python.control: <https://python-control.readthedocs.io/en/latest/>
- Präsentation: **typst touying theme** <https://typst.app/universe/package/touying/>
- Programmcode für Simulationen: <https://github.com/Dummyrunner/DynamicSimulationDemo>