

Visualisierung der Hysterese von Kipppunkten

Impulsvortrag mit anschließender Diskussion



Letters for Future, 30. September 2023

The likelihood and impacts of abrupt and/or irreversible changes in the climate system, including changes triggered when tipping points are reached, increase with further global warming (*high confidence*).

Die Wahrscheinlichkeit und die Auswirkungen abrupter und/oder unumkehrbarer Änderungen im Klimasystem, einschließlich solcher Änderungen, die ausgelöst werden, wenn Kipppunkte erreicht werden, nehmen mit der weiteren globalen Erwärmung zu (*hohe Sicherheit*).

IPCC Climate Change 2023 Synthesis Report (Summary for Policymakers), B3.2, Seite 18¹

Motivation & Ziele II

Motivation & Ziele II

- Was ist eine *Rückkopplung* (engl. *feedback*)?

Motivation & Ziele II

- Was ist eine *Rückkopplung* (engl. *feedback*)?
- Was ist ein *Kipppunkt* (engl. *tipping point*)?

Motivation & Ziele II

- Was ist eine *Rückkopplung* (engl. *feedback*)?
- Was ist ein *Kipppunkt* (engl. *tipping point*)?
- Was ist ein *Kippelement* (engl. *tipping element*)?

Motivation & Ziele II

- Was ist eine *Rückkopplung* (engl. *feedback*)?
- Was ist ein *Kipppunkt* (engl. *tipping point*)?
- Was ist ein *Kippelement* (engl. *tipping element*)?
- Welche Beispiele gibt es?

Motivation & Ziele II

- Was ist eine *Rückkopplung* (engl. *feedback*)?
- Was ist ein *Kipppunkt* (engl. *tipping point*)?
- Was ist ein *Kippelement* (engl. *tipping element*)?
- Welche Beispiele gibt es?
- Was sind die grundsätzlichen Eigenschaften?

Motivation & Ziele II

- Was ist eine *Rückkopplung* (engl. *feedback*)?
- Was ist ein *Kipppunkt* (engl. *tipping point*)?
- Was ist ein *Kippelement* (engl. *tipping element*)?
- Welche Beispiele gibt es?
- Was sind die grundsätzlichen Eigenschaften?
- Warum können die Auswirkungen *abrupt* sein?

Motivation & Ziele II

- Was ist eine *Rückkopplung* (engl. *feedback*)?
- Was ist ein *Kipppunkt* (engl. *tipping point*)?
- Was ist ein *Kippelement* (engl. *tipping element*)?
- Welche Beispiele gibt es?
- Was sind die grundsätzlichen Eigenschaften?
- Warum können die Auswirkungen *abrupt* sein?
- Warum können die Auswirkungen *irreversibel* sein?

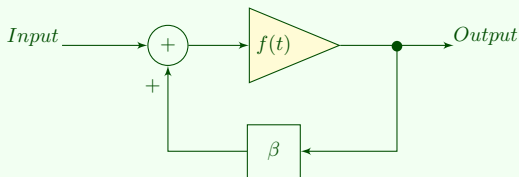
Motivation & Ziele II

- Was ist eine *Rückkopplung* (engl. *feedback*)?
- Was ist ein *Kipppunkt* (engl. *tipping point*)?
- Was ist ein *Kippelement* (engl. *tipping element*)?
- Welche Beispiele gibt es?
- Was sind die grundsätzlichen Eigenschaften?
- Warum können die Auswirkungen *abrupt* sein?
- Warum können die Auswirkungen *irreversibel* sein?
- Welche weiteren Besonderheiten können auftreten?

Rückkopplung I

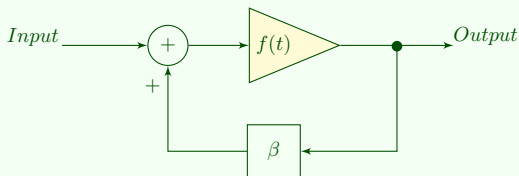
Rückkopplung I

- *Mitkopplung* oder *positive Rückkopplung*



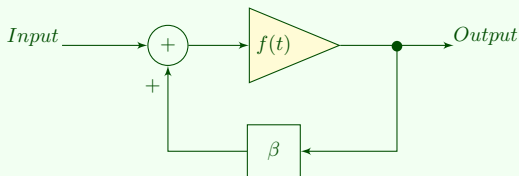
Rückkopplung I

- *Mitkopplung* oder *positive* Rückkopplung
 - Ggf. aufschaukelnd verstärkende Wirkung



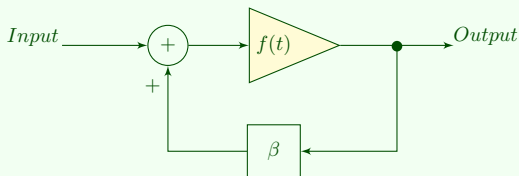
Rückkopplung I

- *Mitkopplung* oder *positive* Rückkopplung
 - Ggf. aufschaukelnd verstärkende Wirkung
 - Beispiele:



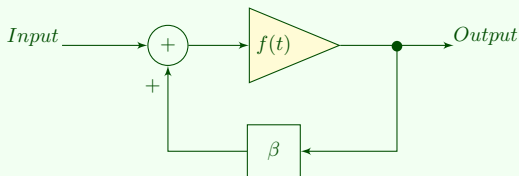
Rückkopplung I

- *Mitkopplung* oder *positive* Rückkopplung
 - Ggf. aufschaukelnd verstärkende Wirkung
 - Beispiele:
 - „Pfeifendes“ Mikro



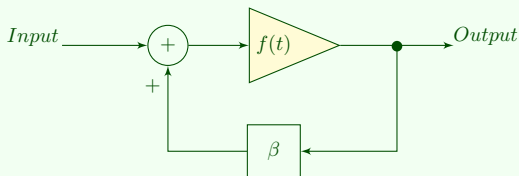
Rückkopplung I

- *Mitkopplung* oder *positive* Rückkopplung
 - Ggf. aufschaukelnd verstärkende Wirkung
 - Beispiele:
 - „Pfeifendes“ Mikro
 - Explosion



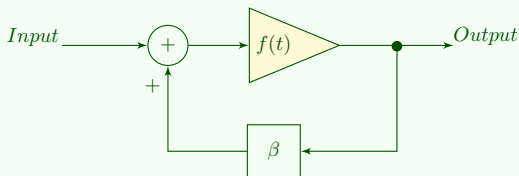
Rückkopplung I

- *Mitkopplung* oder *positive* Rückkopplung
 - Ggf. aufschaukelnd verstärkende Wirkung
 - Beispiele:
 - „Pfeifendes“ Mikro
 - Explosion
 - Lawine



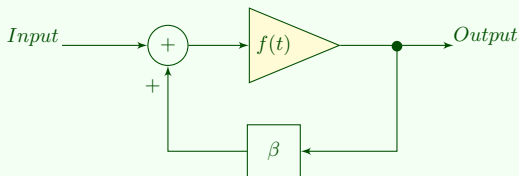
Rückkopplung I

- *Mitkopplung* oder *positive* Rückkopplung
 - Ggf. aufschaukelnd verstärkende Wirkung
 - Beispiele:
 - „Pfeifendes“ Mikro
 - Explosion
 - Lawine
 - **Laser**



Rückkopplung I

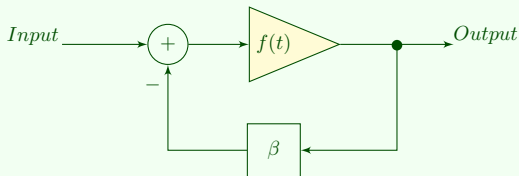
- *Mitkopplung* oder *positive* Rückkopplung
 - Ggf. aufschaukelnd verstärkende Wirkung
 - Beispiele:
 - „Pfeifendes“ Mikro
 - Explosion
 - Lawine
 - Laser
 - Zinseszinsen



Rückkopplung II

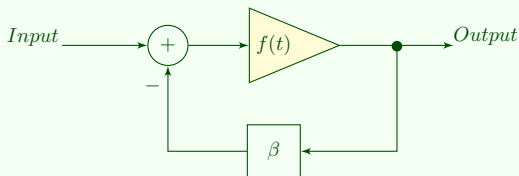
Rückkopplung II

- *Gegenkopplung* oder *negative Rückkopplung*



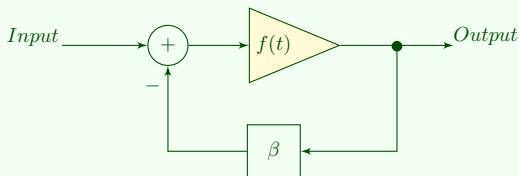
Rückkopplung II

- *Gegenkopplung* oder *negative Rückkopplung*
 - Abschwächende, dämpfende Wirkung



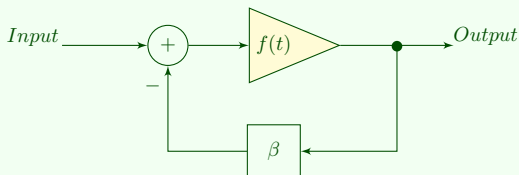
Rückkopplung II

- *Gegenkopplung* oder *negative* Rückkopplung
 - Abschwächende, dämpfende Wirkung
 - Beispiele:



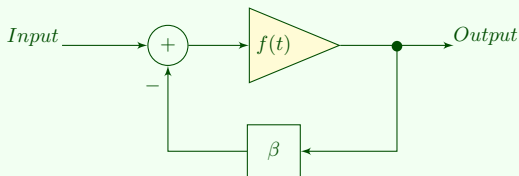
Rückkopplung II

- *Gegenkopplung* oder *negative* Rückkopplung
 - Abschwächende, dämpfende Wirkung
 - Beispiele:
 - Technischer Regelkreis:



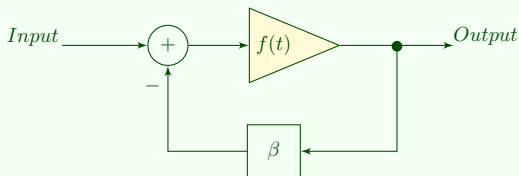
Rückkopplung II

- *Gegenkopplung* oder *negative* Rückkopplung
 - Abschwächende, dämpfende Wirkung
 - Beispiele:
 - Technischer Regelkreis:
Temperaturregler / Thermostat (Kühlschrank, Heizung)



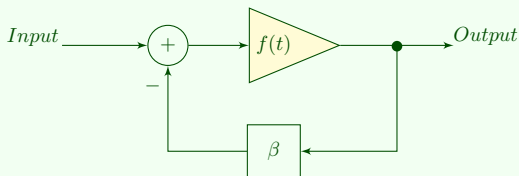
Rückkopplung II

- *Gegenkopplung* oder *negative* Rückkopplung
 - Abschwächende, dämpfende Wirkung
 - Beispiele:
 - Technischer Regelkreis:
Temperaturregler / Thermostat (Kühlschrank, Heizung)
Spannungsregler / *stabilisiertes Netzteil*



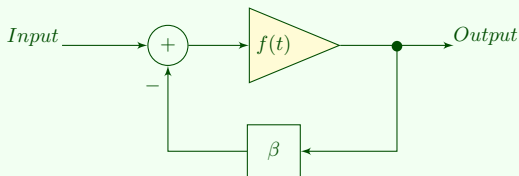
Rückkopplung II

- *Gegenkopplung* oder *negative* Rückkopplung
 - Abschwächende, dämpfende Wirkung
 - Beispiele:
 - Technischer Regelkreis:
 - Temperaturregler / Thermostat (Kühlschrank, Heizung)
 - Spannungsregler / stabilisiertes Netzteil
 - Fliehkraftregler



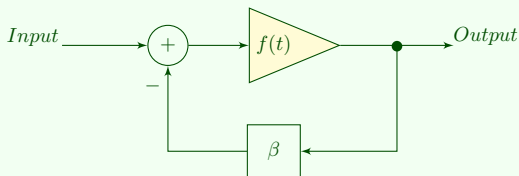
Rückkopplung II

- *Gegenkopplung* oder *negative* Rückkopplung
 - Abschwächende, dämpfende Wirkung
 - Beispiele:
 - Technischer Regelkreis:
 - Temperaturregler / Thermostat (Kühlschrank, Heizung)
 - Spannungsregler / stabilisiertes Netzteil
 - Fliehkraftregler
 - Noise Cancelling



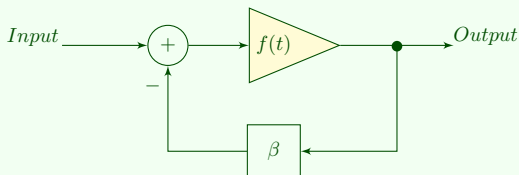
Rückkopplung II

- *Gegenkopplung* oder *negative* Rückkopplung
 - Abschwächende, dämpfende Wirkung
 - Beispiele:
 - Technischer Regelkreis:
 - Temperaturregler / Thermostat (Kühlschrank, Heizung)
 - Spannungsregler / stabilisiertes Netzteil
 - Fliehkraftregler
 - Noise Cancelling
 - Schilddrüsenfunktion



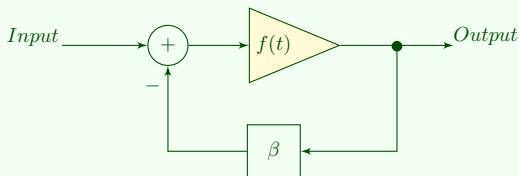
Rückkopplung II

- *Gegenkopplung* oder *negative* Rückkopplung
 - Abschwächende, dämpfende Wirkung
 - Beispiele:
 - Technischer Regelkreis:
 - Temperaturregler / Thermostat (Kühlschrank, Heizung)
 - Spannungsregler / stabilisiertes Netzteil
 - Fliehkraftregler
 - Noise Cancelling
 - Schilddrüsenfunktion
 - Angebot und Nachfrage



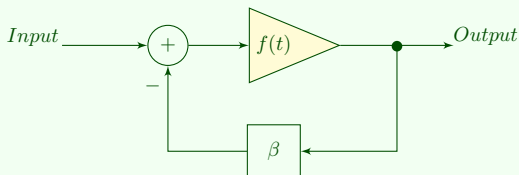
Rückkopplung II

- *Gegenkopplung* oder *negative Rückkopplung*
 - Abschwächende, dämpfende Wirkung
 - Beispiele:
 - Technischer Regelkreis:
 - Temperaturregler / Thermostat (Kühlschrank, Heizung)
 - Spannungsregler / stabilisiertes Netzteil
 - Fliehkraftregler
 - Noise Cancelling
 - Schilddrüsenfunktion
 - Angebot und Nachfrage
 - Temperaturkompensation, Frequenzkompensation (Harrison H4)



Rückkopplung II

- *Gegenkopplung* oder *negative Rückkopplung*
 - Abschwächende, dämpfende Wirkung
 - Beispiele:
 - Technischer Regelkreis:
 - Temperaturregler / Thermostat (Kühlschrank, Heizung)
 - Spannungsregler / stabilisiertes Netzteil
 - Fliehkraftregler
 - Noise Cancelling
 - Schilddrüsenfunktion
 - Angebot und Nachfrage
 - Temperaturkompensation, Frequenzkompensation (Harrison H4)
 - Autofokus (Flankendiskriminator)



Kipppunkt

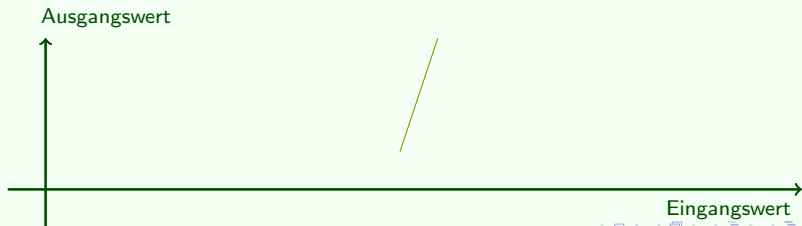
- Mitkopplung



Kipppunkt

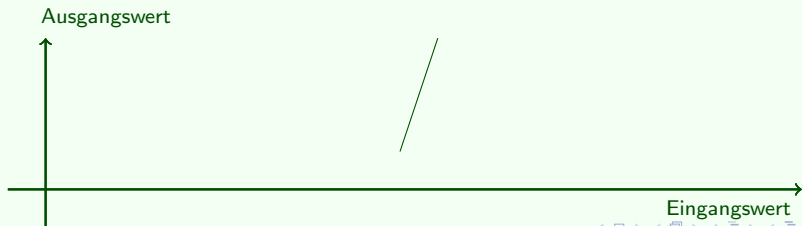
- Mitkopplung

⇒ hohe Verstärkung, steile Flanke



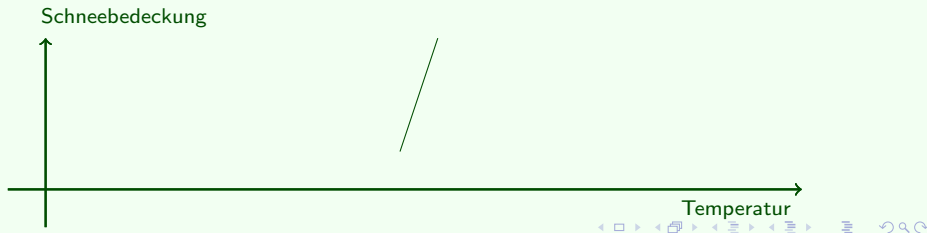
Kipppunkt

- Mitkopplung
⇒ hohe Verstärkung, steile Flanke
- Sättigung: Ausgangsgröße ggf. begrenzt (physikal. Limit)



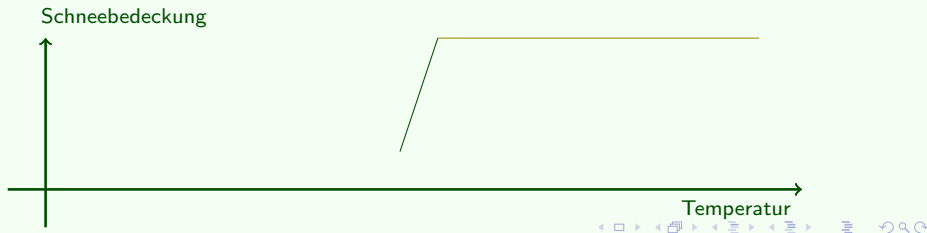
Kipppunkt

- Mitkopplung
 - ⇒ hohe Verstärkung, steile Flanke
- Sättigung: Ausgangsgröße ggf. begrenzt (physikal. Limit)
 - Beispiel: Schneebedeckung in niederschlagsreichem Gebiet



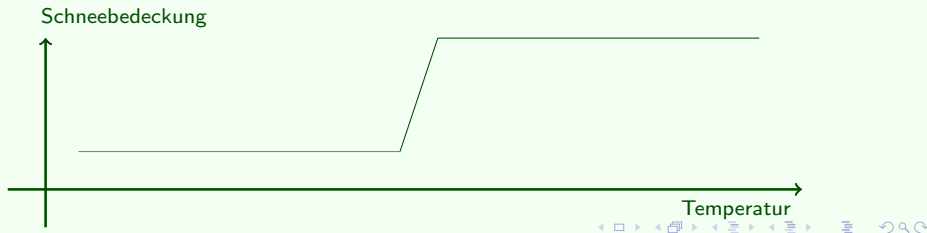
Kipppunkt

- Mitkopplung
 - ⇒ hohe Verstärkung, steile Flanke
- Sättigung: Ausgangsgröße ggf. begrenzt (physikal. Limit)
 - Beispiel: Schneebedeckung in niederschlagsreichem Gebiet
 - maximal 100% Schneebedeckung



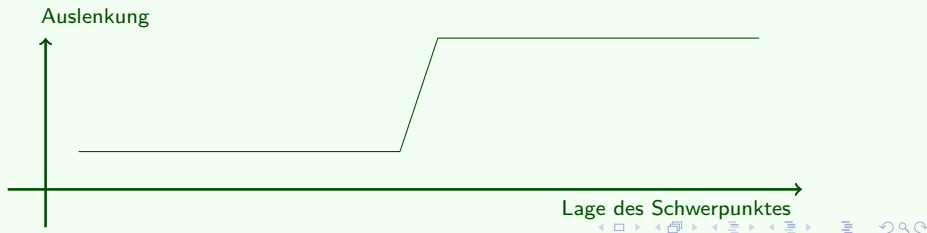
Kipppunkt

- Mitkopplung
 - ⇒ hohe Verstärkung, steile Flanke
- Sättigung: Ausgangsgröße ggf. begrenzt (physikal. Limit)
 - Beispiel: Schneebedeckung in niederschlagsreichem Gebiet
 - maximal 100% Schneebedeckung
 - minimal 0% Schneebedeckung



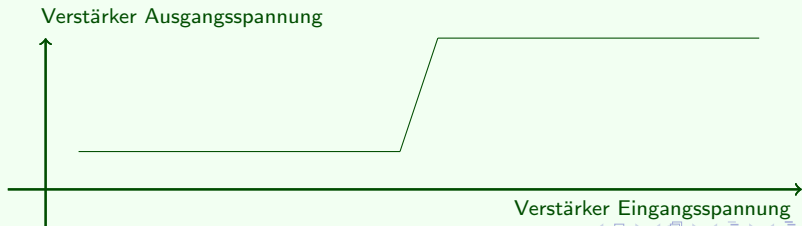
Kipppunkt

- Mitkopplung
⇒ hohe Verstärkung, steile Flanke
- Sättigung: Ausgangsgröße ggf. begrenzt (physikal. Limit)
 - Beispiel: Schneebedeckung in niederschlagsreichem Gebiet
 - maximal 100% Schneebedeckung
 - minimal 0% Schneebedeckung
 - Beispiel Wippe: Begrenzte Auslenkung



Kipppunkt

- Mitkopplung
 - ⇒ hohe Verstärkung, steile Flanke
- Sättigung: Ausgangsgröße ggf. begrenzt (physikal. Limit)
 - Beispiel: Schneebedeckung in niederschlagsreichem Gebiet
 - maximal 100% Schneebedeckung
 - minimal 0% Schneebedeckung
 - Beispiel Wippe: Begrenzte Auslenkung
 - Beispiel OpAmp: Ausgangsspannung innerhalb Versorgungsspannung



Kippunkt

- Mitkopplung

⇒ hohe Verstärkung, steile Flanke

- Sättigung: Ausgangsgröße ggf. begrenzt (physikal. Limit)

- Beispiel: Schneebedeckung in niederschlagsreichem Gebiet

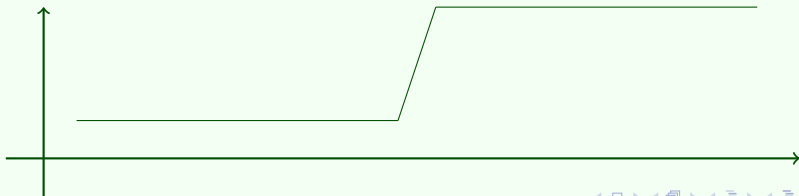
- maximal 100% Schneebedeckung

- minimal 0% Schneebedeckung

- Beispiel Wippe: Begrenzte Auslenkung

- Beispiel OpAmp: Ausgangsspannung innerhalb Versorgungsspannung

⇒ Schwellwert in System mit zwei (oder mehr) Zuständen



Kipppunkt

- Mitkopplung

⇒ hohe Verstärkung, steile Flanke

- Sättigung: Ausgangsgröße ggf. begrenzt (physikal. Limit)

- Beispiel: Schneebedeckung in niederschlagsreichem Gebiet

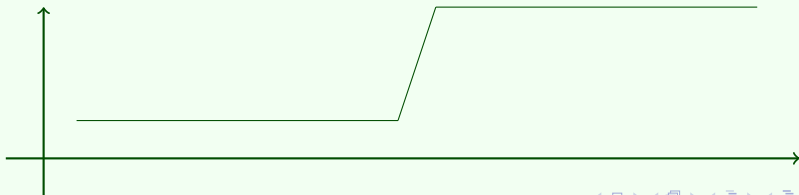
- maximal 100% Schneebedeckung
 - minimal 0% Schneebedeckung

- Beispiel Wippe: Begrenzte Auslenkung

- Beispiel OpAmp: Ausgangsspannung innerhalb Versorgungsspannung

⇒ Schwellwert in System mit zwei (oder mehr) Zuständen

⇒ rascher Zustandswechsel bei Schwellwertüberschreitung
(Kipppunkt)



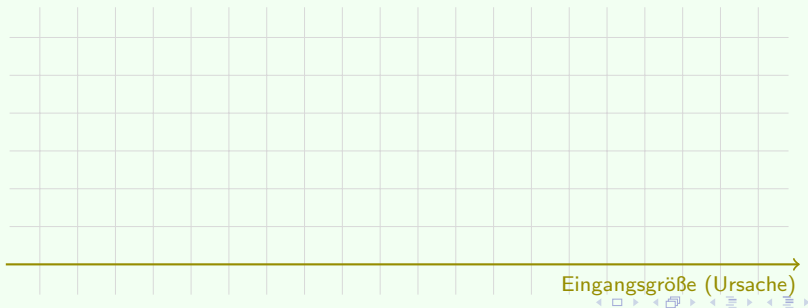
Kipppunkt?

Erstes, naives Modell: Einzelne abrupte Schwelle

Kipppunkt?

Erstes, naives Modell: Einzelne abrupte Schwelle

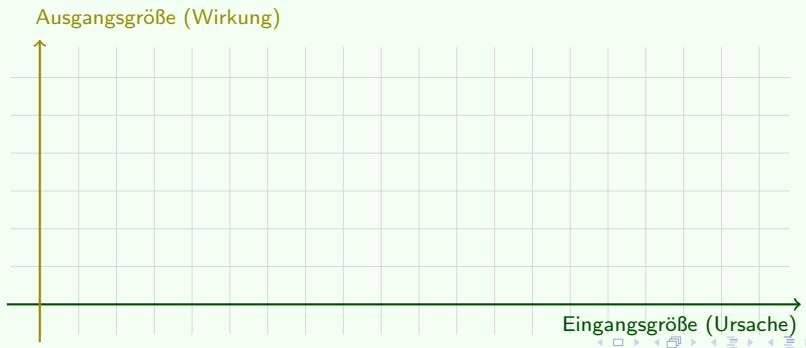
- Eingehende Größe (z.B. Last auf Wippe, CO_2 -Gehalt der Luft)



Kipppunkt?

Erstes, naives Modell: Einzelne abrupte Schwelle

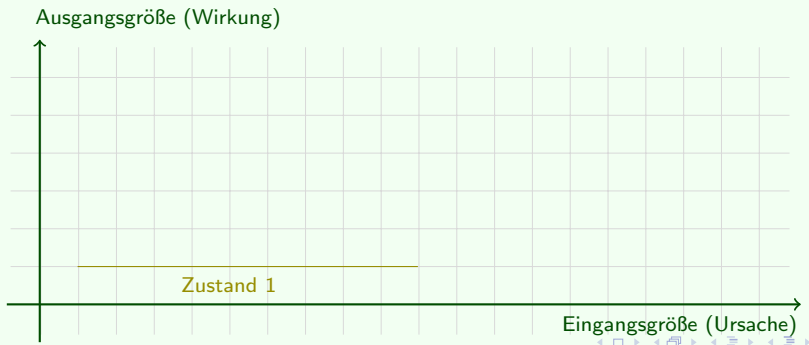
- Eingehende Größe (z.B. Last auf Wippe, CO_2 -Gehalt der Luft)
- Ausgehende Größe (Neigung der Wippe, Erderwärmung)



Kipppunkt?

Erstes, naives Modell: Einzelne abrupte Schwelle

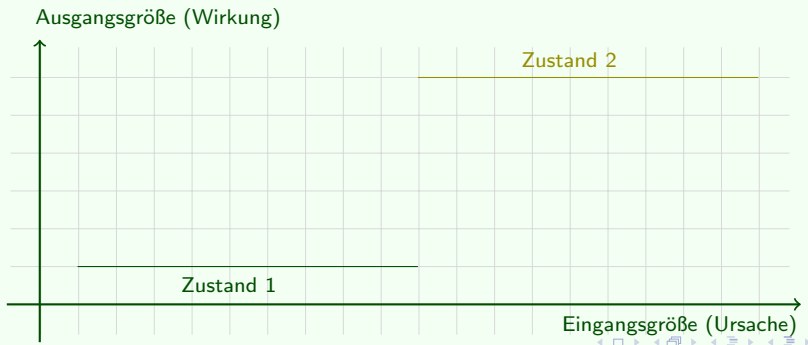
- Eingehende Größe (z.B. Last auf Wippe, CO_2 -Gehalt der Luft)
- Ausgehende Größe (Neigung der Wippe, Erderwärmung)
- Zustand 1 (Neigung zu einer Seite, kälteres Klima)



Kippunkt?

Erstes, naives Modell: Einzelne abrupte Schwelle

- Eingehende Größe (z.B. Last auf Wippe, CO_2 -Gehalt der Luft)
- Ausgehende Größe (Neigung der Wippe, Erderwärmung)
- Zustand 1 (Neigung zu einer Seite, kälteres Klima)
- Zustand 2 (Neigung zur anderen Seite, wärmeres Klima)

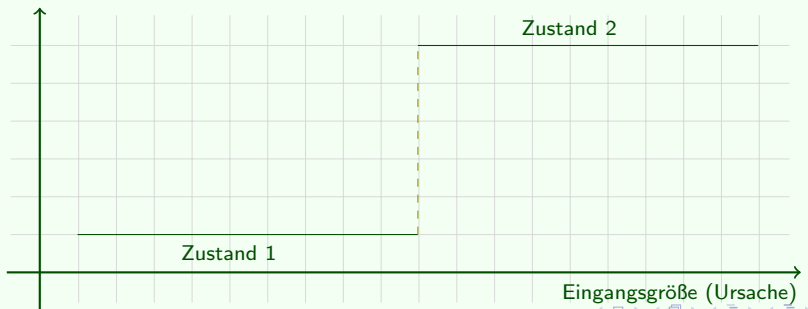


Kippunkt?

Erstes, naives Modell: Einzelne abrupte Schwelle

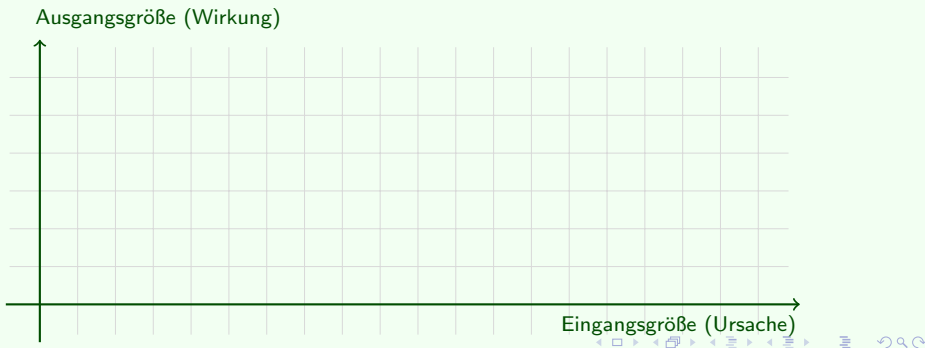
- Eingehende Größe (z.B. Last auf Wippe, CO₂-Gehalt der Luft)
- Ausgehende Größe (Neigung der Wippe, Erderwärmung)
- Zustand 1 (Neigung zu einer Seite, kälteres Klima)
- Zustand 2 (Neigung zur anderen Seite, wärmeres Klima)
- Abrupter Zustandswechsel (*Kippunkt*)

Ausgangsgröße (Wirkung)



Kippelement!

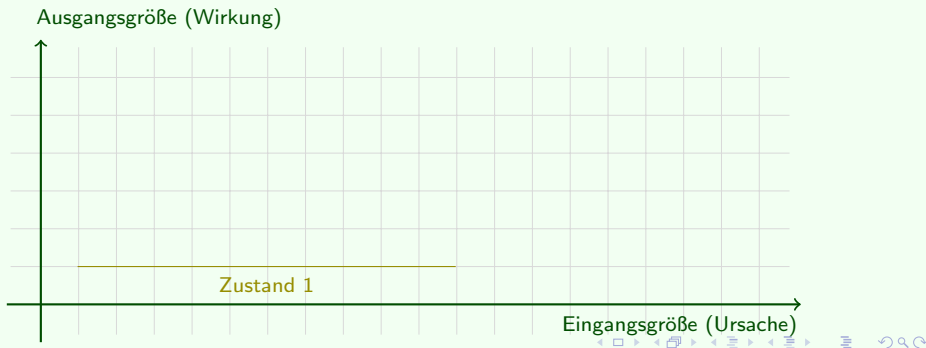
Verfeinertes Modell: Hysterese



Kippelement!

Verfeinertes Modell: Hysterese

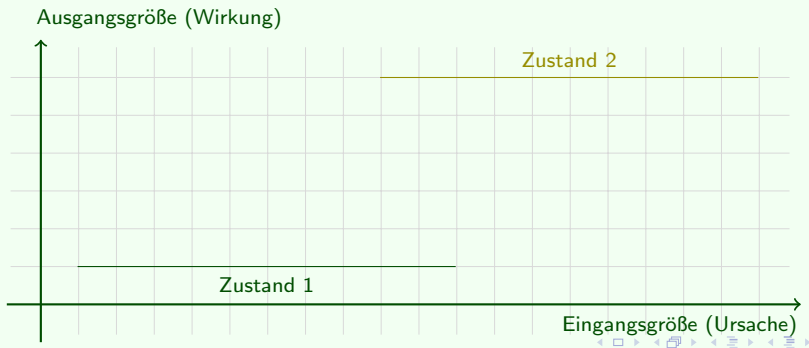
- Zustand 1 (Neigung zu einer Seite, kälteres Klima)



Kippelement!

Verfeinertes Modell: Hysterese

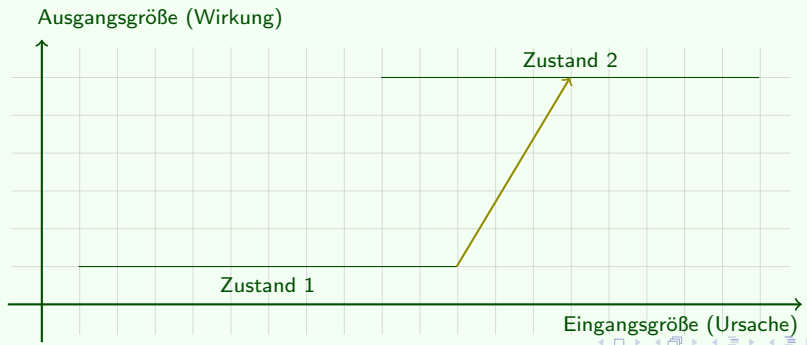
- Zustand 1 (Neigung zu einer Seite, kälteres Klima)
- Zustand 2 (Neigung zur anderen Seite, wärmeres Klima)



Kippelement!

Verfeinertes Modell: Hysterese

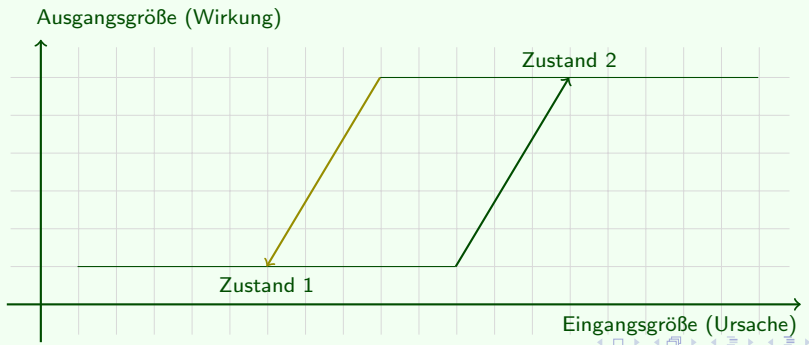
- Zustand 1 (Neigung zu einer Seite, kälteres Klima)
- Zustand 2 (Neigung zur anderen Seite, wärmeres Klima)
- *Wechselbereich* Zustandsübergang 1 → 2



Kippelement!

Verfeinertes Modell: Hysterese

- Zustand 1 (Neigung zu einer Seite, kälteres Klima)
- Zustand 2 (Neigung zur anderen Seite, wärmeres Klima)
- Wechselbereich Zustandsübergang 1 → 2
- Wechselbereich Zustandsübergang 2 → 1

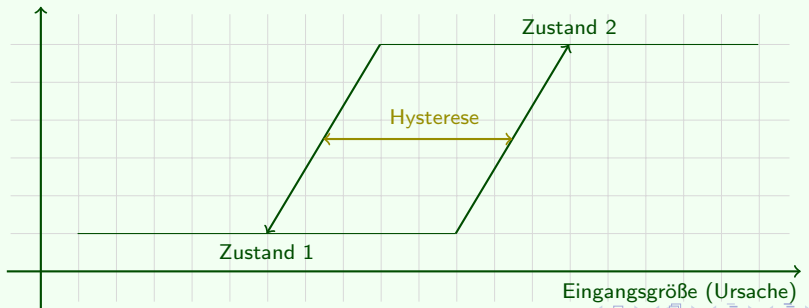


Kippelement!

Verfeinertes Modell: Hysterese

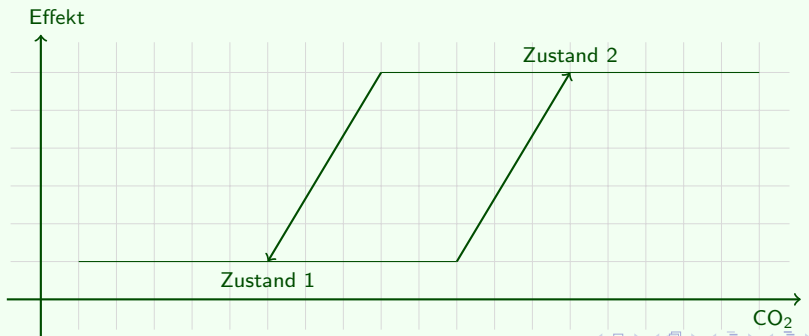
- Zustand 1 (Neigung zu einer Seite, kälteres Klima)
- Zustand 2 (Neigung zur anderen Seite, wärmeres Klima)
- Wechselbereich Zustandsübergang $1 \rightarrow 2$
- Wechselbereich Zustandsübergang $2 \rightarrow 1$
- \Rightarrow statt *Kipppunkt* besser: *Kippelement* mit *Hysterese*

Ausgangsgröße (Wirkung)



„Point of No Return“ („PNR“)?

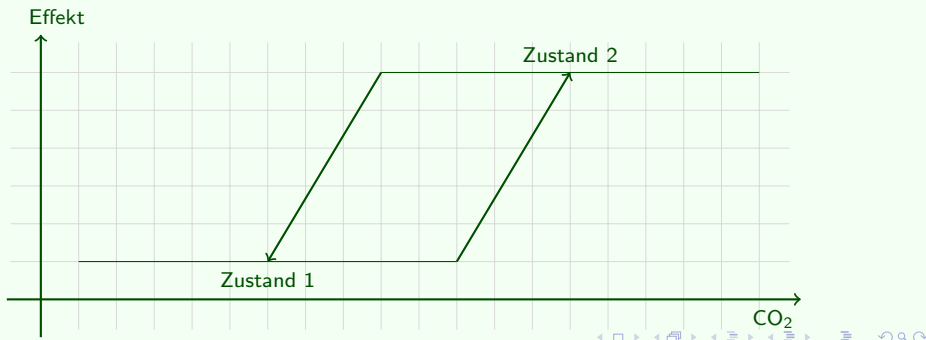
Ab wann geht es realistischerweise nicht mehr zurück?



„Point of No Return“ („PNR“)?

Ab wann geht es realistischerweise nicht mehr zurück?

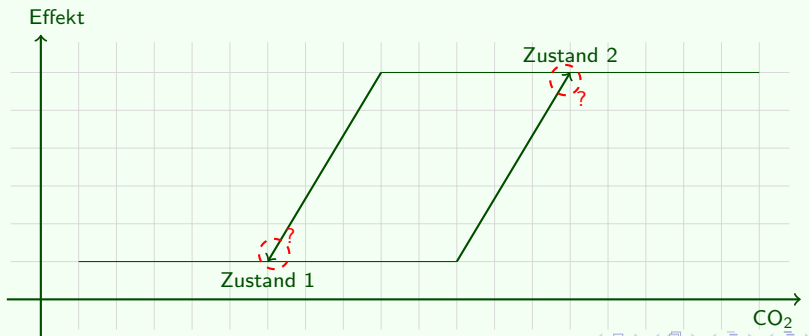
- Im Modell



„Point of No Return“ („PNR“)?

Ab wann geht es realistischerweise nicht mehr zurück?

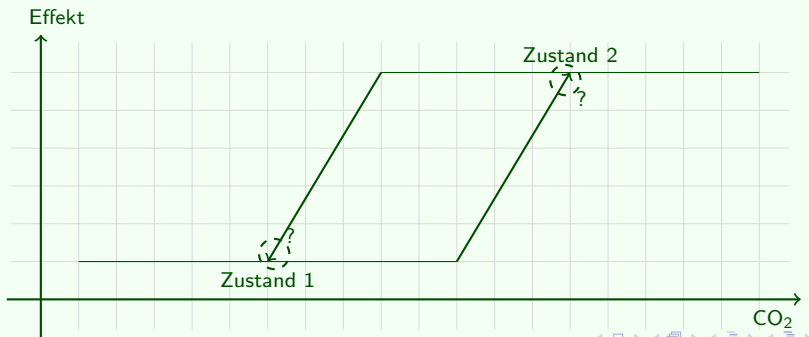
- Im Modell
 - Bei Verlassen des Hysteresebereichs?



„Point of No Return“ („PNR“)?

Ab wann geht es realistischerweise nicht mehr zurück?

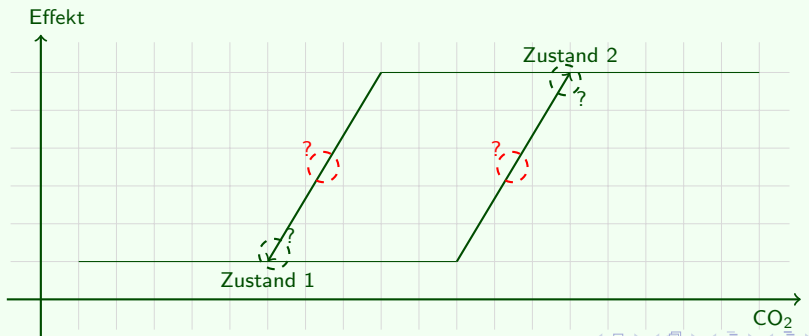
- Im Modell
 - Bei Verlassen des Hysteresebereichs?
- In Realität, Beispiel präparierte Wippe mit Kugel



„Point of No Return“ („PNR“)?

Ab wann geht es realistischerweise nicht mehr zurück?

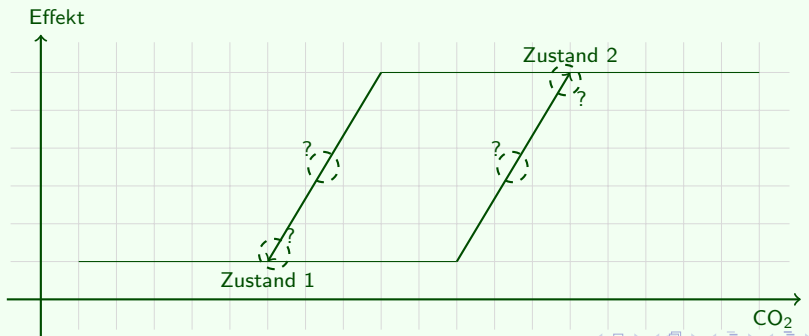
- Im Modell
 - Bei Verlassen des Hysteresebereichs?
- In Realität, Beispiel präparierte Wippe mit Kugel
 - Ggf. deutlich früher?



„Point of No Return“ („PNR“)?

Ab wann geht es realistischerweise nicht mehr zurück?

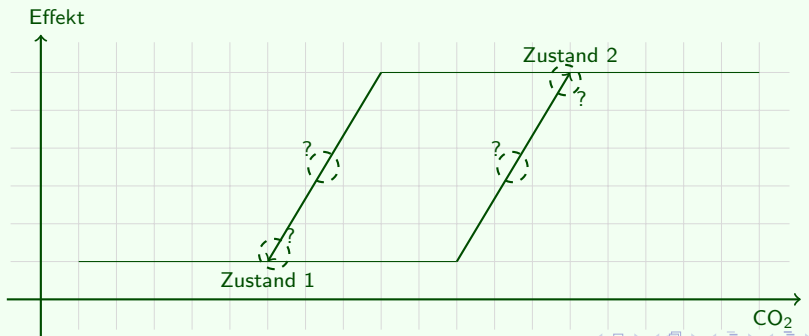
- Im Modell
 - Bei Verlassen des Hysteresebereichs?
- In Realität, Beispiel präparierte Wippe mit Kugel
 - Ggf. deutlich früher?
 - **Zusatzherausforderung der trägen Kugel**



„Point of No Return“ („PNR“)?

Ab wann geht es realistischerweise nicht mehr zurück?

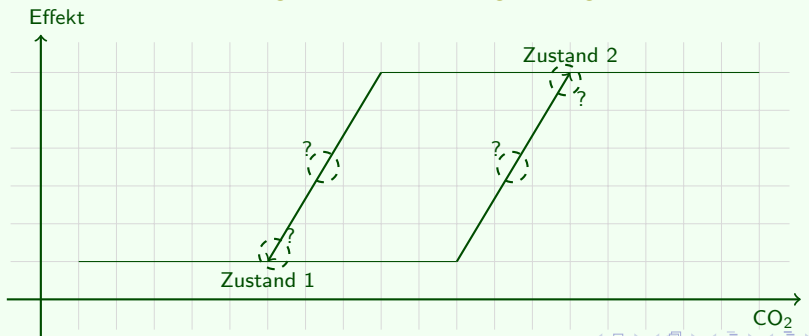
- Im Modell
 - Bei Verlassen des Hysteresebereichs?
- In Realität, Beispiel präparierte Wippe mit Kugel
 - Ggf. deutlich früher?
 - Zusatzherausforderung der trägen Kugel
 - Umkehrung der Rollrichtung der Kugel



„Point of No Return“ („PNR“)?

Ab wann geht es realistischerweise nicht mehr zurück?

- Im Modell
 - Bei Verlassen des Hysteresebereichs?
- In Realität, Beispiel präparierte Wippe mit Kugel
 - Ggf. deutlich früher?
 - Zusatzherausforderung der trägen Kugel
 - Umkehrung der Rollrichtung der Kugel
 - Ist-Geschwindigkeit der beschleunigten Kugel einrechnen

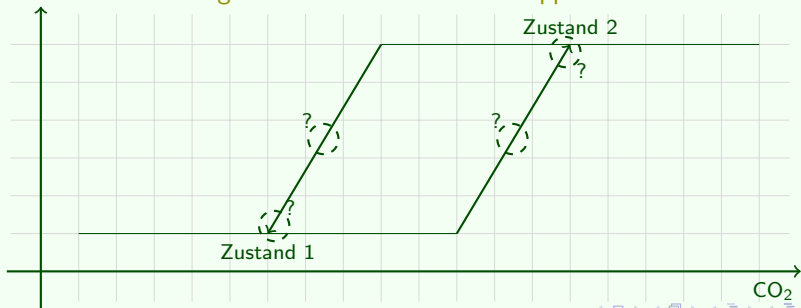


„Point of No Return“ („PNR“)?

Ab wann geht es realistischerweise nicht mehr zurück?

- Im Modell
 - Bei Verlassen des Hysteresebereichs?
- In Realität, Beispiel präparierte Wippe mit Kugel
 - Ggf. deutlich früher?
 - Zusatzherausforderung der trägen Kugel
 - Umkehrung der Rollrichtung der Kugel
 - Ist-Geschwindigkeit der beschleunigten Kugel einrechnen

Effekt \Rightarrow Gleichgewicht reicht nicht zum Stoppen



Beispiel Klimakipppunkte

nach Schellnhuber, Stand 2008^{2,3}

Beispiel Klimakipppunkte

nach Schellnhuber, Stand 2008^{2,3}

- Abschmelzen des sommerlichen arktischen Meereises

Beispiel Klimakipppunkte

nach Schellnhuber, Stand 2008^{2,3}

- Abschmelzen des sommerlichen arktischen Meereises
- Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes

Beispiel Klimakipppunkte

nach Schellnhuber, Stand 2008^{2,3}

- Abschmelzen des sommerlichen arktischen Meereises
- Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes
- Abschmelzen des Westantarktischen Eisschildes

Beispiel Klimakipppunkte

nach Schellnhuber, Stand 2008^{2,3}

- Abschmelzen des sommerlichen arktischen Meereises
- Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes
- Abschmelzen des Westantarktischen Eisschildes
- Erlahmen der atlantischen thermohalinen Zirkulation

Beispiel Klimakipppunkte

nach Schellnhuber, Stand 2008^{2,3}

- Abschmelzen des sommerlichen arktischen Meereises
- Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes
- Abschmelzen des Westantarktischen Eisschildes
- Erlahmen der atlantischen thermohalinen Zirkulation
- Veränderung der El Niño-Southern Oscillation (ENSO)

Beispiel Klimakipppunkte

nach Schellnhuber, Stand 2008^{2,3}

- Abschmelzen des sommerlichen arktischen Meereises
- Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes
- Abschmelzen des Westantarktischen Eisschildes
- Erlahmen der atlantischen thermohalinen Zirkulation
- Veränderung der El Niño-Southern Oscillation (ENSO)
- Zusammenbruch des indischen Sommermonsuns

Beispiel Klimakipppunkte

nach Schellnhuber, Stand 2008^{2,3}

- Abschmelzen des sommerlichen arktischen Meereises
- Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes
- Abschmelzen des Westantarktischen Eisschildes
- Erlahmen der atlantischen thermohalinen Zirkulation
- Veränderung der El Niño-Southern Oscillation (ENSO)
- Zusammenbruch des indischen Sommermonsuns
- Veränderungen im Westafrikanischen Monsunsystem mit Auswirkungen auf Sahara und Sahelzone

Beispiel Klimakipppunkte

nach Schellnhuber, Stand 2008^{2,3}

- Abschmelzen des sommerlichen arktischen Meereises
- Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes
- Abschmelzen des Westantarktischen Eisschildes
- Erlahmen der atlantischen thermohalinen Zirkulation
- Veränderung der El Niño-Southern Oscillation (ENSO)
- Zusammenbruch des indischen Sommermonsuns
- Veränderungen im Westafrikanischen Monsunsystem mit Auswirkungen auf Sahara und Sahelzone
- Entwaldung des tropischen Regenwaldes

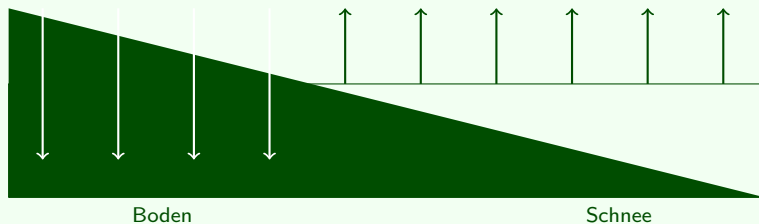
Beispiel Klimakipppunkte

nach Schellnhuber, Stand 2008^{2,3}

- Abschmelzen des sommerlichen arktischen Meereises
- Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes
- Abschmelzen des Westantarktischen Eisschildes
- Erlahmen der atlantischen thermohalinen Zirkulation
- Veränderung der El Niño-Southern Oscillation (ENSO)
- Zusammenbruch des indischen Sommermonsuns
- Veränderungen im Westafrikanischen Monsunsystem mit Auswirkungen auf Sahara und Sahelzone
- Entwaldung des tropischen Regenwaldes
- Rückgang borealer Wälder

Beispiel: Albedo von Schneeflächen

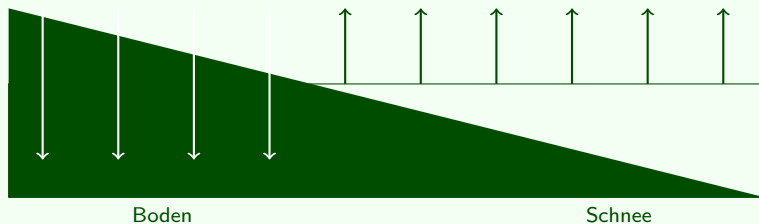
Albedo: Rückstrahlvermögen diffus reflektierender Oberflächen



Beispiel: Albedo von Schneeflächen

Albedo: Rückstrahlvermögen diffus reflektierender Oberflächen

- Zustand 1: Schneedecke vorhanden

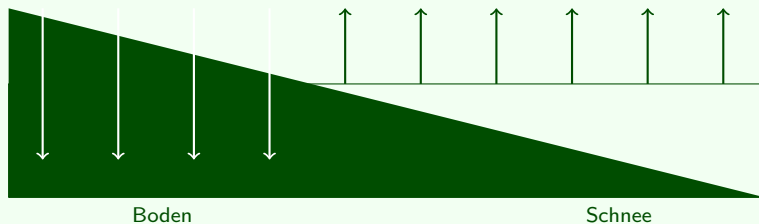


Beispiel: Albedo von Schneeflächen

Albedo: Rückstrahlvermögen diffus reflektierender Oberflächen

- Zustand 1: Schneedecke vorhanden

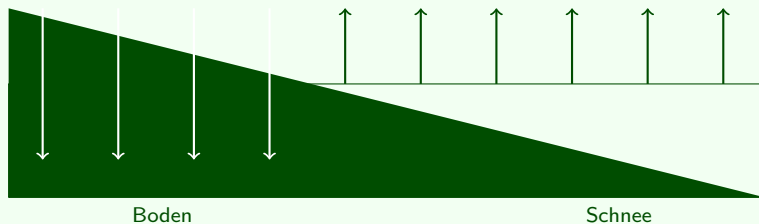
⇒ Schnee reflektiert Licht



Beispiel: Albedo von Schneeflächen

Albedo: Rückstrahlvermögen diffus reflektierender Oberflächen

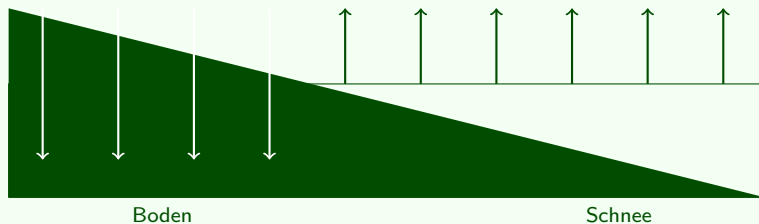
- Zustand 1: Schneedecke vorhanden
 - ⇒ Schnee reflektiert Licht
 - ⇒ **Kalter Boden**



Beispiel: Albedo von Schneeflächen

Albedo: Rückstrahlvermögen diffus reflektierender Oberflächen

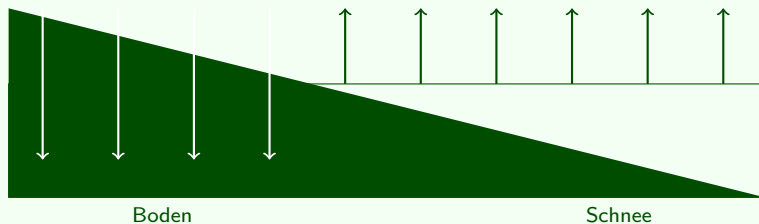
- Zustand 1: Schneedecke vorhanden
 - ⇒ Schnee reflektiert Licht
 - ⇒ Kalter Boden
 - ⇒ Neuschnee bleibt liegen ← Mitkopplung!



Beispiel: Albedo von Schneeflächen

Albedo: Rückstrahlvermögen diffus reflektierender Oberflächen

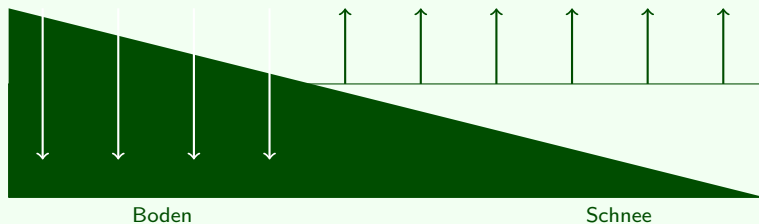
- Zustand 1: Schneedecke vorhanden
 - ⇒ Schnee reflektiert Licht
 - ⇒ Kalter Boden
 - ⇒ Neuschnee bleibt liegen ← Mitkopplung!
- Zustand 2: Schneedecke weggeschmolzen



Beispiel: Albedo von Schneeflächen

Albedo: Rückstrahlvermögen diffus reflektierender Oberflächen

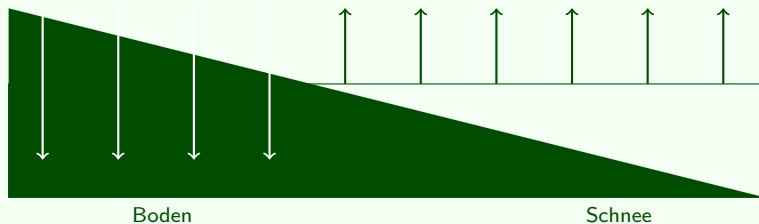
- Zustand 1: Schneedecke vorhanden
 - ⇒ Schnee reflektiert Licht
 - ⇒ Kalter Boden
 - ⇒ Neuschnee bleibt liegen ← Mitkopplung!
- Zustand 2: Schneedecke weggeschmolzen
 - ⇒ Dunkler Boden absorbiert Licht



Beispiel: Albedo von Schneeflächen

Albedo: Rückstrahlvermögen diffus reflektierender Oberflächen

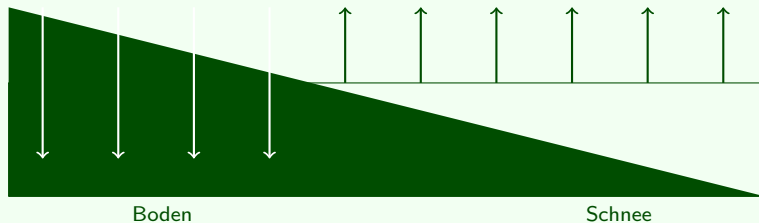
- Zustand 1: Schneedecke vorhanden
 - ⇒ Schnee reflektiert Licht
 - ⇒ Kalter Boden
 - ⇒ Neuschnee bleibt liegen ← Mitkopplung!
- Zustand 2: Schneedecke weggeschmolzen
 - ⇒ Dunkler Boden absorbiert Licht
 - ⇒ Warmer Boden



Beispiel: Albedo von Schneeflächen

Albedo: Rückstrahlvermögen diffus reflektierender Oberflächen

- Zustand 1: Schneedecke vorhanden
 - ⇒ Schnee reflektiert Licht
 - ⇒ Kalter Boden
 - ⇒ Neuschnee bleibt liegen ← Mitkopplung!
- Zustand 2: Schneedecke weggeschmolzen
 - ⇒ Dunkler Boden absorbiert Licht
 - ⇒ Warmer Boden
 - ⇒ Neuschnee schmilzt weg ← Mitkopplung!



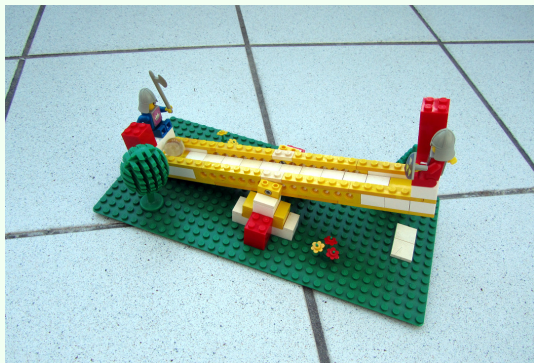
Beispiel mechanisches Modell: Wippe

Präparierung mit Kugel

Beispiel mechanisches Modell: Wippe

Präparierung mit Kugel

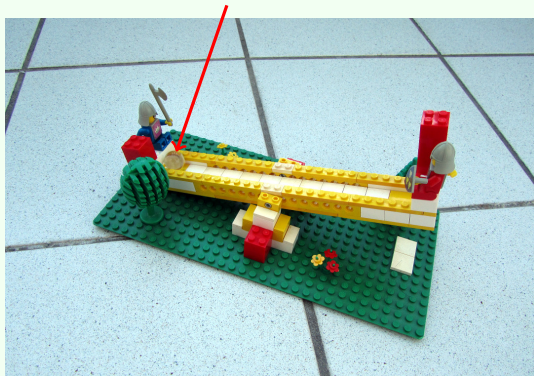
- Gewöhnliche Wippe: Hysterese vernachlässigbar



Beispiel mechanisches Modell: Wippe

Präparierung mit Kugel

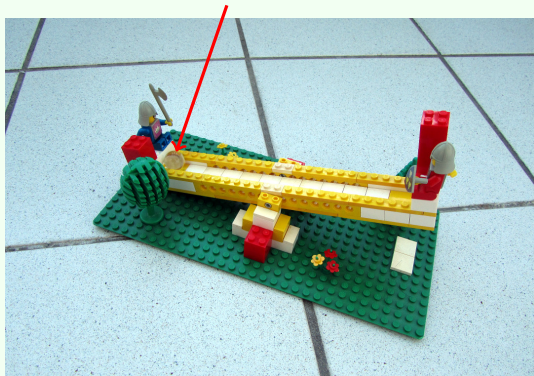
- Gewöhnliche Wippe: Hysterese vernachlässigbar
- Präparierte Wippe: Rollendes Gewicht im Balken



Beispiel mechanisches Modell: Wippe

Präparierung mit Kugel

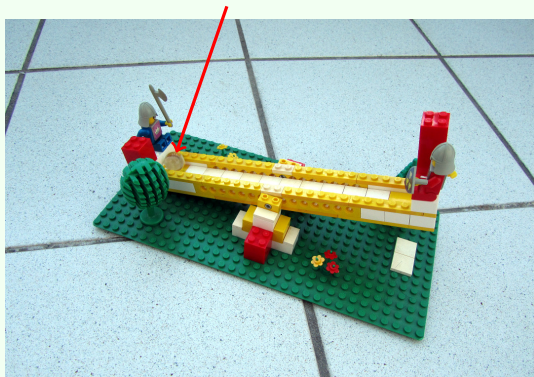
- Gewöhnliche Wippe: Hysterese vernachlässigbar
- Präparierte Wippe: Rollendes Gewicht im Balken
- Kugel rollt zum unteren Ende



Beispiel mechanisches Modell: Wippe

Präparierung mit Kugel

- Gewöhnliche Wippe: Hysterese vernachlässigbar
- Präparierte Wippe: Rollendes Gewicht im Balken
- Kugel rollt zum unteren Ende
- Hysterese durch Position der Kugel



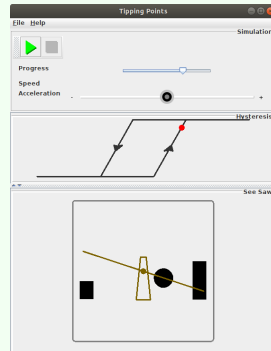
Computersimulation der Wippe

Ein Modell ist ein *vereinfachtes* Abbild der Wirklichkeit.

Computersimulation der Wippe

Ein Modell ist ein *vereinfachtes* Abbild der Wirklichkeit.

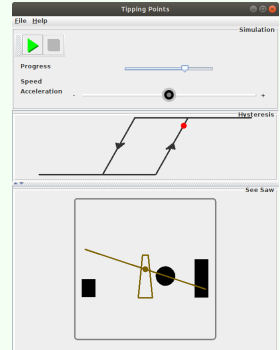
- Nachbildung Wippe, rollende Kugel



Computersimulation der Wippe

Ein Modell ist ein *vereinfachtes* Abbild der Wirklichkeit.

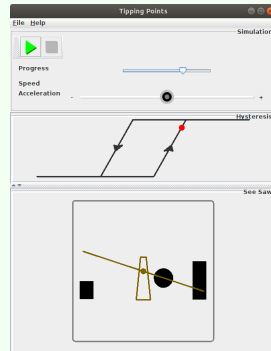
- Nachbildung Wippe, rollende Kugel
- Vereinfachungen



Computersimulation der Wippe

Ein Modell ist ein *vereinfachtes* Abbild der Wirklichkeit.

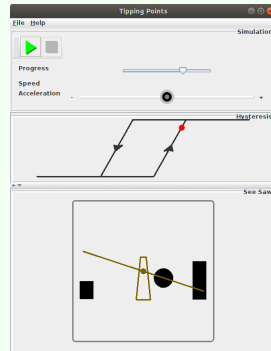
- Nachbildung Wippe, rollende Kugel
- Vereinfachungen
 - Konstant schnelles Rollen



Computersimulation der Wippe

Ein Modell ist ein *vereinfachtes* Abbild der Wirklichkeit.

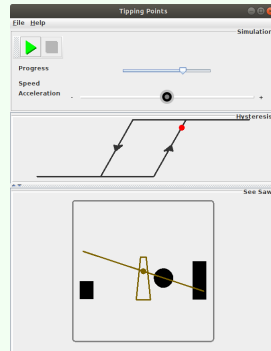
- Nachbildung Wippe, rollende Kugel
- Vereinfachungen
 - Konstant schnelles Rollen
 - Simulationsumkehr vor Wendepunkt



Computersimulation der Wippe

Ein Modell ist ein *vereinfachtes* Abbild der Wirklichkeit.

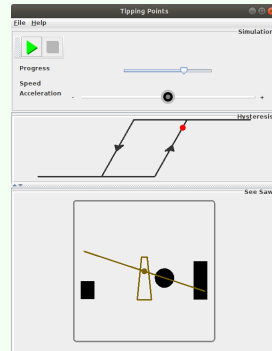
- Nachbildung Wippe, rollende Kugel
- Vereinfachungen
 - Konstant schnelles Rollen
 - Simulationsumkehr vor Wendepunkt
⇒ Aufwärtsrollen



Computersimulation der Wippe

Ein Modell ist ein *vereinfachtes* Abbild der Wirklichkeit.

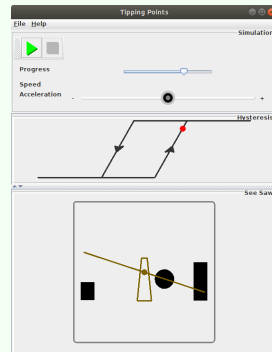
- Nachbildung Wippe, rollende Kugel
- Vereinfachungen
 - Konstant schnelles Rollen
 - Simulationsumkehr vor Wendepunkt
⇒ Aufwärtsrollen
- Wirklichkeit deutlich komplexer



Computersimulation der Wippe

Ein Modell ist ein *vereinfachtes* Abbild der Wirklichkeit.

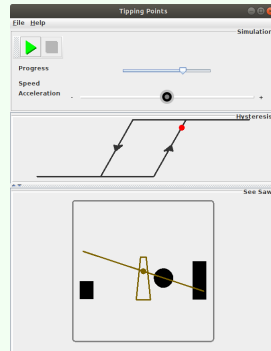
- Nachbildung Wippe, rollende Kugel
- Vereinfachungen
 - Konstant schnelles Rollen
 - Simulationsumkehr vor Wendepunkt
⇒ Aufwärtsrollen
- Wirklichkeit deutlich komplexer
 - Linear wachsende Geschwindigkeit der Kugel



Computersimulation der Wippe

Ein Modell ist ein *vereinfachtes* Abbild der Wirklichkeit.

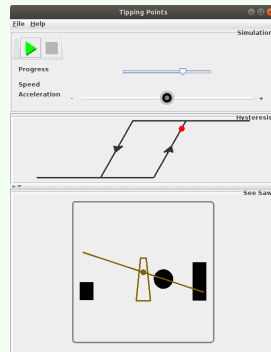
- Nachbildung Wippe, rollende Kugel
- Vereinfachungen
 - Konstant schnelles Rollen
 - Simulationsumkehr vor Wendepunkt
⇒ Aufwärtsrollen
- Wirklichkeit deutlich komplexer
 - Linear wachsende Geschwindigkeit der Kugel
 - Richtungsumkehr: Kugel muss erst Abbremsen



Computersimulation der Wippe

Ein Modell ist ein *vereinfachtes* Abbild der Wirklichkeit.

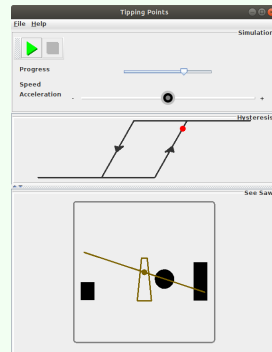
- Nachbildung Wippe, rollende Kugel
- Vereinfachungen
 - Konstant schnelles Rollen
 - Simulationsumkehr vor Wendepunkt
⇒ Aufwärtsrollen
- Wirklichkeit deutlich komplexer
 - Linear wachsende Geschwindigkeit der Kugel
 - Richtungsumkehr: Kugel muss erst Abbremsen
⇒ Umkehr zusätzlich erschwert



Computersimulation der Wippe

Ein Modell ist ein *vereinfachtes* Abbild der Wirklichkeit.

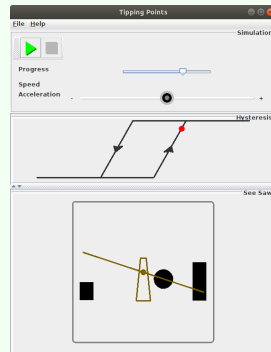
- Nachbildung Wippe, rollende Kugel
- Vereinfachungen
 - Konstant schnelles Rollen
 - Simulationsumkehr vor Wendepunkt
⇒ Aufwärtsrollen
- Wirklichkeit deutlich komplexer
 - Linear wachsende Geschwindigkeit der Kugel
 - Richtungsumkehr: Kugel muss erst Abbremsen
⇒ Umkehr zusätzlich erschwert
 - Reibungskräfte am Drehpunkt



Computersimulation der Wippe

Ein Modell ist ein *vereinfachtes* Abbild der Wirklichkeit.

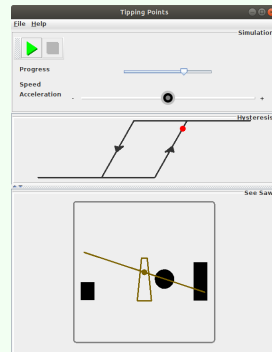
- Nachbildung Wippe, rollende Kugel
- Vereinfachungen
 - Konstant schnelles Rollen
 - Simulationsumkehr vor Wendepunkt
⇒ Aufwärtsrollen
- Wirklichkeit deutlich komplexer
 - Linear wachsende Geschwindigkeit der Kugel
 - Richtungsumkehr: Kugel muss erst Abbremsen
⇒ Umkehr zusätzlich erschwert
 - Reibungskräfte am Drehpunkt
 - Eigengewicht der Wippe



Computersimulation der Wippe

Ein Modell ist ein *vereinfachtes* Abbild der Wirklichkeit.

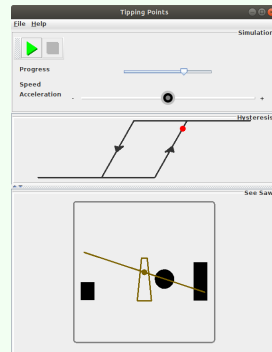
- Nachbildung Wippe, rollende Kugel
- Vereinfachungen
 - Konstant schnelles Rollen
 - Simulationsumkehr vor Wendepunkt
⇒ Aufwärtsrollen
- Wirklichkeit deutlich komplexer
 - Linear wachsende Geschwindigkeit der Kugel
 - Richtungsumkehr: Kugel muss erst Abbremsen
⇒ Umkehr zusätzlich erschwert
 - Reibungskräfte am Drehpunkt
 - Eigengewicht der Wippe
 - Horizontale Position der Gewichte: Hebelgesetz!



Computersimulation der Wippe

Ein Modell ist ein *vereinfachtes* Abbild der Wirklichkeit.

- Nachbildung Wippe, rollende Kugel
- Vereinfachungen
 - Konstant schnelles Rollen
 - Simulationsumkehr vor Wendepunkt
⇒ Aufwärtsrollen
- Wirklichkeit deutlich komplexer
 - Linear wachsende Geschwindigkeit der Kugel
 - Richtungsumkehr: Kugel muss erst Abbremsen
⇒ Umkehr zusätzlich erschwert
 - Reibungskräfte am Drehpunkt
 - Eigengewicht der Wippe
 - Horizontale Position der Gewichte: Hebelgesetz!
 - Äußere Einflüsse (Wind, Temperatur, Erschütterungen, ...)



Computersimulation der Wippe: Ergebnisse

Computersimulation der Wippe: Ergebnisse

- Didaktisches, interaktives Spielzeug mit netter Grafik

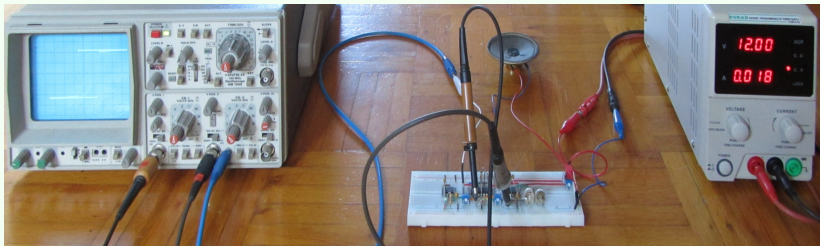
Computersimulation der Wippe: Ergebnisse

- Didaktisches, interaktives Spielzeug mit netter Grafik
- Für „ersten Kontakt“ mit Thematik nützlich

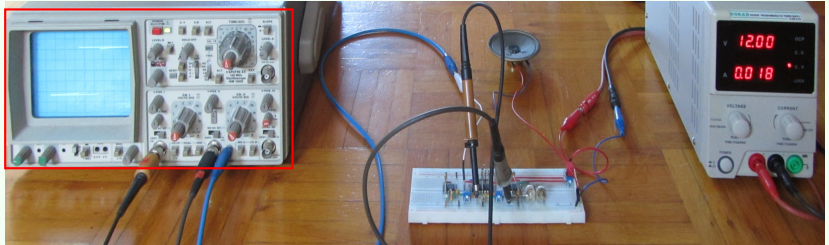
Computersimulation der Wippe: Ergebnisse

- Didaktisches, interaktives Spielzeug mit netter Grafik
- Für „ersten Kontakt“ mit Thematik nützlich
- Als reine Softwarelösung ohne spezielle Hardwarevoraussetzungen unkompliziert einsetzbar
- Nicht wirklich realitätsnah; primitives Modell mit sehr starken Vereinfachungen

Elektronisches Modell

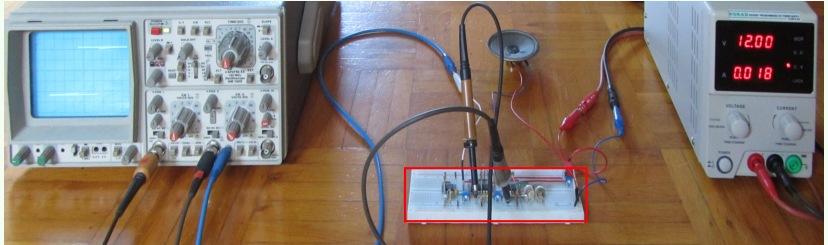


Elektronisches Modell



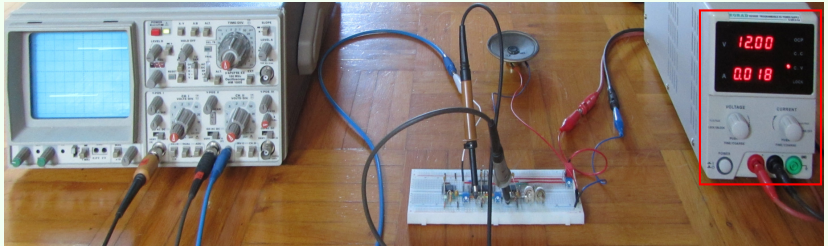
- Oszilloskop für Visualisierung

Elektronisches Modell



- Oszilloskop für Visualisierung
- elektronisches Modell auf Breadboard

Elektronisches Modell



- Oszilloskop für Visualisierung
- elektronisches Modell auf Breadboard
- Labornetzgerät, Spannungsversorgung 12V

Elektronisches Modell: Visualisierung

- Oszilloskop zur Darstellung

Elektronisches Modell: Visualisierung

- Oszilloskop zur Darstellung
- Betrieb im X-Y-Modus als *Kennlinienschreiber*

Elektronisches Modell: Visualisierung

- Oszilloskop zur Darstellung
- Betrieb im X-Y-Modus als *Kennlinienschreiber*
- Bildwiederholung für stehendes Bild notwendig

- Oszilloskop zur Darstellung
- Betrieb im X-Y-Modus als *Kennlinienschreiber*
- Bildwiederholung für stehendes Bild notwendig
⇒ Kippelement mit Oszillator periodisch durchwandern

- Oszilloskop zur Darstellung
- Betrieb im X-Y-Modus als *Kennlinienschreiber*
- Bildwiederholung für stehendes Bild notwendig
 - ⇒ Kippelement mit Oszillator periodisch durchwandern
 - ⇒ Dreieckschwingung erzeugen für Durchlaufen der X-Achse

Elektronisches Modell: Visualisierung

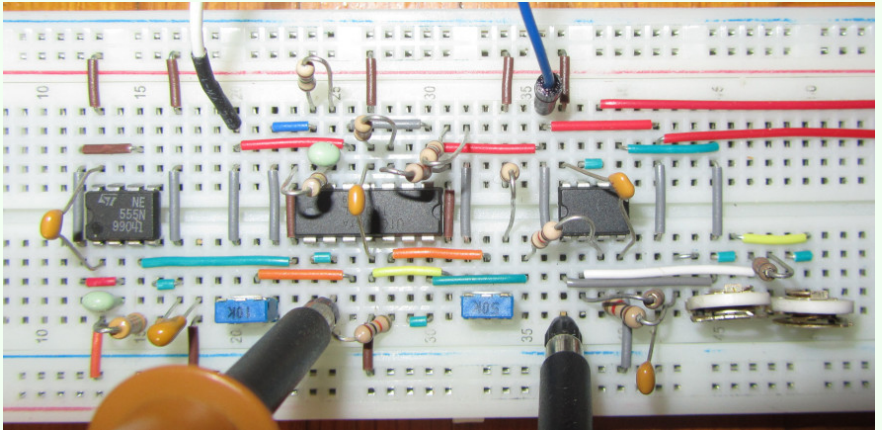
- Oszilloskop zur Darstellung
- Betrieb im X-Y-Modus als *Kennlinienschreiber*
- Bildwiederholung für stehendes Bild notwendig
 - ⇒ Kippelement mit Oszillator periodisch durchwandern
 - ⇒ Dreieckschwingung erzeugen für Durchlaufen der X-Achse
- *Schmitt-Trigger* als eigentliches Kippelement

Elektronisches Modell: Visualisierung

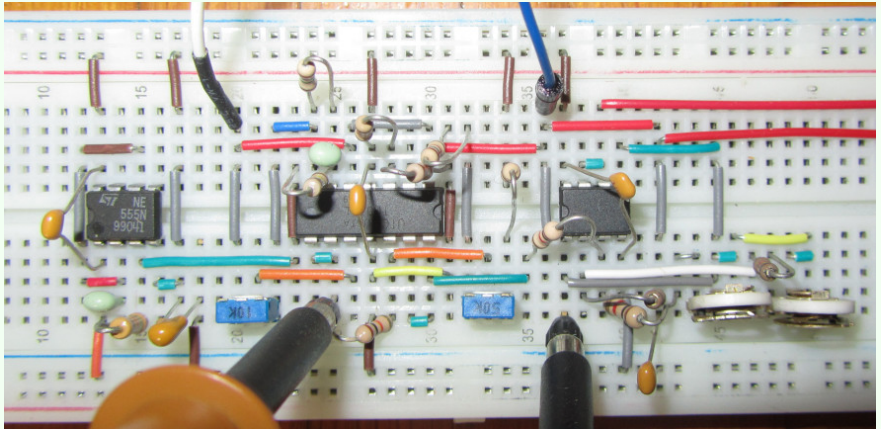
- Oszilloskop zur Darstellung
- Betrieb im X-Y-Modus als *Kennlinienschreiber*
- Bildwiederholung für stehendes Bild notwendig
 - ⇒ Kippelement mit Oszillator periodisch durchwandern
 - ⇒ Dreieckschwingung erzeugen für Durchlaufen der X-Achse
- *Schmitt-Trigger* als eigentliches Kippelement
- Dreieck auf Eingang des Schmitt-Triggers legen

- Oszilloskop zur Darstellung
- Betrieb im X-Y-Modus als *Kennlinienschreiber*
- Bildwiederholung für stehendes Bild notwendig
 - ⇒ Kippelement mit Oszillator periodisch durchwandern
 - ⇒ Dreieckschwingung erzeugen für Durchlaufen der X-Achse
- *Schmitt-Trigger* als eigentliches Kippelement
- Dreieck auf Eingang des Schmitt-Triggers legen
- Ausgang des Schmitt-Triggers: Y-Achse

Elektronisches Modell: Implementierung

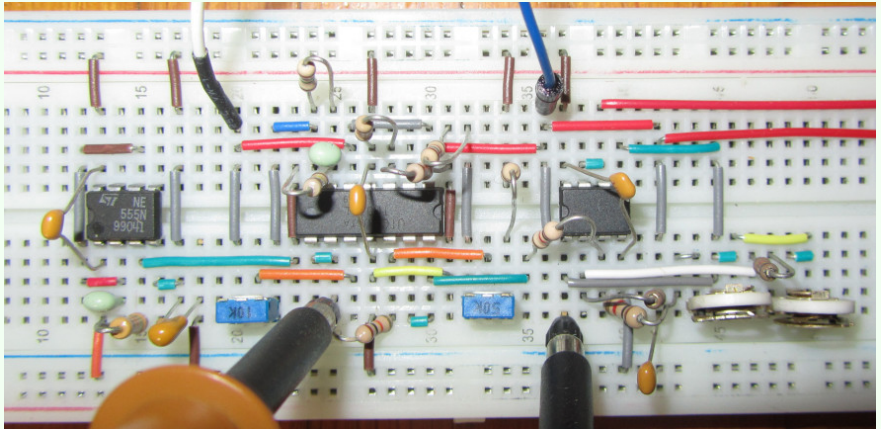


Elektronisches Modell: Implementierung



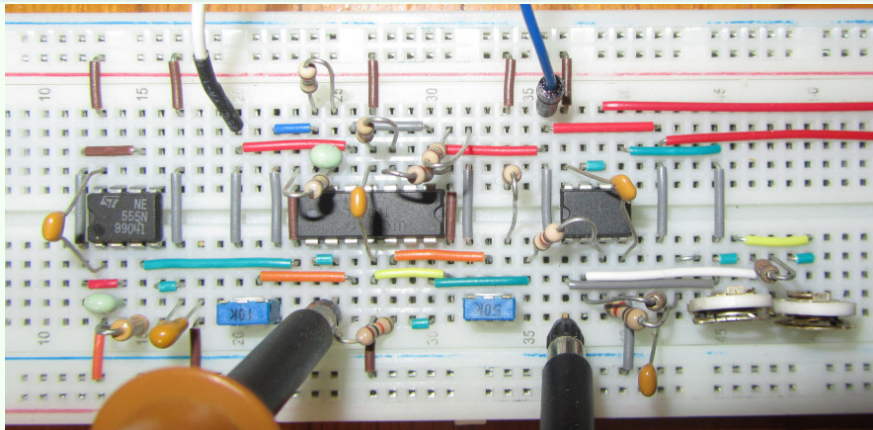
- Implementierung auf Breadboard

Elektronisches Modell: Implementierung



- Implementierung auf Breadboard
- Oszillator mit Standardtimer NE555

Elektronisches Modell: Implementierung



- Implementierung auf Breadboard
- Oszillator mit Standardtimer NE555
- Integrator, Skalierung, Offset und Schmitt-Trigger mit Standard-OPV TL07x

Elektronisches Modell: Erzeugung Dreieckschwingung

Elektronisches Modell: Erzeugung Dreieckschwingung

- Standard-Oszillatorschaltung

Elektronisches Modell: Erzeugung Dreieckschwingung

- Standard-Oszillatorschaltung
- Frequenz ca. 1,7kHz

Elektronisches Modell: Erzeugung Dreieckschwingung

- Standard-Oszillatorschaltung
- Frequenz ca. 1,7kHz
- Signalaufbereitung

Elektronisches Modell: Erzeugung Dreieckschwingung

- Standard-Oszillatorschaltung
- Frequenz ca. 1,7kHz
- Signalaufbereitung
 - Oszillation \Rightarrow nicht-lineare Ladekurve am Kondensator

Elektronisches Modell: Erzeugung Dreieckschwingung

- Standard-Oszillatorschaltung
- Frequenz ca. 1,7kHz
- Signalaufbereitung
 - Oszillation \Rightarrow nicht-lineare Ladekurve am Kondensator
 - Schwellwertschalter \Rightarrow symmetrische Rechteckspannung

Elektronisches Modell: Erzeugung Dreiecksschwingung

- Standard-Oszillatorschaltung
- Frequenz ca. 1,7kHz
- Signalaufbereitung
 - Oszillation \Rightarrow nicht-lineare Ladekurve am Kondensator
 - Schwellwertschalter \Rightarrow symmetrische Rechteckspannung
 - Integrator \Rightarrow symmetrische Dreiecksspannung

Elektronisches Modell: Erzeugung Dreiecksschwingung

- Standard-Oszillatorschaltung
- Frequenz ca. 1,7kHz
- Signalaufbereitung
 - Oszillation \Rightarrow nicht-lineare Ladekurve am Kondensator
 - Schwellwertschalter \Rightarrow symmetrische Rechteckspannung
 - Integrator \Rightarrow symmetrische Dreieckspannung
- Frequenz der Oszillation im hörbaren Bereich

Elektronisches Modell: Erzeugung Dreiecksschwingung

- Standard-Oszillatorschaltung
- Frequenz ca. 1,7kHz
- Signalaufbereitung
 - Oszillation \Rightarrow nicht-lineare Ladekurve am Kondensator
 - Schwellwertschalter \Rightarrow symmetrische Rechteckspannung
 - Integrator \Rightarrow symmetrische Dreieckspannung
- Frequenz der Oszillation im hörbaren Bereich
- Kalibrierung der Linearität (Klirrfaktor) auch per Lautsprecher möglich

Elektronisches Modell: Dreieckschwingung für X-Achse

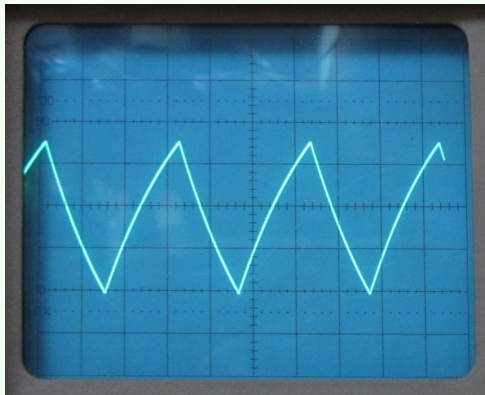


Abbildung: Der Spannungsverlauf der Ladekurve am Kondensator des Oszillators kommt nur unzureichend der gewünschten Dreieckschwingung nahe.

Elektronisches Modell: Dreieckschwingung für X-Achse

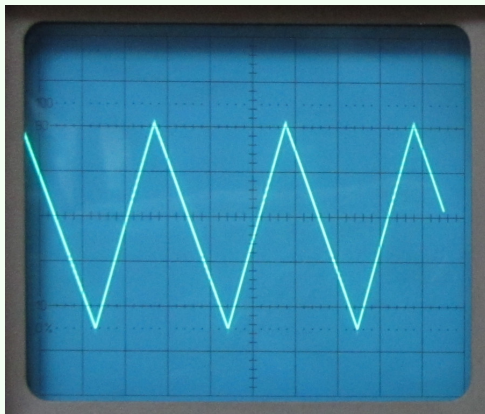


Abbildung: Der Spannungsverlauf der Ladekurve lässt sich per Schwellwertschalter in eine Rechteckschwingung und mit nachgeschaltetem Integrator in eine Dreieckschwingung hoher Genauigkeit wandeln.

Elektronisches Modell: Hysterese bei Volldurchlauf

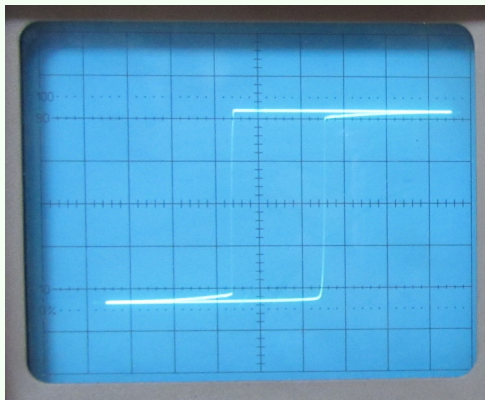


Abbildung: Für die Darstellung der Kennlinie wird die Dreiecksspannung im X-Y-Modus des Oszilloskops als X-Wert verwendet und zugleich durch den Schmitt-Trigger geführt, dessen Ausgangsspannung als Y-Wert dient.

Elektronisches Modell: Kehrtwende im Hysteresebereich

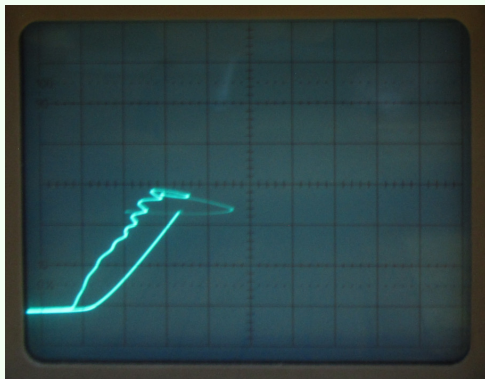


Abbildung: Wird die Dreieckschwingung so verschoben, dass der Hysteresebereich nicht mehr vollständig durchlaufen wird, sondern vorzeitig die Umkehr erfolgt, dann beginnt das System stark zu schwingen. Die Hysterese kommt bereits bei Eintritt in den Hysteresebereich weitgehend zum Tragen.

Elektronisches Modell: Ergebnisse

- Anders als die einfache Computersimulation „echtes“ Kippelement

- Anders als die einfache Computersimulation „echtes“ Kippelement
⇒ Potenzial, Effekte realer Kippunkte besser herauszuarbeiten und abzubilden

Elektronisches Modell: Ergebnisse

- Anders als die einfache Computersimulation „echtes“ Kippelement
⇒ Potenzial, Effekte realer Kippunkte besser herauszuarbeiten und abzubilden
- Parallelogramm-förmige Hysterese sehr gut visualisierbar

Elektronisches Modell: Ergebnisse

- Anders als die einfache Computersimulation „echtes“ Kippelement
⇒ Potenzial, Effekte realer Kippunkte besser herauszuarbeiten und abzubilden
- Parallelogramm-förmige Hysterese sehr gut visualisierbar
- Übergang zwischen Kippelement und Linearverstärker sehr gut visualisierbar

- Anders als die einfache Computersimulation „echtes“ Kippelement
⇒ Potenzial, Effekte realer Kippunkte besser herauszuarbeiten und abzubilden
- Parallelogramm-förmige Hysterese sehr gut visualisierbar
- Übergang zwischen Kippelement und Linearverstärker sehr gut visualisierbar
 - Hohe Mitkopplung: Kippelement mit Hysterese

Elektronisches Modell: Ergebnisse

- Anders als die einfache Computersimulation „echtes“ Kippelement
⇒ Potenzial, Effekte realer Kippunkte besser herauszuarbeiten und abzubilden
- Parallelogramm-förmige Hysterese sehr gut visualisierbar
- Übergang zwischen Kippelement und Linearverstärker sehr gut visualisierbar
 - Hohe Mitkopplung: Kippelement mit Hysterese
 - Hohe Gegenkopplung: Lineare Verstärkung

Elektronisches Modell: Ergebnisse

- Anders als die einfache Computersimulation „echtes“ Kippelement
⇒ Potenzial, Effekte realer Kippunkte besser herauszuarbeiten und abzubilden
- Parallelogramm-förmige Hysterese sehr gut visualisierbar
- Übergang zwischen Kippelement und Linearverstärker sehr gut visualisierbar
 - Hohe Mitkopplung: Kippelement mit Hysterese
 - Hohe Gegenkopplung: Lineare Verstärkung
- Hysterese schlägt ggf. bereits bei Eintritt in Hysteresebereich voll durch

Elektronisches Modell: Ergebnisse

- Anders als die einfache Computersimulation „echtes“ Kippelement
⇒ Potenzial, Effekte realer Kippunkte besser herauszuarbeiten und abzubilden
- Parallelogramm-förmige Hysterese sehr gut visualisierbar
- Übergang zwischen Kippelement und Linearverstärker sehr gut visualisierbar
 - Hohe Mitkopplung: Kippelement mit Hysterese
 - Hohe Gegenkopplung: Lineare Verstärkung
- Hysterese schlägt ggf. bereits bei Eintritt in Hysteresebereich voll durch
- Bei plötzlicher Kehrtwende im Hysteresebereich können ggf. starke Oszillationen auftreten

Ergebnisse I

Ergebnisse I

- (Kleine) Hysterese praktisch immer vorhanden

Ergebnisse I

- (Kleine) Hysterese praktisch immer vorhanden
 - Wegen „Kosten“ (Energie, Aufwand) für Zustandswechsel

- (Kleine) Hysterese praktisch immer vorhanden
 - Wegen „Kosten“ (Energie, Aufwand) für Zustandswechsel
 - Durch Reibung, Wegstrecke, Abschmelzen, Einbringung, Entfernung, etc.

Ergebnisse I

- (Kleine) Hysterese praktisch immer vorhanden
 - Wegen „Kosten“ (Energie, Aufwand) für Zustandswechsel
 - Durch Reibung, Wegstrecke, Abschmelzen, Einbringung, Entfernung, etc.
- Größe der Hysterese abhängig von Mitkopplung & Gegenkopplung

Ergebnisse I

- (Kleine) Hysterese praktisch immer vorhanden
 - Wegen „Kosten“ (Energie, Aufwand) für Zustandswechsel
 - Durch Reibung, Wegstrecke, Abschmelzen, Einbringung, Entfernung, etc.
- Größe der Hysterese abhängig von Mitkopplung & Gegenkopplung
 - Entscheidend für Irreversibilität

Ergebnisse I

- (Kleine) Hysterese praktisch immer vorhanden
 - Wegen „Kosten“ (Energie, Aufwand) für Zustandswechsel
 - Durch Reibung, Wegstrecke, Abschmelzen, Einbringung, Entfernung, etc.
- Größe der Hysterese abhängig von Mitkopplung & Gegenkopplung
 - Entscheidend für Irreversibilität
 - Ggf. schwer zu bestimmen / abzuschätzen

Ergebnisse I

- (Kleine) Hysterese praktisch immer vorhanden
 - Wegen „Kosten“ (Energie, Aufwand) für Zustandswechsel
 - Durch Reibung, Wegstrecke, Abschmelzen, Einbringung, Entfernung, etc.
- Größe der Hysterese abhängig von Mitkopplung & Gegenkopplung
 - Entscheidend für Irreversibilität
 - Ggf. schwer zu bestimmen / abzuschätzen
- Hysterese ggf. schon im Zustandsübergang voll wirksam

Ergebnisse I

- (Kleine) Hysterese praktisch immer vorhanden
 - Wegen „Kosten“ (Energie, Aufwand) für Zustandswechsel
 - Durch Reibung, Wegstrecke, Abschmelzen, Einbringung, Entfernung, etc.
- Größe der Hysterese abhängig von Mitkopplung & Gegenkopplung
 - Entscheidend für Irreversibilität
 - Ggf. schwer zu bestimmen / abzuschätzen
- Hysterese ggf. schon im Zustandsübergang voll wirksam
- verschiedene Hystereseformen und -dynamiken möglich

Ergebnisse II

- Modelle stets Vereinfachung der Realität

Ergebnisse II

- Modelle stets Vereinfachung der Realität
- Verschiedene Modelle betonen verschiedene Hysterese-Eigenschaften

Ergebnisse II

- Modelle stets Vereinfachung der Realität
- Verschiedene Modelle betonen verschiedene Hysterese-Eigenschaften
 - Wippe: ggf. Reibung, Hebelgesetz

Ergebnisse II

- Modelle stets Vereinfachung der Realität
- Verschiedene Modelle betonen verschiedene Hysterese-Eigenschaften
 - Wippe: ggf. Reibung, Hebelgesetz
 - elektron. Modell: Oszillationen

Ergebnisse II

- Modelle stets Vereinfachung der Realität
- Verschiedene Modelle betonen verschiedene Hysterese-Eigenschaften
 - Wippe: ggf. Reibung, Hebelgesetz
 - elektron. Modell: Oszillationen
- Genauigkeit / Aussagekraft je Modell abhängig von Detaillierungsgrad

Ergebnisse II

- Modelle stets Vereinfachung der Realität
- Verschiedene Modelle betonen verschiedene Hysterese-Eigenschaften
 - Wippe: ggf. Reibung, Hebelgesetz
 - elektron. Modell: Oszillationen
- Genauigkeit / Aussagekraft je Modell abhängig von Detaillierungsgrad
- Modell mit unerwartetem / überraschende Effekt

Ergebnisse II

- Modelle stets Vereinfachung der Realität
- Verschiedene Modelle betonen verschiedene Hysterese-Eigenschaften
 - Wippe: ggf. Reibung, Hebelgesetz
 - elektron. Modell: Oszillationen
- Genauigkeit / Aussagekraft je Modell abhängig von Detaillierungsgrad
- Modell mit unerwartetem / überraschende Effekt
- Vielleicht nur „Problem“ des Modells

Ergebnisse II

- Modelle stets Vereinfachung der Realität
- Verschiedene Modelle betonen verschiedene Hysterese-Eigenschaften
 - Wippe: ggf. Reibung, Hebelgesetz
 - elektron. Modell: Oszillationen
- Genauigkeit / Aussagekraft je Modell abhängig von Detaillierungsgrad
- Modell mit unerwartetem / überraschende Effekt
- Vielleicht nur „Problem“ des Modells
- Vielleicht aber Fingerzeig für bislang übersehene Eigenschaft

Ergebnisse II

- Modelle stets Vereinfachung der Realität
- Verschiedene Modelle betonen verschiedene Hysterese-Eigenschaften
 - Wippe: ggf. Reibung, Hebelgesetz
 - elektron. Modell: Oszillationen
- Genauigkeit / Aussagekraft je Modell abhängig von Detaillierungsgrad
- Modell mit unerwartetem / überraschende Effekt
- Vielleicht nur „Problem“ des Modells
- Vielleicht aber Fingerzeig für bislang übersehene Eigenschaft
- Ggf. Anlass für weitere Untersuchungen

Hysterese: Offene Fragen I

Für konkretes reales Kippelement

Hysterese: Offene Fragen I

Für konkretes reales Kippelement

- Wie groß ist die Hysterese (z.B. Schneeflächen)?

Hysterese: Offene Fragen I

Für konkretes reales Kippelement

- Wie groß ist die Hysterese (z.B. Schneeflächen)?
 - Jahre?

Hysterese: Offene Fragen I

Für konkretes reales Kippelement

- Wie groß ist die Hysterese (z.B. Schneeflächen)?
 - Jahre?
 - Jahrzehnte?

Hysterese: Offene Fragen I

Für konkretes reales Kippelement

- Wie groß ist die Hysterese (z.B. Schneeflächen)?
 - Jahre?
 - Jahrzehnte?
- Form der Hysterese?

Hysterese: Offene Fragen I

Für konkretes reales Kippelement

- Wie groß ist die Hysterese (z.B. Schneeflächen)?
 - Jahre?
 - Jahrzehnte?
- Form der Hysterese?
 - Z.B. Parallelogramm?

Hysterese: Offene Fragen I

Für konkretes reales Kippelement

- Wie groß ist die Hysterese (z.B. Schneeflächen)?
 - Jahre?
 - Jahrzehnte?
- Form der Hysterese?
 - Z.B. Parallelogramm?
 - Z.B. Schleife?

Hysterese: Offene Fragen I

Für konkretes reales Kippelement

- Wie groß ist die Hysterese (z.B. Schneeflächen)?
 - Jahre?
 - Jahrzehnte?
- Form der Hysterese?
 - Z.B. Parallelogramm?
 - Z.B. Schleife?
- Wo ist der PNR?

Hysterese: Offene Fragen I

Für konkretes reales Kippelement

- Wie groß ist die Hysterese (z.B. Schneeflächen)?
 - Jahre?
 - Jahrzehnte?
- Form der Hysterese?
 - Z.B. Parallelogramm?
 - Z.B. Schleife?
- Wo ist der PNR?
- Gibt es weitere Einflüsse auf den PNR?

Hysterese: Offene Fragen I

Für konkretes reales Kippelement

- Wie groß ist die Hysterese (z.B. Schneeflächen)?
 - Jahre?
 - Jahrzehnte?
- Form der Hysterese?
 - Z.B. Parallelogramm?
 - Z.B. Schleife?
- Wo ist der PNR?
- Gibt es weitere Einflüsse auf den PNR?
 - Beispiel Wippe: beschleunigte Kugel

Hysterese: Offene Fragen I

Für konkretes reales Kippelement

- Wie groß ist die Hysterese (z.B. Schneeflächen)?
 - Jahre?
 - Jahrzehnte?
- Form der Hysterese?
 - Z.B. Parallelogramm?
 - Z.B. Schleife?
- Wo ist der PNR?
- Gibt es weitere Einflüsse auf den PNR?
 - Beispiel Wippe: beschleunigte Kugel
 - Einfluss Luftfeuchtigkeit auf Niederschlag?

Hysterese: Offene Fragen I

Für konkretes reales Kippelement

- Wie groß ist die Hysterese (z.B. Schneeflächen)?
 - Jahre?
 - Jahrzehnte?
- Form der Hysterese?
 - Z.B. Parallelogramm?
 - Z.B. Schleife?
- Wo ist der PNR?
- Gibt es weitere Einflüsse auf den PNR?
 - Beispiel Wippe: beschleunigte Kugel
 - Einfluss Luftfeuchtigkeit auf Niederschlag?
- innere Variablen in Hysterese-Modell berücksichtigen

Hysterese: Offene Fragen I

Für konkretes reales Kippelement

- Wie groß ist die Hysterese (z.B. Schneeflächen)?
 - Jahre?
 - Jahrzehnte?
- Form der Hysterese?
 - Z.B. Parallelogramm?
 - Z.B. Schleife?
- Wo ist der PNR?
- Gibt es weitere Einflüsse auf den PNR?
 - Beispiel Wippe: beschleunigte Kugel
 - Einfluss Luftfeuchtigkeit auf Niederschlag?
- innere Variablen in Hysterese-Modell berücksichtigen
 - z.B. Kugelposition bei der Wippe

Hysterese: Offene Fragen I

Für konkretes reales Kippelement

- Wie groß ist die Hysterese (z.B. Schneeflächen)?
 - Jahre?
 - Jahrzehnte?
- Form der Hysterese?
 - Z.B. Parallelogramm?
 - Z.B. Schleife?
- Wo ist der PNR?
- Gibt es weitere Einflüsse auf den PNR?
 - Beispiel Wippe: beschleunigte Kugel
 - Einfluss Luftfeuchtigkeit auf Niederschlag?
- innere Variablen in Hysterese-Modell berücksichtigen
 - z.B. Kugelposition bei der Wippe
 - und Kugelgeschwindigkeit

Hysterese: Offene Fragen II

Für konkretes reales Kippelement

Hysterese: Offene Fragen II

Für konkretes reales Kippelement

- Welches Modell kommt Realität am nächsten?

Hysterese: Offene Fragen II

Für konkretes reales Kippelement

- Welches Modell kommt Realität am nächsten?
- In welchen Eigenschaften ist es realistisch?

Hysterese: Offene Fragen II

Für konkretes reales Kippelement

- Welches Modell kommt Realität am nächsten?
- In welchen Eigenschaften ist es realistisch?
- Worin unterscheidet es sich von Realität?

- [1] International Panel on Climate Change (IPCC). „Summary for Policymakers“. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (2023). Hrsg. von Core Writing Team, H. Lee und J. Romero. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf (besucht am 23.09.2023).
- [2] Wikimedia Foundation. *Hysteresis*. 2020. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Hysteresis> (besucht am 25.09.2020).

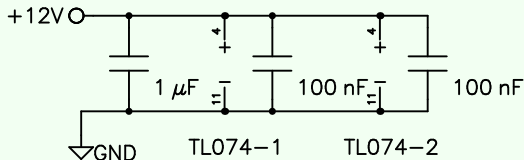
- [3] Claudia Mäder. *Kipp-Punkte im Klimasystem. Welche Gefahren drohen?* Forschungsber. Umweltbundesamt, Juli 2008. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3283.pdf> (besucht am 23.09.2023).
- [4] Jürgen Reuter. *Kipppunkte*. 25. Sep. 2020. URL: <https://soundpaint.github.io/tipping-points/de/> (besucht am 25.09.2020).

Diskussion eröffnet!

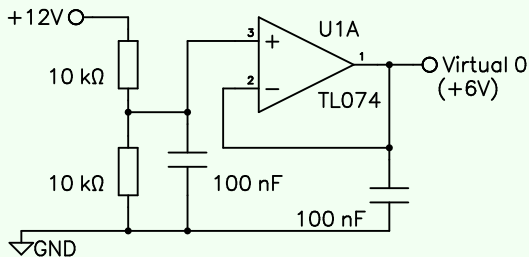
Gerne auch mit den Modellen „spielen“!

Elektronisches Modell: Spannungsglättung und -verteilung

Voltage Supply

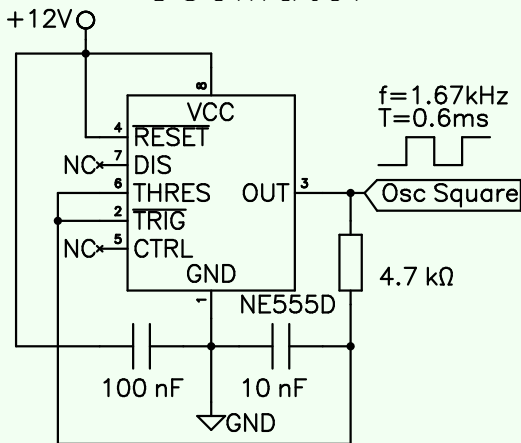


Virtual Ground

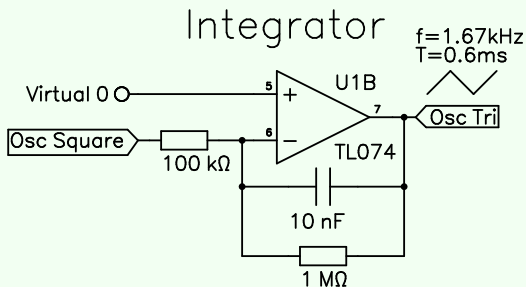


Elektronisches Modell: Rechteckschwingung ($\approx 1.7\text{kHz}$)

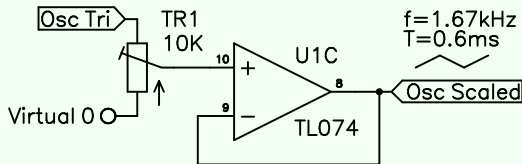
Oscillator



Elektronisches Modell: Wandlung Rechteck \rightarrow Dreieck



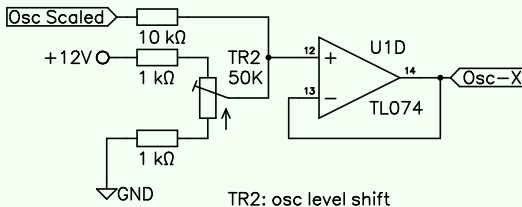
Osc Amplitude Ctrl



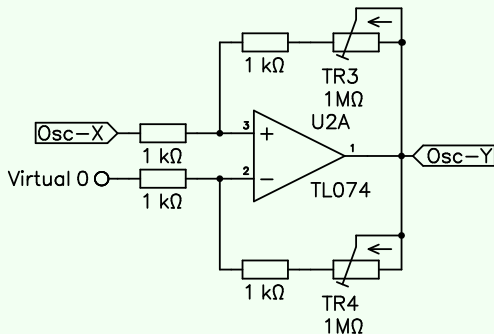
TR1: osc amplitude

Elektronisches Modell: Spannungspegelsteuerung

Osc Level Shift Ctrl



Adjustable Schmitt Trigger



TR3: positive feedback
TR4: negative feedback

Elektronisches Modell: Audio-Ausgang

