



### 3. Reale schwingende Systeme - Resonanz und Rückkopplung

#### Resonanz-Phänomene

**45**  Sehr oft werden **schwingende Systeme** von aussen irgendwie beeinflusst, gestört – oder überhaupt erst zum Schwingen angeregt. Wir untersuchen nun schwingungsfähige Systeme, welche periodisch gestört werden, etwas genauer. Sie sollen die Eigenschaften der "Reaktionen" auf die Störungen durch eigene Beobachtungen finden und beschreiben.


**46**  Untersuchungen an schwach gekoppelten Fadenpendeln: Wir bauen aus zwei Stativstangen einen "Galgen", an welchem zwei Fadenpendel befestigt werden. Das erste Fadenpendel (Pendel 1) soll eine relativ grosse Masse (ca. 0.5 bis 1 kg) tragen und so befestigt sein, dass die Fadenlänge variiert werden kann. Das zweite Fadenpendel (Pendel 2) soll eine fixe Länge haben und eine kleinere Masse tragen.

Pendel 2 wird in die Ruhelage gebracht und danach wird Pendel 1 in Schwingung versetzt. Beobachten Sie das Verhalten des leichteren Pendels während 1 bis 2 Minuten. Wiederholen Sie dies für verschiedene Pendellängen des schwereren Pendels.

Fertigen Sie ein Versuchsprotokoll an:

- Skizzieren Sie "Ihren" **Versuchsaufbau** und halten Sie alle Angaben dazu fest, die für eine Rekonstruktion nötig wären.
- Protokollieren** Sie die Beobachtungen genau.
- Versuchen Sie, aus Ihren Beobachtungen die **Kernaussage** (ein Prinzip, ein Gesetz, ...) herauszuschälen und in einem (möglichst allgemeingültig formulierten) Satz festzuhalten.
- Suchen Sie nun nach einer detaillierten **Erklärung** Ihrer Beobachtung und halten Sie diese ebenfalls schriftlich fest.

Wenn Sie die Erklärung nicht sofort finden, hilft Ihnen vielleicht die folgende Anregung auf die Sprünge: Versuchen Sie durch geschicktes Anblasen das eine Pendel in möglichst heftige Schwingung zu versetzen!

**47**  **Die Resonanzkurve:** Die in der vorangegangenen Aufgabe gemachten Beobachtungen lassen sich in einem Diagramm zusammenfassen, welches die "Reaktion" des leichten Pendels (seine maximale Amplitude  $A_{2max}$ ) als Funktion der "Störung" durch das schwere Pendel (seine Frequenz  $f_1$ ) darstellen soll.

Messen Sie grob einige notwendige Grössen, um den ungefähren Verlauf des Diagramms zu skizzieren.



- 48 ⓘ Um eine allgemeine Formulierung für die oben gemachten Beobachtungen zu ermöglichen, führen wir die folgenden Begriffe ein:



- 49 📄 Es gibt eine Vielzahl von **Resonanzerscheinungen**. Machen Sie sich die notwendigen Notizen zu folgenden Demonstrationen oder Ausführungen.

- horizontales Federpendel
- Drehpendel
- Vibration eines Buses bei geringer Motordrehzahl
- Lautsprecher und Gehör
- Mitschwingen einer Klaviersaite beim Singen eines bestimmten Tones
- Resonanzkasten** bei Stimmgabel und Musikinstrumenten
- Resonanzkatastrophen**: Brücke von Takoma (Film), "Zersingen" von Gläsern
- Radioempfang (Schwingkreis)

- 50 **R** Wenn man mit dem Auto im **Schnee oder Morast** steckengeblieben ist, empfiehlt es sich, im passend gewählten Rhythmus hin- und herzufahren, um das Auto wieder freizubekommen. Erklären Sie.

- 51 **R** Weshalb lässt sich selbst ein schweres Personenauto **seitlich verschieben**, wenn man es an der Stossstange im richtigen Rhythmus auf und ab bewegt?

- 52 **R** Ein Boot ist auf einem See. Es gibt Wind und somit unruhigen Seegang. Die Wasserwellen breiten sich mit 2 m/s aus. Die Wellenberge haben einen Abstand von etwa 4 m. Im Boot ist ein Fadenpendel aufgehängt. Je nachdem, welche Länge das Pendel hat, könnte nun eine **Resonanzkatastrophe** eintreten. Bestimmen Sie diese kritische Länge.

- 53 **R** Die Senderwahl bei einem **Radio** geschieht durch das Abgleichen der Eigenfrequenz eines elektrischen Schwingkreises auf die Frequenz der zu empfangenden Radiowellen. Dazu wird die Kapazität des Schwingkreis-Kondensators verändert. Nehmen wir an, die Induktivität der Schwingkreis-Spule betrage 10 mH. In welchem Bereich muss die Kapazität variiert werden können, damit alle Sender des **Langwellenbandes** (ca. 140 kHz bis 280 kHz) empfangen werden können?

**Erregerfrequenz**

**Eigenfrequenz**

**Resonanz**

**Resonanzbedingung**

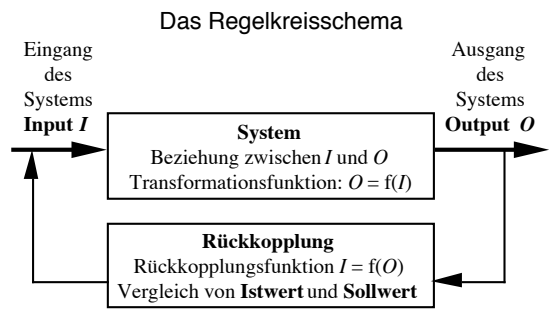
### Schwingungen durch Rückkopplung

**54** Wir haben gesehen: Ein schwingungsfähiges System ist im Zustand der **Resonanz**, wenn kleine Stösse von aussen periodisch, immer genau im richtigen Zeitpunkt, ein wenig Energie zuführen. Es entsteht eine **Aufschaukelung**: die Schwingung wird grösser und grösser.

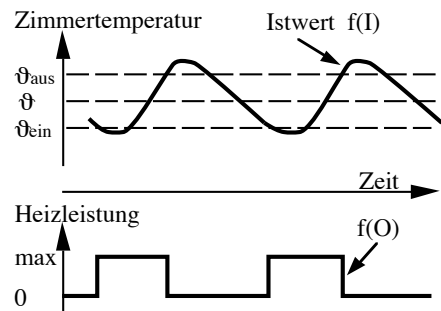
Wünscht man andererseits, dass die Schwingung eines Systems nicht abklingt (z.B. bei einer Uhr), was sie natürlicherweise machen würde, so muss ebenfalls periodisch etwas Energie zugeführt werden. Um in einem solchen Fall eine Art Resonanz sicherzustellen, ist es notwendig, durch einen geeigneten **„Selbststeuerungsmechanismus“** die Resonanzbedingung zu garantieren. Wir nennen diesen Mechanismus **Rückkopplung**. Er stellt eine Verbindung dar zwischen dem schwingenden System und der Energiezuführung. Das schwingende System und die Rückkopplung zusammen bilden einen **Regelkreis**.

Es ist nicht immer die primäre Aufgabe von Regelkreisen, Schwingungen zu erzeugen. Oft soll ein Mechanismus dafür sorgen, dass eine Grösse einen bestimmten Wert beibehält, trotz sich ändernder Rahmenbedingungen. In diesem Fall sorgt der Rückkopplungsmechanismus dafür, dass der **Istwert** der Grösse zum **Sollwert** hin korrigiert wird. Bei diesem Steuerungsvorgang kann eine Schwingung entstehen: der Istwert schwingt um den Sollwert.

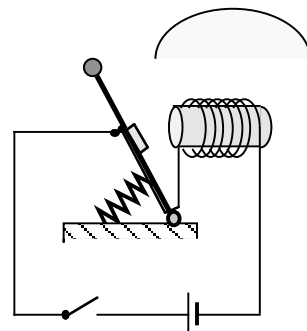
Das System bestimmt den Istwert (Output) als Funktion vom Input. Die Steuerung des Inputs geschieht durch die Rückkopplungsfunktion: Der Input ist somit eine Funktion des Outputs.



Steuerung der Raumtemperatur



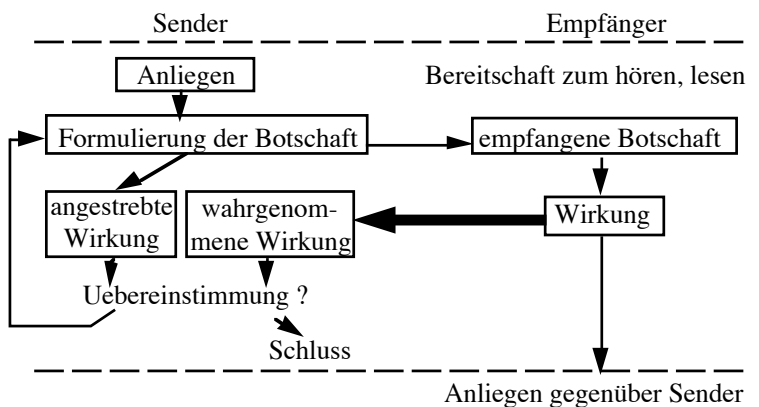
Elektrische Klingel



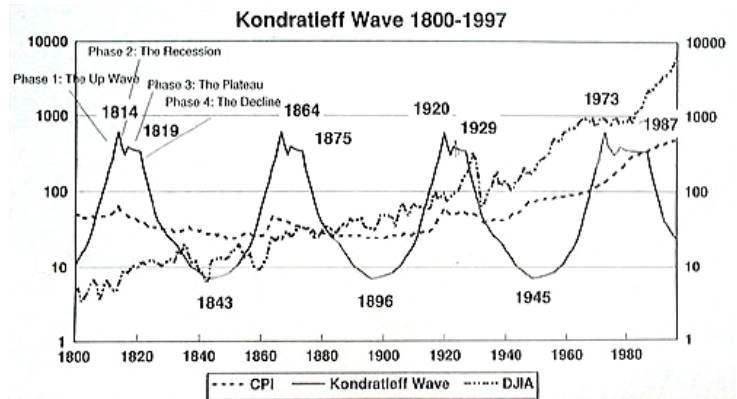
**55** Beispiele


- a) Steuerung der Raumtemperatur
- b) Elektrische Klingel
- c) Wirkschema von Sprache (Feedback)

Wirkschema von Sprache

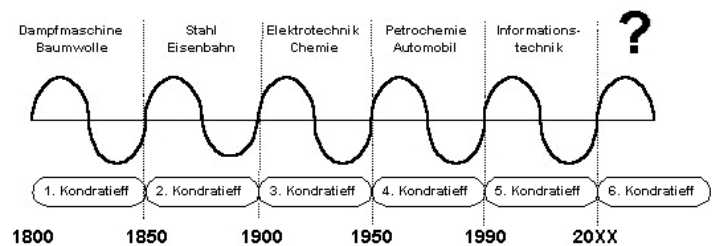


**56 R** Es soll hier auch auf eine ökonomische Schwingung hingewiesen werden, deren Regelsystem sehr komplex und nicht einfach zu erforschen ist - wenn überhaupt: **Wirtschaftszyklen nach Kondratieff**. Wie gross war bisher die Periode? Wodurch wurde möglicherweise jeweils eine neue Periode eingeleitet?




**57**  Bereiten Sie sich vor für eine kurze Darstellung vor der Klasse von einem der folgenden Regelkreise. Diskutieren Sie ihn in Bezug auf das Regelkreisschema (Input, Output, Rückkopplung).

- Technik: **ABS**-Bremsen
- Ökonomie: **Angebot-Nachfrage**-System
- Biologie: Einstellung der **Pupillen-grösse**
- Biologie: **Zittern des Espenlaubes**
- Astronomie: **Pulsare**
- Schaukel**
- Zeitmessung: **Pendeluhr**
- .....
- .....



## Ergänzungen

**58**  Unter dieser Nummer werden Sie die Ergänzungen festhalten, die wir zu diesem Kapitel möglicherweise machen werden.

- Es gibt keine Ergänzungen!  
 Es gibt Ergänzungen: