



Beispiel 1 Das Doppelpendel

Ein kleines physikalisches Wunder,
ganz harmlos daherkommend ...



Entwurf



Die Geschichte des ‚Kiosk‘-Doppelpendels

- Ein Doppelpendel kann man nicht käuflich erwerben
- Ein Freund des ‚Kiosk‘ – ein afghanischer Geflüchteter – hat eines für uns gebaut
 - wie immer, wenn es ans Detail geht, keine triviale Angelegenheit – wir sind sehr stolz auf Sarfaraz, dass er es hinbekommen hat!
- Unmittelbar vor Ausbruch der Corona-Pandemie konnten wir das Pendel Anfang 2020 erstmals einem Publikum vorführen.
- Den ‚Kiosk‘ als Veranstaltungsort gibt es inzwischen nicht mehr, er hat Corona nicht überlebt. Weitere „Live-Auftritte“ des Pendels wird es trotzdem hoffentlich bald wieder geben! 😊
- Leider gibt es noch immer kein Video von ‚unserem‘ Doppelpendel – weshalb wir euch (vorläufig!) auf andere Youtube-Videos verträsten müssen, damit ihr uns glaubt, was wir hier erzählen ;-)
(siehe Folien 8 und 9)



Das Doppelpendel – für den ‚Kiosk‘ zu einem **Symbol** geworden:

- für die **Neugier**, die wir verbreiten möchten – gerade auch auf scheinbar ‚Unerklärliches‘
- dafür, dass **komplexe Phänomene** auch im ‚richtigen Leben‘ viel öfter vorkommen als uns bewusst ist
- dafür, dass wir einen **falschen Begriff** von ‚Komplexität‘ („kompliziert“; „schwierig zu verstehen“) und **unnötig Angst** vor komplexen Sachverhalten haben
- dafür, dass wir unsere **Möglichkeiten**, etwas zu begreifen und uns eine fundierte Meinung darüber zu bilden, besser kennen und viel mehr nutzen sollten

Entwurf



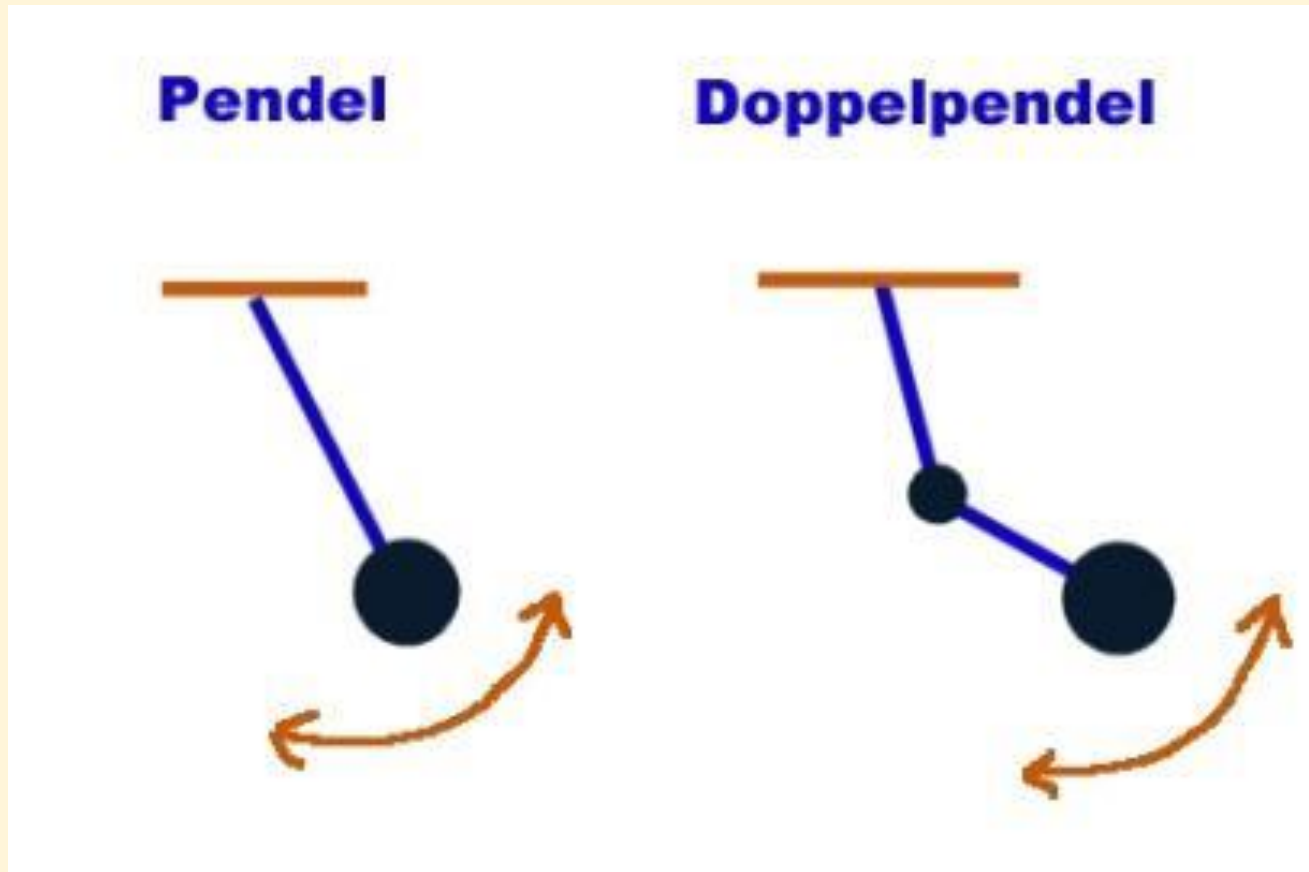
Warum Doppelpendel?

- Wie wir noch sehen werden, vollführt das sogenannte Doppelpendel – im Gegensatz zum **einfachen** Pendel - ziemlich bizarre Bewegungen
 - es wird genau wegen dieses Verhaltens auch **„Chaos‘pendel** genannt
- Es ist damit vielleicht das einfachste Beispiel, an dem sich zeigen lässt, dass **Komplexität und Kompliziertheit zwei verschiedene Erscheinungen bezeichnen**
 - denn das Doppelpendel ist eine äußerst **einfach(!)** aufgebaute physikalische Apparatur und seine Bewegung folgt den seit mehr als 300 Jahren **bekanntem Bewegungsgesetzen** der Klassischen Mechanik
 - es ist wahrlich nicht kompliziert, aber sein Verhalten ist dennoch **komplex**
 - wir kommen darauf zurück, was damit gemeint ist
- Zuvor kann man sich natürlich fragen:
Was interessiert mich irgend so eine physikalische Kuriosität?!
 - Sie ist – außer für naturwissenschaftlich Interessierte – nur deswegen bedeutsam, weil an ihr gerade aufgrund der Einfachheit in Reinform gezeigt werden kann, was bei den wirklich interessanten komplexen Vorgängen selten so isoliert und unmittelbar beobachtet werden kann:
Nämlich **wie** ein komplexes Verhalten zustande kommen kann.

Entwurf



ähnlich und doch ganz anders ...

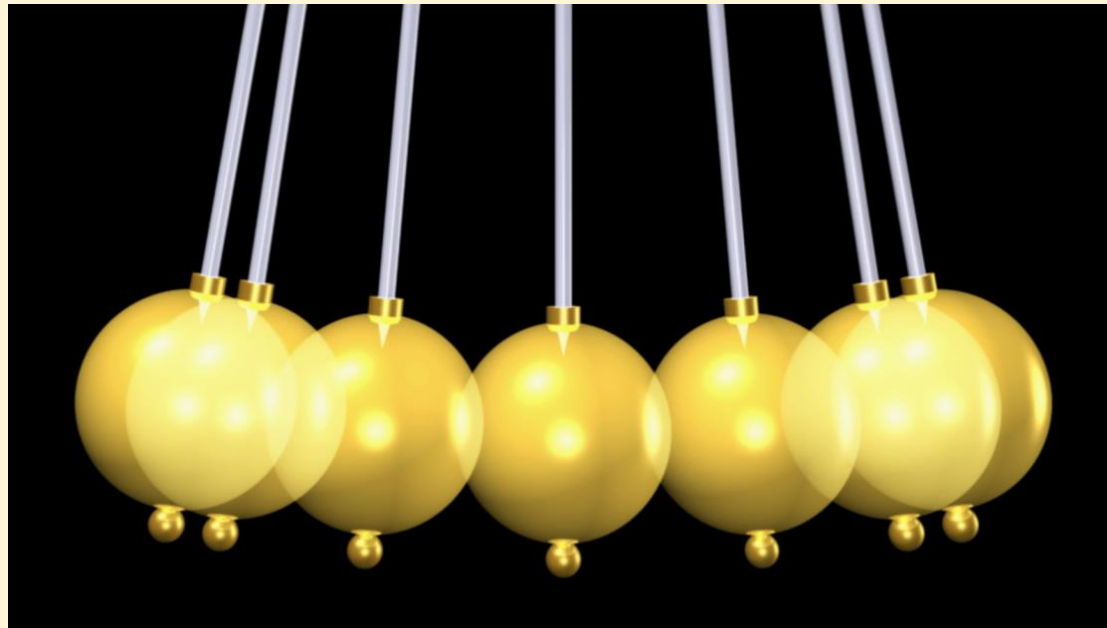
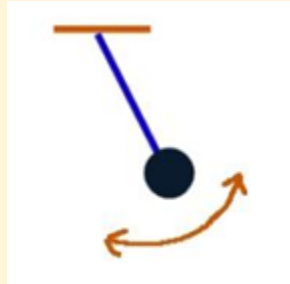


Entwurf



Das einfache Pendel

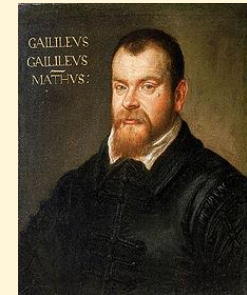
- ein bisschen langweilig ...:





Das einfache Pendel

- Galileo Galilei:
Schwingungsdauer nur von der Länge des Fadens abhängig



Galileo Galilei
(1564-1642)



- beim Sekundenpendel
Länge ca. 99 cm



Entwurf



Aus 1 mach' 2

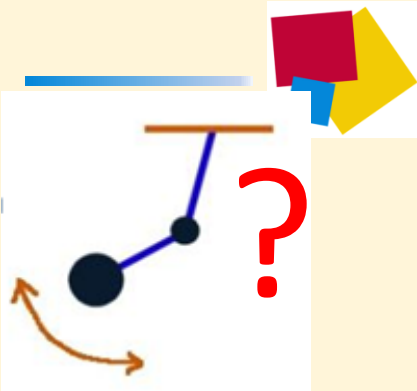
- ein **einfaches** Pendel (wie z.B. in einer Standuhr) ist einfach zu verstehen:
 - wird es angestoßen, ist vorhersehbar, dass es in immer gleichem Tempo hin und herschwingt, mit der Zeit weniger weit ausschlagend
- was aber, wenn an dieses Pendel noch ein **zweites** angehängt wird?
 - **um das zu verstehen, schaue man sich bitte ein Video zum Thema „Doppelpendel“ an! (es ist kein Fake!)**
 - ❖ z.B. <https://www.youtube.com/watch?v=U39RMUzCjiU>
(die erste Minute reicht; danach passiert nicht mehr viel)



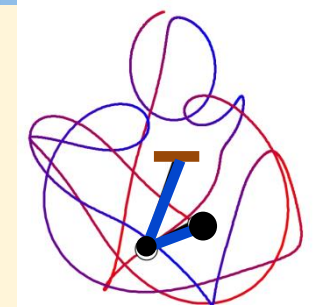
Was bekommen wir zu sehen?

1. einen Bewegungsablauf, der sehr **überraschend** ist und dem wir (anders als beim einfachen Pendel) **nicht folgen können**
 - der Bewegungsablauf ist **,chaotisch‘**
2. bei **Wiederholung** des Versuches entsteht ein völlig **anderer** Bewegungsablauf als beim ersten Mal
 - siehe hierzu ein weiteres Video:
<https://www.youtube.com/shorts/CgYGyRt5kVI>
(nach etwa 30 Sekunden werden **mehrere** zeitgleich gestartete Doppelpendel **parallel** gezeigt)
 - ein stattgefundenener Bewegungsablauf ist offensichtlich **nicht wiederholbar**
 - (wohingegen das **einfache** Pendel auch beim 2., 3. und x-ten Mal genau so hin und her schwingen wird wie zuvor ...)

Entwurf



Sarfaraz' Doppelpendel: was ist anders?



1. starke **Beschleunigungen**, die ein *einfaches* Pendel nie ausführen würde
2. gegenseitige Behinderung der beiden Pendel
→ zeitweise fast **Stillstand**, obwohl in voller Dynamik
3. **kleinste Änderungen** der Auslenkung **am Anfang** bewirken bei der Wiederholung eine völlig andere Bewegungsfolge
 - obwohl wir die Mechanik eines Pendels vollständig verstehen und alle Winkel, Geschwindigkeiten usw. berechnen können:
→ **Wir können den Bewegungsablauf nicht vorhersagen!**

Entwurf



Wie lässt sich das erklären? (1/2)

- beim **einfachen** Pendel kann die Pendelstange frei schwingen
 - Beim **Doppelpendel** ‚stört‘ hingegen die **äußere** Stange die Bewegung der inneren Stange:
 - mal **beschleunigt** sie die Schwingung der inneren Stange
 - ❖ bis dahin, dass sie sich gelegentlich überschlägt
 - mal **hemmt** sie die Schwingung der inneren Stange
 - ❖ manchmal bis zum zeitweiligen Stillstand
 - umgekehrt beeinflusst die Bewegung der **inneren** Stange auch die Bewegung der äußeren Stange
 - auch der äußere Stab vollführt alle möglichen Bewegungen zwischen ‚sich überschlagen‘ und totalem Stillstand, nur *scheinbar* unabhängig von dem inneren Stab
- (Fortsetzung → siehe nächste Seite)



Wie lässt sich das erklären? (2/2)

- man kann also nicht einfach sagen: die Bewegung des inneren Stabes ist frei und die **Ursache** für die Bewegung des äußeren Stabes (die **Wirkung**)
- vielmehr handelt es sich um eine klassische **Wechselwirkung**:
 - was Ursache und was Wirkung ist, lässt sich nicht bestimmen, da der äußere Stab eine **Rückwirkung** auf den inneren Stab ausübt
 - eine **Besonderheit** der Wechselwirkung zwischen den beiden Pendelstangen ist, dass sie (durch die starre Mechanik) erzwungen ist und ohne zeitliche Verzögerung erfolgt
 - ❖ das ist bei vielen anderen komplexen Systemen anders: Wirkung und Rückwirkung können zeitlich auseinander fallen
 - dieser **zeitliche** Aspekt hat große Bedeutung für das mechanistische Verständnis verschiedener komplexer Geschehnisse - wir kommen an anderer Stelle (nämlich **<hier> ??? [Präs. ,WW']**) darauf zurück

Entwurf



Und was hat das mit Komplexität zu tun?!

- Dazu möchten wir auf unsere **Präsentation „Was ist Komplexität?“** verweisen → siehe **<hier> ???**
- Dort führen wir aus, dass **komplexe Vorgänge** durch eine Reihe **besonderer Eigenschaften** gekennzeichnet sind, unter anderem:
 - dem Einfluss von **Wechselwirkungen**, mit der Folge, dass sich das Geschehen nicht anhand von einfachen Ursache-Wirkungs-Ketten verstehen lässt
 - ‚chaotisches‘, **nicht vorhersehbares** und nicht beherrschbares Verhalten
 - ❖ selbst dann, wenn man die Einflussfaktoren auf das Verhalten kennt
 - eine **extreme Empfindlichkeit für geringfügige Abweichungen in den Startbedingungen**:
 - ❖ (beim Doppelpendel der Auslenkungswinkel am Beginn eines Schwingungsversuches:
er lässt sich von einem Versuch zum nächsten nie ganz genau gleich einstellen)
 - ❖ mit der Folge, dass der Vorgang einen völlig unterschiedlichen Verlauf nehmen kann
- trotz (nur vermeintlich) exakt gleicher Bedingungen am Anfang

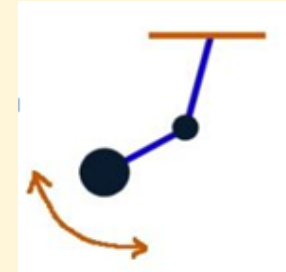
Entwurf



drei Kennzeichen eines komplexen Verhaltens

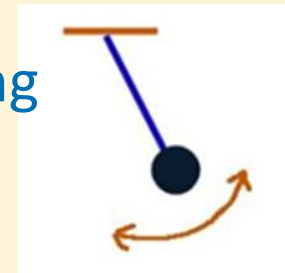
1. *verstärkende* („positive“) Rückkopplung
2. *dämpfende* („negative“) Rückkopplung
3. Empfindlichkeit für kleinste Änderungen

- Drei bekannte **andere Beispiele** für diese Kennzeichen
→ siehe die folgenden drei Folien;
- Für ein tieferes Verständnis dieser Kennzeichen → siehe unsere weiteren Präsentationen über **Wechselwirkungen <hier>** und über **chaotisches Verhalten <hier>**



dagegen nicht komplexe Vorgänge:

- *eine* Ursache (Auslenkung) → *eine* Wirkung
 - keine Wechsel-/ Rückwirkungen
- problemlos wiederholbar

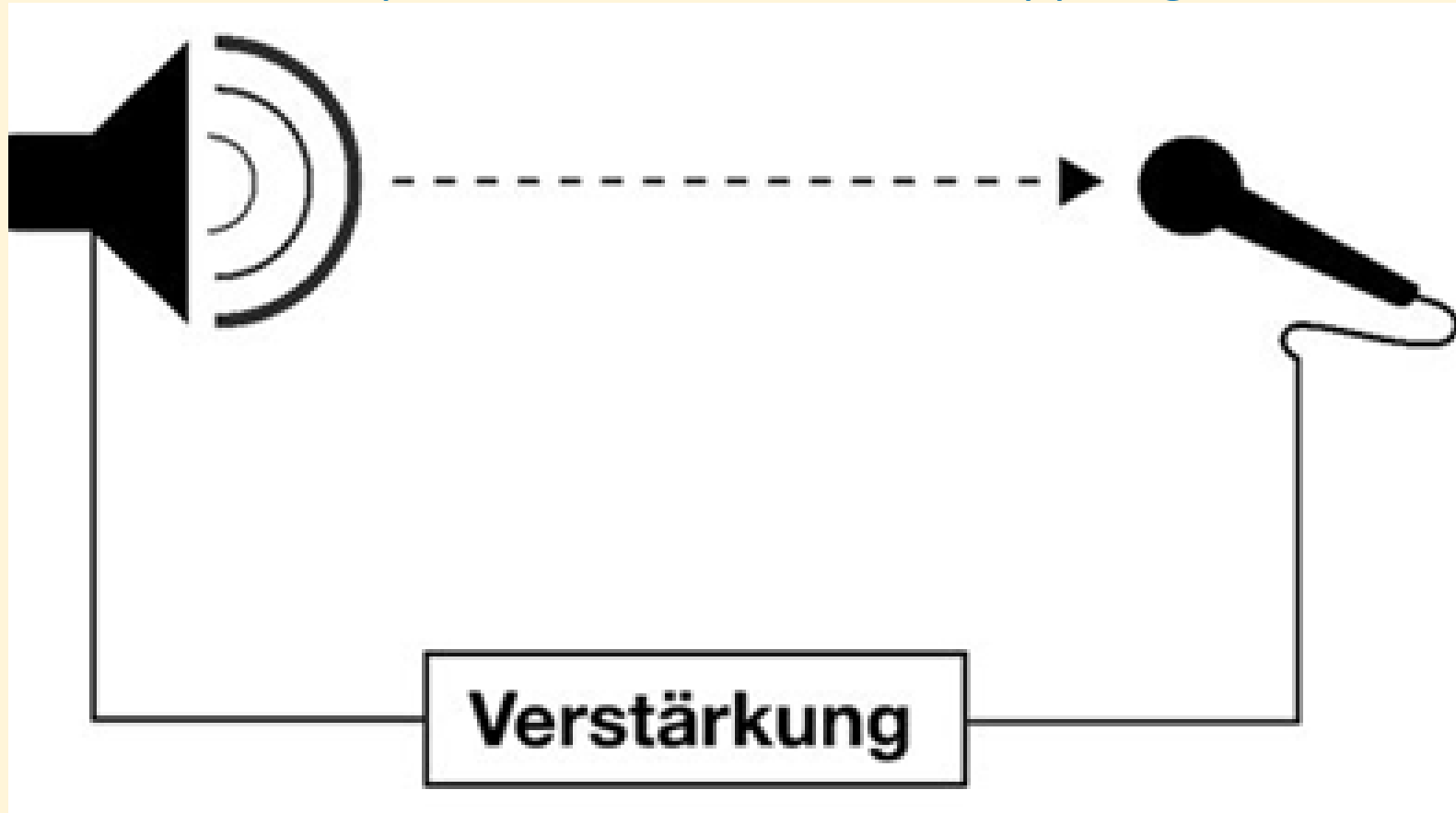


Entwurf



1. Verstärkende („positive“) Rückkopplung

- Das Paradebeispiel: die **akustische** Rückkopplung



Entwurf



2. Dämpfende („negative“) Rückkopplung

- Es entsteht der Eindruck, als ob nichts passiert
- das Sinnbild - **der Thermostat**:
 - die Außentemperatur steigt → die Heizung geht aus
 - die Außentemperatur sinkt → die Heizung geht an



→ die **Raumtemperatur** bleibt weitgehend **konstant**

Entwurf



3. Empfindlichkeit für kleinste Änderungen

- Das berühmteste Beispiel: Der Schmetterlingseffekt

