

Experimentelle Physik I

WS 16/17

Veranstaltung 4010011

<https://campus.studium.kit.edu/event/H7Ke2neVDU6OCiWVculqYw>

PD Dr. Andreas B. Meyer (KIT und DESY)

29. Vorlesung:

6.3 Schwingungen und Wellen (6): Licht und Materie, Nicht-lineare Systeme

Zusammenfassung

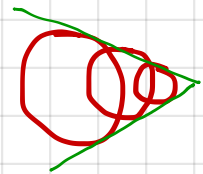
6.2.5 Doppler-Effekt

Quelle oder Empfänger relativ zum Medium Luft bewegt

$$(Q \leftrightarrow) E \quad v' = \frac{1}{1 \pm \frac{v}{c}} v$$

$$Q (\leftrightarrow) E \quad v' = v \cdot (1 \mp \frac{v}{c})$$

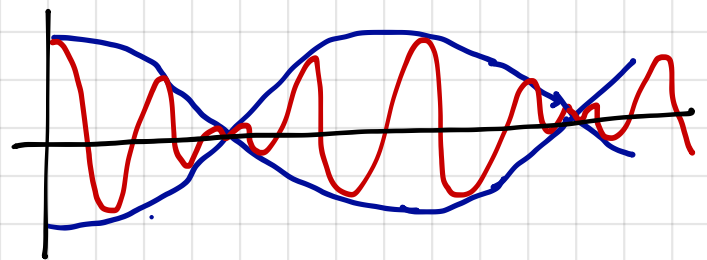
Überschall: $v_Q > c$ Überschallknall



6.2.6 Überlagerung von Wellen

1.) Gruppengeschwindigkeit:

$$v_{Gr} = \frac{d\omega}{dk}$$



Allgemein: $\omega = \omega(k)$

Dispersionsrelation

$$v_{Gr} \neq v_{Ph} \left(= \frac{\omega}{k} \right)$$

$$v_{Gr} = \frac{d}{dk} (v_{Ph} \cdot k) = v_{Ph} + k \cdot \frac{d}{dk} v_{Ph} = v_{Ph} + k \cdot \frac{d}{dk} \frac{\omega(k)}{k}$$

allgemein $\neq 0$

2.) Fourieranalyse

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t)$$

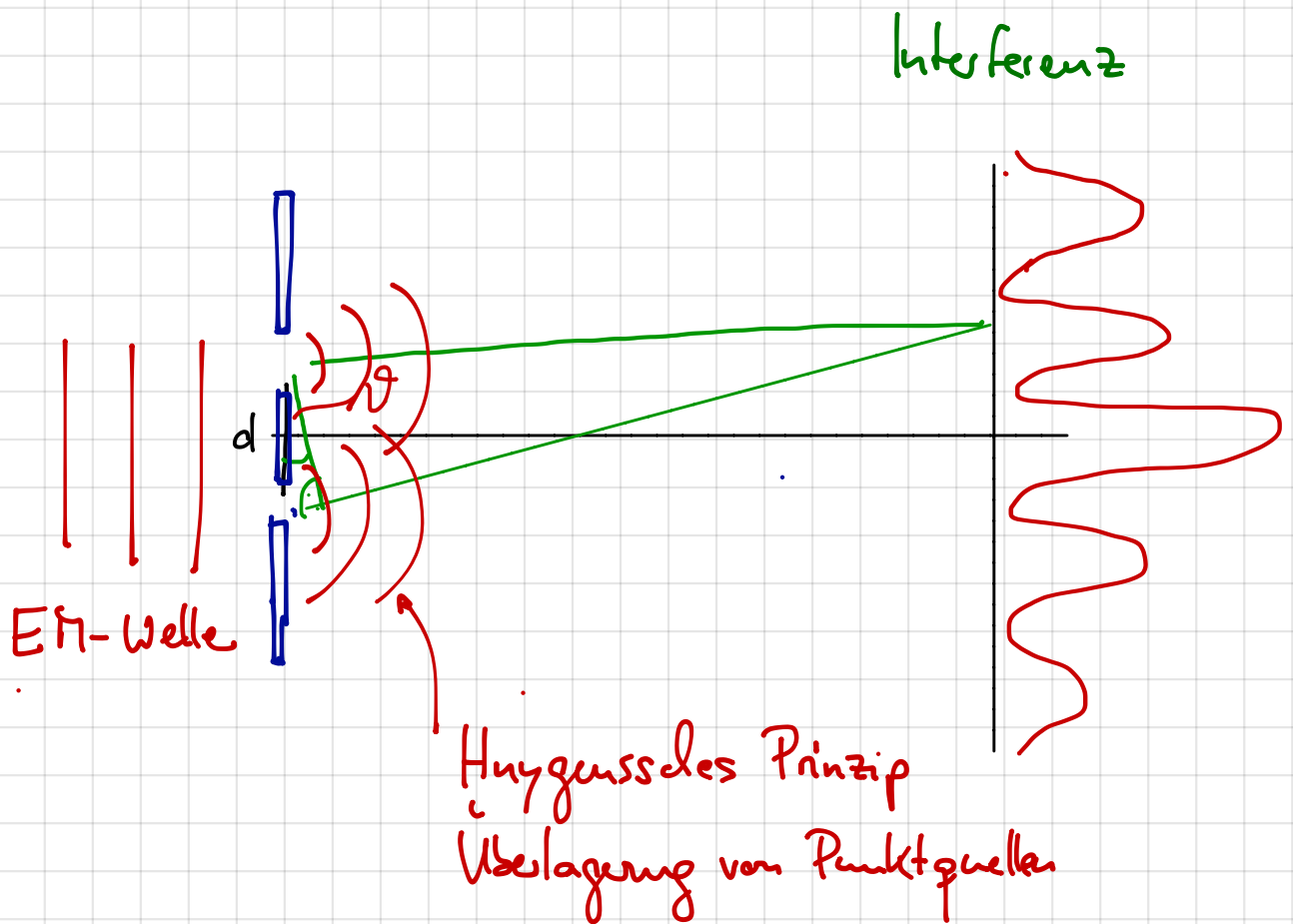
Jede periodische Funktion darstellbar als
Überlagerung von harmonischen Funktionen

3.) Interferenz

Zwei Punktquellen: Maxima, wenn $\Delta L = (L_2 - L_1) = n \cdot \lambda$
 $= d \cdot \sin \vartheta$

6.3. Licht und Materie

1) Licht als EM-Welle



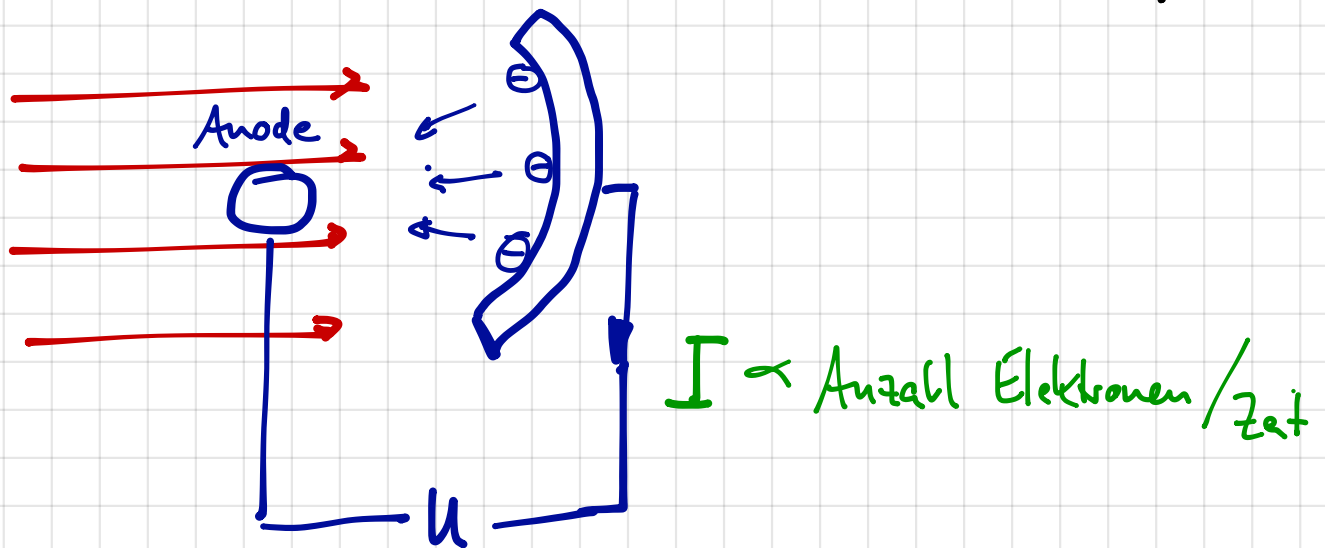
Andere Wellenphänomene:

- Polarisation
- Beugung

2.) Licht als Teilchen

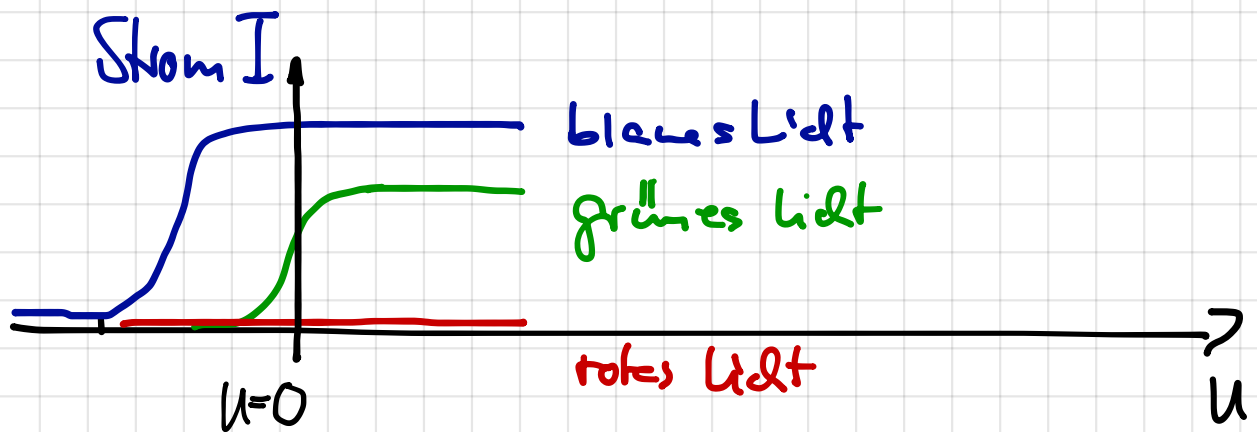
Photoeffekt

H. Hertz
1887



Beobachtungen

- Strom $I \propto$ Intensität des Lichts
- Es fließt auch Strom wenn Spannung umgekehrt:
kinetische Energie der Elektronen abh. von Lichtwellenlänge
aber nicht!! von Intensität \Rightarrow keine Wellen!



c) Je kleiner die Wellenlänge, desto größer die Energie der freigesetzten Elektronen

Erklärung

Einzelne Lichtquanten (Photonen), die ihre Energie übertragen auf einzelne Elektronen:

Im Wellenbild müßte Elektronenenergie von Intensität abhängig sein.

Planck (1900), Einstein (1905)

Energie pro Photon $E_\gamma \propto \nu$

$$\propto \frac{1}{\lambda}$$

Plancksches Wirkungsquantum h $= h \cdot \nu$
 $= h \omega$

Konsequenz: Photonen haben Masse, da $E = mc^2$

Umgekehrt: Teilchen wie Elektronen, Neutronen etc haben Welleneigenschaften \rightarrow Wellenpakete
 \Rightarrow Interferenz.

De Broglie (1923) $p = \frac{h}{\lambda}$

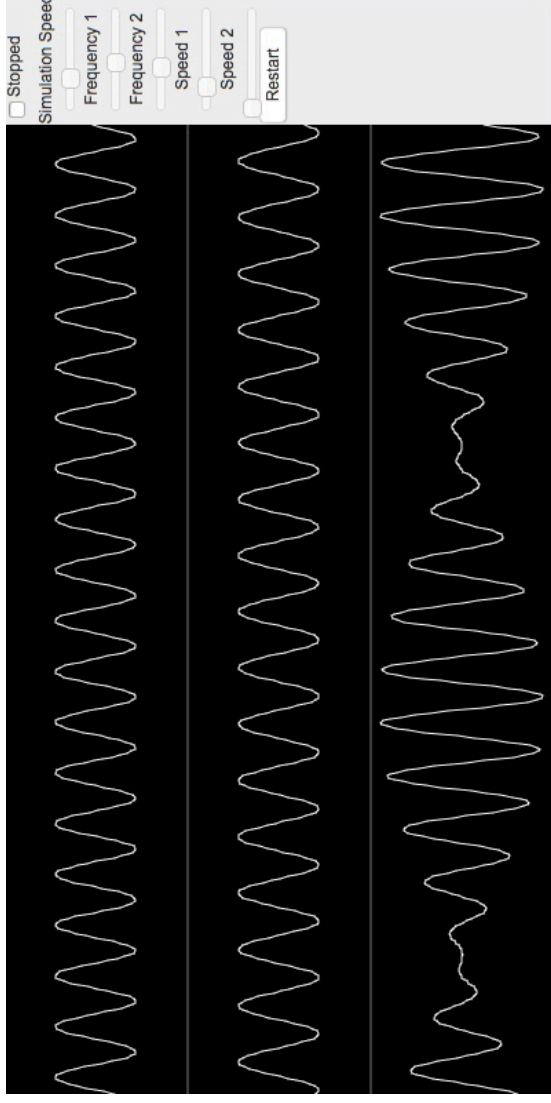
Welle-Teilchen-Dualismus



6.4. Nicht-lineare Dynamik und Chaos

Deterministische Systeme

- **Streuung mechanischer Prozesse aufgrund von kleinen (praktisch unvorhersehbaren) Störungen.**
 - Klassische Physik: Streng deterministisch, d.h. Einzelfall prinzipiell aus Anfangsbedingung vorhersagbar
 - Quantenmechanik: Statistisch, d.h. Einzelfall prinzipiell nicht vorhersagbar, nur Häufigkeitsverteilungen
- **In dieser Vorlesung:**
 - Auswahl von Problemen und Experimenten mit einfachen Randbedingungen, für die analytische Rechnungen zum Ziel führen, d.h. vernünftige Beschreibung liefern.
 - Beispiel: Harmonischer Oszillator: Kraft proportional zur Auslenkung
 - Bewegungsgleichungen sind lineare und i.a. homogene Differentialgleichungen:
 - Analytisch lösbar
 - Es gilt das Superpositionsprinzip

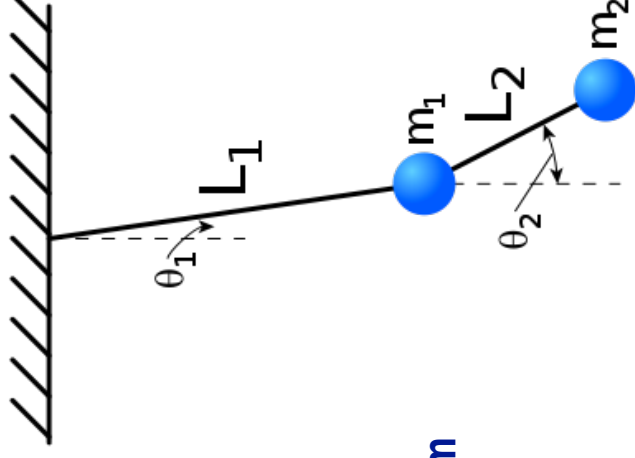


Deterministische Systeme

- **Allgemein:**
 - Voll deterministische Systeme können ebenfalls (scheinbar) zufälliges Verhalten zeigen.
 - Ein nicht-linearer Term in der Bewegungsgleichung: Superpositionsprinzip gilt nicht mehr
- **Dann meist:**
 - Keine analytische Lösung möglich oder bekannt
 - Starke Abhängigkeit von Anfangsbedingungen
 - Instabiles Verhalten, kleine Ursachen haben große Wirkungen
 - Keine Vorhersagbarkeit auf lange Sicht



Beispiel: Doppel-Pendel



Quelle: Wikipedia

- Aus Energie und Drehimpulserhaltung kann die Bewegungsgleichung hergeleitet werden (→ TheoB)
- Bewegungsgleichungen für zwei Pendel in homogenem Gravitationsfeld:

$$(m_1 + m_2) l_1 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_2 \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + m_2 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + g l_1 (m_1 + m_2) \sin \theta_1 = 0$$
$$m_2 l_2 \ddot{\theta}_2 + m_2 l_1 \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) - m_2 l_1 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + g l_2 m_2 \sin \theta_2 = 0$$

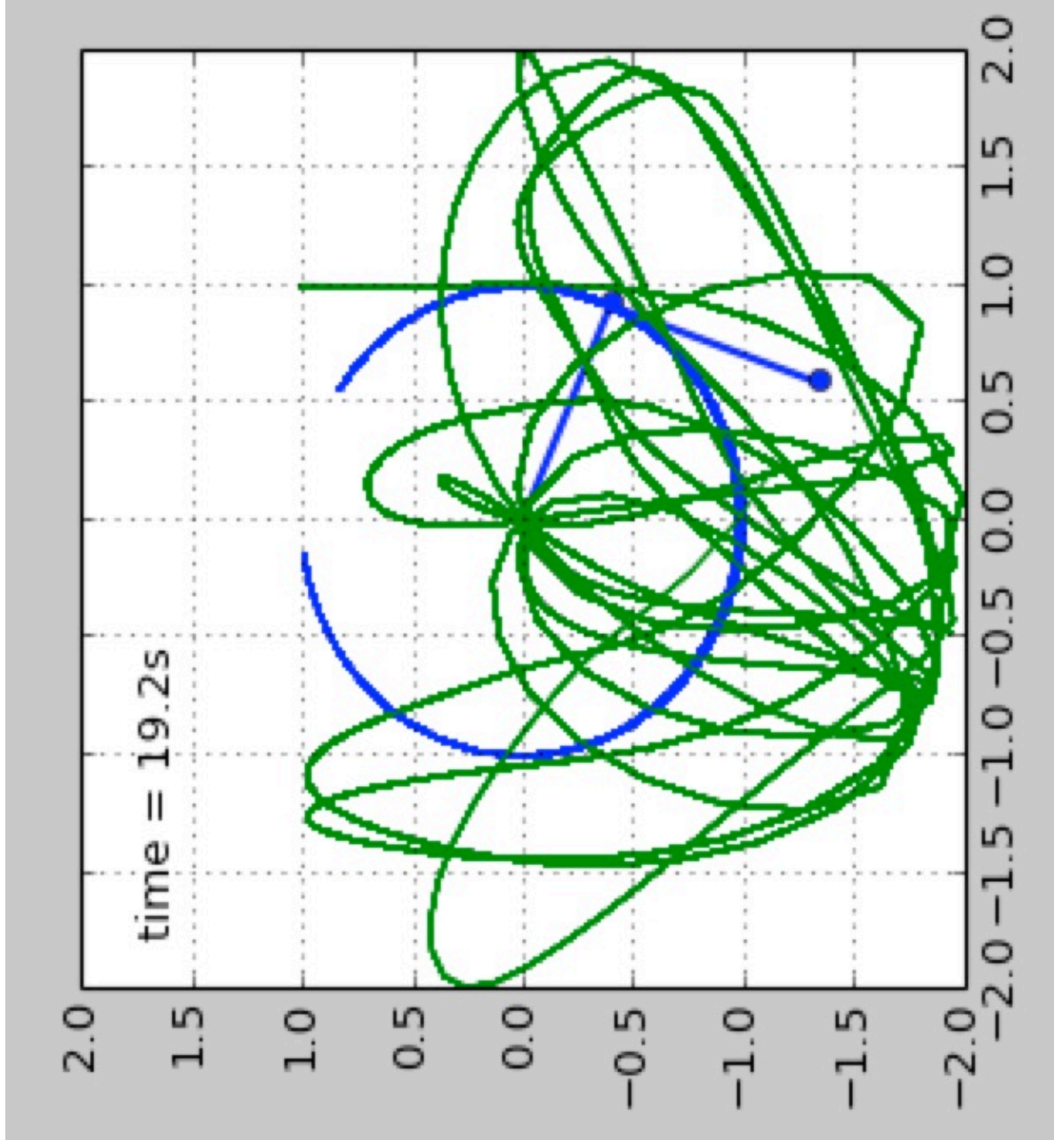
- Nicht-lineare homogene Differentialgleichung 2.Ordnung
- **Bemerkung:** Kleinwinkelnäherung hier noch nicht angewendet

Nicht-lineares Anfangswert-Problem

- **Numerische Verfahren zur Lösung sogenannter nicht-linearer Anfangswertprobleme**
 - i.a. werden Differentiale durch (viele kleine) Differenzenquotienten ersetzt.
 - Methoden zur Abschätzung und Minimierung der dadurch entstandenen Fehler
- **Konkretes Beispiel hier: Implementierung in Python mit Rechenpaket SciPy**
 - Funktion `scipy.integrate.odeint` behandelt Differentialgleichungen 1.Ordnung
 - Substitution $\omega(t) = d/dt \theta(t)$
 - Konstruktion eines Systems von vier Differentialgleichungen 1.Ordnung
- **Physik: Einsatz von Software zur numerischen Lösung von physikalischen Problemen**
- **Chaos-Theorie: Erforschung von Regelmäßigkeiten im Verhalten nicht-linearer, chaotischer Systeme**

Doppel-Pendel mit scipy

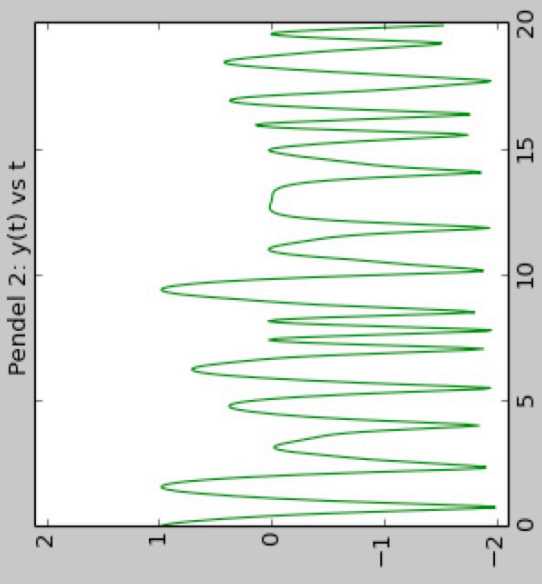
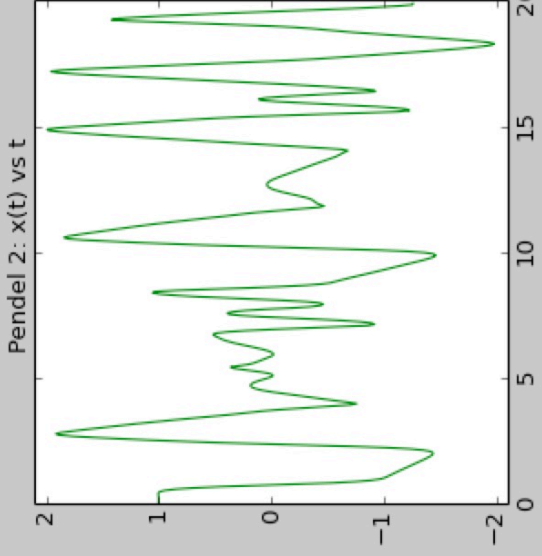
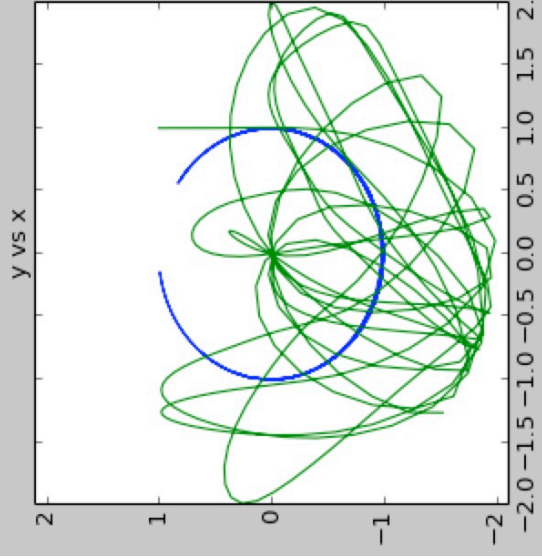
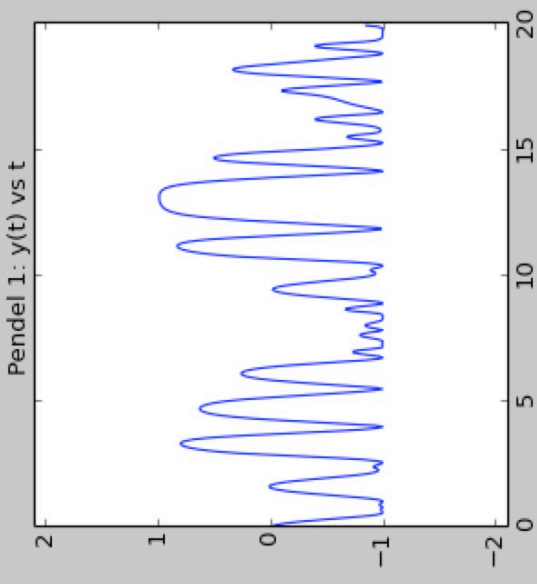
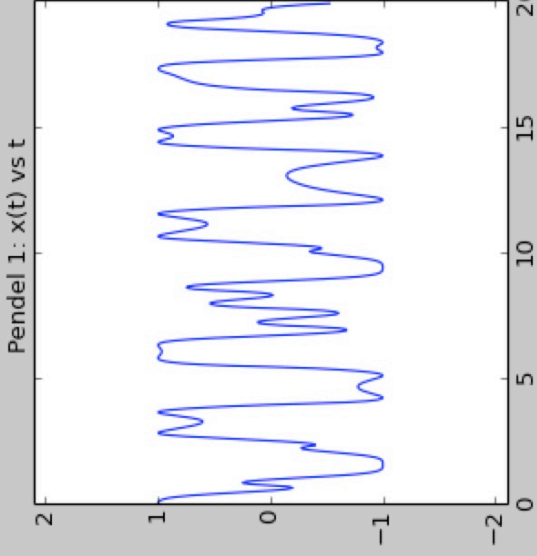
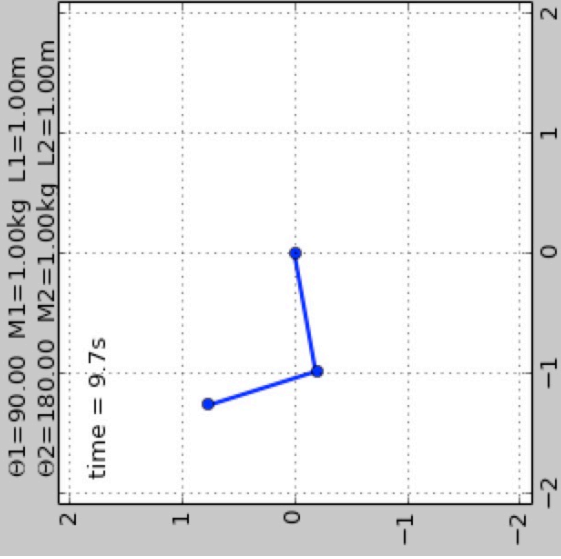
matplotlib.org/examples/animation/double_pendulum_animated.html



Doppel-Pendel

Pendelparameter: $m_1 = 1 \text{ kg}$, $L_1 = 1 \text{ m}$, $m_2 = 1 \text{ kg}$, $L_2 = 1 \text{ m}$

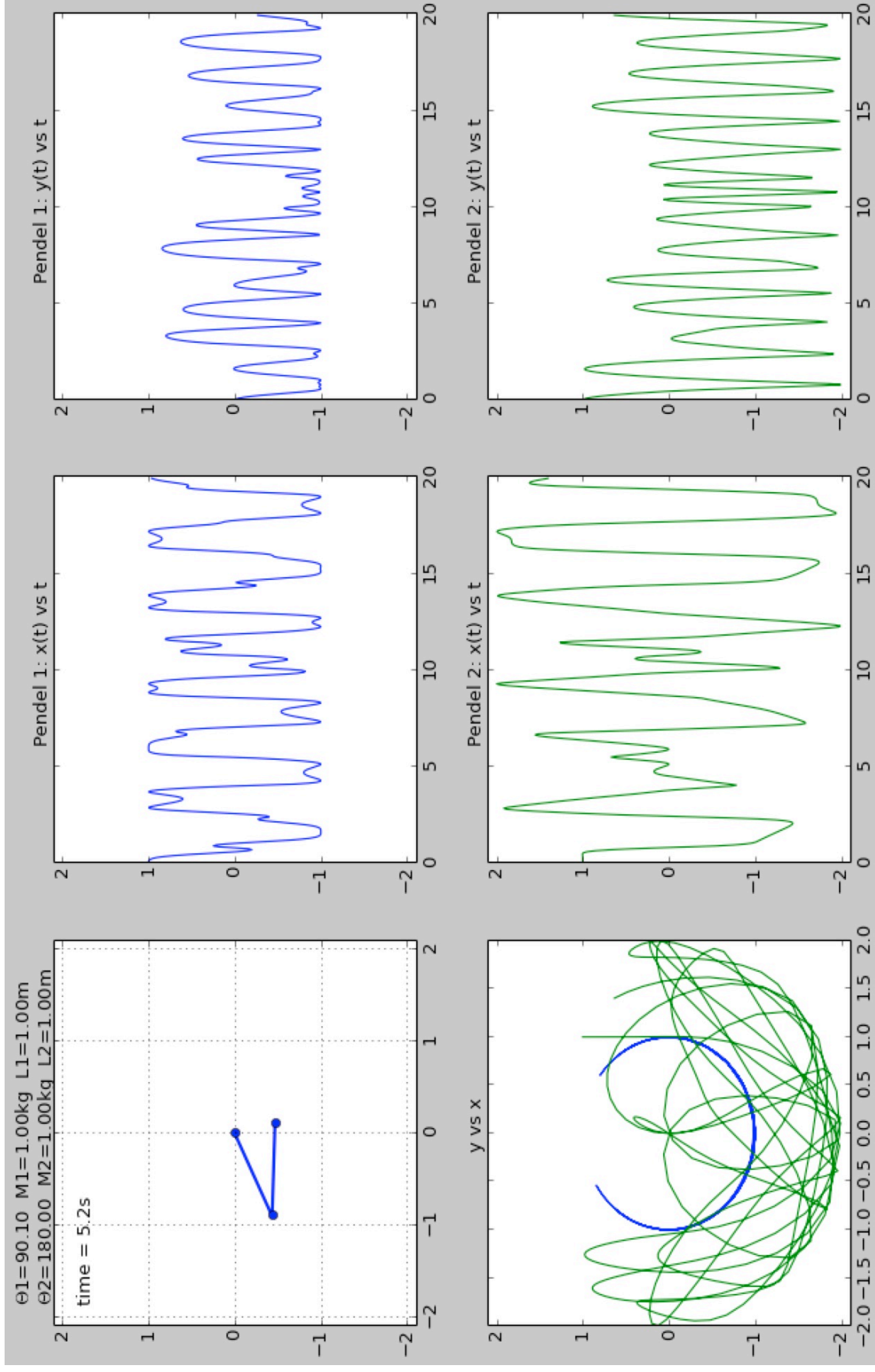
Anfangsbedingungen: $\theta_1(0) = 90.0^\circ$; $\theta_2(0) = 180.0^\circ$; $\dot{\theta}_1(0) = \dot{\theta}_2(0) = 0$



Doppel-Pendel

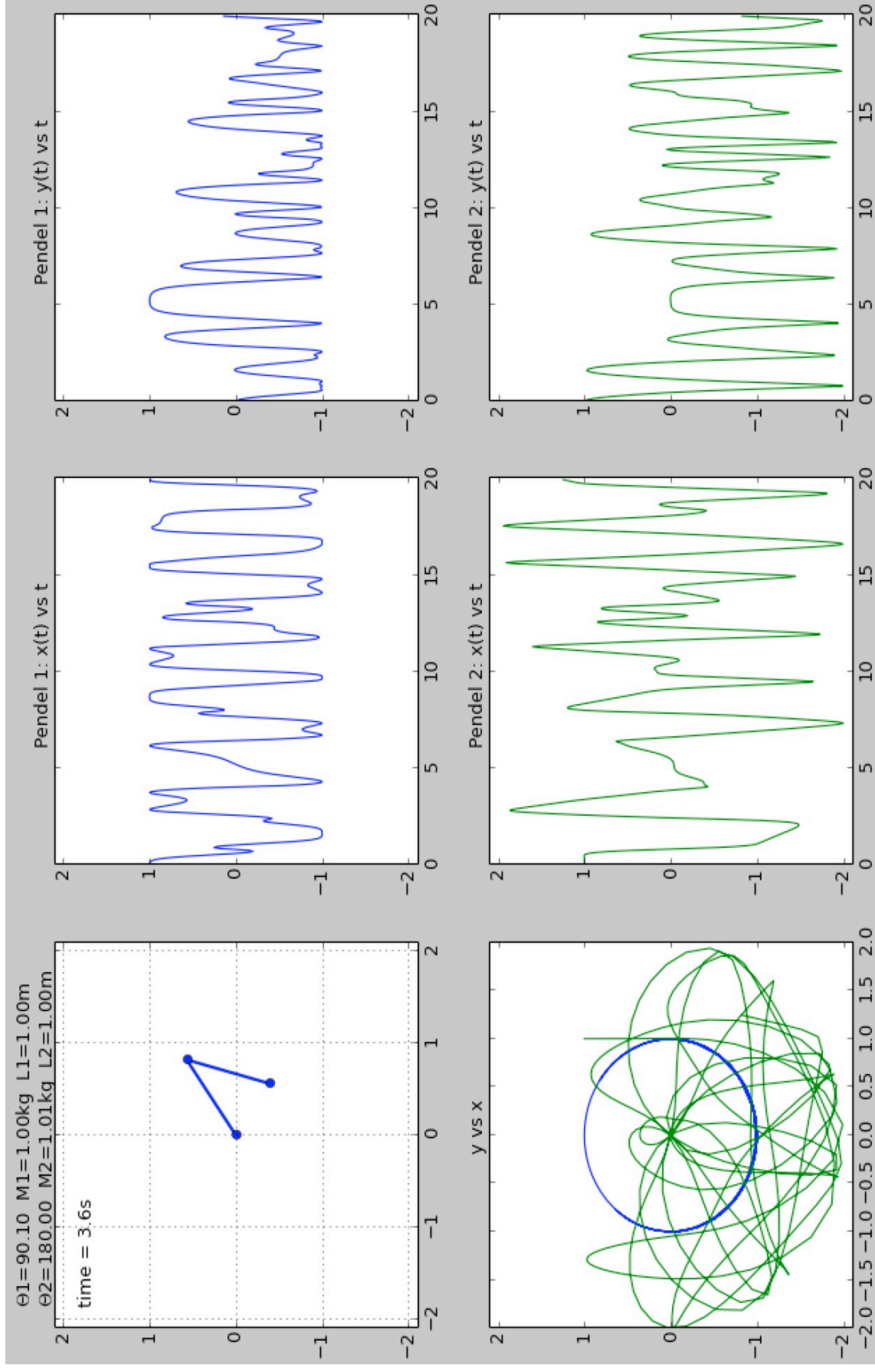
Pendelparameter: $m_1 = 1 \text{ kg}$, $m_2 = 1 \text{ kg}$, $L_1 = 1 \text{ m}$, $L_2 = 1 \text{ m}$

Anfangsbedingungen: $\theta_1(0) = 90.1^\circ$; $\theta_2(0) = 180.0^\circ$; $\dot{\theta}_1(0) = \dot{\theta}_2(0) = 0$



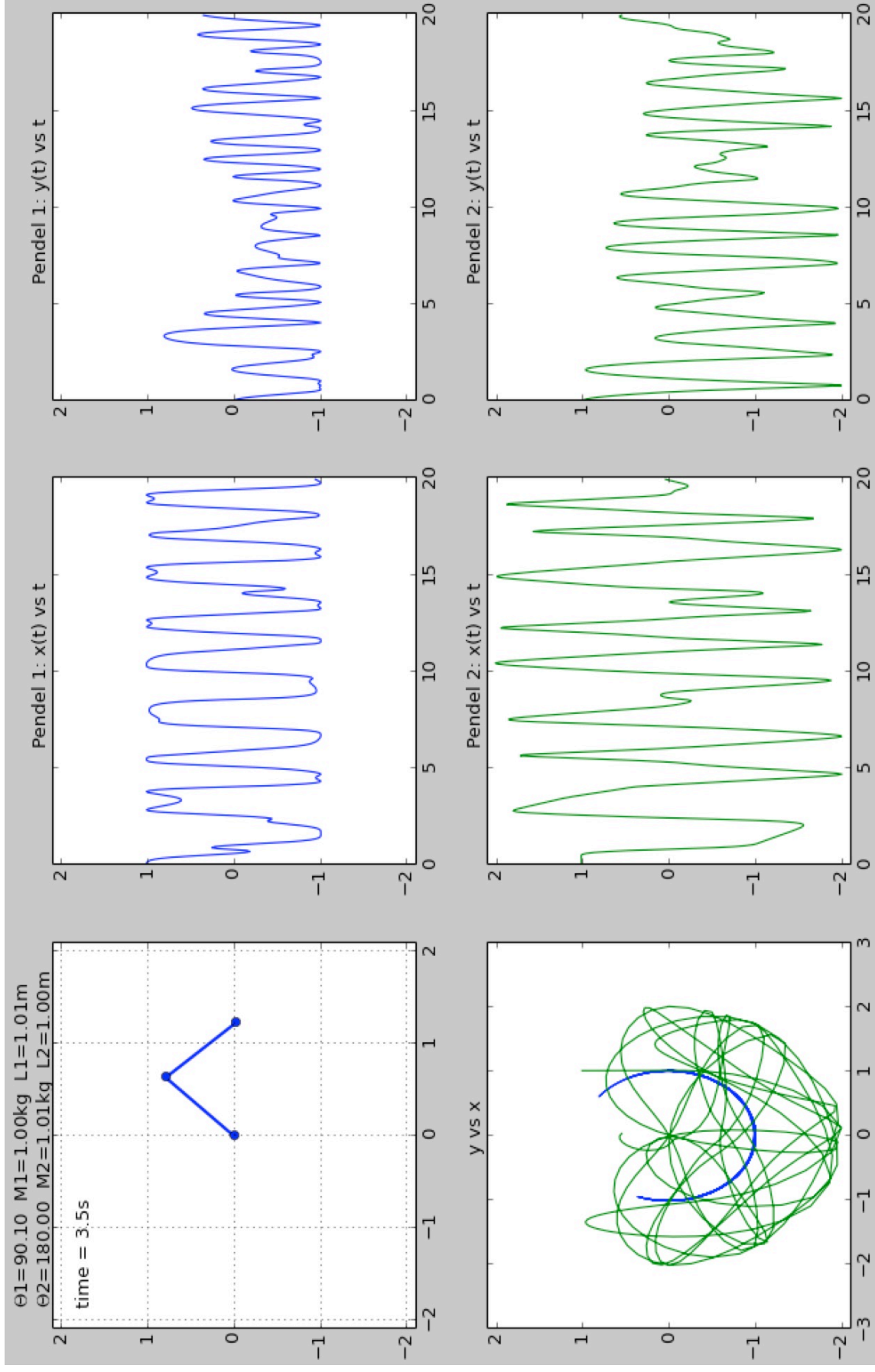
Doppel-Pendel

Pendelparameter: $m_1 = 1 \text{ kg}$, $m_2 = 1.01 \text{ kg}$, $L_1 = 1 \text{ m}$, $L_2 = 1 \text{ m}$
Anfangsbedingungen: $\theta_1(0) = 90.1^\circ$; $\theta_2(0) = 180.0^\circ$; $\dot{\theta}_1(0) = \dot{\theta}_2(0) = 0$



Doppel-Pendel

Pendelparameter: $m_1 = 1 \text{ kg}$, $m_2 = 1.01 \text{ kg}$, $L_1 = 1.01 \text{ m}$, $L_2 = 1 \text{ m}$
Anfangsbedingungen: $\theta_1(0) = 90.1^\circ$; $\theta_2(0) = 180.0^\circ$; $\dot{\theta}_1(0) = \dot{\theta}_2(0) = 0$



7. Quiz

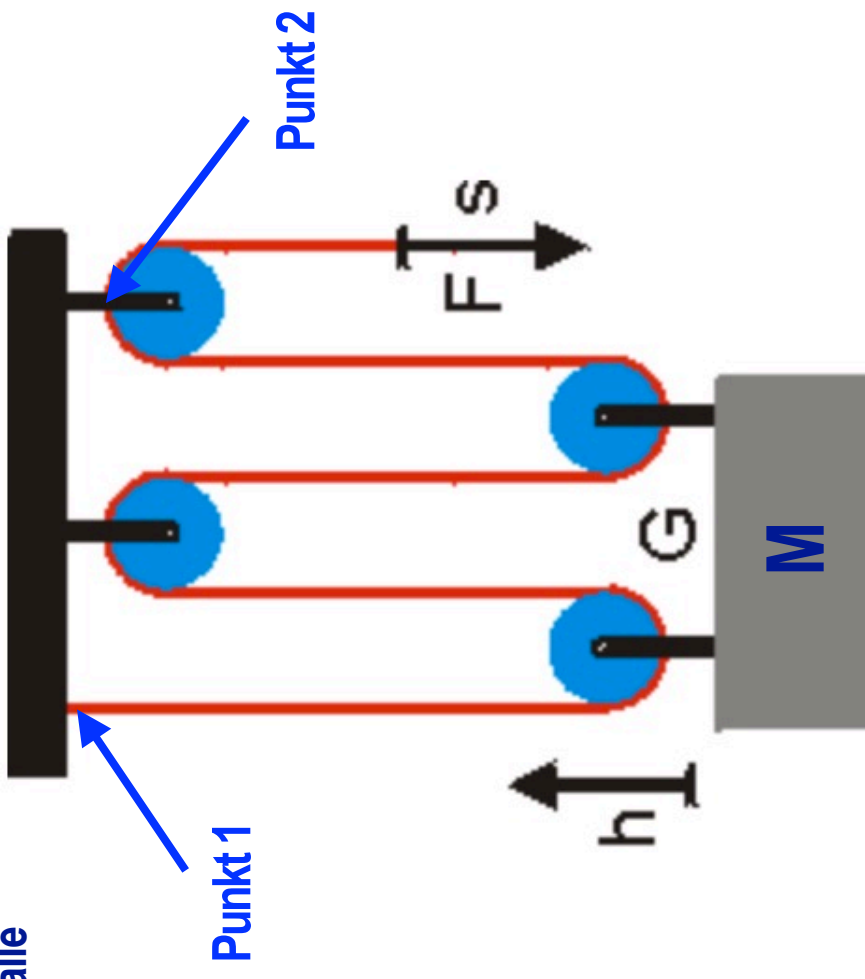
<http://pingo.upb.de/493900>

Richtige Antworten sind unterstrichen

Frage 1: Flaschenzug

<http://pingo.upb.de/493900>

- Ein Gewicht G soll um die Höhe h angehoben werden. Dazu zieht man mit dem Flaschenzug mit der Kraft F die Strecke s . Vernachlässigen Sie alle Reibung, sowie Seil- und Rollengewichte.



- Welche Aussagen sind richtig?

1. $F s = G h$
2. $F/s = G/h$
3. $G = 2F$
4. $G = 3F$
5. $G = 4F$

- In welche Richtung wirkt die Kraft des Seils an folgenden Stellen ?

- in Punkt 1:
 6. nach unten
 7. nach oben
- in Punkt 2:
 8. nach unten
 9. nach oben

Frage 2: Steinwurf

<http://pingo.upb.de/4933900>

- Sie lassen einen 1 kg schweren Stein in einen Brunnen fallen und hören es nach $t = 2 \text{ s}$ platschen.
Wie tief ist der Brunnen? (Annahme $g=10\text{ms}^{-2}$)
 1. $s = 10 \text{ m}$
 2. $s = 20 \text{ m}$
 3. $s = 40 \text{ m}$

- Bei einem 2kg schweren Stein geht es
 4. halb so schnell
 5. doppelt so schnell
 6. genau gleich

- Ein Stein wird genau senkrecht hochgeworfen. Trifft er genau an der gleichen Stelle wieder auf?
 7. Ja, weil die Erde ein Inertialsystem ist
 8. Ja, weil die Erde kein Inertialsystem ist
 9. Nein, weil die Erde kein Inertialsystem ist und sich unter dem Stein wegdreht
 10. Nein, weil die Erde kein Inertialsystem ist und sich der Stein mit ihr mitdreht

Frage 3: Kraftfeld und Arbeit

<http://pingo.upb.de/4933900>

- **In einem konservativen Kraftfeld gilt:**
 1. Die Arbeit hängt von Anfangs- und Endpunkt ab
 2. Die Arbeit hängt nicht von Anfangs- und Endpunkt ab
 3. Die potentielle Energie ist erhalten
 4. Die kinetische Energie ist erhalten
 5. Die Kraft ist proportional zum Gradienten eines Potentials
 6. Das Potential ist proportional zum Gradienten einer Kraft

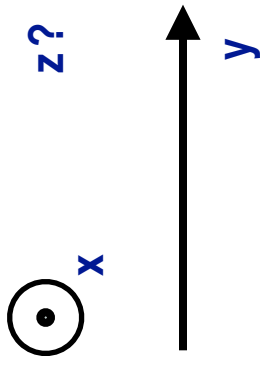
- **Energie- und Impulserhaltung: In inelastischen Stößen ist ...**
 7. ... die Summe der kinetischen Energien erhalten
 8. ... die Summe der kinetischen Energien nicht erhalten
 9. ... die Summe der Impulse erhalten
 10. ... die Summe der Impulse nicht erhalten

Frage 4: Rotation

<http://pingo.upb.de/4933900>

- Ein rechtshändiges Koordinaten-System wird so gezeichnet, dass die x-Achse nach vorn (aus der Bildebene heraus) und die y-Achse nach rechts weist. Wohin zeigt die z-Achse?

1. rechts
2. links
3. oben
4. unten
5. hinten
6. vorn



- **Wohin zeigt der Vektor $(0,1,0)$ x $(1,0,0)$?**

7. positive x-Richtung
8. positive y-Richtung
9. positive z-Richtung
10. negative x-Richtung
11. negative y-Richtung
12. negative z-Richtung

- Ein massiver Zylinder und eine Kugel gleicher Masse und gleichen Radius rollen (rollreibungsfrei) eine schiefe Ebene runter. Welcher Körper ist schneller?
 1. beide gleich
 2. Kugel
 3. Zylinder

- Welche Aussagen sind korrekt?
 4. $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$
 5. $\vec{M} = \vec{F} \times \vec{r}$
 6. $\vec{L} = d\vec{M}/dt$
 7. $\vec{L} = J \vec{\omega}$
 8. $\vec{M} = J \vec{\omega}$

Frage 6: Corioliskraft

<http://pingo.upb.de/4933900>

- **In welche Richtung zeigt die Winkelgeschwindigkeit der Erde?**
 1. Norden
 2. Süden
 3. Osten
 4. Westen
 5. die Winkelgeschwindigkeit ist eine skalare Größe

- **In welche Richtung dreht sich die Ebene des Foucaultschen Pendels auf der Nordhalbkugel aus Sicht eines auf der Erde ruhenden Betrachters?**
 6. für nach Norden orientierte Pendel nach rechts
 7. für nach Westen orientierte Pendel nach links
 8. hängt von der Orientierung des Pendels ab
 9. hängt nicht von der Orientierung des Pendels ab

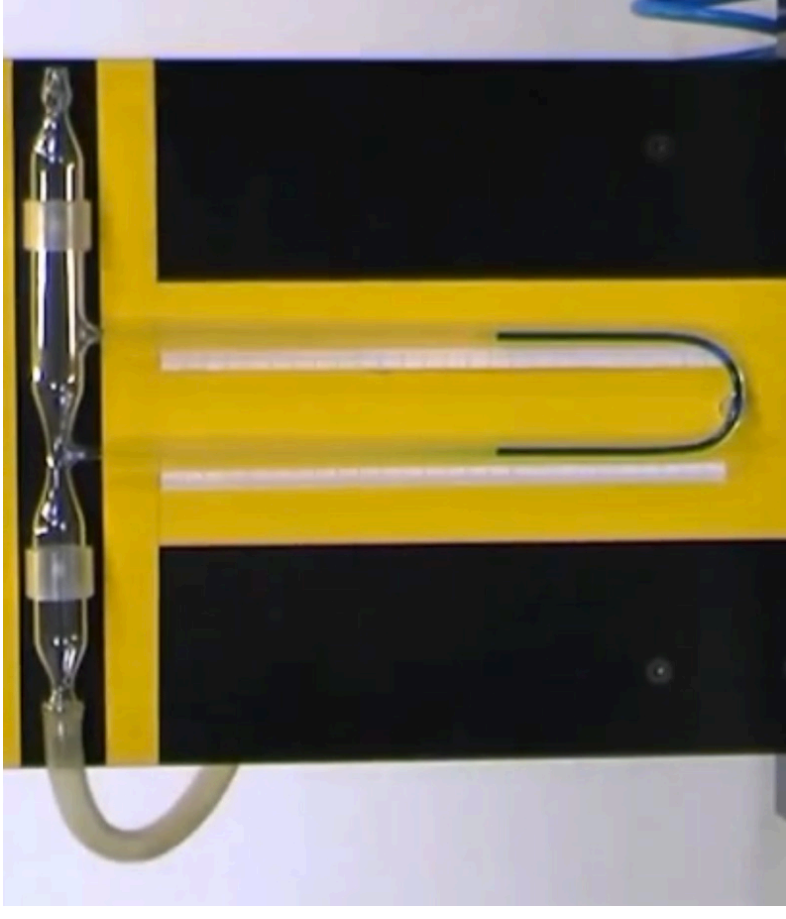
Frage 7: Venturi-Rohr

<http://pingo.upb.de/493900>

- Das Glasrohr oben ist an einer Stelle verengt. Die linke Seite des U-Rohrs unten mündet an dieser Stelle. Die rechte Seite des U-Rohrs mündet an einer Stelle mit breiterem Querschnitt

- Luft wird von rechts durchgeblasen. Im U-Rohr sind die Pegel:
 1. rechts höher als links
 2. links höher als rechts
 3. rechts und links gleich

- Luft wird von links durchgeblasen. Im U-Rohr sind die Pegel:
 4. rechts höher als links
 5. links höher als rechts
 6. rechts und links gleich



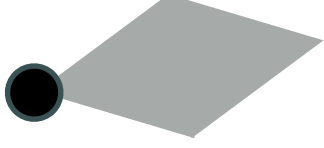
Frage 8: Schwingungen

<http://pingo.upb.de/4933900>

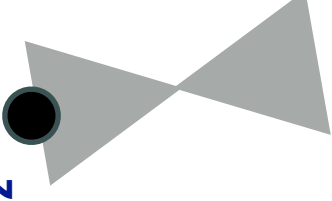
- Zwei Pendel gleicher Masse und gleichen Volumens, aber unterschiedlicher Form: Welches Pendel hat eine größere Periodendauer?

1. Pendel 1
2. Pendel 2
3. beide gleich

Pendel 1



Pendel 2



- Erzwungene Schwingung: Im Grenzfall kleiner Dämpfung ist die Phase oberhalb der Resonanz näherungsweise verschoben um

4. $+\pi$
5. $-\pi$
6. $+\pi/2$
7. $-\pi/2$

Frage 9: Zeitdilatation

<http://pingo.upb.de/493900>

- **Ein Objekt (beispielsweise ein Myon aus der Höhenstrahlung) bewegt sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit von der äußeren Atmosphäre auf die Erde zu. Welche Aussagen sind richtig?**
 1. Die Flugzeit des Myons von der Erde aus gemessen ist länger als die im System des Myons
 2. Die Flugzeit des Myons von der Erde aus gemessen ist kürzer als die im System des Myons
 3. Die Dicke der Atmosphäre aus Sicht des Myons ist kleiner als von der Erde aus gemessen
 4. Die Dicke der Atmosphäre aus Sicht des Myons ist größer als von der Erde aus gemessen