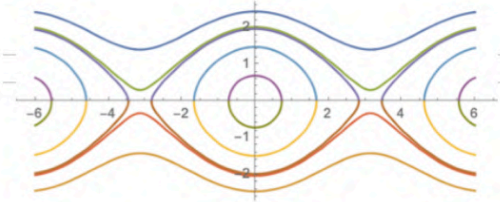
Universität Siegen



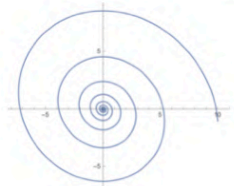
SUBATOMIC HEROES

Ankündigung für das Wintersemester 2024/25

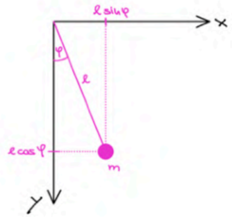
Das theoretische Minimum I

Mechanik - von Newton über Emmy Noether zu Heisenberg

Prof. Dr. Alexander Lenz, 4PHY00011V



$$\boxed{\overrightarrow{F} = m\vec{a} = m\ddot{\vec{x}}}$$



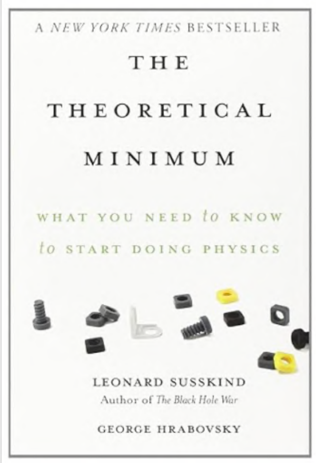
Diese Vorlesungsreihe gibt eine Einführung in die Grundprinzipen der theoretischen Physik.

Im Wintersemester 2024/25 beschäftigen wir uns u.a. mit vermeintlich einfachen Problemen, wie dem Pendel oder dem Kepler-Problem (Planetenbahnen). Ausgehend von den **Newtonschen Axiomen** wird eine moderne und elegante Formulierung der theoretischen Mechanik vorgestellt, aus der später die Quantenmechanik direkt abgeleitet werden kann - dies wird der sogenannte **Lagrange-** und **Hamilton-Formalismus** sein. Weiter werden eingehend Symmetrieprinzipen diskutiert - insbesondere das zum Veranstaltungsort passende **Noether-Theorem** -, auf dessen Verallgemeinerung die heutige Elementarteilchenphysik und unser gesamtes Verständnis der Welt beruht.

$$L \;=\; L(x,\dot{x}) = E_{Kin} - E_{Pot} = \frac{m}{2}\dot{x}^2 - U(x)\,,$$

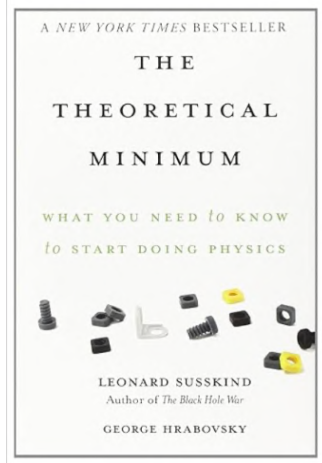
Die Vorlesung richtet sich an Mittwochsakademiker, Oberstufenschülerinnen und -schüler, Lehrkräfte, Physikenthusiasten mit einem großen Interesse an aktuellen Themen der Physik. Es werden mathematische Konzepte (auf dem Niveau der gymnasialen Oberstufe) eingeführt und benutzt. Die Vorlesung ist an die erfolgreiche Vorlesungs- und Buchreihe "**The theoretical Minimum**" von Leonard Susskind angelehnt, welche auf dieselbe Zielgruppe ausgerichtet war. Vom Niveau her wird sich die Veranstaltung auf dem schmalen Grat zwischen einer rein populärwissenschaftlichen Bildershow und einer theoretischen Physikvorlesung im Bachelorstudium bewegen.

9 Termine im Wintersemester 24/25:
20.11., 27.11., 4.12., 11.12, 18.12. ,8.1., 15.1., 22.1., 29.1.
Mittwochs 16-18
Emmy Noether Campus ENC-D-114
Infos unter: alexander.lenz@uni-siegen.de
https://tp1.physik.uni-siegen.de/mittwochsakademie/



Vorlesung: Das theoretische Minimum

Mittwochsakademie



angelehnt an
“The theoretical Minimum“ von Leonard Susskind
https://theoreticalminimum.com/

Ziel dieser Ringvorlesung ist es nicht-triviale Einblicke in die Struktur und Grundprinzipien physikalischer Gesetzen zu geben.

16:15- 17:00 Allgemeine Einführung
17:00 - 18:00 Mathematische Vertiefung.

Allgemeinverständlich **Fortgeschritten**

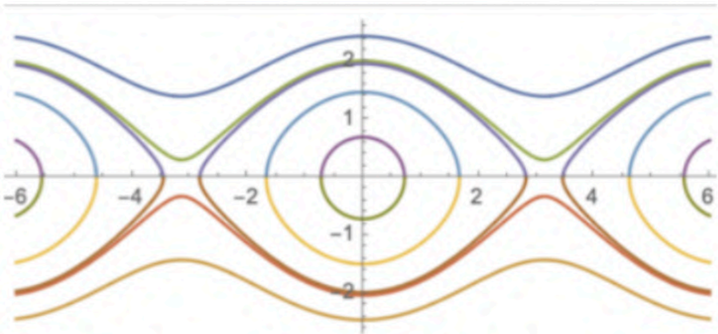
Vorlesung: Das theoretische Minimum
Mittwochsakademie

Netflix - 3 body problem

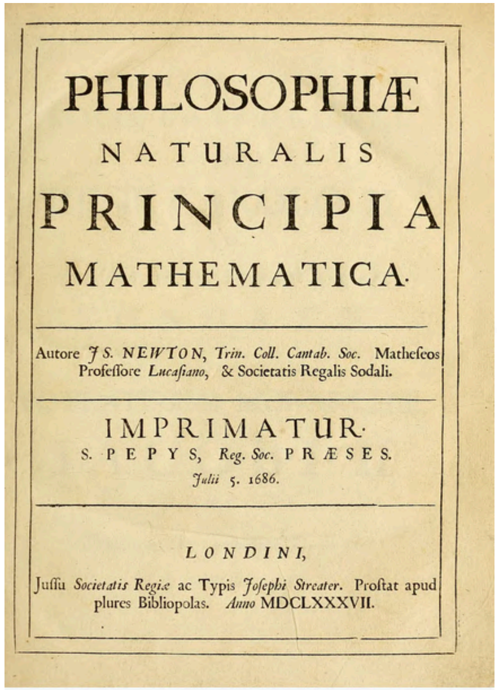
Ablauf

20.11. Zustandsdiagramme und die Natur physikalischer Gesetze
27.11. Newtonsche Gesetze, Phasenraum, Impuls und Energie
4.12. Lagrange-Funktion, Minimale Wirkung, Euler-Lagrange
11.12. Symmetrien und Erhaltungssätze
18.12. Hamilton-Funktion

8.1. Hamilton-Gleichungen
15.1. Liouville Theorem
22.1. Poisson Klammern
29.1. Elektrische und magnetische Felder



Phasenraumbild vom harmonischen Oszillator

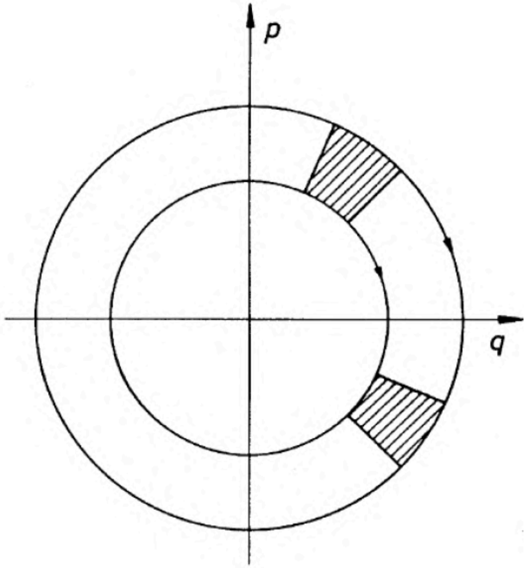


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA

Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.



Liouville Theorem

Was ist Physik?

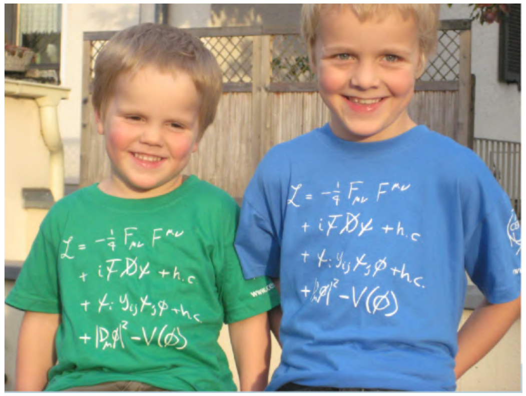
**In der Natur gibt es Gesetze,
die mit Hilfe der Mathematik beschrieben werden können**

Durch Experimente versuchen wir

i) diese Gesetze zu finden,

ii) diese mathematisch zu formulieren

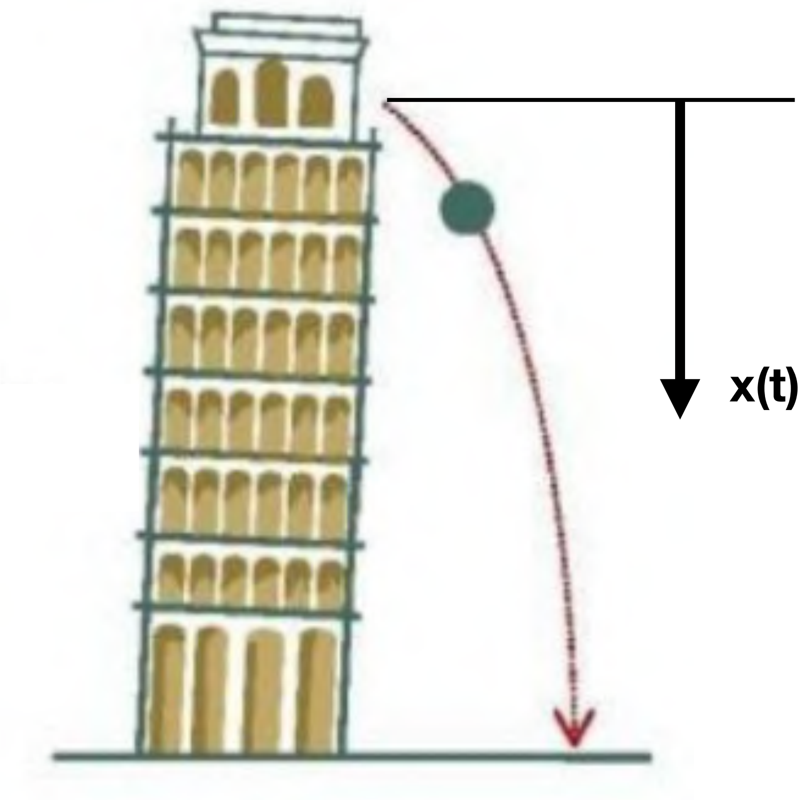
iii) und dann auf elementarere Prinzipien zurückzuführen



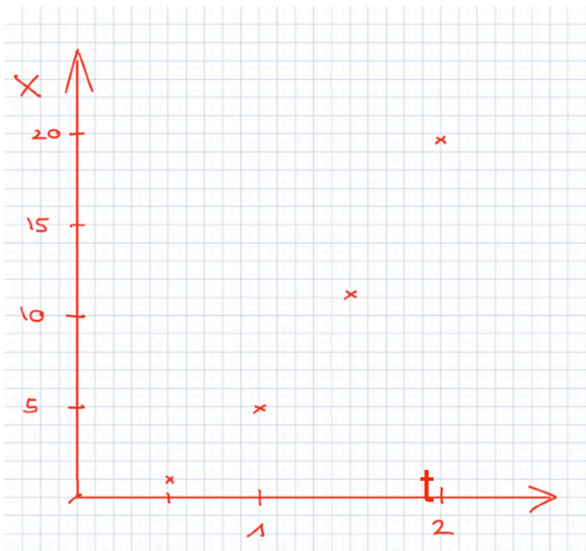
**Physik ist keine Religion!
Wir kennen die letzten, fundamentalsten Gesetzte (noch) nicht,
aber wir kennen den Weg zur Erkenntnis und
die bisherige Erkenntnis hat Unmengen an technologischen Anwendungen ermöglicht**

Beispiel: Fallgesetze

Messung:



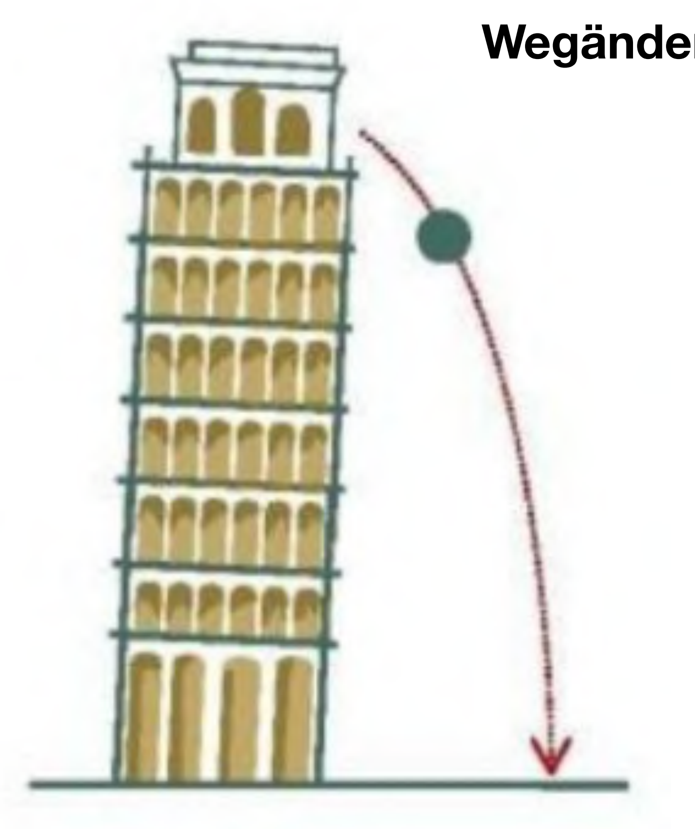
x	5 m	10m	20m
t	1s	1.5s	2s



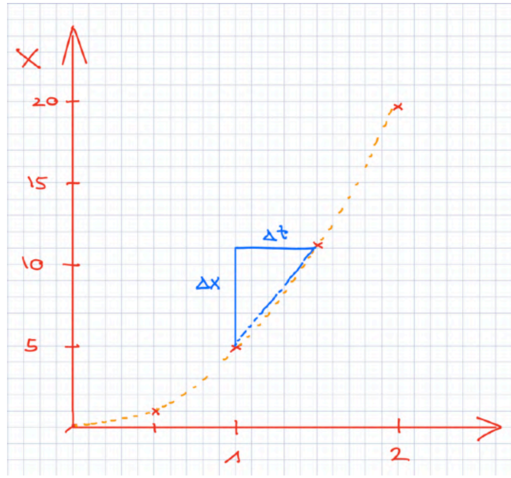
Empirischer Zusammenhang zwischen Fallhöhe x und Fallzeit t

Beispiel: Fallgesetze

Geschwindigkeit $v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t}$



Wegänderung pro Zeit

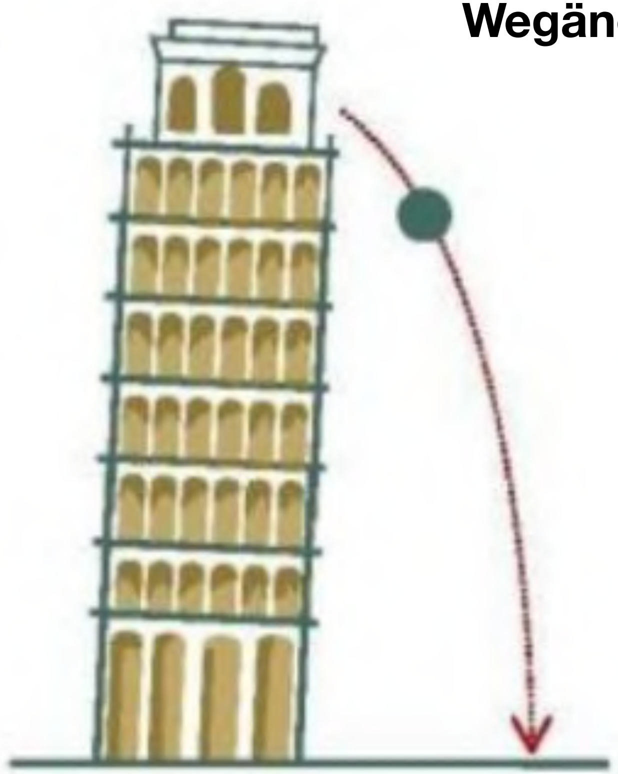


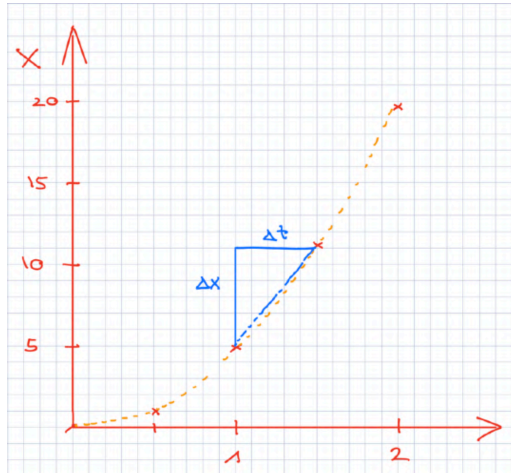
Beispiel: Fallgesetze

Geschwindigkeit $v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t}$

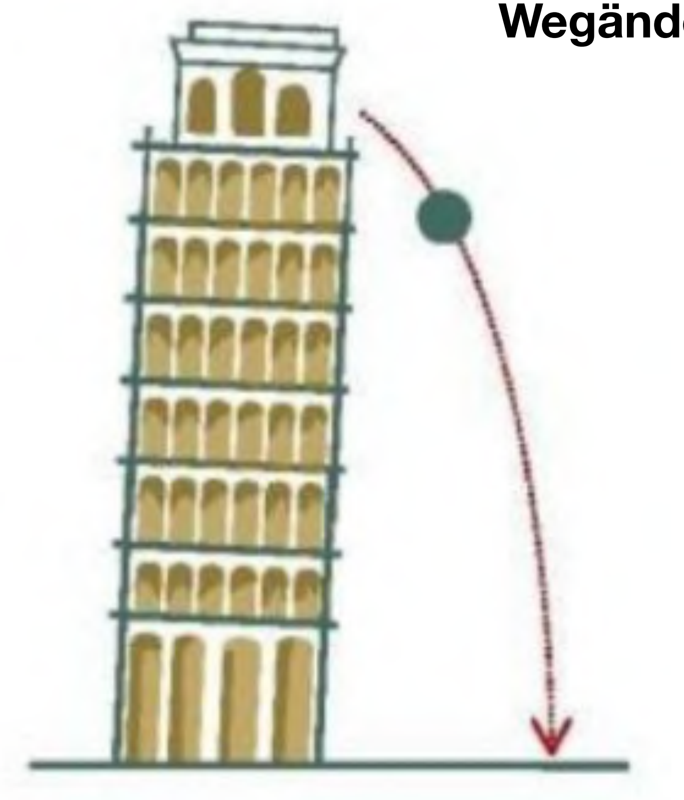
Mathematik: Ableiten

Wegänderung pro Zeit





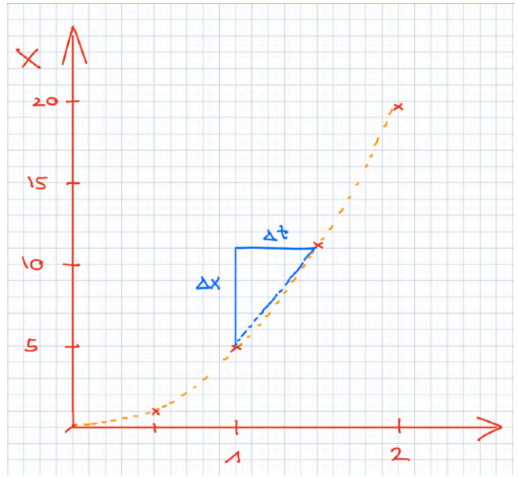
Beispiel: Fallgesetze



Geschwindigkeit $v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t}$

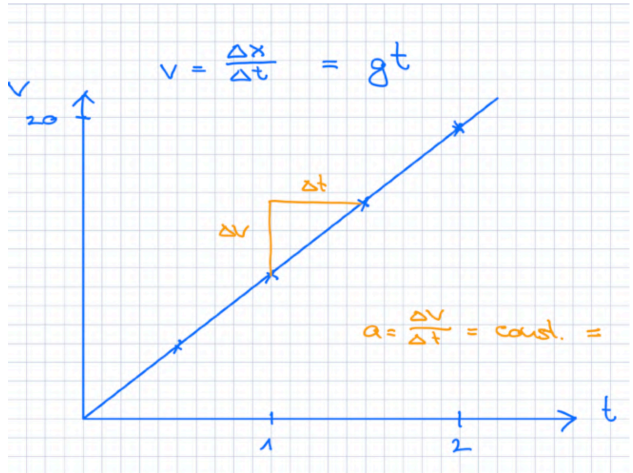
Mathematik: Ableiten

Wegänderung pro Zeit



Beschleunigung $a = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}$

Geschwindigkeitsänderung pro Zeit



Was ist Physik?

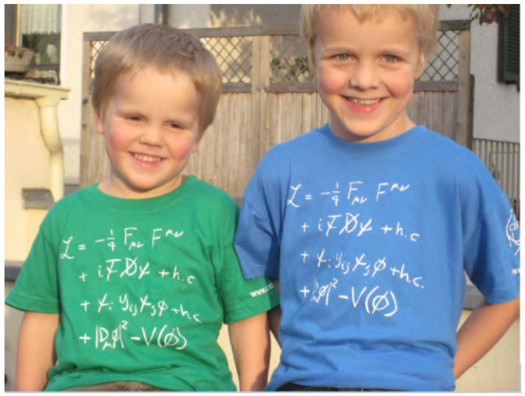
In der Natur gibt es Gesetze,
die mit Hilfe der Mathematik beschrieben werden können

Durch Experimente versuchen wir

i) diese Gesetze zu finden,

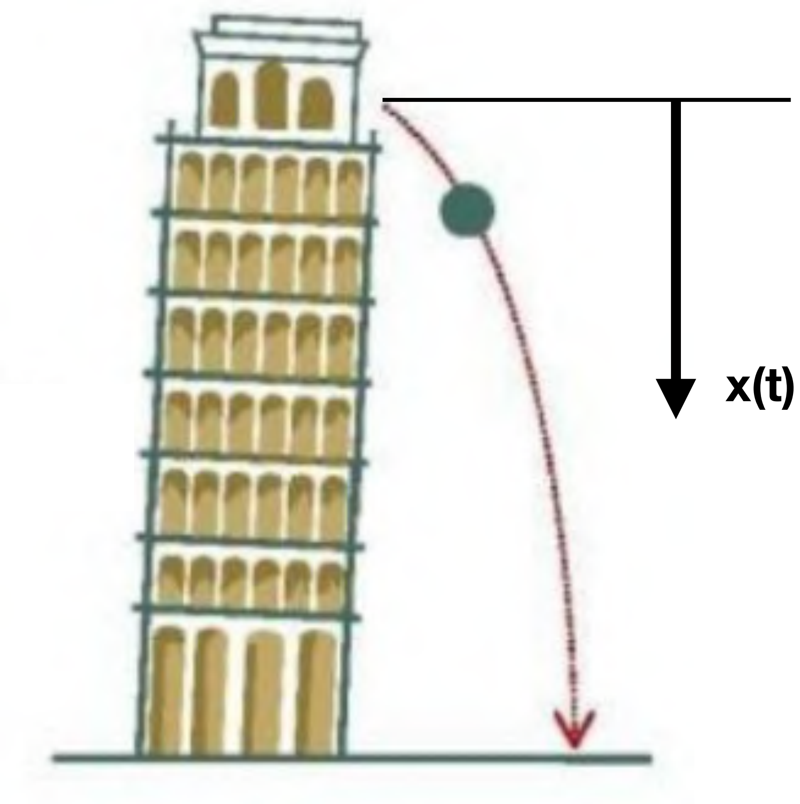
ii) diese mathematisch zu formulieren

iii) und dann auf elementarere Prinzipien zurückzuführen



Physik ist keine Religion!
Wir kennen die letzten, fundamentalsten Gesetzte (noch) nicht,
aber wir kennen den Weg zur Erkenntnis und
die bisherige Erkenntnis hat Unmengen an technologischen Anwendungen ermöglicht

Beispiel: Fallgesetze

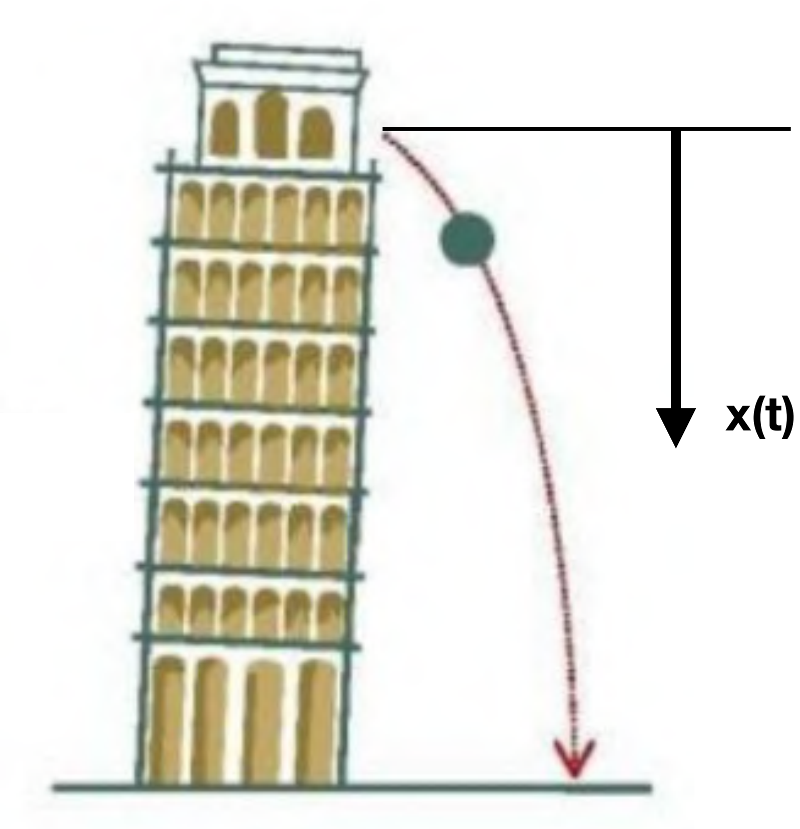


$$g = 9.81\frac{m}{s^2}$$

Mathematische Formulierung des empirischen Zusammenhangs:

$$\boxed{x(t) = \frac{1}{2}gt^2} \Leftrightarrow t = \sqrt{\frac{2x(t)}{g}}$$

Beispiel: Fallgesetze



$$g = 9.81\frac{m}{s^2}$$

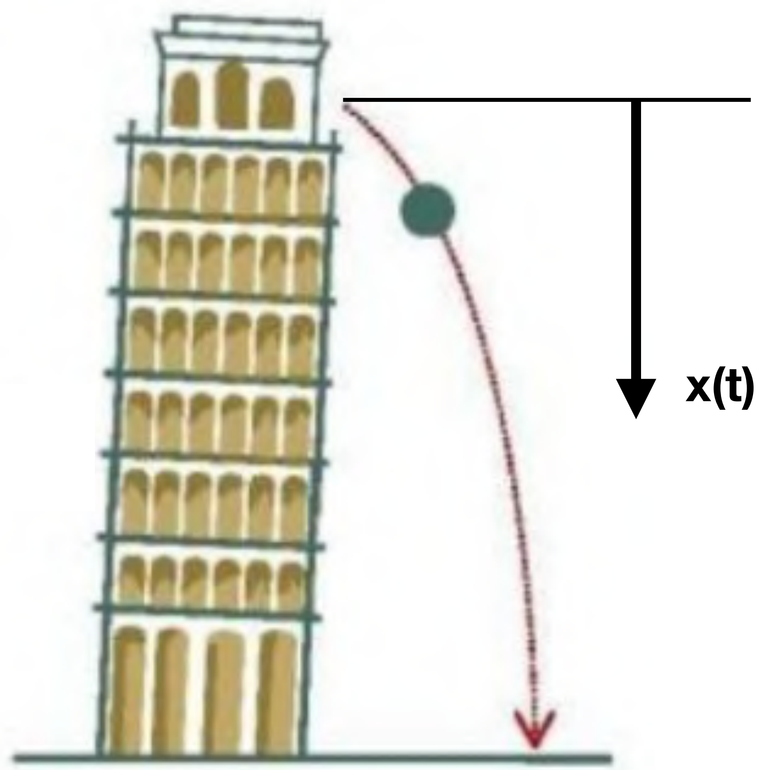
Mathematische Formulierung des empirischen Zusammenhangs:

$$\boxed{x(t) = \frac{1}{2}gt^2} \Leftrightarrow t = \sqrt{\frac{2x(t)}{g}}$$

Geschwindigkeit

$$\boxed{v(t) =} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t}$$

Beispiel: Fallgesetze



$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

Mathematische Formulierung des empirischen Zusammenhangs:

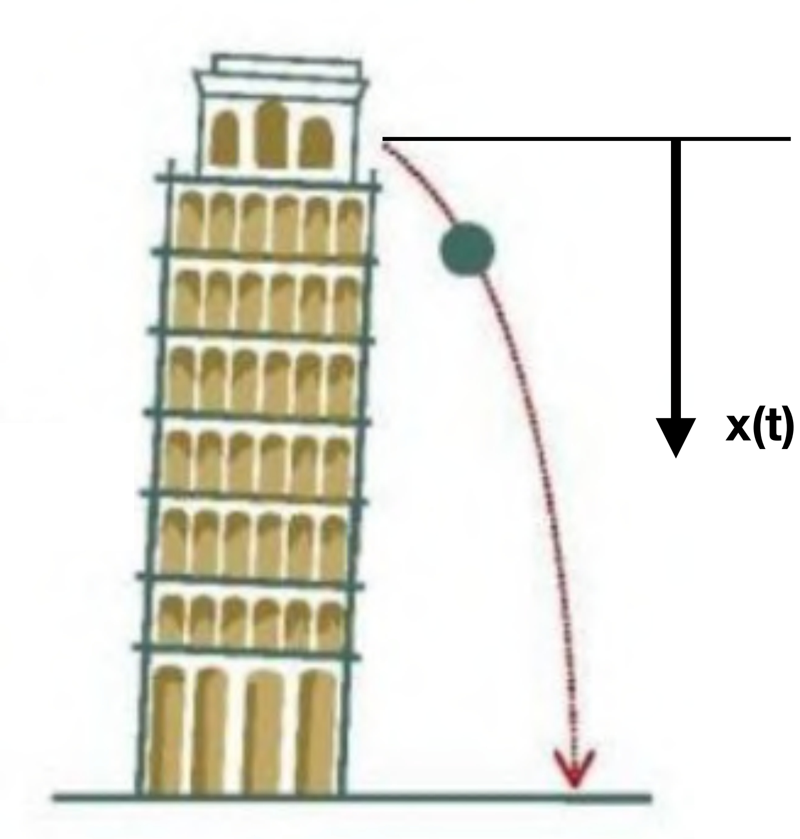
$$\boxed{x(t) = \frac{1}{2} g t^2} \Leftrightarrow t = \sqrt{\frac{2x(t)}{g}}$$

Geschwindigkeit

$$\boxed{v(t) =} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t}$$

$$= \frac{\frac{1}{2} g (t + \Delta t)^2 - \frac{1}{2} g t^2}{\Delta t}$$

Beispiel: Fallgesetze



$$g = 9.81\frac{m}{s^2}$$

Mathematische Formulierung des empirischen Zusammenhangs:

$$\boxed{x(t) = \frac{1}{2}gt^2} \Leftrightarrow t = \sqrt{\frac{2x(t)}{g}}$$

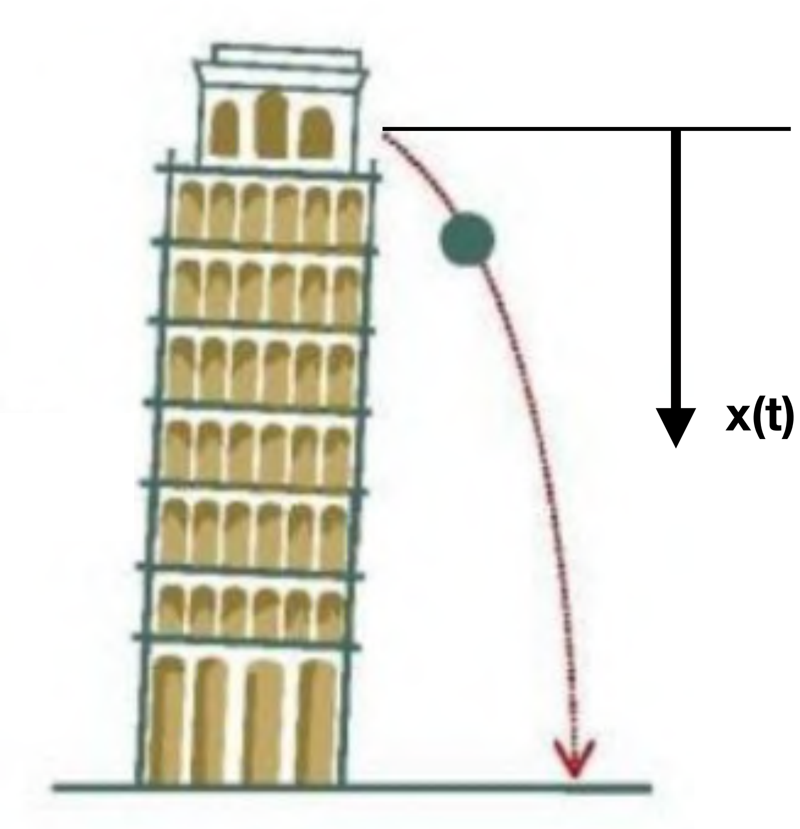
Geschwindigkeit

$$\boxed{v(t) =} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t}$$

$$= \frac{\frac{1}{2}g(t+\Delta t)^2 - \frac{1}{2}gt^2}{\Delta t}$$

$$= \frac{\cancel{\frac{1}{2}gt^2} + gt\Delta t + \frac{1}{2}g\Delta t^2 - \cancel{\frac{1}{2}gt^2}}{\Delta t}$$

Beispiel: Fallgesetze



$$g = 9.81\frac{m}{s^2}$$

Mathematische Formulierung des empirischen Zusammenhangs:

$$\boxed{x(t) = \frac{1}{2}gt^2} \Leftrightarrow t = \sqrt{\frac{2x(t)}{g}}$$

Geschwindigkeit

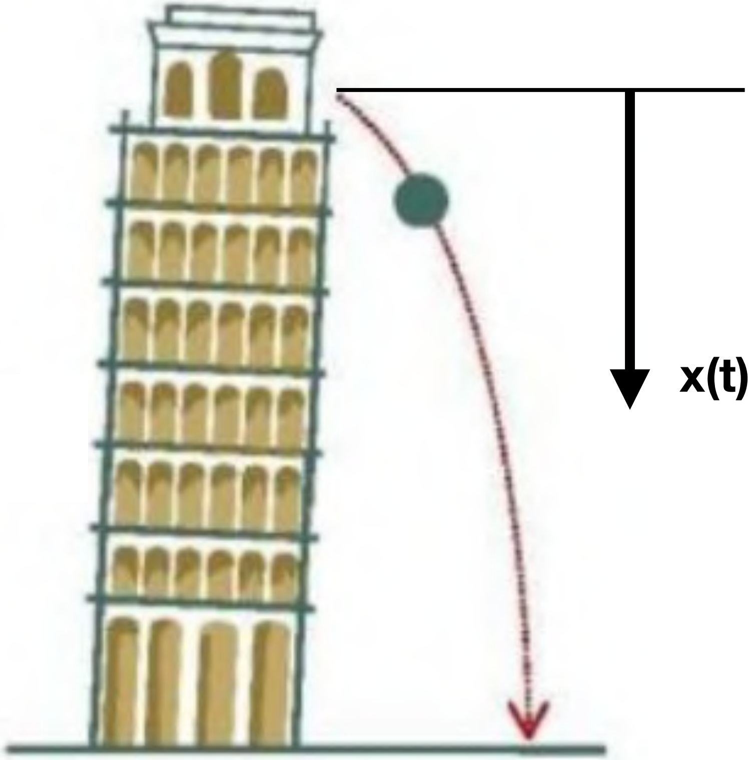
$$\boxed{v(t) =} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t}$$

$$= \frac{\frac{1}{2}g(t+\Delta t)^2 - \frac{1}{2}gt^2}{\Delta t}$$

$$= \frac{\cancel{\frac{1}{2}gt^2} + gt\Delta t + \frac{1}{2}g\Delta t^2 - \cancel{\frac{1}{2}gt^2}}{\Delta t}$$

$$\lim_{\Delta t \to 0} gt + \frac{1}{2}g\Delta t$$

Beispiel: Fallgesetze



$$g = 9.81\frac{m}{s^2}$$

Mathematische Formulierung des empirischen Zusammenhangs:

$$x(t) = \frac{1}{2}gt^2 \Leftrightarrow t = \sqrt{\frac{2x(t)}{g}}$$

Geschwindigkeit

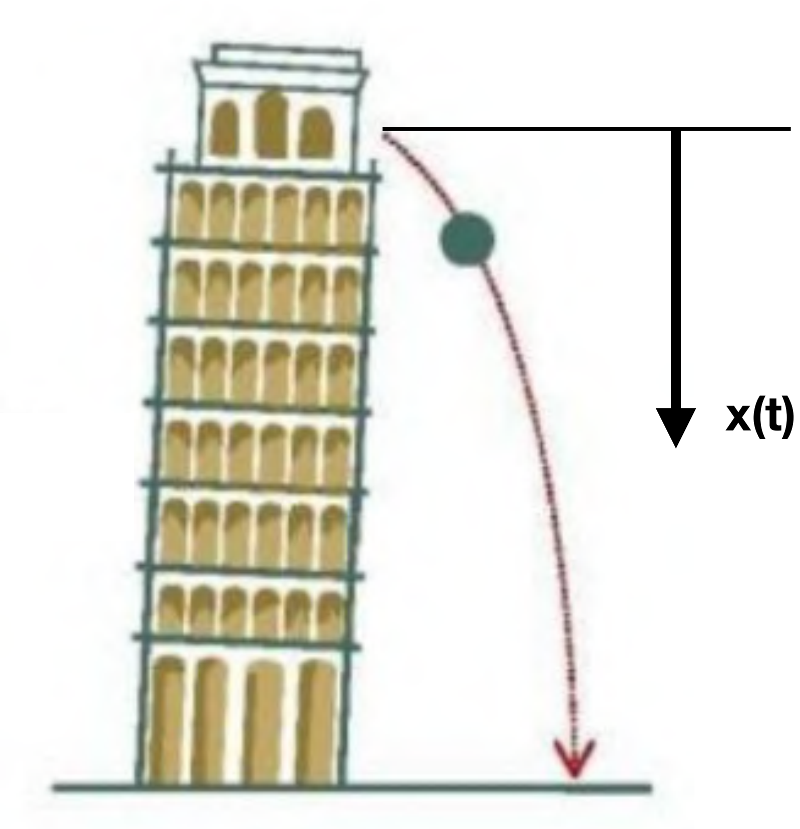
$$v(t) = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t}$$

$$= \frac{\frac{1}{2}g(t+\Delta t)^2 - \frac{1}{2}gt^2}{\Delta t}$$

$$= \frac{\cancel{\frac{1}{2}gt^2} + gt\Delta t + \frac{1}{2}g\Delta t^2 - \cancel{\frac{1}{2}gt^2}}{\Delta t}$$

$$\lim_{\Delta t \to 0} gt + \frac{1}{2}g\Delta t = gt$$

Beispiel: Fallgesetze



$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

Mathematische Formulierung des empirischen Zusammenhangs:

$$\boxed{x(t) = \frac{1}{2} g t^2} \Leftrightarrow t = \sqrt{\frac{2x(t)}{g}}$$

Geschwindigkeit

$$\boxed{v(t) =} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t}$$

$$= \frac{\frac{1}{2} g (t+\Delta t)^2 - \frac{1}{2} g t^2}{\Delta t}$$

$$= \frac{\cancel{\frac{1}{2} g t^2} + g t \Delta t + \frac{1}{2} g \Delta t^2 - \cancel{\frac{1}{2} g t^2}}{\Delta t}$$

$$\lim_{\Delta t \to 0} g t + \frac{1}{2} g \Delta t \boxed{= g t}$$

$$\boxed{v = g t = g \sqrt{\frac{2x}{g}} = \sqrt{2 g x}}$$

Was ist Physik?

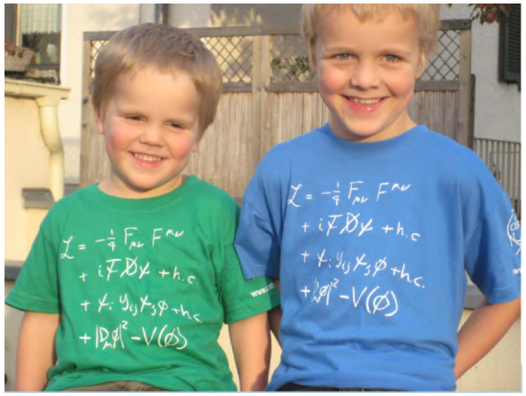
In der Natur gibt es Gesetze,
die mit Hilfe der Mathematik beschrieben werden können

Durch Experimente versuchen wir

i) diese Gesetze zu finden,

ii) diese mathematisch zu formulieren

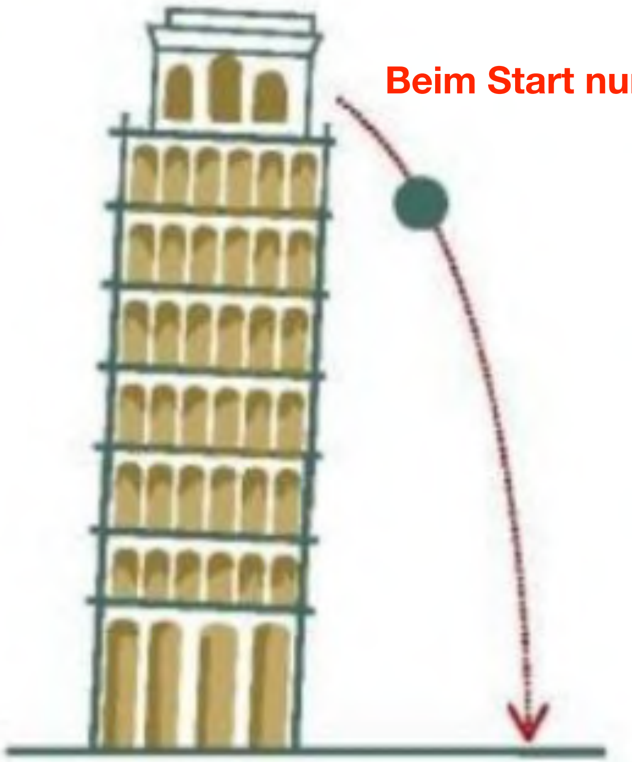
iii) und dann auf elementarere Prinzipien zurückzuführen



Physik ist keine Religion!
Wir kennen die letzten, fundamentalsten Gesetzte (noch) nicht,
aber wir kennen den Weg zur Erkenntnis und
die bisherige Erkenntnis hat Unmengen an technologischen Anwendungen ermöglicht

Beispiel: Fallgesetze

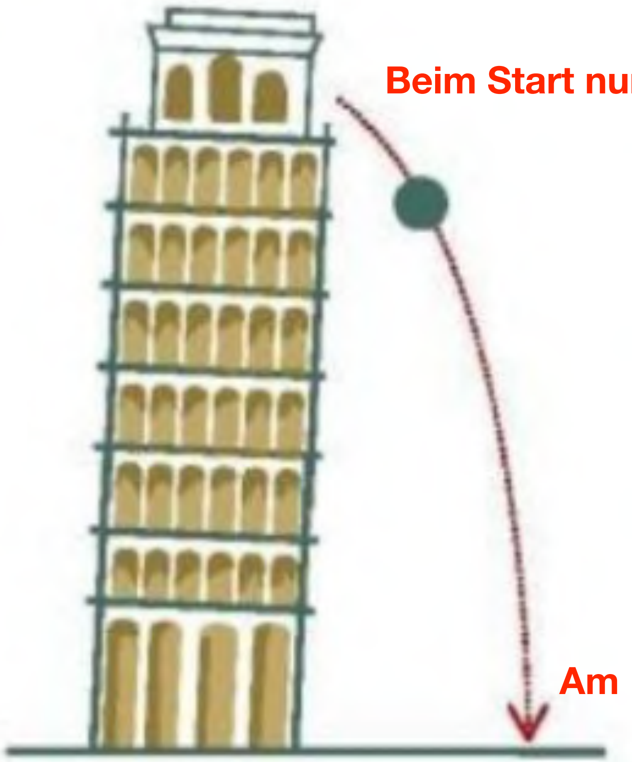
Elementare Prinzipien 1: Energieerhaltung:



Beim Start nur potentielle Energie $E_{\text{pot.}} = mgx$, keine kinetische Energie

Beispiel: Fallgesetze

Elementare Prinzipien 1: Energieerhaltung:

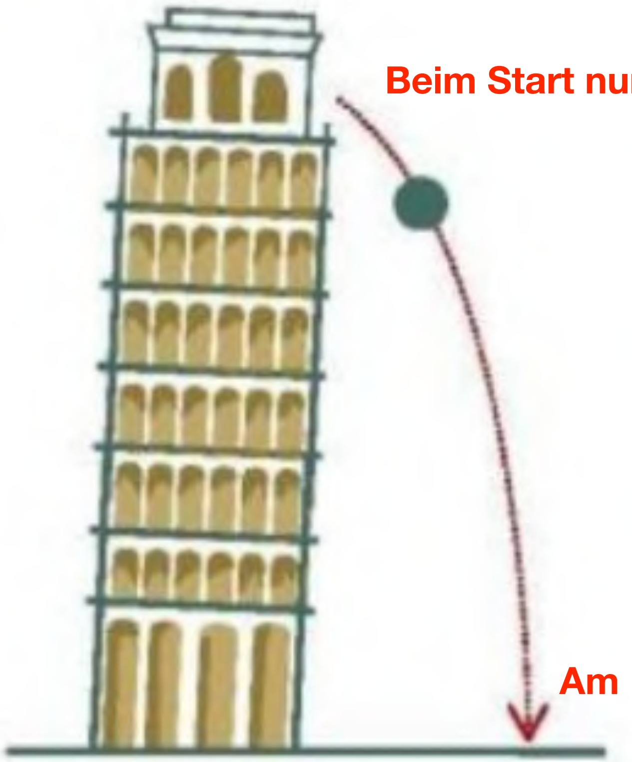


Beim Start nur potentielle Energie $E_{\text{pot.}} = mgx$, keine kinetische Energie

Am Ende nur kinetische Energie $E_{\text{kin.}} = \frac{1}{2}mv^2$, keine potentielle Energie

Beispiel: Fallgesetze

Elementare Prinzipien 1: Energieerhaltung:



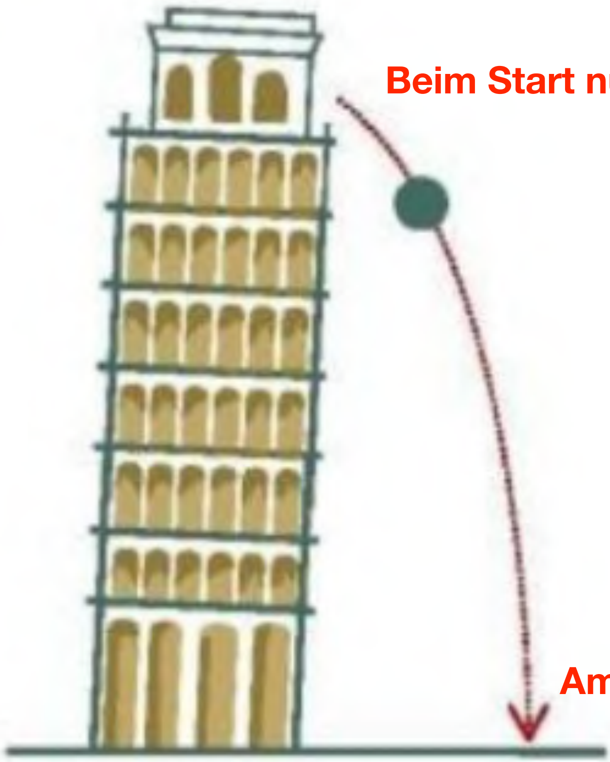
Beim Start nur potentielle Energie $E_{\text{pot.}} = mgx$, keine kinetische Energie

Am Ende nur kinetische Energie $E_{\text{kin.}} = \frac{1}{2}mv^2$, keine potentielle Energie

Energieerhaltung: $E_{kin.} = E_{pot.} \Rightarrow v = \sqrt{2gx}$ gleiches Gesetz wie vorher

Beispiel: Fallgesetze

Elementare Prinzipien 1: Energieerhaltung:



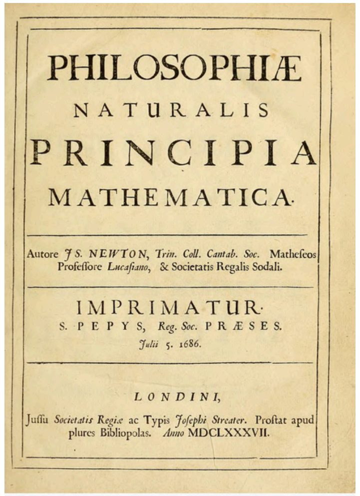
Beim Start nur potentielle Energie $E_{\text{pot.}} = mgx$, keine kinetische Energie

Am Ende nur kinetische Energie $E_{\text{kin.}} = \frac{1}{2}mv^2$, keine potentielle Energie

Energieerhaltung: $E_{kin.} = E_{pot.} \Rightarrow v = \sqrt{2gx}$ gleiches Gesetz wie vorher

Beispiel: Fallgesetze

Elementare Prinzipien 2: Newtonsche Gleichungen:


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

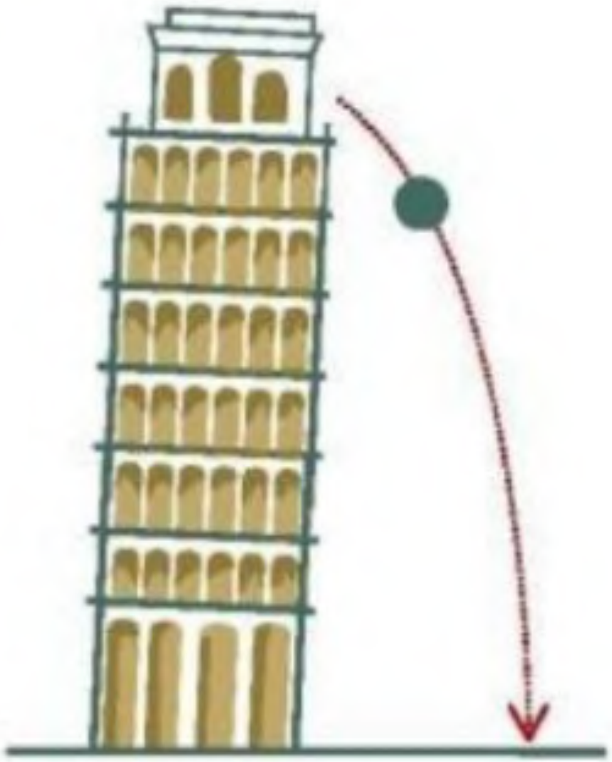
Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

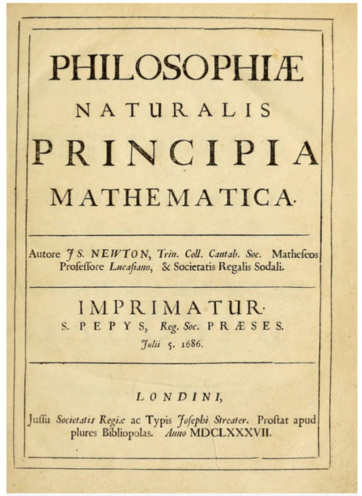
LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

1. **Newtonsches Gesetz:**

$$F = ma$$



Beispiel: Fallgesetze



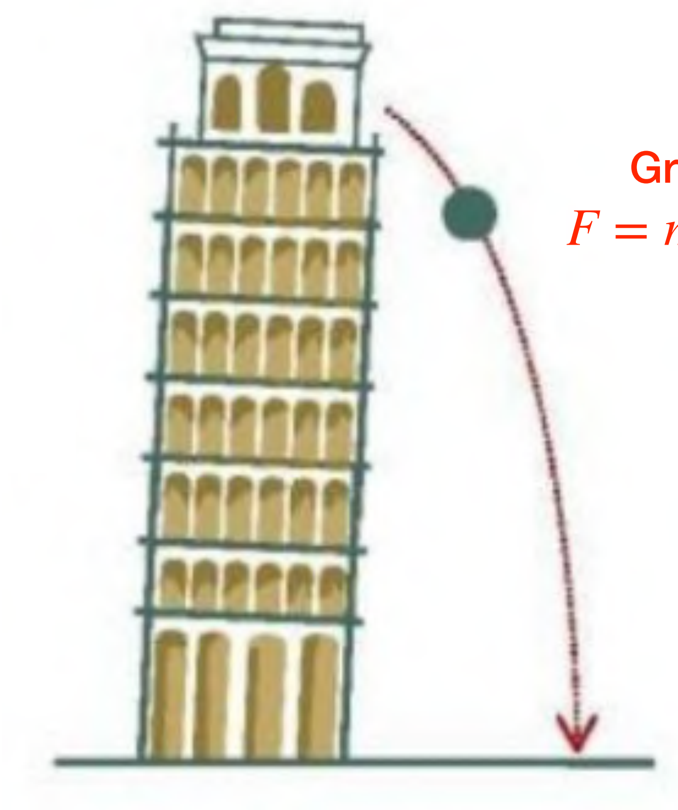
PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Elementare Prinzipien 2: Newtonsche Gleichungen:



1. **Newtonsches Gesetz:**

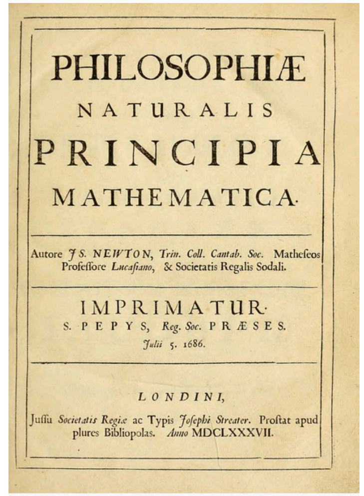
$$F = ma$$

Gravitationskraft:

$$F = mg, g = 9.81 m/s^2$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Beispiel: Fallgesetze

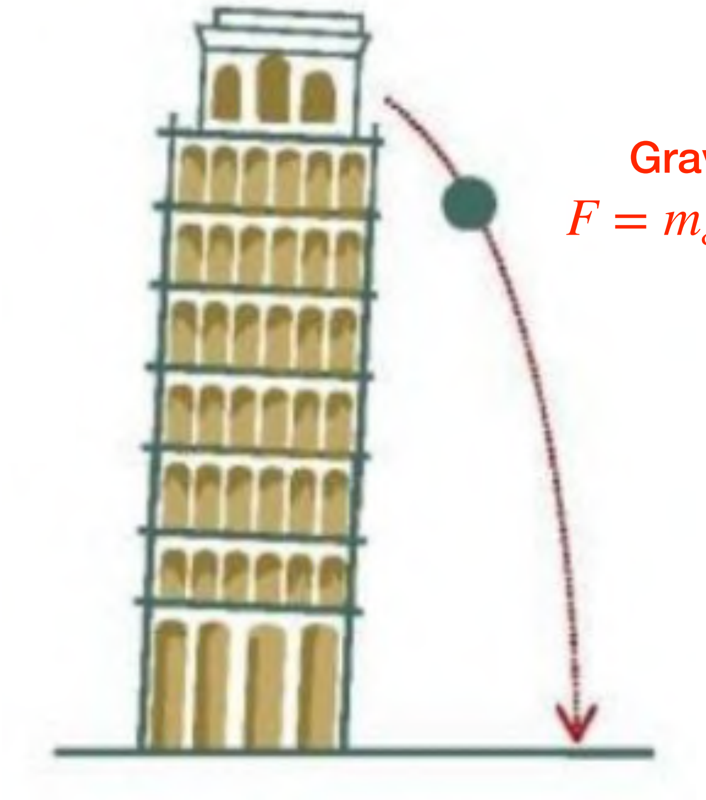

PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Elementare Prinzipien 2: Newtonsche Gleichungen:



1. Newtonsches Gesetz:

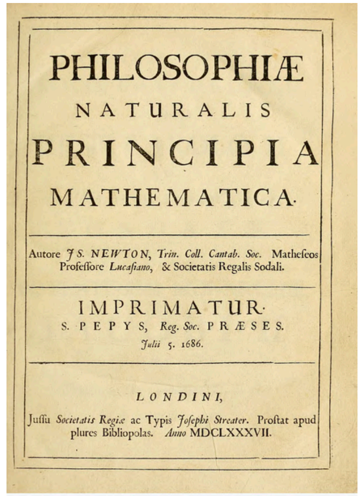
$$F = ma$$

Gravitationskraft:

$$F = mg, g = 9.81 m/s^2$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = a = \frac{F}{m} = g$$


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

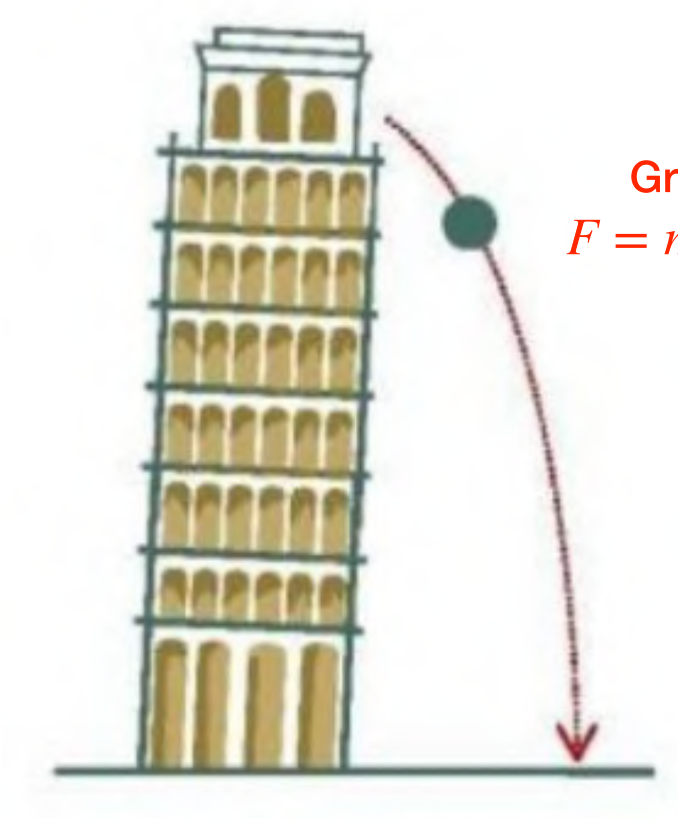
Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Beispiel: Fallgesetze

Elementare Prinzipien 2: Newtonsche Gleichungen:



1. Newtonsches Gesetz:

$$F = ma$$

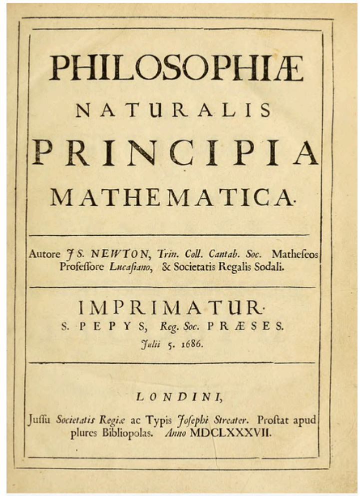
Gravitationskraft:

$$F = mg, g = 9.81 m/s^2$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = a = \frac{F}{m} = g$$

$$\Rightarrow v = gt$$


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Beispiel: Fallgesetze

Elementare Prinzipien 2: Newtonsche Gleichungen:

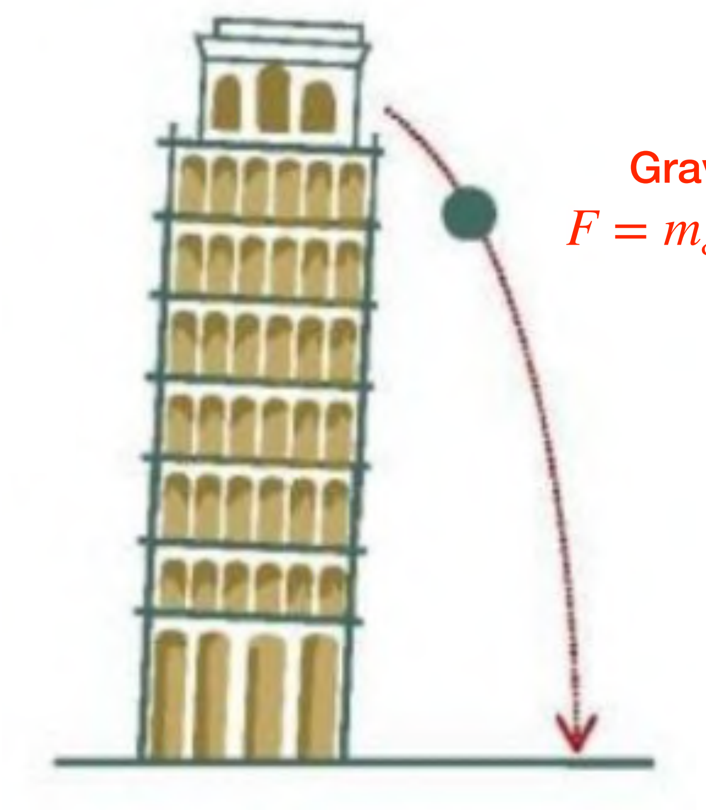
1. Newtonsches Gesetz:

$$F = ma$$

Gravitationskraft:

$$F = mg, g = 9.81 m/s^2$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

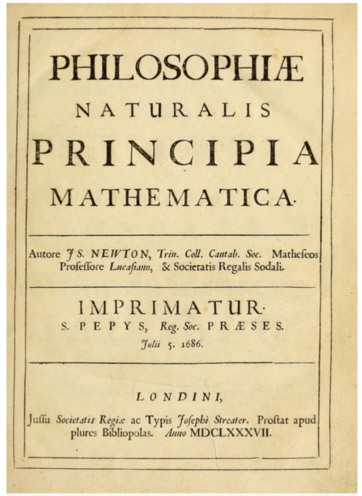


$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = a = \frac{F}{m} = g$$

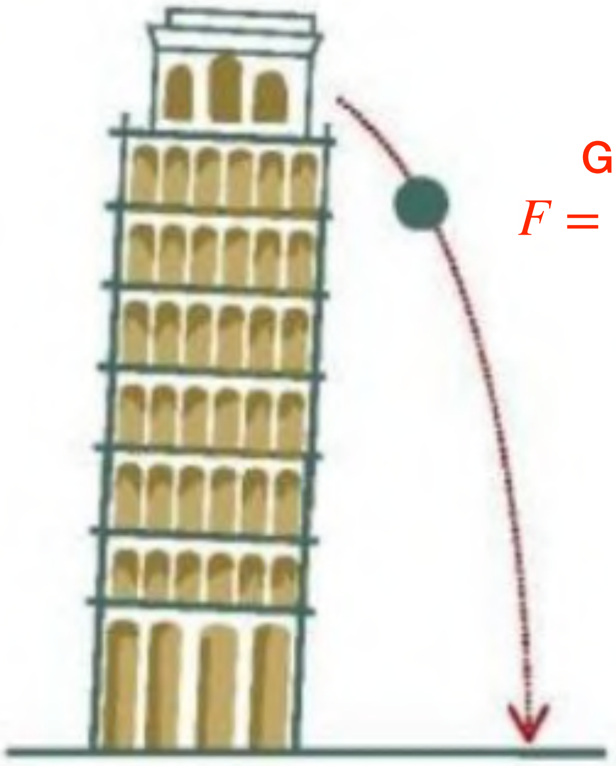
Mathematik: Integrieren

$$\Rightarrow v = gt$$

Beispiel: Fallgesetze


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.
Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.
IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.
LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Elementare Prinzipien 2: Newtonsche Gleichungen:



1. **Newtonsches Gesetz:**

$$F = ma$$

Gravitationskraft:

$$F = mg, g = 9.81 m/s^2$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

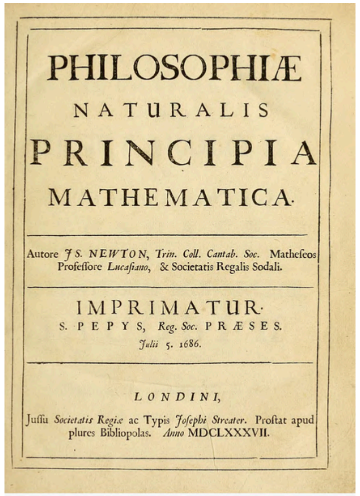
$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = a = \frac{F}{m} = g$$

$$\Rightarrow v = gt$$

Mathematik: Integrieren

$$\Rightarrow x = \frac{1}{2} g t^2$$

Beispiel: Fallgesetze

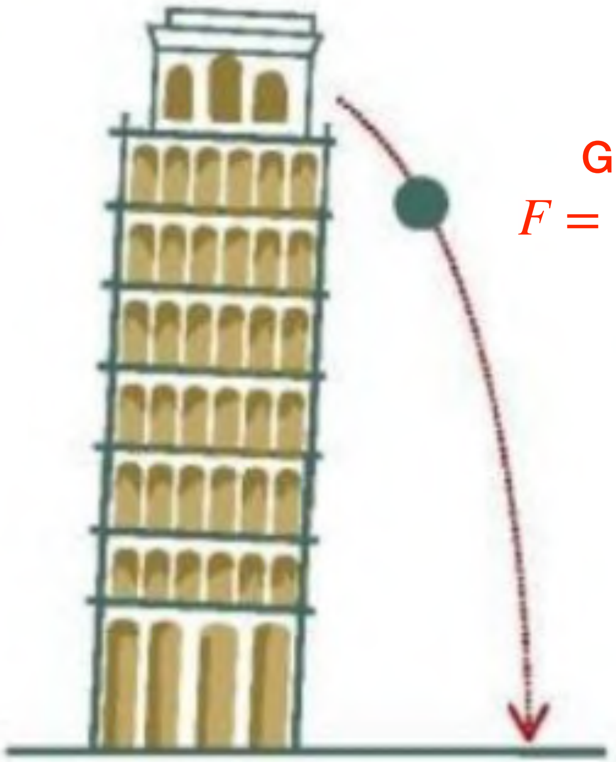

PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Elementare Prinzipien 2: Newtonsche Gleichungen:



1. **Newtonsches Gesetz:**

$$F = ma$$

Gravitationskraft:

$$F = mg,\ g = 9.81 m/s^2$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

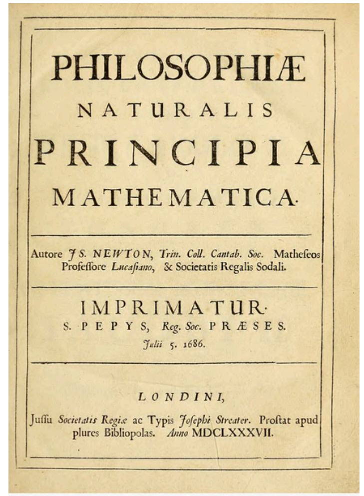
$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = a = \frac{F}{m} = g$$

$$\Rightarrow v = gt$$

Mathematik: Integrieren

$$\Rightarrow x = \frac{1}{2} g t^2$$

Beispiel: Fallgesetze



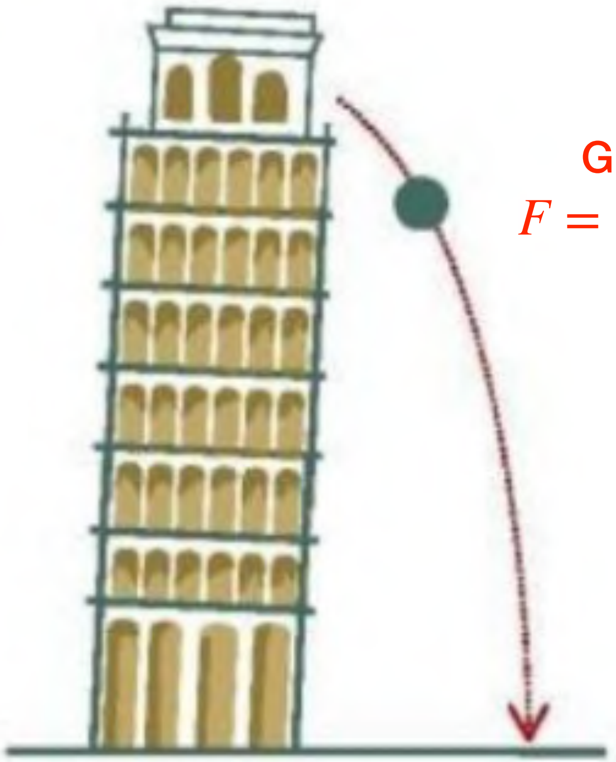
PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Elementare Prinzipien 2: Newtonsche Gleichungen:



1. Newtonsches Gesetz:

$$F = ma$$

Gravitationskraft:

$$F = mg, g = 9.81 m/s^2$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

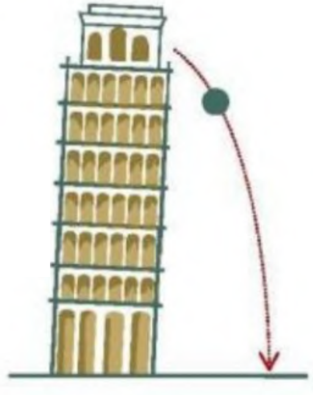
$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = a = \frac{F}{m} = g$$

$$\Rightarrow v = gt$$

Mathematik: Integrieren

$$\Rightarrow x = \frac{1}{2} g t^2$$

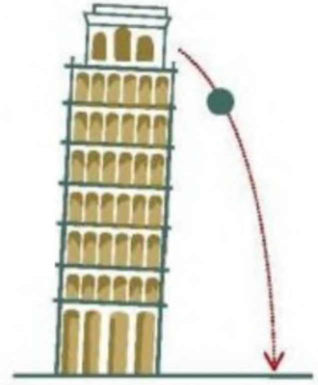
Elektromagnetische Lorentzkraft: $\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$



Beispiel: Fallgesetze

Numerische Lösung (Alternative zum Integrieren):

Anfangsbedingung zur Zeit $t = t_0 : \; x_0, v_0$



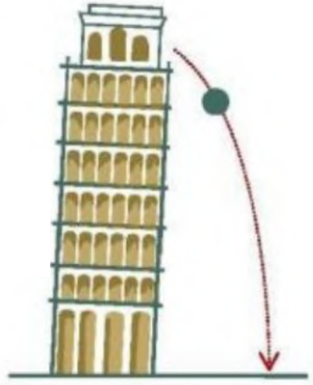
Beispiel: Fallgesetze

Numerische Lösung (Alternative zum Integrieren):

Anfangsbedingung zur Zeit $t = t_0 : \ x_0, v_0$

Welche Geschwindigkeit besitzt das Teilchen zum Zeitpunkt $t = t_0 + \Delta t$ **?**

Beispiel: Fallgesetze



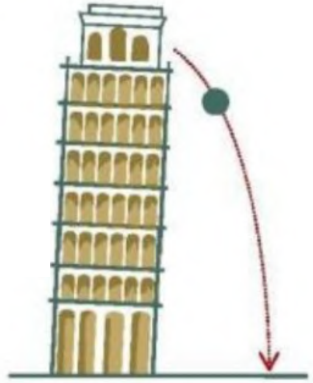
Numerische Lösung (Alternative zum Integrieren):

Anfangsbedingung zur Zeit $t = t_0 : \; x_0, v_0$

Welche Geschwindigkeit besitzt das Teilchen zum Zeitpunkt $t = t_0 + \Delta t$ **?**

Die Geschwindigkeitsänderung beträgt

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{F}{m} = g \Rightarrow \Delta v = g\Delta t \qquad \Rightarrow v(t_0 + \Delta t) = v_0 + \Delta v = v_0 + g\Delta t$$



Beispiel: Fallgesetze

Numerische Lösung (Alternative zum Integrieren):

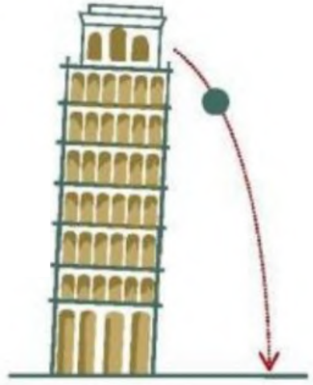
Anfangsbedingung zur Zeit $t = t_0 : \; x_0, v_0$

Welche Geschwindigkeit besitzt das Teilchen zum Zeitpunkt $t = t_0 + \Delta t$ **?**

Die Geschwindigkeitsänderung beträgt

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{F}{m} = g \Rightarrow \Delta v = g\Delta t \qquad \Rightarrow v(t_0 + \Delta t) = v_0 + \Delta v = v_0 + g\Delta t$$

An welchem Ort befindet sich das Teilchen zum Zeitpunkt $t = t_0 + \Delta t$ **?**



Beispiel: Fallgesetze

Numerische Lösung (Alternative zum Integrieren):

Anfangsbedingung zur Zeit $t = t_0 : \; x_0, v_0$

Welche Geschwindigkeit besitzt das Teilchen zum Zeitpunkt $t = t_0 + \Delta t$ **?**

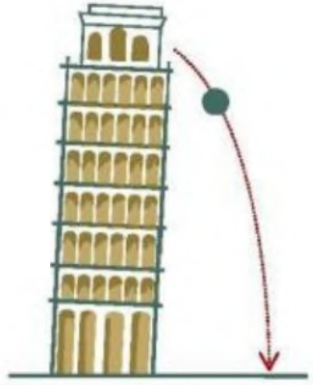
Die Geschwindigkeitsänderung beträgt

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{F}{m} = g \Rightarrow \Delta v = g\Delta t \qquad \Rightarrow v(t_0 + \Delta t) = v_0 + \Delta v = v_0 + g\Delta t$$

An welchem Ort befindet sich das Teilchen zum Zeitpunkt $t = t_0 + \Delta t$ **?**

Die Wegänderung beträgt

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v_0 \Rightarrow \Delta x = v_0\Delta t \qquad \Rightarrow x(t_0 + \Delta t) = x_0 + \Delta x = x_0 + v_0\Delta t$$



Beispiel: Fallgesetze

Numerische Lösung (Alternative zum Integrieren):

Anfangsbedingung zur Zeit $t = t_0 : \; x_0, v_0$

Welche Geschwindigkeit besitzt das Teilchen zum Zeitpunkt $t = t_0 + \Delta t$ **?**

Die Geschwindigkeitsänderung beträgt

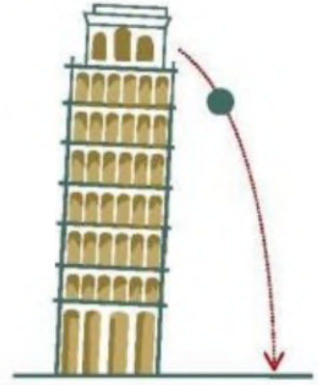
$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{F}{m} = g \Rightarrow \Delta v = g \Delta t \qquad \Rightarrow v(t_0 + \Delta t) = v_0 + \Delta v = v_0 + g \Delta t$$

An welchem Ort befindet sich das Teilchen zum Zeitpunkt $t = t_0 + \Delta t$ **?**

Die Geschwindigkeitsänderung beträgt

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v_0 \Rightarrow \Delta x = v_0 \Delta t \qquad \Rightarrow x(t_0 + \Delta t) = x_0 + \Delta x = x_0 + v_0 \Delta t$$

Nächster Schritt: $\underbrace{t_0 + \Delta t}_{t_0'} + \Delta t$



Beispiel: Fallgesetze

Numerische Lösung (Alternative zum Integrieren):

Anfangsbedingung zur Zeit $t = t_0 : \; x_0, v_0$

Welche Geschwindigkeit besitzt das Teilchen zum Zeitpunkt $t = t_0 + \Delta t$ **?**

Die Geschwindigkeitsänderung beträgt

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{F}{m} = g \Rightarrow \Delta v = g\Delta t \qquad \Rightarrow v(t_0 + \Delta t) = v_0 + \Delta v = v_0 + g\Delta t$$

An welchem Ort befindet sich das Teilchen zum Zeitpunkt $t = t_0 + \Delta t$ **?**

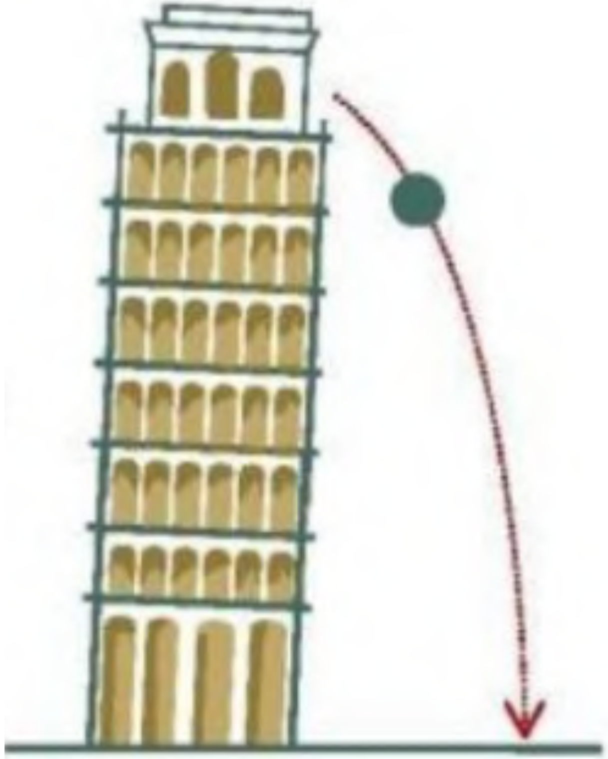
Die Geschwindigkeitsänderung beträgt

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v_0 \Rightarrow \Delta x = v_0\Delta t \qquad \Rightarrow x(t_0 + \Delta t) = x_0 + \Delta x = x_0 + v_0\Delta t$$

Nächster Schritt: $\underbrace{t_0 + \Delta t}_{t_0'} + \Delta t$ **; besser** $v_0 \rightarrow \frac{1}{2}(v_0 + v_0 + g\Delta t)$

Beispiel: Fallgesetze

Elementare Prinzipien 3: Prinzip der kleinsten Wirkung:



Pierre Maupertuis

Leonhard Euler

Joseph Lagrange

William Hamilton

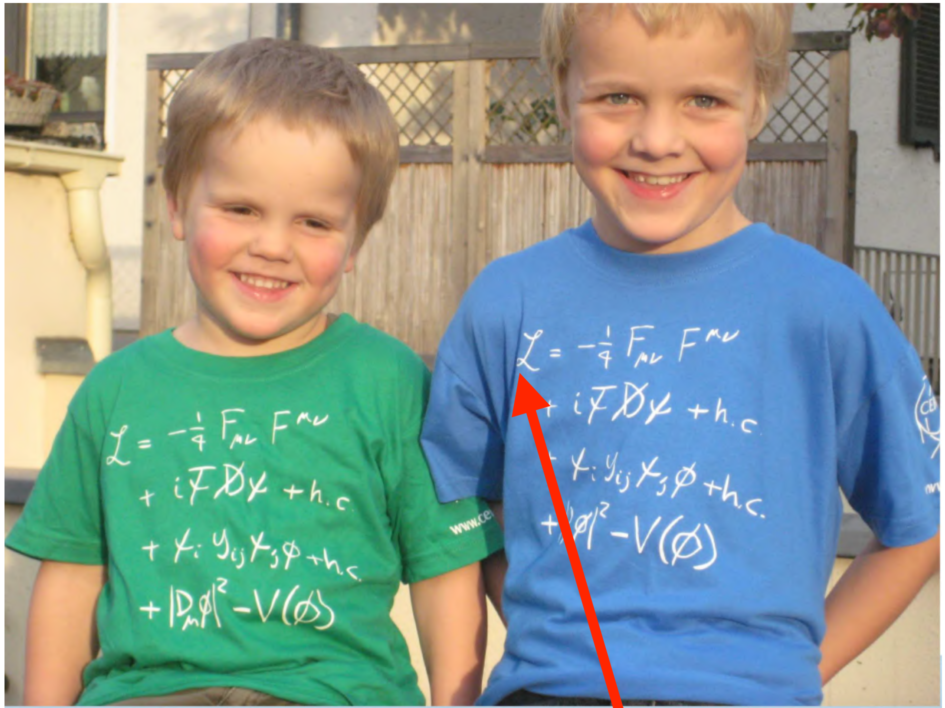
Betrachte beliebige Bahnkurven x(t):

diejenige Kurve für die

$$\sum_{i=0} \left(E_{kin}(t_i) - E_{Pot}(x(t_i))\right) \Delta t$$

minimal wird, ist die physikalische Kurve

Prinzip der kleinsten Wirkung



Minimiere die Wirkung $S = \int \mathscr{L} d^4x$ und erhalte alle fundamentalen Wechselwirkungen im Mikrokosmos:

Elektromagnetische Wechselwirkung

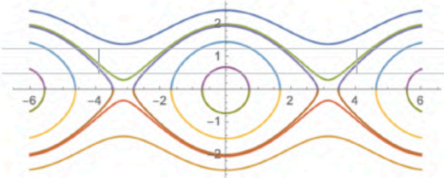
Starke Wechselwirkung

Schwache Wechselwirkung

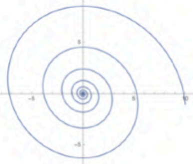
Allgemeine Relativitätstheorie kann auch aus diesem Prinzip abgeleitet werden

https://www.youtube.com/watch?v=Q10_srZ-pbs

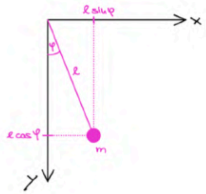
Ziel:



Ankündigung für das Wintersemester 2024/25
Das theoretische Minimum I
Mechanik - von Newton über Emmy Noether zu Heisenberg
Prof. Dr. Alexander Lenz, 4PHY00011V



$$\boxed{\vec{F} = m\vec{a} = m\ddot{\vec{x}}}$$



Diese Vorlesungsreihe gibt eine Einführung in die Grundprinzipen der theoretischen Physik.

Im Wintersemester 2024/25 beschäftigen wir uns u.a. mit vermeintlich einfachen Problemen, wie dem Pendel oder dem Kepler-Problem (Planetenbahnen). Ausgehend von den **Newtonschen Axiomen** wird eine moderne und elegante Formulierung der theoretischen Mechanik vorgestellt, aus der später die Quantenmechanik direkt abgeleitet werden kann - dies wird der sogenannte **Lagrange-** und **Hamilton-Formalismus** sein. Weiter werden eingehend Symmetrieprinzipen diskutiert - insbesondere das zum Veranstaltungsort passende **Noether-Theorem** -, auf dessen Verallgemeinerung die heutige Elementarteilchenphysik und unser gesamtes Verständnis der Welt beruht.

$$L = L(x,\dot{x}) = E_{Kin} - E_{Pot} = \frac{m}{2}\dot{x}^2 - U(x)\,,$$

Die Vorlesung richtet sich an Mittwochsakademiker, Oberstufenschülerinnen und -schüler, Lehrkräfte, Physikenthusiasten mit einem großen Interesse an aktuellen Themen der Physik. Es werden mathematische Konzepte (auf dem Niveau der gymnasialen Oberstufe) eingeführt und benutzt. Die Vorlesung ist an die erfolgreiche Vorlesungs- und Buchreihe "**The theoretical Minimum**" von Leonard Susskind angelehnt, welche auf dieselbe Zielgruppe ausgerichtet war. Vom Niveau her wird sich die Veranstaltung auf dem schmalen Grat zwischen einer rein populärwissenschaftlichen Bildershow und einer theoretischen Physikvorlesung im Bachelorstudium bewegen.

9 Termine im Wintersemester 24/25:
20.11., 27.11., 4.12., 11.12, 18.12. ,8.1., 15.1., 22.1., 29.1.
Mittwochs 16-18
Emmy Noether Campus ENC-D-114
Infos unter: alexander.lenz@uni-siegen.de
https://tp1.physik.uni-siegen.de/mittwochsakademie/

Erkläre das Prinzip der kleinsten Wirkung

Was ist klassische Physik?

Physik der makroskopischen Welt
(keine Quantenphysik)

Beispiele:

- **Newton Gleichungen für Bewegung von Massenpunkten**
- **Maxwell-Gleichungen für elektromagnetische Felder**
- **Allgemeine Relativitätstheorie für Gravitation**

Was ist klassische Physik?

Physik der makroskopischen Welt
(keine Quantenphysik)

Beispiele:

- **Newton Gleichungen für Bewegung von Massenpunkten**
- **Maxwell-Gleichungen für elektromagnetische Felder**
- **Allgemeine Relativitätstheorie für Gravitation**

Zugrundeliegende Logik/Regeln
Klassische Mechanik

bestimmt die Zukunft eines Systems

Was ist klassische Physik?

Physik der makroskopischen Welt
(keine Quantenphysik)

Beispiele:

- **Newton Gleichungen für Bewegung von Massenpunkten**
- **Maxwell-Gleichungen für elektromagnetische Felder**
- **Allgemeine Relativitätstheorie für Gravitation**

Zugrundeliegende Logik/Regeln
Klassische Mechanik

bestimmt die Zukunft eines Systems

Wikipedia: " Neben den Themen der *Théorie Analytique* beschrieb Laplace außerdem einen alles rational erfassenden „Weltgeist“, der die Gegenwart mit allen Details kennt und daher die Vergangenheit und Zukunft des Weltgeschehens in allen Einzelheiten beschreiben kann. Laplace meinte jedoch auch, dass die menschliche Intelligenz dieses nie erreichen könne. Dieser „Weltgeist“ wurde später als Laplacescher Dämon bekannt

Dynamische Systeme

System:= Menge von Objekten, z.B. Teilchen, Felder, Wellen…

Dynamische Systeme

System:= Menge von Objekten, z.B. Teilchen, Felder, Wellen…

Geschlossenes System:= völlig abgeschlossen von der Umwelt, keine Wechselwirkung

Dynamische Systeme

System:= Menge von Objekten, z.B. Teilchen, Felder, Wellen…

Geschlossenes System:= völlig abgeschlossen von der Umwelt, keine Wechselwirkung

Zustand:= Objekte können in verschiedenen Zuständen sein, z.B. Objekt Münze kann in den Zuständen “Kopf” oder “Zahl” sein; Objekt Teilchen kann im Zustand $x = 3.45\,m$, $v = 12.4\ m/s$ sein

Dynamische Systeme

System:= Menge von Objekten, z.B. Teilchen, Felder, Wellen…

Geschlossenes System:= völlig abgeschlossen von der Umwelt, keine Wechselwirkung

Zustand:= Objekte können in verschiedenen Zuständen sein, z.B. Objekt Münze kann in den Zuständen “Kopf” oder “Zahl” sein; Objekt Teilchen kann im Zustand x= 3.45m, v = 12.4 m/s sein

Zustandsraum:= Menge aller möglichen Zustände eine Objektes, z.B. Münze {Kopf, Zahl}; Teilchen $\vec{x} \in \mathbb{R}^3$, $\vec{v} \in \mathbb{R}^3$

Dynamische Systeme

System:= Menge von Objekten, z.B. Teilchen, Felder, Wellen…

Geschlossenes System:= völlig abgeschlossen von der Umwelt, keine Wechselwirkung

Zustand:= Objekte können in verschiedenen Zuständen sein, z.B. Objekt Münze kann in den Zuständen “Kopf” oder “Zahl” sein; Objekt Teilchen kann im Zustand x= 3.45m, v = 12.4 m/s sein

Zustandsraum:= Menge aller möglichen Zustände eine Objektes, z.B. Münze {Kopf, Zahl}; Teilchen $\vec{x} \in \mathbb{R}^3$, $\vec{v} \in \mathbb{R}^3$

Dynamisches System:= System das sich mit der Zeit ändert, besteht aus Zustandsraum und dem Bewegungsgesetz oder dynamischen Gesetz. Zeit kann **kontinuierlich** ablaufen (Parameter $t \in \mathbb{R}$), oder in **diskreten** Schritten (Parameter $n \in \mathbb{N}$) .

Dynamische Systeme

System:= Menge von Objekten, z.B. Teilchen, Felder, Wellen…

Geschlossenes System:= völlig abgeschlossen von der Umwelt, keine Wechselwirkung

Zustand:= Objekte können in verschiedenen Zuständen sein, z.B. Objekt Münze kann in den Zuständen “Kopf” oder “Zahl” sein; Objekt Teilchen kann im Zustand x= 3.45m, v = 12.4 m/s sein

Zustandsraum:= Menge aller möglichen Zustände eine Objektes, z.B. Münze {Kopf, Zahl}; Teilchen $\vec{x} \in \mathbb{R}^3$, $\vec{v} \in \mathbb{R}^3$

Dynamisches System:= System das sich mit der Zeit ändert, besteht aus Zustandsraum und dem Bewegungsgesetz oder dynamischen Gesetz. Zeit kann **kontinuierlich** ablaufen (Parameter $t \in \mathbb{R}$), oder in **diskreten** Schritten (Parameter $n \in \mathbb{N}$) .

Deterministisches dynamisches System:= ist der Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannt, dann kann daraus der Zustand für jeden beliebigen **zukünftigen** Zeitpunkt bestimmt werden.

Dynamische Systeme

System:= Menge von Objekten, z.B. Teilchen, Felder, Wellen…

Geschlossenes System:= völlig abgeschlossen von der Umwelt, keine Wechselwirkung

Zustand:= Objekte können in verschiedenen Zuständen sein, z.B. Objekt Münze kann in den Zuständen “Kopf” oder “Zahl” sein; Objekt Teilchen kann im Zustand x= 3.45m, v = 12.4 m/s sein

Zustandsraum:= Menge aller möglichen Zustände eine Objektes, z.B. Münze {Kopf, Zahl}; Teilchen $\vec{x} \in \mathbb{R}^3$, $\vec{v} \in \mathbb{R}^3$

Dynamisches System:= System das sich mit der Zeit ändert, besteht aus Zustandsraum und dem Bewegungsgesetz oder dynamischen Gesetz. Zeit kann **kontinuierlich** ablaufen (Parameter $t \in \mathbb{R}$), oder in **diskreten** Schritten (Parameter $n \in \mathbb{N}$) .

Deterministisches dynamisches System:= ist der Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannt, dann kann daraus der Zustand für jeden beliebigen **zukünftigen** Zeitpunkt bestimmt werden.

Reversibles dynamisches System:= ist der Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannt, dann kann daraus der Zustand für jeden beliebigen vergangenen Zeitpunkt bestimmt werden.

Dynamische Systeme

System:= Menge von Objekten, z.B. Teilchen, Felder, Wellen…

Geschlossenes System:= völlig abgeschlossen von der Umwelt, keine Wechselwirkung

Zustand:= Objekte können in verschiedenen Zuständen sein, z.B. Objekt Münze kann in den Zuständen “Kopf” oder “Zahl” sein; Objekt Teilchen kann im Zustand x= 3.45m, v = 12.4 m/s sein

Zustandsraum:= Menge aller möglichen Zustände eine Objektes, z.B. Münze {Kopf, Zahl}; Teilchen $\vec{x} \in \mathbb{R}^3$, $\vec{v} \in \mathbb{R}^3$

Dynamisches System:= System das sich mit der Zeit ändert, besteht aus Zustandsraum und dem Bewegungsgesetz oder dynamischen Gesetz. Zeit kann **kontinuierlich** ablaufen (Parameter $t \in \mathbb{R}$), oder in **diskreten** Schritten (Parameter $n \in \mathbb{N}$) .

Deterministisches dynamisches System:= ist der Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannt, dann kann daraus der Zustand für jeden beliebigen **zukünftigen** Zeitpunkt bestimmt werden.

Klassische Mechanik ist deterministisch und reversibel

Reversibles dynamisches System:= ist der Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannt, dann kann daraus der Zustand für jeden beliebigen vergangenen Zeitpunkt bestimmt werden.

Dynamische Systeme

Beispiel 1: System mit einem Zustand

Z. B. Auf Tische geklebte Münze, bei der Kopf nach oben zeigt

Dynamische Systeme

Beispiel 1: System mit einem Zustand

Z. B. Auf Tische geklebte Münze, bei der Kopf nach oben zeigt

Zustand zum Zeitpunkt n= 1: Kopf
Zustand zum Zeitpunkt n= 2: Kopf
Zustand zum Zeitpunkt n= 3: Kopf
Zustand zum Zeitpunkt n= 4: Kopf
Zustand zum Zeitpunkt n= 5: Kopf
…

Trivial - da passiert nichts!

Dynamische Systeme

Beispiel 2: System mit zwei Zuständen

Z. B. Münze: Kopf K oder Zahl Z zeigt nach oben

$$\boxed{K} \qquad \boxed{Z}$$

Dynamische Systeme

Beispiel 2: System mit zwei Zuständen

Z. B. Münze: Kopf K oder Zahl Z zeigt nach oben

$$\boxed{K} \quad \boxed{Z}$$

Dynamische Gesetze

A) Mache nichts:

$KKKKKKKKKKKKKK$……

$ZZZZZZZZZZZZZZZZZ$…..

Dynamische Systeme

Beispiel 2: System mit zwei Zuständen

Z. B. Münze: Kopf K oder Zahl Z zeigt nach oben

$$\boxed{K} \qquad \boxed{Z}$$

Dynamische Gesetze

A) Mache nichts:

$KKKKKKKKKKKKKK$......

$ZZZZZZZZZZZZZZZZZ$.....

Dynamische Systeme

Beispiel 2: System mit zwei Zuständen

Z. B. Münze: Kopf K oder Zahl Z zeigt nach oben

$$\boxed{K} \qquad \boxed{Z}$$

Dynamische Gesetze

A) Mache nichts:

$KKKKKKKKKKKKKK$...... $\qquad \boxed{K}$

$ZZZZZZZZZZZZZZZZZ$..... $\qquad \boxed{Z}$

B) Ändere immer den Zustand:

$ZKZKZKZKZKZKZK$...

$KZKZKZKZKZKZKZ$...

Dynamische Systeme

Beispiel 2: System mit zwei Zuständen

Z. B. Münze: Kopf K oder Zahl Z zeigt nach oben

$$\boxed{K} \quad \boxed{Z}$$

Dynamische Gesetze

A) Mache nichts:

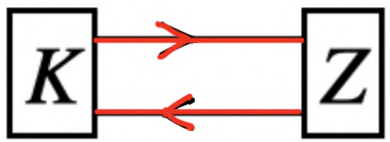
$KKKKKKKKKKKKKK$......

$ZZZZZZZZZZZZZZZZZZ$.....

B) Ändere immer den Zustand:

$ZKZKZKZKZKZKZKZK$…

$KZKZKZKZKZKZKZKZ$…



Dynamische Systeme

Beispiel 2: System mit zwei Zuständen

Z. B. Münze: Kopf K oder Zahl Z zeigt nach oben

$\boxed{K}$ $\boxed{Z}$

Dynamische Gesetze

A) Mache nichts:

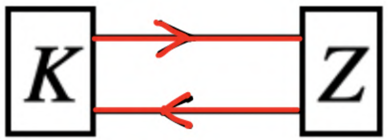
$KKKKKKKKKKKKK\ldots\ldots$

$ZZZZZZZZZZZZZZZZZ\ldots..$

B) Ändere immer den Zustand:

$ZKZKZKZKZKZKZKZK\ldots$

$KZKZKZKZKZKZKZKZ\ldots$



Freiheitsgrad: Variable, die das System beschreibt, hier σ:

Kopf: $\sigma = +1$

Zahl: $\sigma = -1$

Mathematische Formel: System zur Zeit n: $\sigma(n)$

Dynamische Systeme

Beispiel 2: System mit zwei Zuständen

Z. B. Münze: Kopf K oder Zahl Z zeigt nach oben

$\boxed{K}$ $\boxed{Z}$

Dynamische Gesetze

A) Mache nichts:

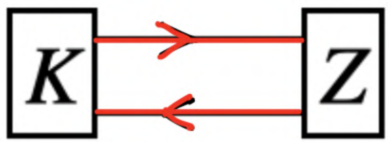
$KKKKKKKKKKKKKK$…….

$ZZZZZZZZZZZZZZZZZZ$…..

B) Ändere immer den Zustand:

$ZKZKZKZKZKZKZKZK$…

$KZKZKZKZKZKZKZKZ$…



Freiheitsgrad: Variable, die das System beschreibt, hier σ:

Kopf: $\sigma = +1$

Zahl: $\sigma = -1$

Mathematische Formel: System zur Zeit n: $\sigma(n)$

$\sigma(n+1) =$

Dynamische Systeme

Beispiel 2: System mit zwei Zuständen

Z. B. Münze: Kopf K oder Zahl Z zeigt nach oben

$\boxed{K}$ $\boxed{Z}$

Freiheitsgrad: Variable, die das System beschreibt, hier σ:

Kopf: $\sigma = +1$

Zahl: $\sigma = -1$

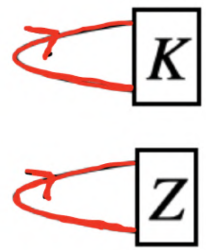
Dynamische Gesetze

Mathematische Formel: System zur Zeit n: $\sigma(n)$

A) Mache nichts:

$KKKKKKKKKKKKKKK.......$

$ZZZZZZZZZZZZZZZZZ.....$

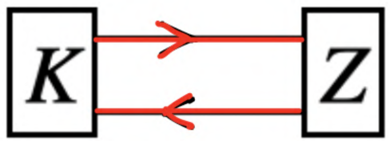


$$\sigma(n+1) = \sigma(n)$$

B) Ändere immer den Zustand:

$ZKZKZKZKZKZKZKZK...$

$KZKZKZKZKZKZKZKZ...$



$$\sigma(n+1) =$$

Dynamische Systeme

Beispiel 2: System mit zwei Zuständen

Z. B. Münze: Kopf K oder Zahl Z zeigt nach oben

$\boxed{K}$ $\boxed{Z}$

Freiheitsgrad: Variable, die das System beschreibt, hier σ:

Kopf: $\sigma = +1$

Zahl: $\sigma = -1$

Dynamische Gesetze

Mathematische Formel: System zur Zeit n: $\sigma(n)$

A) Mache nichts:

$KKKKKKKKKKKKKK$.......

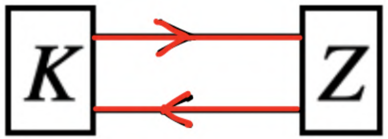
$ZZZZZZZZZZZZZZZZZ$.....

$$\sigma(n+1) = \sigma(n)$$

B) Ändere immer den Zustand:

$ZKZKZKZKZKZKZKZK$...

$KZKZKZKZKZKZKZKZ$...

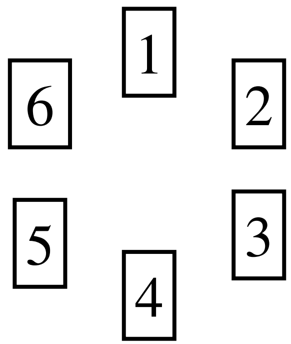


$$\sigma(n+1) = -\sigma(n)$$

Dynamische Systeme

Beispiel 3: System mit sechs Zuständen

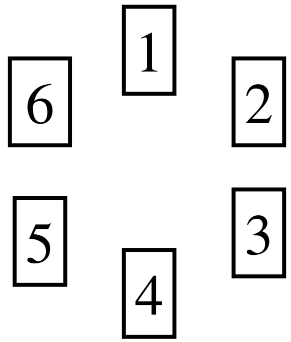
Z. B.Würfel:



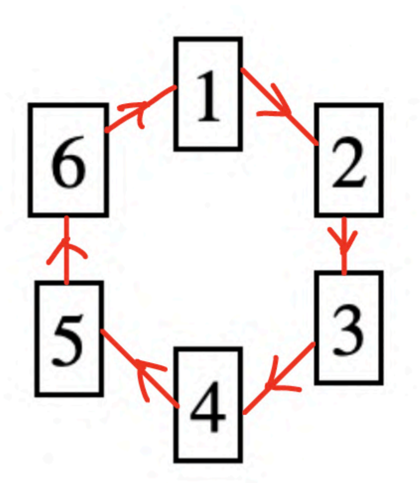
Dynamische Systeme

Beispiel 3: System mit sechs Zuständen

Z. B.Würfel:



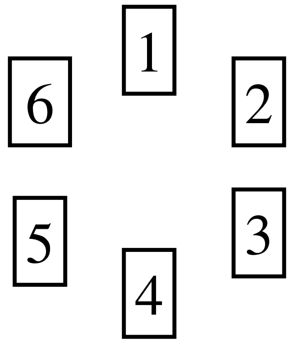
Dynamische Gesetze (kompliziert zu beschreiben, am einfachsten mit Diagrammen



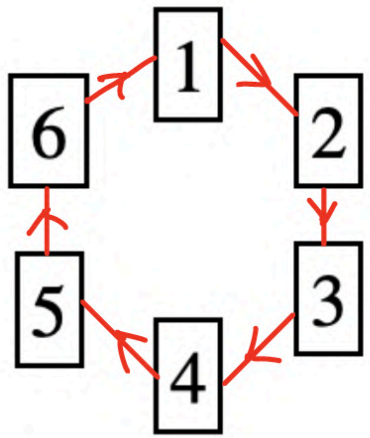
Dynamische Systeme

Beispiel 3: System mit sechs Zuständen

Z. B.Würfel:



Dynamische Gesetze (kompliziert zu beschreiben, am einfachsten mit Diagrammen

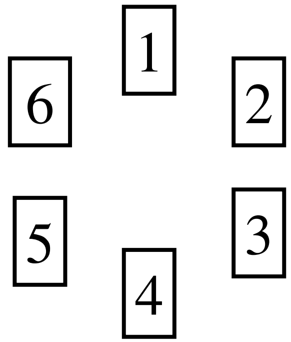


123456123456….
Deterministisch?
Reversibel?

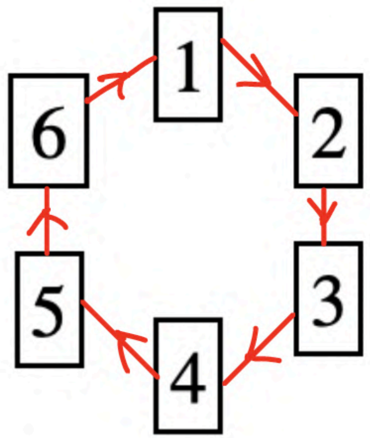
Dynamische Systeme

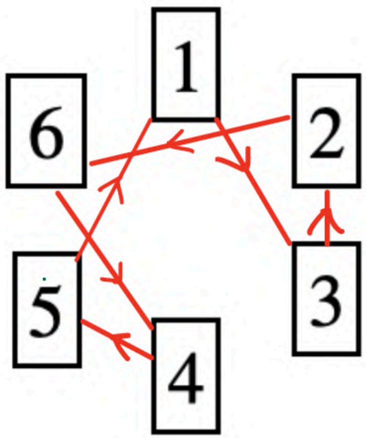
Beispiel 3: System mit sechs Zuständen

Z. B.Würfel:



Dynamische Gesetze



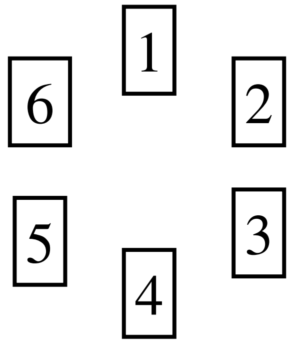


132645132645132645….
Deterministisch?
Reversibel?

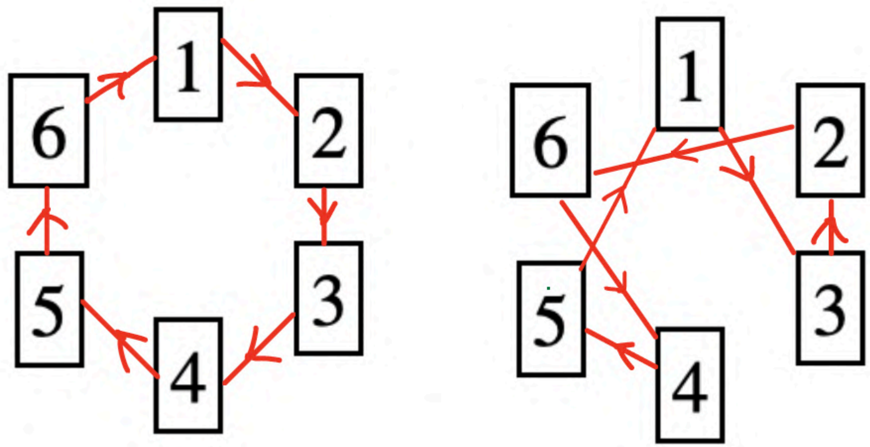
Dynamische Systeme

Beispiel 3: System mit sechs Zuständen

Z. B.Würfel:



Dynamische Gesetze

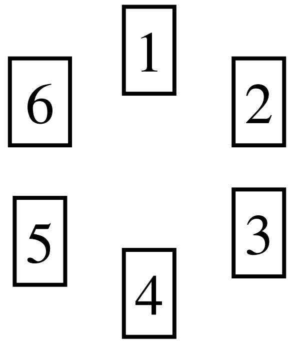


Wenn man die Seiten vom Würfel umenumeriert, dann ist das äquivalent zum 1. Fall

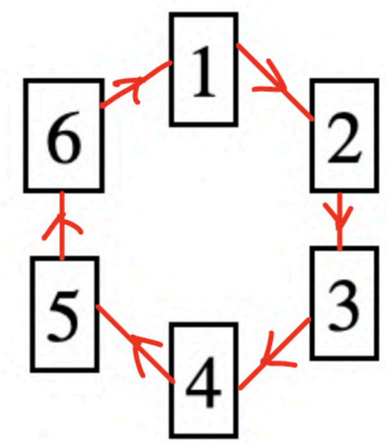
Dynamische Systeme

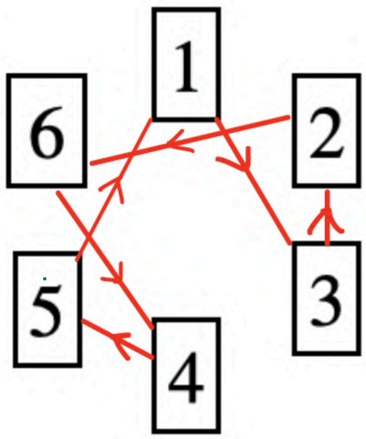
Beispiel 3: System mit sechs Zuständen

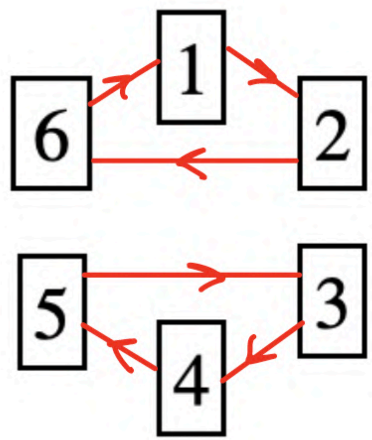
Z. B.Würfel:



Dynamische Gesetze





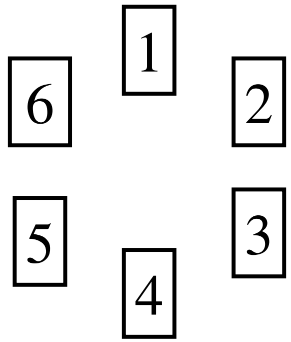


2 Zyklen: 612612…, 534534….
Deterministisch?
Reversibel?

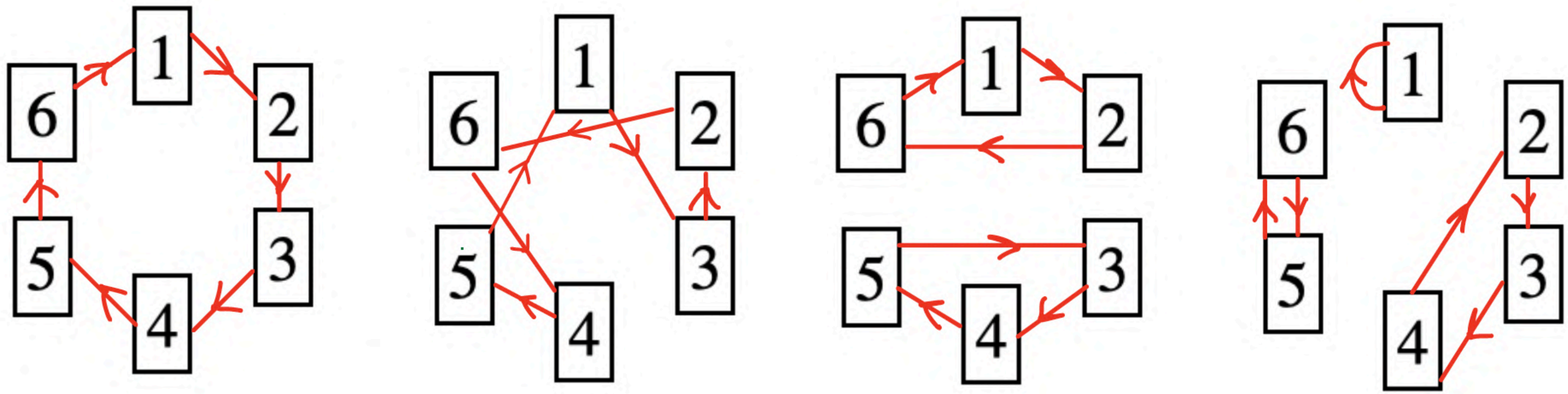
Dynamische Systeme

Beispiel 3: System mit sechs Zuständen

Z. B.Würfel:



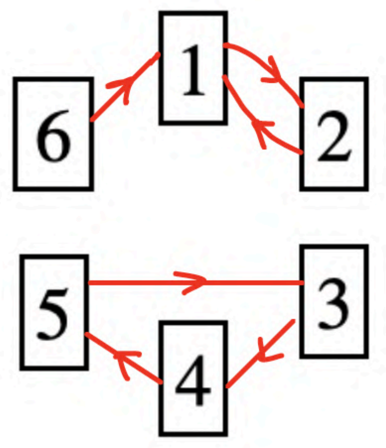
Dynamische Gesetze



3 Zyklen:
111111…, 565656…, 234234….
Deterministisch? Reversibel?

Dynamische Systeme

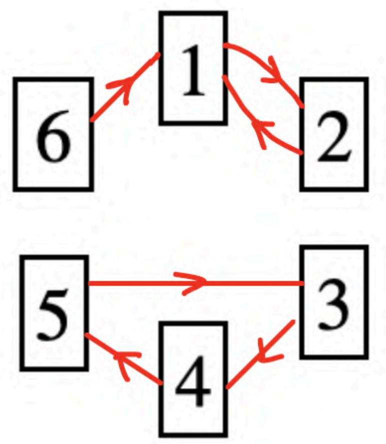
Klassische Physik ist deterministisch und reversible: welche Gesetze sind nicht erlaubt?



oberer Zyklus.
Deterministisch?
Reversibel?

Dynamische Systeme

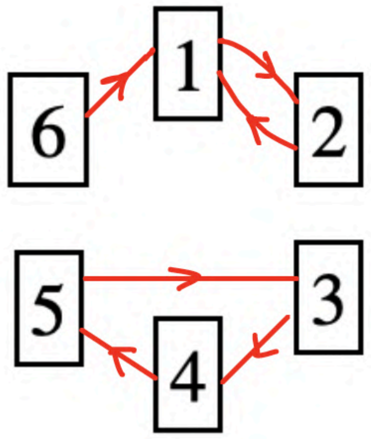
Klassische Physik ist deterministisch und reversible:
welche Gesetze sind nicht erlaubt?



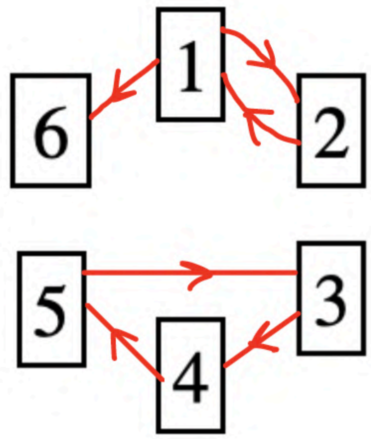
oberer Zyklus.
Deterministisch?
~~Reversibel~~?

Dynamische Systeme

Klassische Physik ist deterministisch und reversible:
welche Gesetze sind nicht erlaubt?



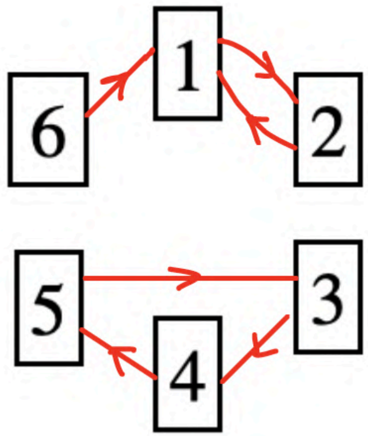
oberer Zyklus.
Deterministisch?
~~Reversibel~~?



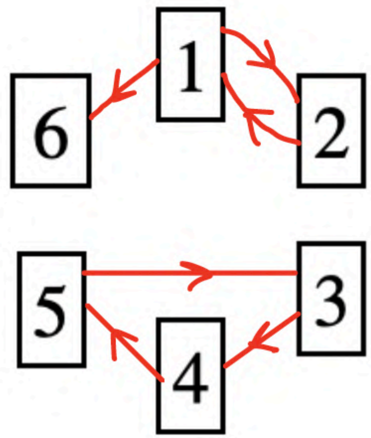
oberer Zyklus.
Deterministisch?
Reversibel?

Dynamische Systeme

Klassische Physik ist deterministisch und reversible:
welche Gesetze sind nicht erlaubt?



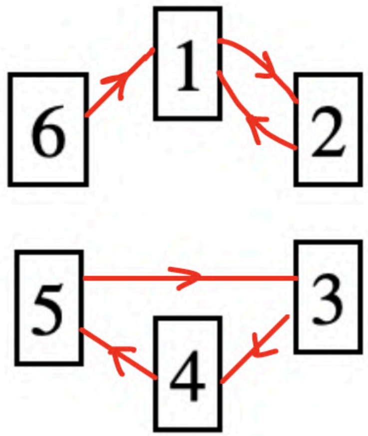
oberer Zyklus.
Deterministisch?
~~Reversibel~~?

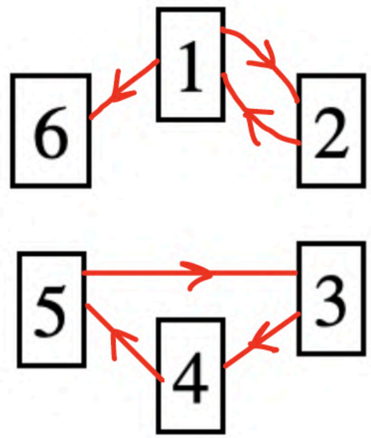


oberer Zyklus.
~~Deterministisch~~?
Reversibel?

Dynamische Systeme

Klassische Physik ist deterministisch und reversible:
welche Gesetze sind nicht erlaubt?





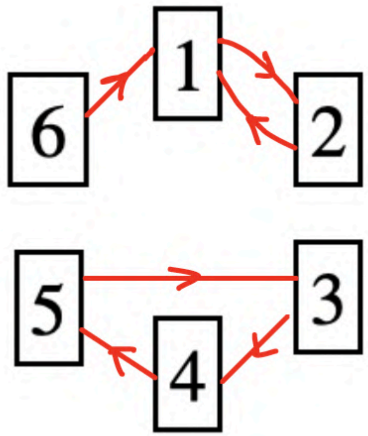
oberer Zyklus.
Deterministisch?
~~Reversibel~~?

oberer Zyklus.
~~Deterministisch~~?
Reversibel?

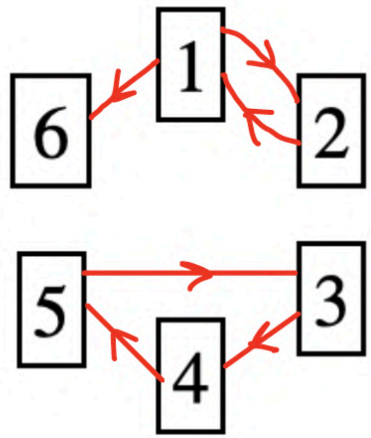
Diagramm ist deterministisch und reversibel,
wenn in jeden Zustand ein Pfeil reingeht und Pfeil rausgeht

Dynamische Systeme

Klassische Physik ist deterministisch und reversible:
welche Gesetze sind nicht erlaubt?



oberer Zyklus.
Deterministisch?
~~Reversibel~~?



oberer Zyklus.
~~Deterministisch~~?
Reversibel?

Gesetze sind deterministisch und reversibel
⇔ Information ist erhalten

Dynamische Systeme

Unendlich viele Zustände

$$\boxed{\ldots}\quad\boxed{-3}\quad\boxed{-2}\quad\boxed{-1}\quad\boxed{0}\quad\boxed{1}\quad\boxed{2}\quad\boxed{3}\quad\boxed{\ldots}$$

Wert des Zustandes wird mit N **bezeichnet,** $N \in \{\ldots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \ldots\}$

Wert des Zustandes zur Zeit n**:** $N(n)$

Dynamische Systeme

Unendlich viele Zustände

$$\boxed{\ldots}\quad\boxed{-3}\quad\boxed{-2}\quad\boxed{-1}\quad\boxed{0}\quad\boxed{1}\quad\boxed{2}\quad\boxed{3}\quad\boxed{\ldots}$$

Wert des Zustandes wird mit N bezeichnet, $N \in \{\ldots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \ldots\}$

Wert des Zustandes zur Zeit n: $N(n)$

Dynamisches Gesetz:

$$\boxed{\ldots}\rightarrow\boxed{-3}\rightarrow\boxed{-2}\rightarrow\boxed{-1}\rightarrow\boxed{0}\rightarrow\boxed{1}\rightarrow\boxed{2}\rightarrow\boxed{3}\rightarrow\boxed{\ldots}$$

Dynamische Systeme

Unendlich viele Zustände

$$\boxed{\ldots}\ \boxed{-3}\ \boxed{-2}\ \boxed{-1}\ \boxed{0}\ \boxed{1}\ \boxed{2}\ \boxed{3}\ \boxed{\ldots}$$

Wert des Zustandes wird mit N **bezeichnet,** $N \in \{\ldots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \ldots\}$

Wert des Zustandes zur Zeit n**:** $N(n)$

Dynamisches Gesetz:

$$\boxed{\ldots} \rightarrow \boxed{-3} \rightarrow \boxed{-2} \rightarrow \boxed{-1} \rightarrow \boxed{0} \rightarrow \boxed{1} \rightarrow \boxed{2} \rightarrow \boxed{3} \rightarrow \boxed{\ldots}$$

Mathematische Formel für dieses Gesetz:

Dynamische Systeme

Unendlich viele Zustände

$$\boxed{\ldots}\ \boxed{-3}\ \boxed{-2}\ \boxed{-1}\ \boxed{0}\ \boxed{1}\ \boxed{2}\ \boxed{3}\ \boxed{\ldots}$$

Wert des Zustandes wird mit N **bezeichnet,** $N \in \{\ldots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \ldots\}$
Wert des Zustandes zur Zeit n**:** $N(n)$

Dynamisches Gesetz:

$$\boxed{\ldots} \rightarrow \boxed{-3} \rightarrow \boxed{-2} \rightarrow \boxed{-1} \rightarrow \boxed{0} \rightarrow \boxed{1} \rightarrow \boxed{2} \rightarrow \boxed{3} \rightarrow \boxed{\ldots}$$

Mathematische Formel für dieses Gesetz:

$$N(n+1) = N(n) + 1$$

Dynamische Systeme

Unendlich viele Zustände

$$\boxed{\ldots}\ \boxed{-3}\ \boxed{-2}\ \boxed{-1}\ \boxed{0}\ \boxed{1}\ \boxed{2}\ \boxed{3}\ \boxed{\ldots}$$

Wert des Zustandes wird mit N bezeichnet, $N \in \{\ldots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \ldots\}$

Wert des Zustandes zur Zeit n: $N(n)$

Weitere Gesetze:

$$N(n+1) = N(n) - 1$$

$$N(n+1) = N(n) + 2$$

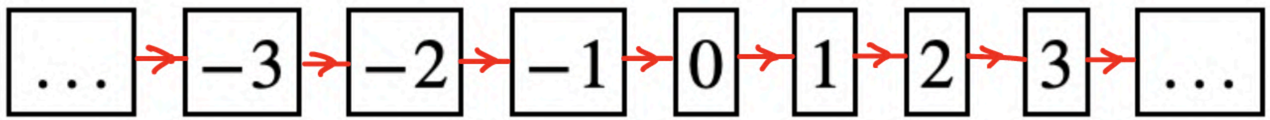
Deterministisch?
Reversibel?
Gibt es verschiedene Zyklen?

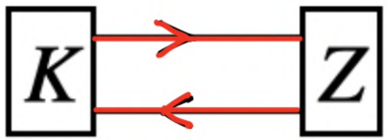
$$N(n+1) = (N(n))^2$$

Dynamische Systeme

Unendlich viele Zustände

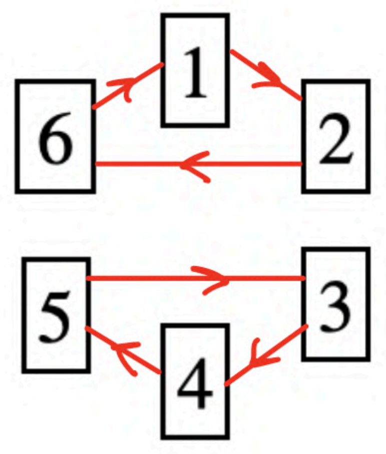
Es gibt auch zusammengesetzte Systeme





Dynamische Systeme

Zyklen und Erhaltungssätze



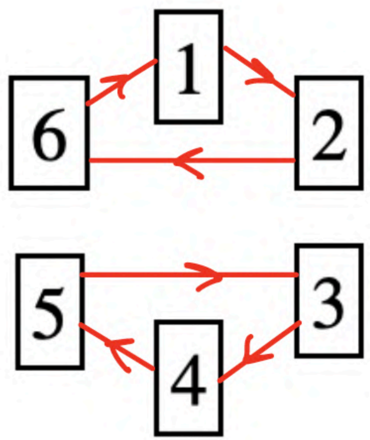
Ist ein System in einem Zyklus, dann entkommt es diesem nicht mehr

oder

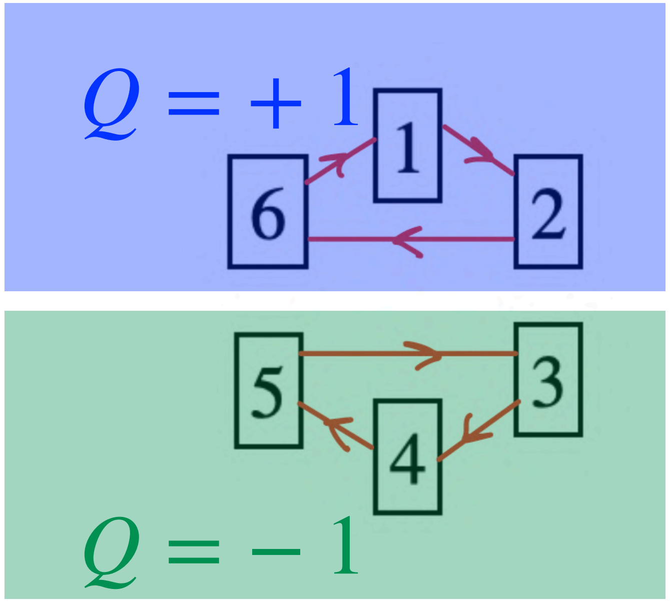
das System erinnert sich in welchem Zyklus es war

Dynamische Systeme

Zyklen und Erhaltungssätze



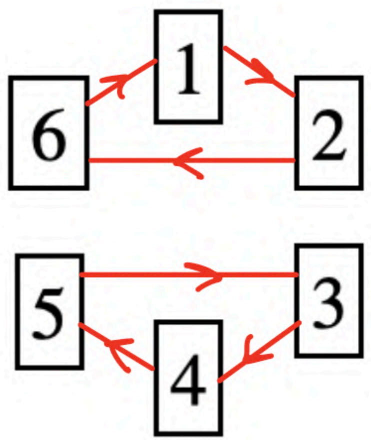
Ist ein System in einem Zyklus, dann entkommt es diesem nicht mehr
oder
das System erinnert sich in welchem Zyklus es war



Ordnet man einem Zyklus eine Größe Q zu, dann ist diese Größe bei der dynamischen Zeitentwicklung erhalten

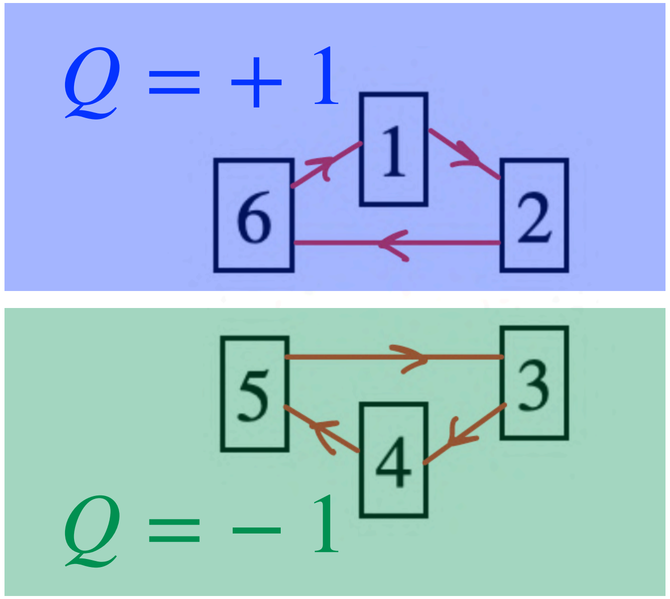
Dynamische Systeme

Zyklen und Erhaltungssätze



Ist ein System in einem Zyklus, dann entkommt es diesem nicht mehr
oder
das System erinnert sich in welchem Zyklus es war

Ordnet man einem Zyklus eine Größe Q zu, dann ist diese Größe bei der dynamischen Zeitentwicklung erhalten



Genau das passiert z.B. bei der Energieerhaltung: es sind bei der Bewegung nur die Zustände erlaubt, die dieselbe Energie haben

Dynamische Systeme

Grenzen der Präzision

Ist das System zum Anfangszeitpunkt exakt bekannt, dann kann auch die Zukunft exakt berechnet werden z.B. Münze

Dynamische Systeme

Grenzen der Präzision

**Ist das System zum Anfangszeitpunkt exakt bekannt,
dann kann auch die Zukunft exakt berechnet werden
z.B. Münze**

**Es kann aber auch unmöglich sein das System zum
Anfangszeitpunkt exakt zu kennen:
z.B.: Teilchen mit Anfangsort und Anfangsgeschwindigkeit**

Dynamische Systeme

Grenzen der Präzision

Ist das System zum Anfangszeitpunkt exakt bekannt, dann kann auch die Zukunft exakt berechnet werden z.B. Münze

Es kann aber auch unmöglich sein das System zum Anfangszeitpunkt exakt zu kennen: z.B.: Teilchen mit Anfangsort und Anfangsgeschwindigkeit

Geringe Sensibilität, lineare Dynamik

Zukunft kann näherungsweise berechnet werden

Dynamische Systeme

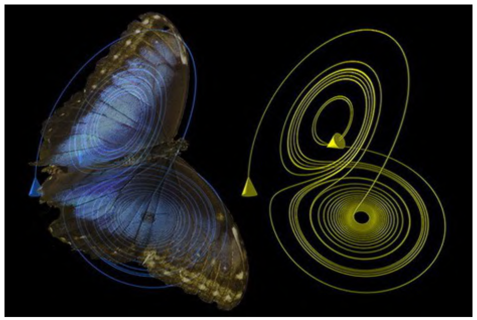
Grenzen der Präzision

**Ist das System zum Anfangszeitpunkt exakt bekannt,
dann kann auch die Zukunft exakt berechnet werden
z.B. Münze**

**Es kann aber auch unmöglich sein das System zum
Anfangszeitpunkt exakt zu kennen:
z.B.: Teilchen mit Anfangsort und Anfangsgeschwindigkeit**

**Geringe Sensibilität,
lineare Dynamik**

**Hohe Sensibilität,
nicht-lineare Dynamik**



**Zukunft kann näherungsweise
berechnet werden**

**Zukunft kann nicht
wirklich berechnet werden
(Chaos)**

Ende 1. Vorlesung