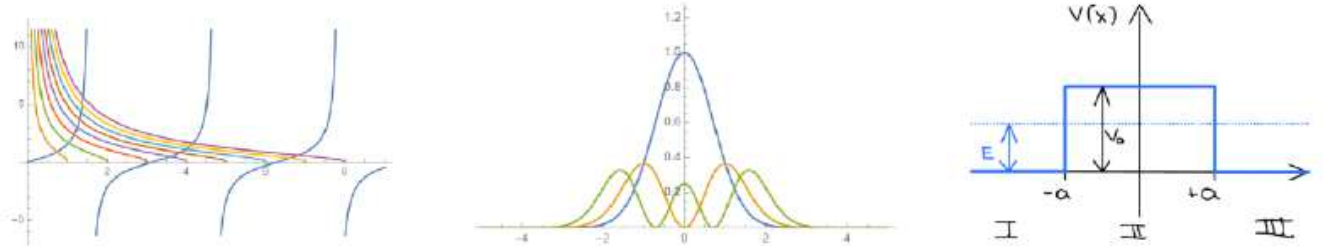




Schrödinger's Katze am Emmy Noether Campus: sie lebt!

Ankündigung für das Sommersemester 2025
Das theoretische Minimum II
Quantenmechanik - Prof. Dr. Alexander Lenz, 4PHY00011V



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

2025 wird weltweit das 100 jährige Jubiläum der Entdeckung der Quantenmechanik gefeiert. Ursprünglich war dies über viele Jahrzehnte lang reinste Grundlagenforschung ohne jegliche Hinweise auf potentielle Anwendungen. 100 Jahre später finden wir, dass ein Großteil der technologischen Errungenschaften der Menschheit im letzten Jahrhundert auf der Quantenmechanik basiert - zuletzt gipfelte dies in den ersten Quantencomputern.

Im Sommersemester 2025 beschäftigen wir uns daher mit einer Einführung in die Grundprinzipien der Quantenmechanik:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{x}, t) = \left[\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(\vec{x}) \right] \Psi(\vec{x}, t)$$

Die Vorlesung richtet sich an Mittwochsakademiker, Oberstufenschülerinnen und -schüler, Lehrkräfte und 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.



11 Termine im Sommersemester 25:
7.5., 14.5., 21.5., 28.5., 4.6., 11.6., 18.6., 25.6., 2.7., 9.7., 16.7.
Mittwochs 16-18
Emmy Noether Campus ENC-D-114
Infos unter: alexander.lenz@uni-siegen.de
<https://tp1.physik.uni-siegen.de/mittwochsakademie/>



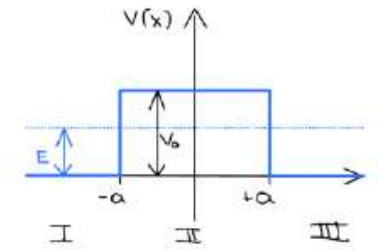
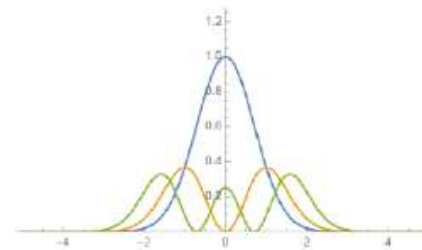
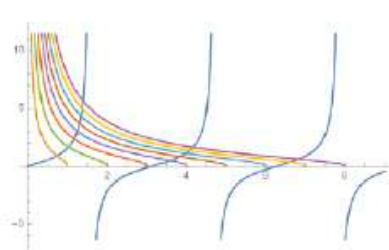


Schrödinger's Katze am Emmy Noether Campus: sie lebt!

Ankündigung für das Sommersemester 2025

Das theoretische Minimum II

Quantenmechanik - Prof. Dr. Alexander Lenz, 4PHY00011V



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

2025 wird weltweit das 100 jährige Jubiläum der Entdeckung der Quantenmechanik gefeiert. Ursprünglich war dies über viele Jahrzehnte lang reinste Grundlagenforschung ohne jegliche Hinweise auf potentielle Anwendungen. 100 Jahre später finden wir, dass ein Großteil der technologischen Errungenschaften der Menschheit im letzten Jahrhundert auf der Quantenmechanik basiert - zuletzt gipfelte dies in den ersten Quantencomputern.

Im Sommersemester 2025 beschäftigen wir uns daher mit einer Einführung in die Grundprinzipien der Quantenmechanik:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{x}, t) = \left[\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(\vec{x}) \right] \Psi(\vec{x}, t)$$

Die Vorlesung richtet sich an Mittwochsakademiker, Oberstufenschülerinnen und -schüler, Lehrkräfte und 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.



11 Termine im Sommersemester 25:

7.5., 14.5., 21.5., 28.5., 4.6., 11.6., 18.6., 25.6., 2.7., 9.7., 16.7.

Mittwochs 16-18

Emmy Noether Campus ENC-D-114

Infos unter: alexander.lenz@uni-siegen.de

<https://tp1.physik.uni-siegen.de/mittwochsakademie/>



[https://
www.quantum2025
.de](https://www.quantum2025.de)



2025 Quantum2025



Schrödinger's Katze am Emmy Noether Campus: sie lebt!



Termine:

7.5:
14.5:
21.5:



28.5: Vertretung

4.6:
11.6:
18.6:



25.6: Prof. Tao Han

2.7:
9.7:



+ Oppenheimer

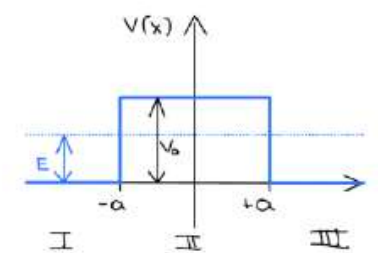
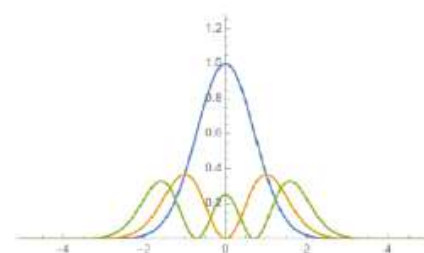
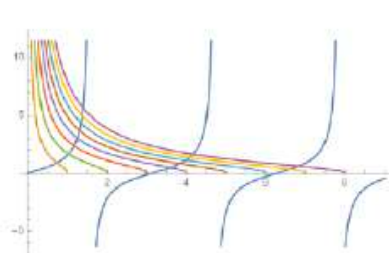
16.7:



Prof. Dr. Tao Han forscht mit Unterstützung der Humboldt-Stiftung an der Uni Siegen.



Ankündigung für das Sommersemester 2025 Das theoretische Minimum II Quantenmechanik - Prof. Dr. Alexander Lenz, 4PHY00011V



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

2025 wird weltweit das 100 jährige Jubiläum der Entdeckung der Quantenmechanik gefeiert. Ursprünglich war dies über viele Jahrzehnte lang reinste Grundlagenforschung ohne jegliche Hinweise auf potentielle Anwendungen. 100 Jahre später finden wir, dass ein Großteil der technologischen Errungenschaften der Menschheit im letzten Jahrhundert auf der Quantenmechanik basiert - zuletzt gipfelte dies in den ersten Quantencomputern.

Im Sommersemester 2025 beschäftigen wir uns daher mit einer Einführung in die Grundprinzipien der Quantenmechanik:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{x}, t) = \left[\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(\vec{x}) \right] \Psi(\vec{x}, t)$$

Die Vorlesung richtet sich an Mittwochsakademiker, Oberstufenschülerinnen und -schüler, Lehrkräfte und 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.



11 Termine im Sommersemester 25:
7.5., 14.5., 21.5., 28.5., 4.6., 11.6., 18.6., 25.6., 2.7., 9.7., 16.7.
Mittwochs 16-18
Emmy Noether Campus ENC-D-114
Infos unter: alexander.lenz@uni-siegen.de
<https://tp1.physik.uni-siegen.de/mittwochsakademie/>



[https://
www.quantum2025
.de](https://www.quantum2025.de)



Vorlesung: Das theoretische Minimum Quantenmechanik

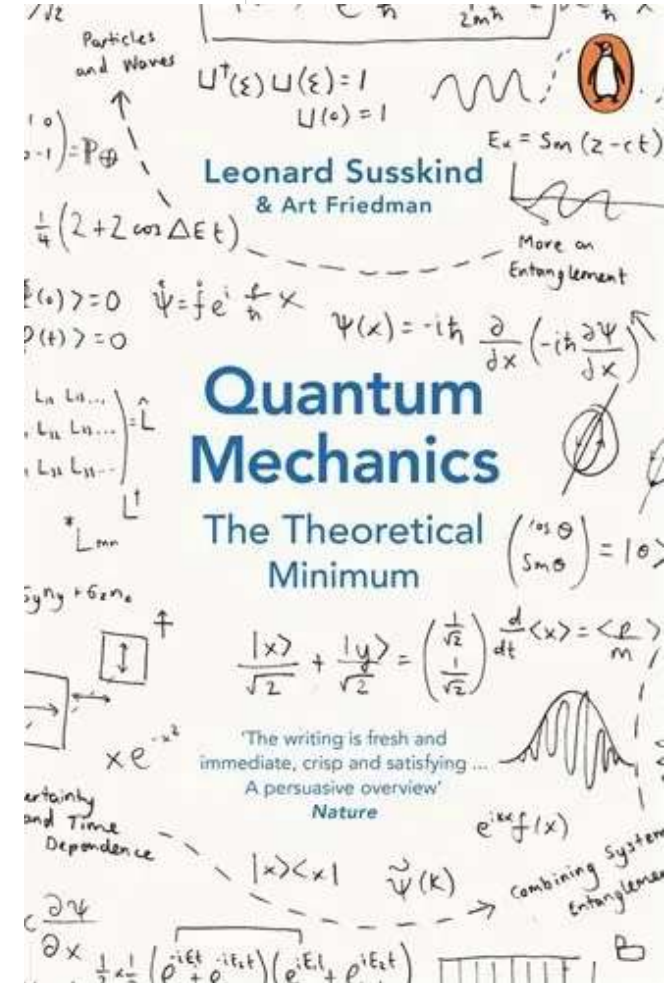
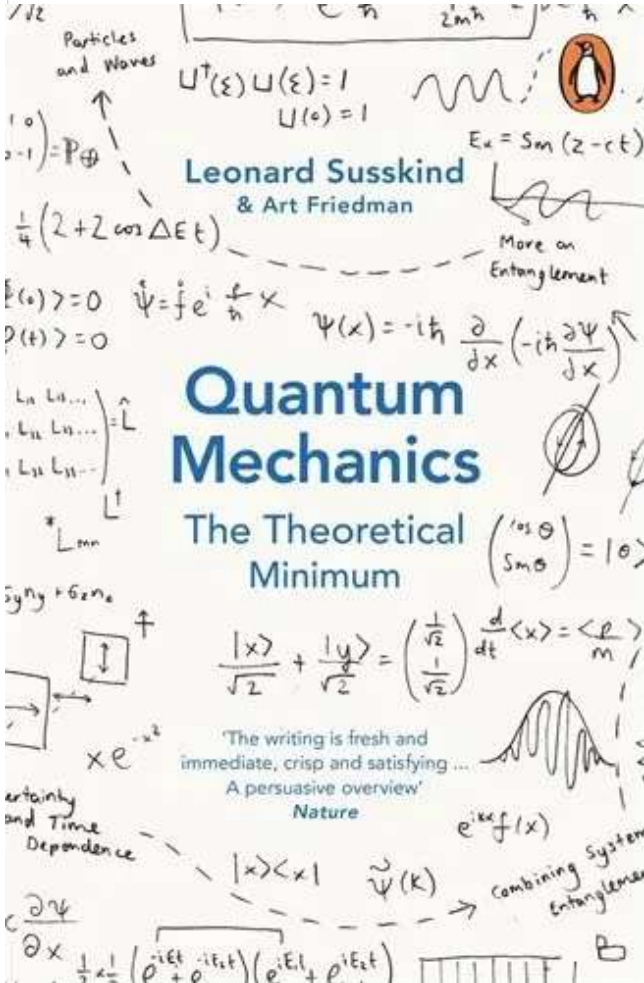
Mittwochsakademie

angelehnt an

“The theoretical Minimum“ von Leonard Susskind

<https://theoreticalminimum.com/>

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

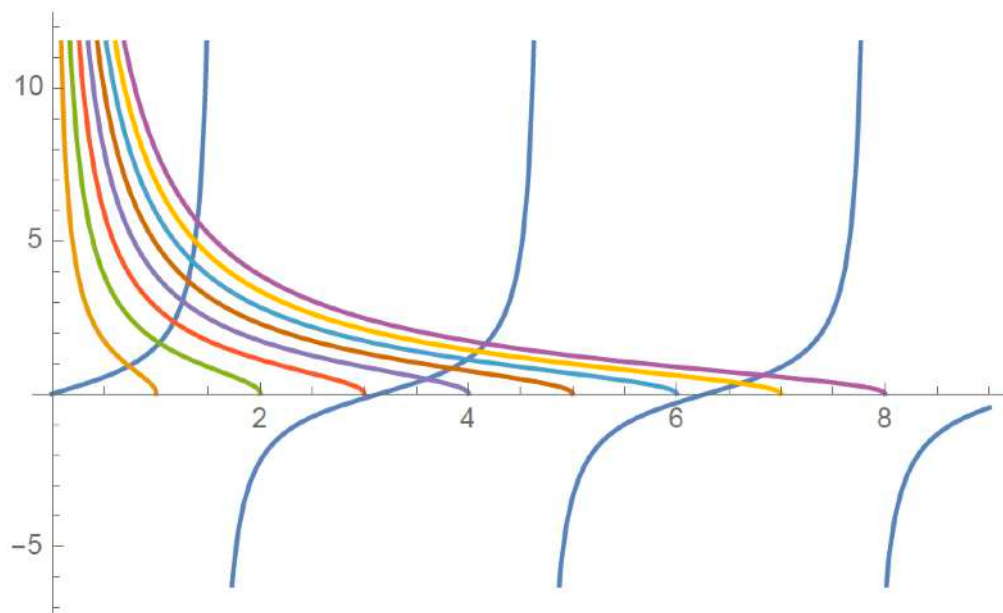


Vorlesung: Das theoretische Minimum

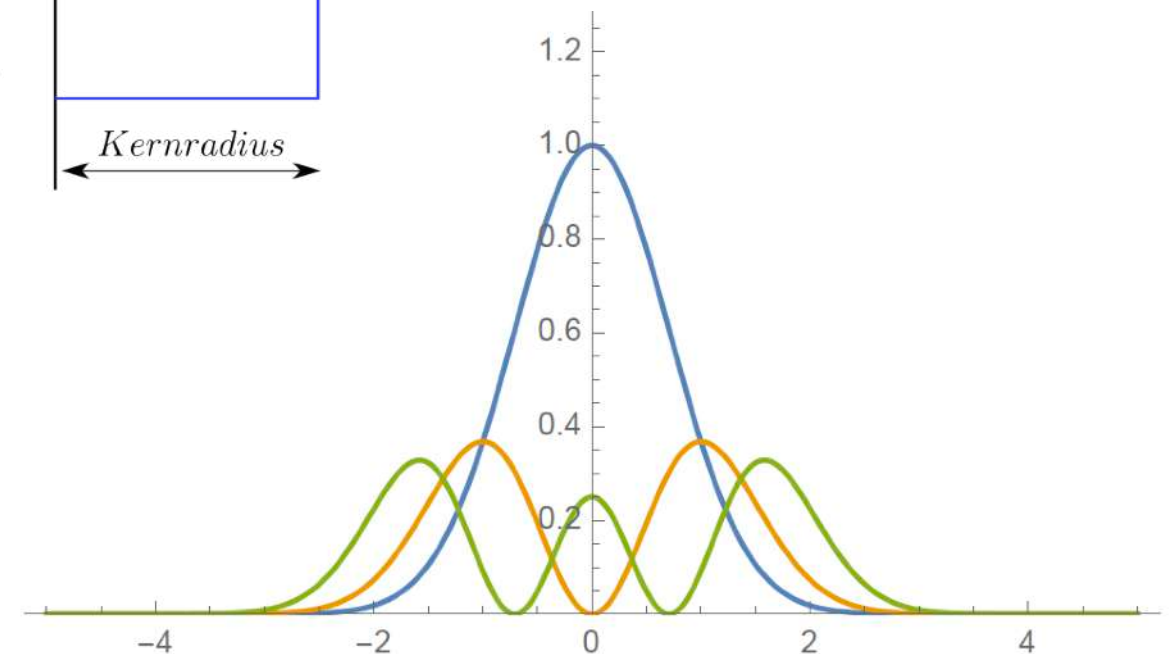
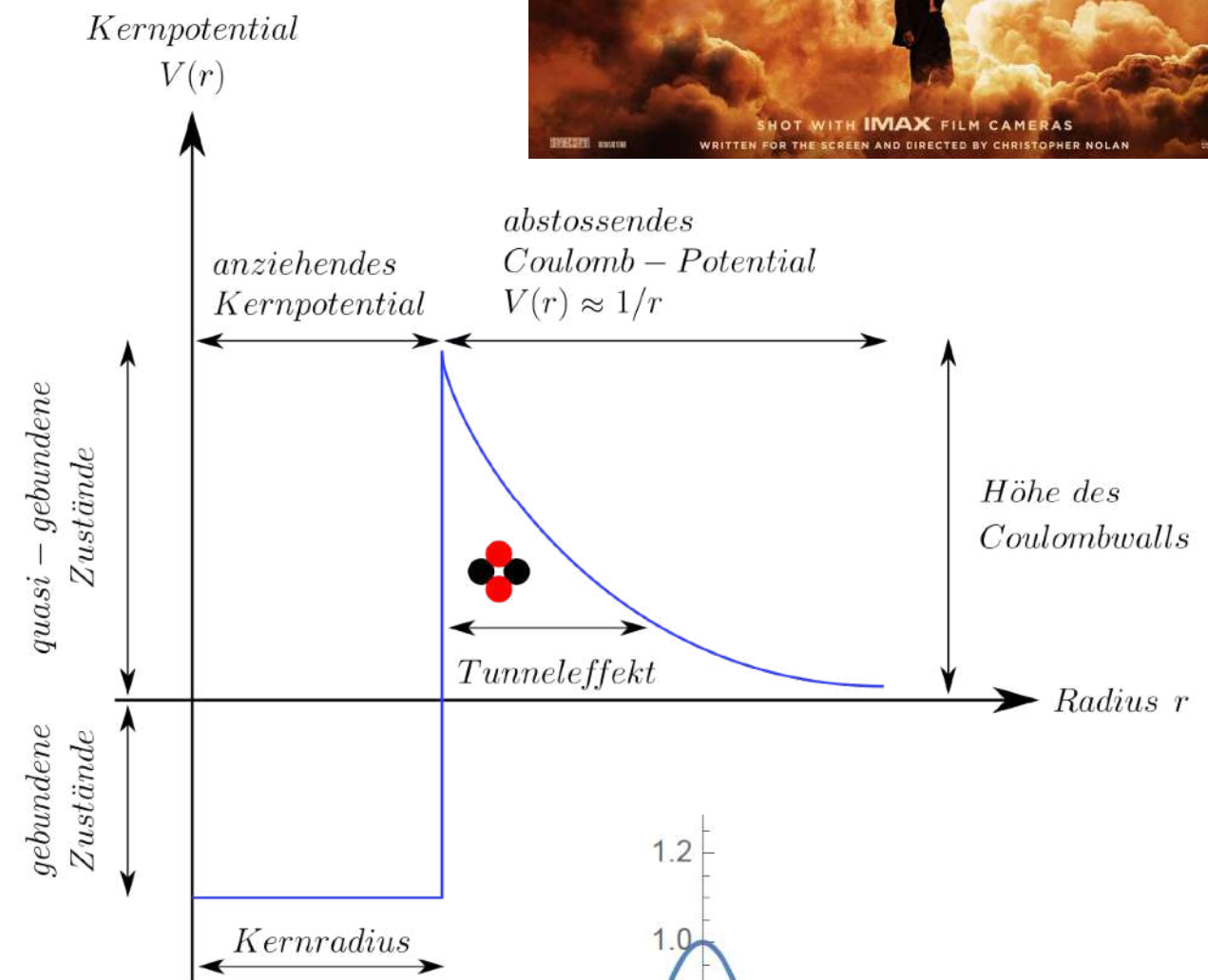
Mittwochsakademie

Ablauf

- 7.5.: Einführung
- 14.5.: Zustände, Vektorräume
- 21.5.: Grundprinzipien der QM
- 28.5.: Vertretung - Zeitentwicklung
- 4.6.: Unschärferelation
- 11.6.: Verschränkung
- 18.6.: Verschränkung II
- 25.6.: **Festkolloquium: Prof. Tao Han**
- 2.7.: Teilchen und Wellen
- 9.7.: Dynamik + **Film: Oppenheimer**
- 16.7.: Harmonischer Oszillator



Streuung an Kastenpotential



Aufenthaltswahrscheinlichkeit
beim harmonischen Oszillator

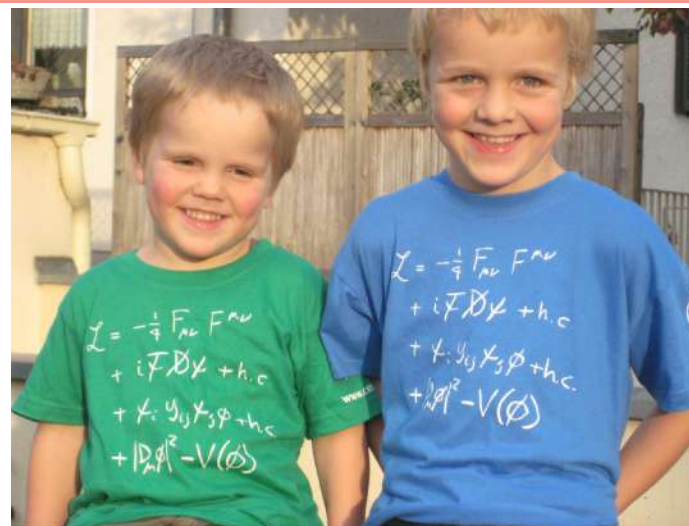


Was ist Physik?

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



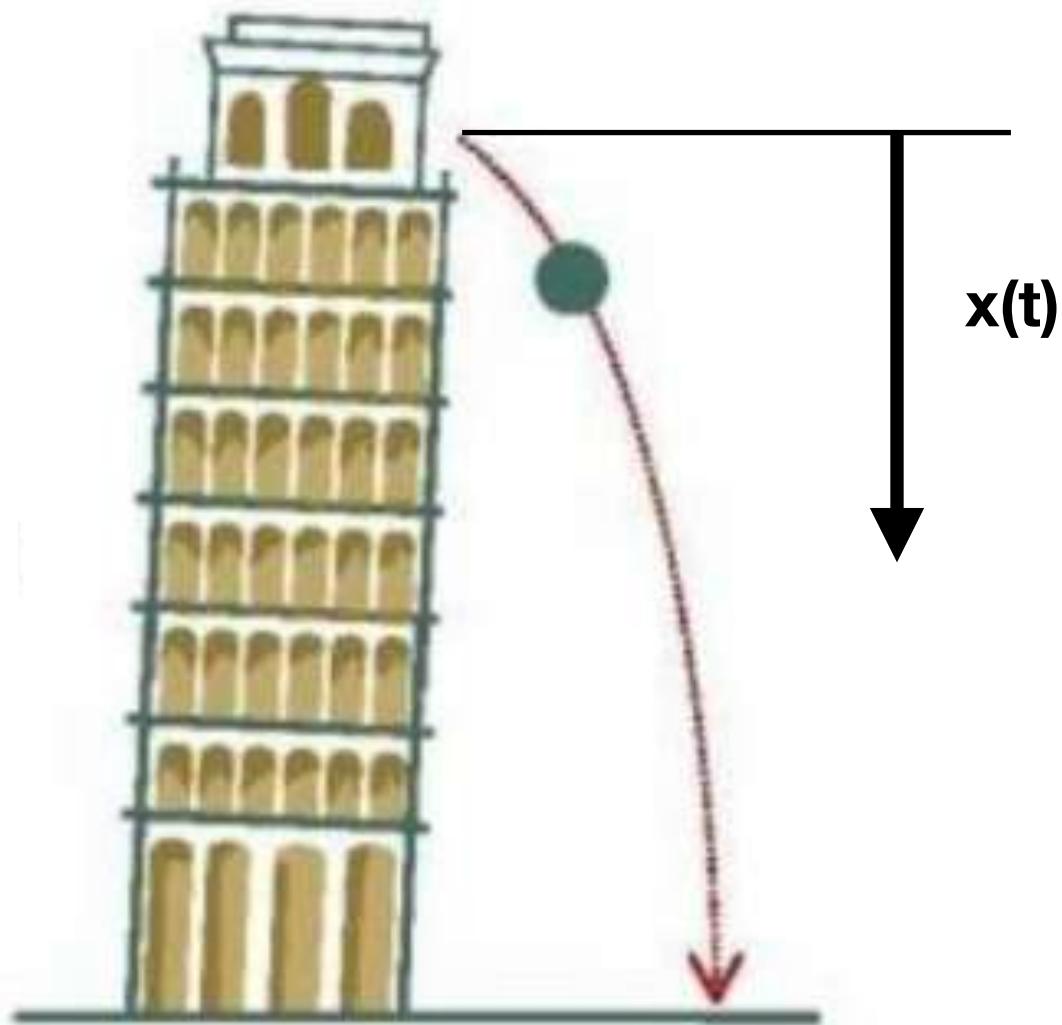
Physik ist keine Religion!

**Wir kennen die letzten, fundamentalsten Gesetze (noch) nicht,
aber wir kennen den Weg zur Erkenntnis und**

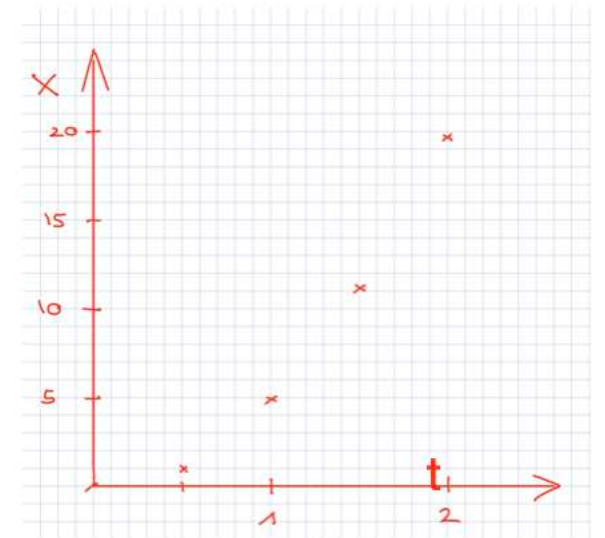
die bisherige Erkenntnis hat Unmengen an technologischen Anwendungen ermöglicht

Beispiel: Fallgesetze

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



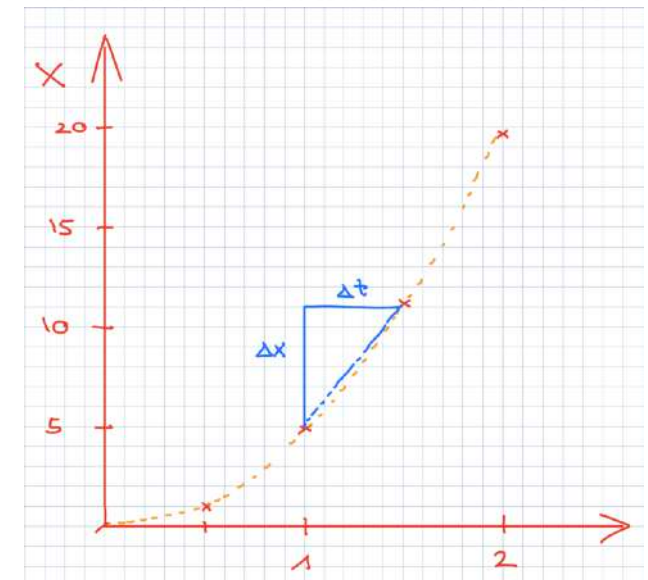
Messung:



Geschwindigkeit

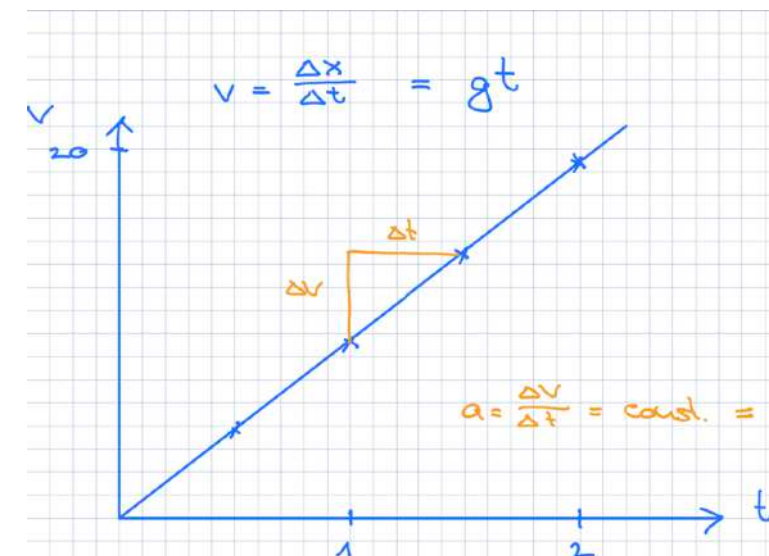
$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t}$$

Wegänderung pro Zeit



Mathematik:
Ableiten

Beschleunigung $a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}$
Geschwindigkeitsänderung pro Zeit



Beispiel: Fallgesetze

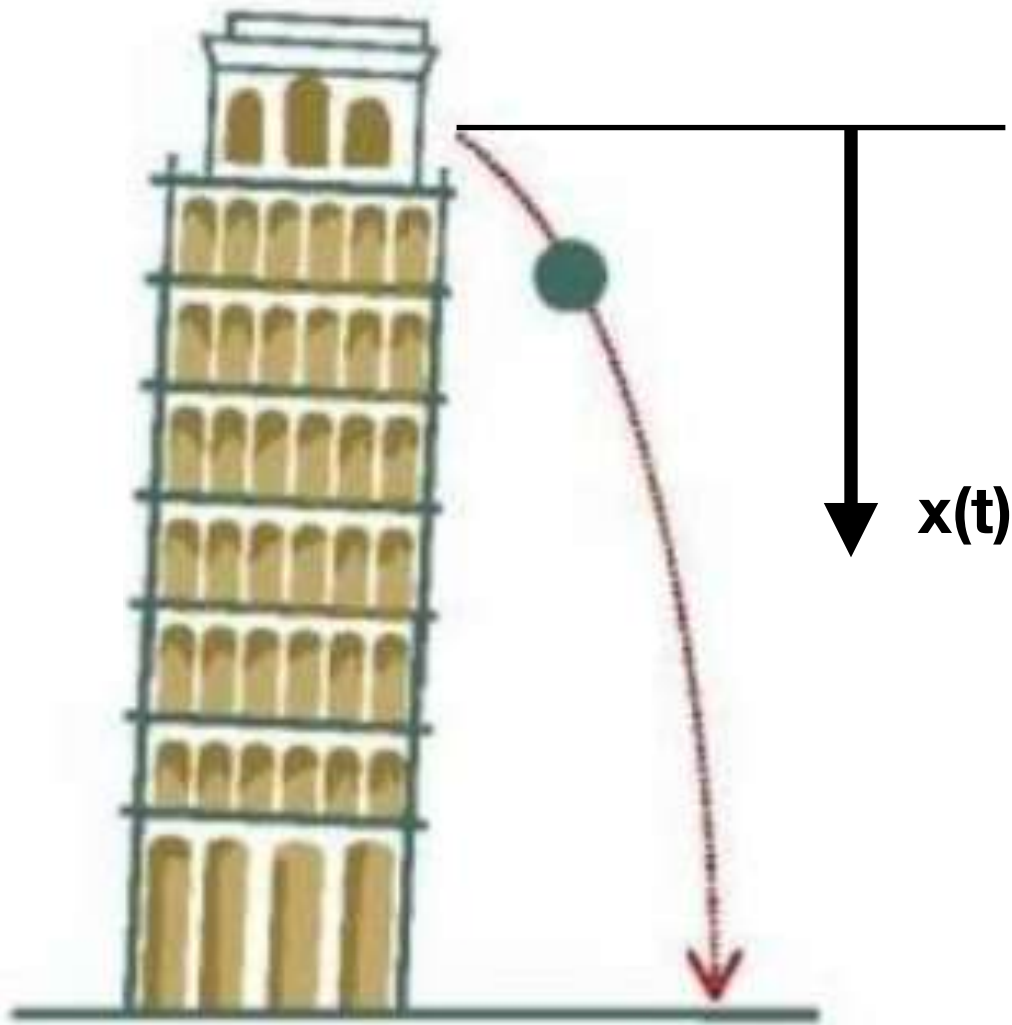
Mathematische Formulierung des empirischen Zusammenhangs:

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

Geschwindigkeit

$$\begin{aligned} v(t) &= \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} \\ &= \frac{\frac{1}{2}g(t + \Delta t)^2 - \frac{1}{2}gt^2}{\Delta t} \\ &= \frac{\cancel{\frac{1}{2}gt^2} + gt\Delta t + \frac{1}{2}g\Delta t^2 - \cancel{\frac{1}{2}gt^2}}{\Delta t} \end{aligned}$$

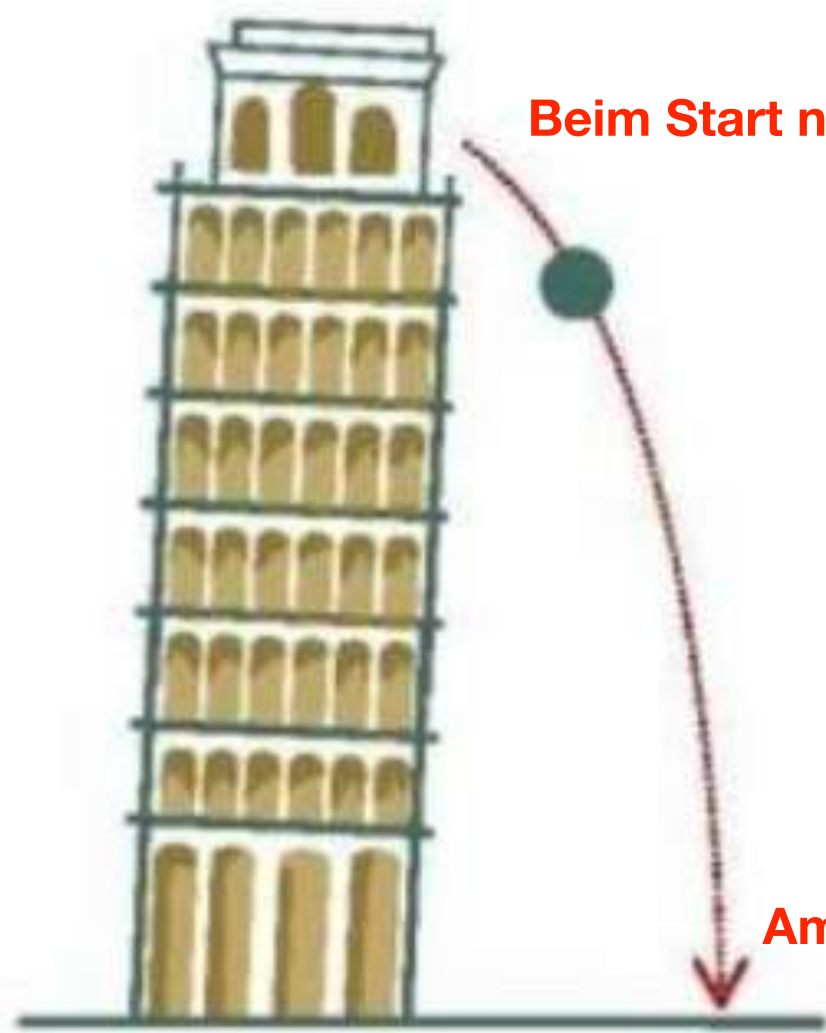
$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} gt + \frac{1}{2}g\Delta t = gt$$



$$v = gt = g\sqrt{\frac{2x}{g}} = \sqrt{2gx}$$

Beispiel: Fallgesetze

Elementare Prinzipien 1: **Energieerhaltung:**



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



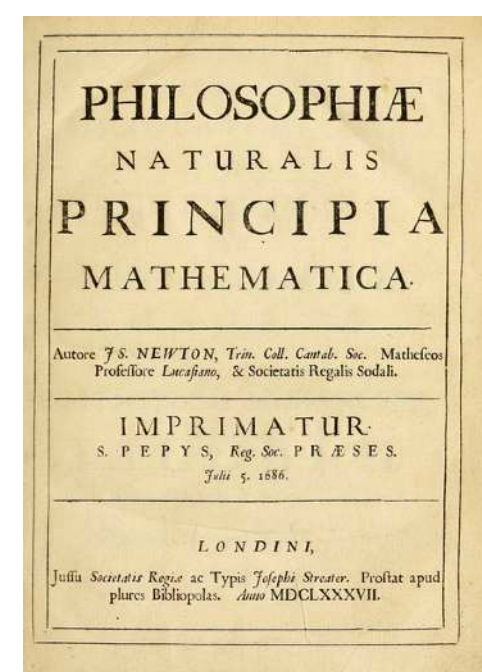
Am Ende nur kinetische Energie $E_{\text{kin.}} = \frac{1}{2}mv^2$, keine potentielle Energie

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



Beispiel: Fallgesetze

Elementare Prinzipien 2: Newtonsche Gleichungen:



1. Newtonsches Gesetz:

$$F = ma$$

Gravitationskraft:

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

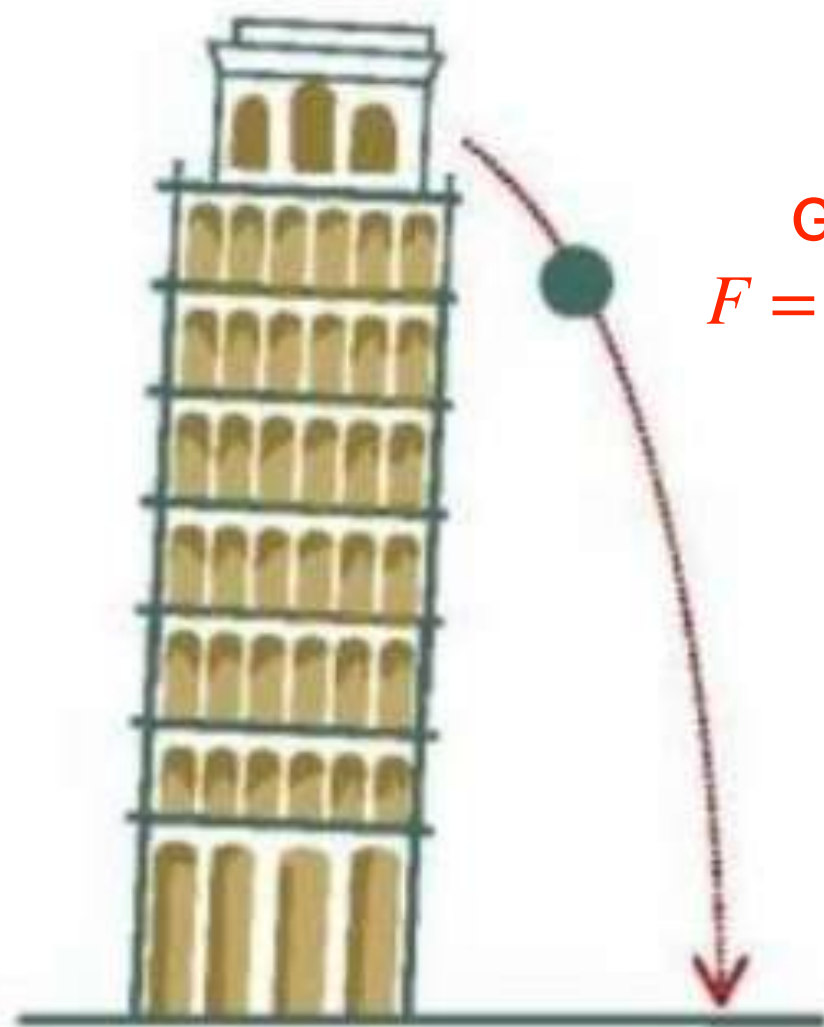
$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

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

$$\Rightarrow v = gt$$

$$\Rightarrow x = \frac{1}{2}gt^2$$

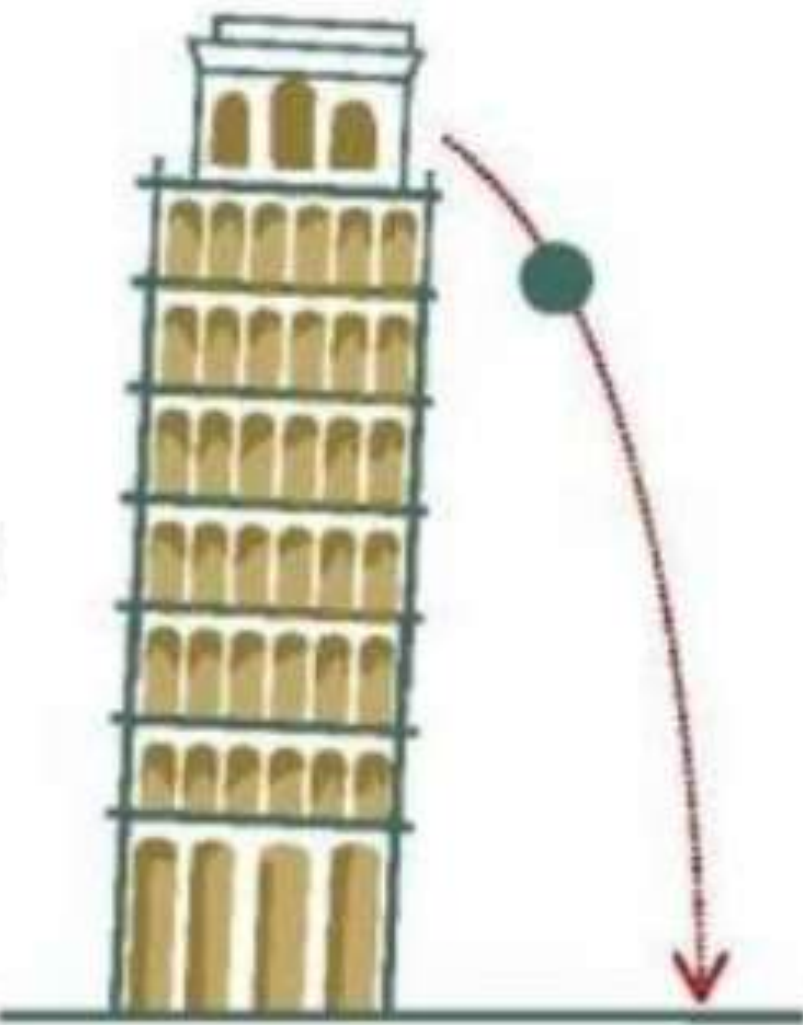
Mathematik: Integrieren



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

Beispiel: Fallgesetze

Elementare Prinzipien 3: **Prinzip der kleinsten Wirkung:**



Pierre Maupertuis

Leonhard Euler

Joseph Lagrange

William Hamilton

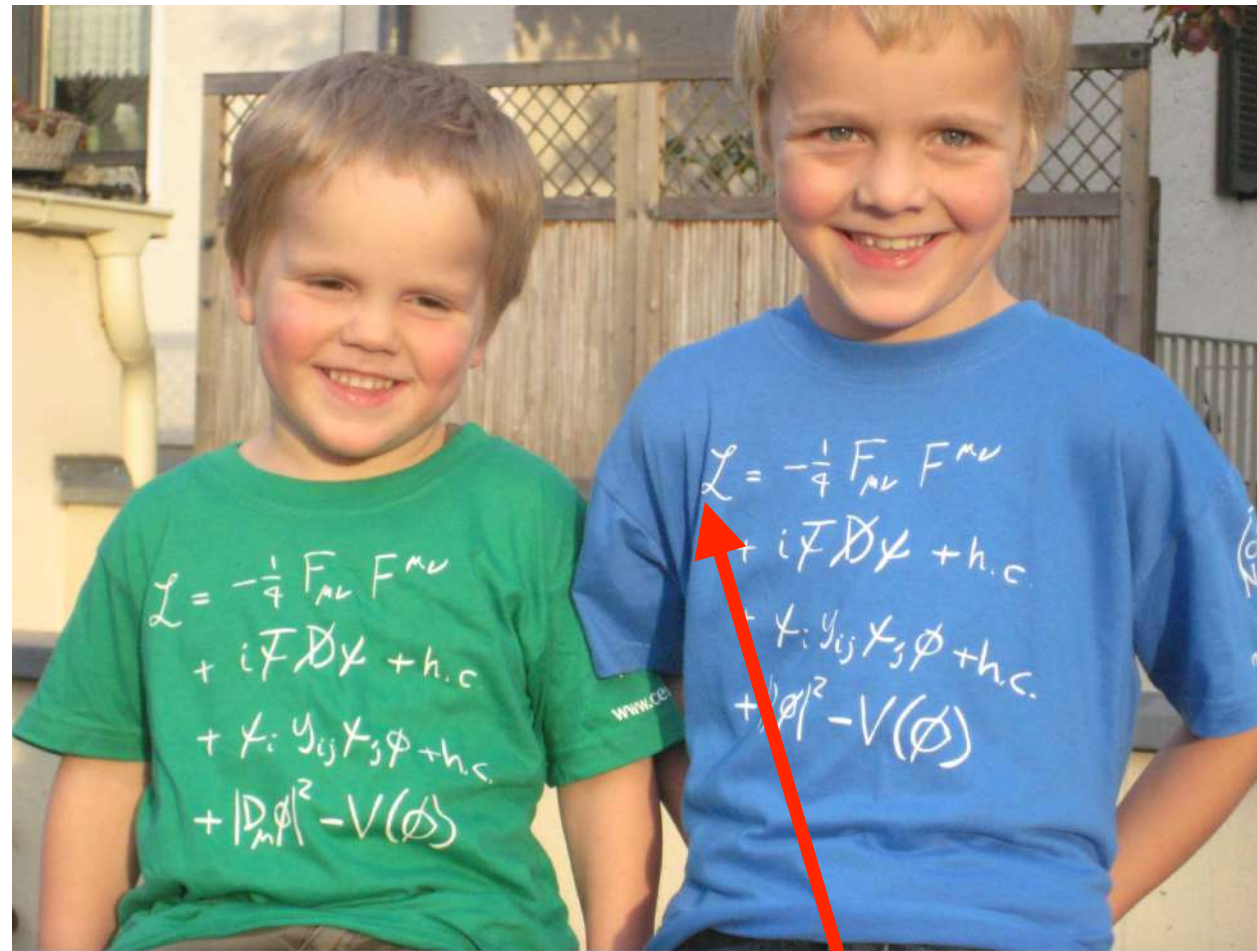


Betrachte beliebige Bahnkurven $x(t)$:

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 $S = \int \mathcal{L} d^4x$ und erhalte alle

fundamentalen Wechselwirkungen
im Mikrokosmos:

Elektromagnetische Wechselwirkung

Starke Wechselwirkung

Schwache Wechselwirkung

Allgemeine Relativitätstheorie kann auch aus
diesem Prinzip abgeleitet werden

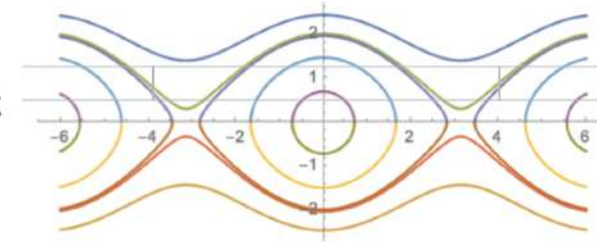
https://www.youtube.com/watch?v=Q10_srZ-pbs

Ziel im WS 24/25:

Erkläre das Prinzip der kleinsten Wirkung

Skripten sind online

[https://tp1.physik.uni-siegen.de/
mittwochsakademie/](https://tp1.physik.uni-siegen.de/mittwochsakademie/)

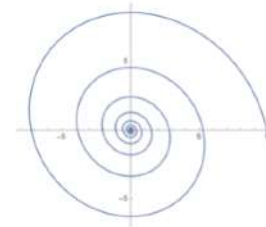


Ankündigung für das Wintersemester 2024/25

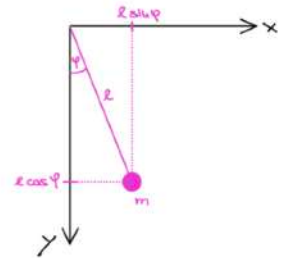
Das theoretische Minimum I

Mechanik - von Newton über Emmy Noether zu Heisenberg

Prof. Dr. Alexander Lenz, 4PHY00011V



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



Diese Vorlesungsreihe gibt eine Einführung in die Grundprinzipien 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 Symmetrieprinzipien 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.

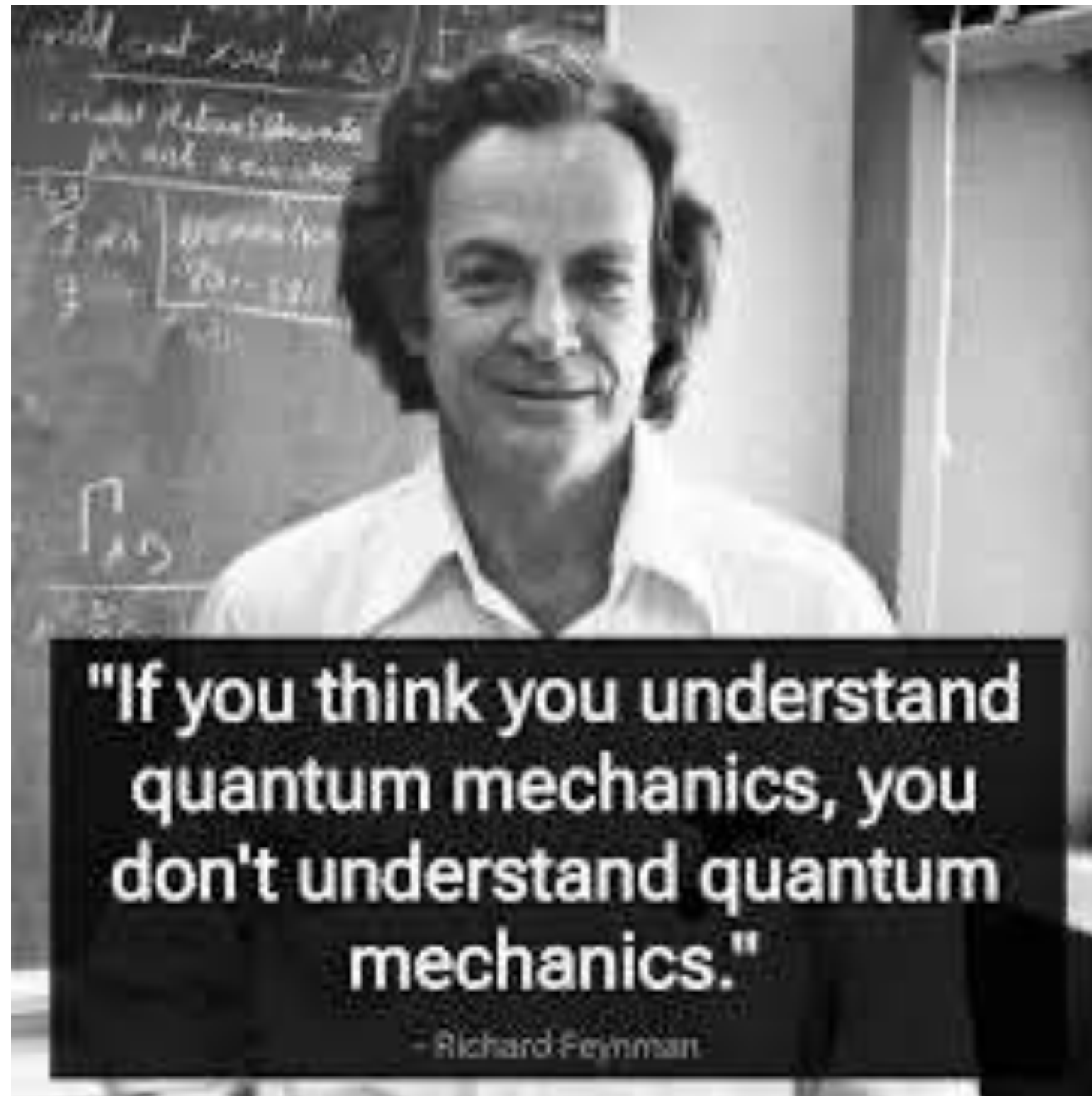
Mittwochs 16-18

Emmy Noether Campus ENC-D-114

Infos unter: alexander.lenz@uni-siegen.de

<https://tp1.physik.uni-siegen.de/mittwochsakademie/>

100 a Quantentheorie



"If you think you understand quantum mechanics, you don't understand quantum mechanics."

- Richard Feynman



Schrödinger's Katze am Emmy Noether Campus: sie lebt!

Ziel im SS 25:

Erkläre die Prinzipien der Quantenmechanik

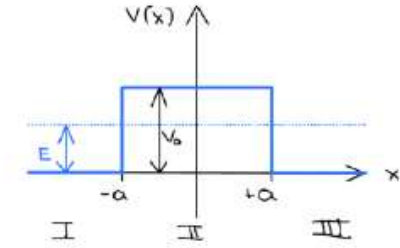
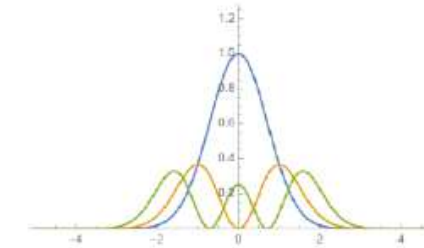
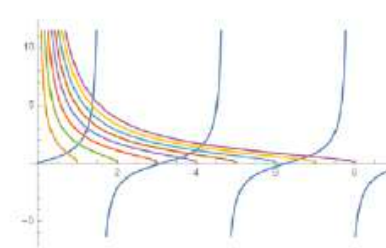
Skripten werden online
gestellt

[https://tp1.physik.uni-siegen.de/
mittwochsakademie/](https://tp1.physik.uni-siegen.de/mittwochsakademie/)

Ankündigung für das Sommersemester 2025

Das theoretische Minimum II

Quantenmechanik - Prof. Dr. Alexander Lenz, 4PHY00011V



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

2025 wird weltweit das 100 jährige Jubiläum der Entdeckung der Quantenmechanik gefeiert. Ursprünglich war dies über viele Jahrzehnte lang reinste Grundlagenforschung ohne jegliche Hinweise auf potentielle Anwendungen. 100 Jahre später finden wir, dass ein Großteil der technologischen Errungenschaften der Menschheit im letzten Jahrhundert auf der Quantenmechanik basiert - zuletzt gipfelte dies in den ersten Quantencomputern.

Im Sommersemester 2025 beschäftigen wir uns daher mit einer Einführung in die Grundprinzipien der Quantenmechanik:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{x}, t) = \left[\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(\vec{x}) \right] \Psi(\vec{x}, t)$$

Die Vorlesung richtet sich an Mittwochsakademiker, Oberstufenschülerinnen und -schüler, Lehrkräfte und 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.



11 Termine im Sommersemester 25:
7.5., 14.5., 21.5., 28.5., 4.6., 11.6., 18.6., 25.6., 2.7., 9.7., 16.7.
Mittwochs 16-18
Emmy Noether Campus ENC-D-114
Infos unter: alexander.lenz@uni-siegen.de
<https://tp1.physik.uni-siegen.de/mittwochsakademie/>



100 a Quantentheorie

Die moderne Quantenmechanik fand ihren Beginn im Jahr 1925 mit der Formulierung der [Matrizenmechanik](#) durch [Werner Heisenberg](#), [Max Born](#) und [Pascual Jordan](#).^{[3][4][5]} Schon vor der Fertigstellung der ersten Veröffentlichung prägte Heisenberg in einem Brief an [Wolfgang Pauli](#) den Begriff *Quantenmechanik*, um deutlich zu machen, dass die *klassische Mechanik* durch etwas grundlegend Neues abgelöst werden müsse.^{[6][7]}

100 a Quantentheorie

Die moderne Quantenmechanik fand ihren Beginn im Jahr 1925 mit der Formulierung der **Matrizenmechanik** durch **Werner Heisenberg**, **Max Born** und **Pascual Jordan**.^{[3][4][5]} Schon vor der Fertigstellung der ersten Veröffentlichung prägte Heisenberg in einem Brief an **Wolfgang Pauli** den Begriff *Quantenmechanik*, um deutlich zu machen, dass die *klassische Mechanik* durch etwas grundlegend Neues abgelöst werden müsse.^{[6][7]}



Heisenberg

PLC 0017, 017 v
NACHLASS
PROF. W. PAULI
I
Göttingen 21. 6. 1925
Lieber Pauli!
Noch einmal vielen Dank für Ihre freundliche Aufnahme u.
Bewirtung in Göttingen! Mit Ihrem Brief bin ich, was Teil
betrifft, völlig einverstanden, es ist sehr schön, dass Sie sich
das Problem so ordentlich durchgedacht haben, u. ich weiß sehr wohl,
dass empirisch alles stimmen wird. Nur wunderlich ist mir
denken, dass Sie sich über das „Versagen der Mechanik“ wundern.
Wenn etwas, wie die Mechanik, galte, wird ~~man~~ man nie verstehen
können, dass es abnorme gibt; es gibt eben eine andere, eine
„Quantenmechanik“ und man muss sich nur darüber wundern,
dass das Wasserstoffatom zufällig ~~so~~ konstant die Energie-
konstante mit etwas kleinerem Wert besitzt, als bei anderen Atomen.

100 a Quantentheorie

Die moderne Quantenmechanik fand ihren Beginn im Jahr 1925 mit der Formulierung der **Matrizenmechanik** durch **Werner Heisenberg**, **Max Born** und **Pascual Jordan**.^{[3][4][5]} Schon vor der Fertigstellung der ersten Veröffentlichung prägte Heisenberg in einem Brief an **Wolfgang Pauli** den Begriff *Quantenmechanik*, um deutlich zu machen, dass die *klassische Mechanik* durch etwas grundlegend Neues abgelöst werden müsse.^{[6][7]}

Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.

Von **W. Heisenberg** in Göttingen.

(Eingegangen am 29. Juli 1925.)

In der Arbeit soll versucht werden, Grundlagen zu gewinnen für eine quantentheoretische Mechanik, die ausschließlich auf Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen basiert ist.



Heisenberg

PLC 0017, 017 v
NACHLASS
PROF. W. PAULI
I
Göttingen 21. 6. 1925
Lieber Pauli!
Noch einmal vielen Dank für Ihre freundliche Aufnahme u.
Bewirtung in Göttingen! Mit Ihrem Brief bin ich, was Teil
betrifft, völlig einverstanden, es ist sehr schön, dass Sie sich
das Problem so ordentlich durchgedacht haben, u. ich weiß sehr wohl,
dass empirisch alles stimmen wird. Nur wunderlich ist mir
denken, dass Sie sich über das „Versagen der Mechanik“ wundern.
Wenn etwas, wie die Mechanik, galte, wird dann nicht wie verstanden,
können, dass es abnorme gibt; es gibt eben eine andere, eine
„Quantenmechanik“ und man muss sich nur darüber wundern,
dass das Wasserstoffatom zufällig ~~best~~ konstante der Energie
konstante mit etwas klassischem Interferenzverhältnis.
Ich bin ich Ihnen ganz dankbar.

100 a Quantentheorie

Die moderne Quantenmechanik fand ihren Beginn im Jahr 1925 mit der Formulierung der **Matrizenmechanik** durch **Werner Heisenberg**, **Max Born** und **Pascual Jordan**.^{[3][4][5]} Schon vor der Fertigstellung der ersten Veröffentlichung prägte Heisenberg in einem Brief an **Wolfgang Pauli** den Begriff *Quantenmechanik*, um deutlich zu machen, dass die *klassische Mechanik* durch etwas grundlegend Neues abgelöst werden müsse.^{[6][7]}

Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.

Von **W. Heisenberg** in Göttingen.

(Eingegangen am 29. Juli 1925.)

In der Arbeit soll versucht werden, Grundlagen zu gewinnen für eine quantentheoretische Mechanik, die ausschließlich auf Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen basiert ist.



Heisenberg

Zur Quantenmechanik.

Von **M. Born** und **P. Jordan** in Göttingen.

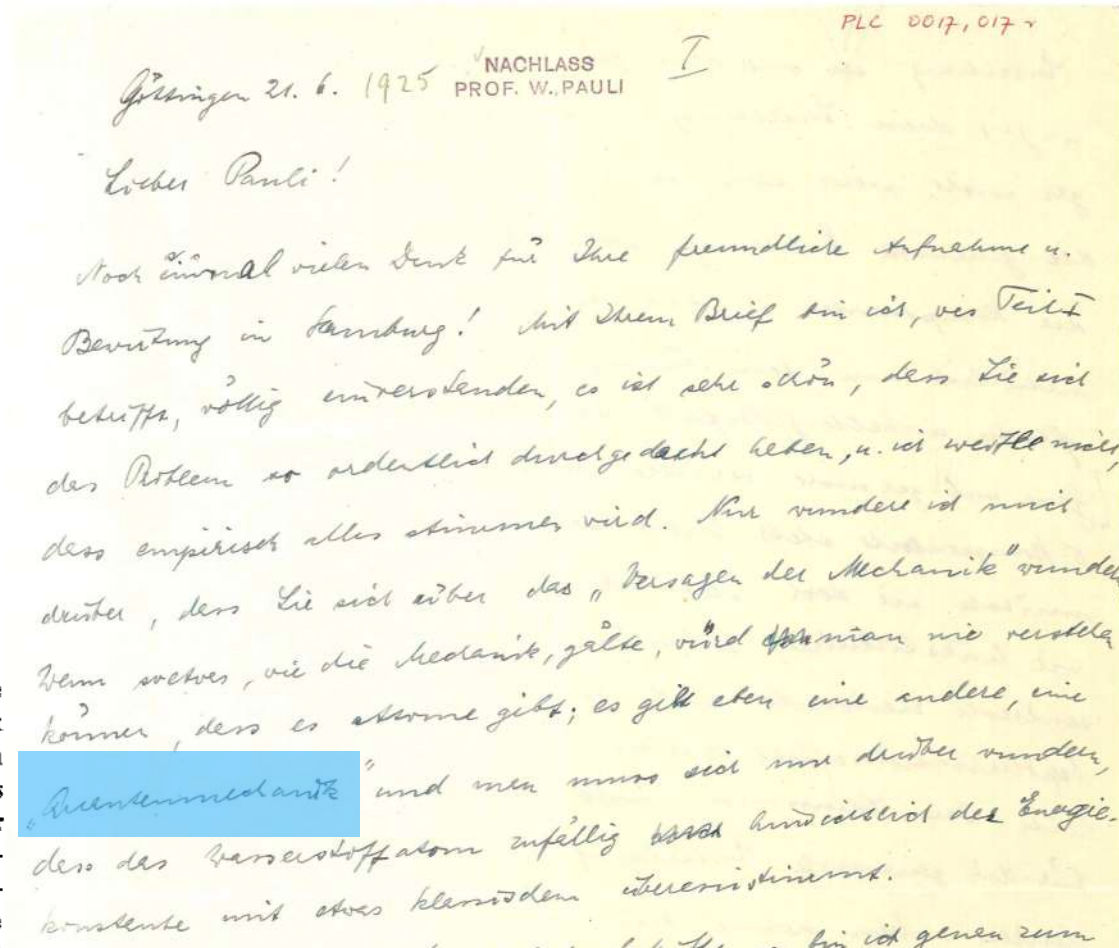
(Eingegangen am 27. September 1925.)

Die kürzlich von Heisenberg gegebenen Ansätze werden (zunächst für Systeme von einem Freiheitsgrad) zu einer systematischen Theorie der Quantenmechanik entwickelt. Das mathematische Hilfsmittel ist die Matrizenrechnung. Nachdem diese kurz dargestellt ist, werden die mechanischen Bewegungsgleichungen aus einem Variationsprinzip abgeleitet und der Beweis geführt, daß auf Grund der Heisenbergschen Quantenbedingung der Energiesatz und die Bohrsche Frequenzbedingung aus den mechanischen Gleichungen folgen. Am Beispiel des anharmonischen Oszillators wird die Frage der Eindeutigkeit der Lösung und die Bedeutung der Phasen in den Partialschwingungen erörtert. Den Schluß bildet ein Versuch, die Gesetze des elektromagnetischen Feldes der neuen Theorie einzufügen.



Max Born

Jordan



100 a Quantentheorie

Die moderne Quantenmechanik fand ihren Beginn im Jahr 1925 mit der Formulierung der **Matrizenmechanik** durch **Werner Heisenberg**, **Max Born** und **Pascual Jordan**.^{[3][4][5]} Schon vor der Fertigstellung der ersten Veröffentlichung prägte Heisenberg in einem Brief an **Wolfgang Pauli** den Begriff *Quantenmechanik*, um deutlich zu machen, dass die *klassische Mechanik* durch etwas grundlegend Neues abgelöst werden müsse.^{[6][7]}

Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.

Von **W. Heisenberg** in Göttingen.

(Eingegangen am 29. Juli 1925.)

In der Arbeit soll versucht werden, Grundlagen zu gewinnen für eine quantentheoretische Mechanik, die ausschließlich auf Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen basiert ist.



Heisenberg

Zur Quantenmechanik.

Von **M. Born** und **P. Jordan** in Göttingen.

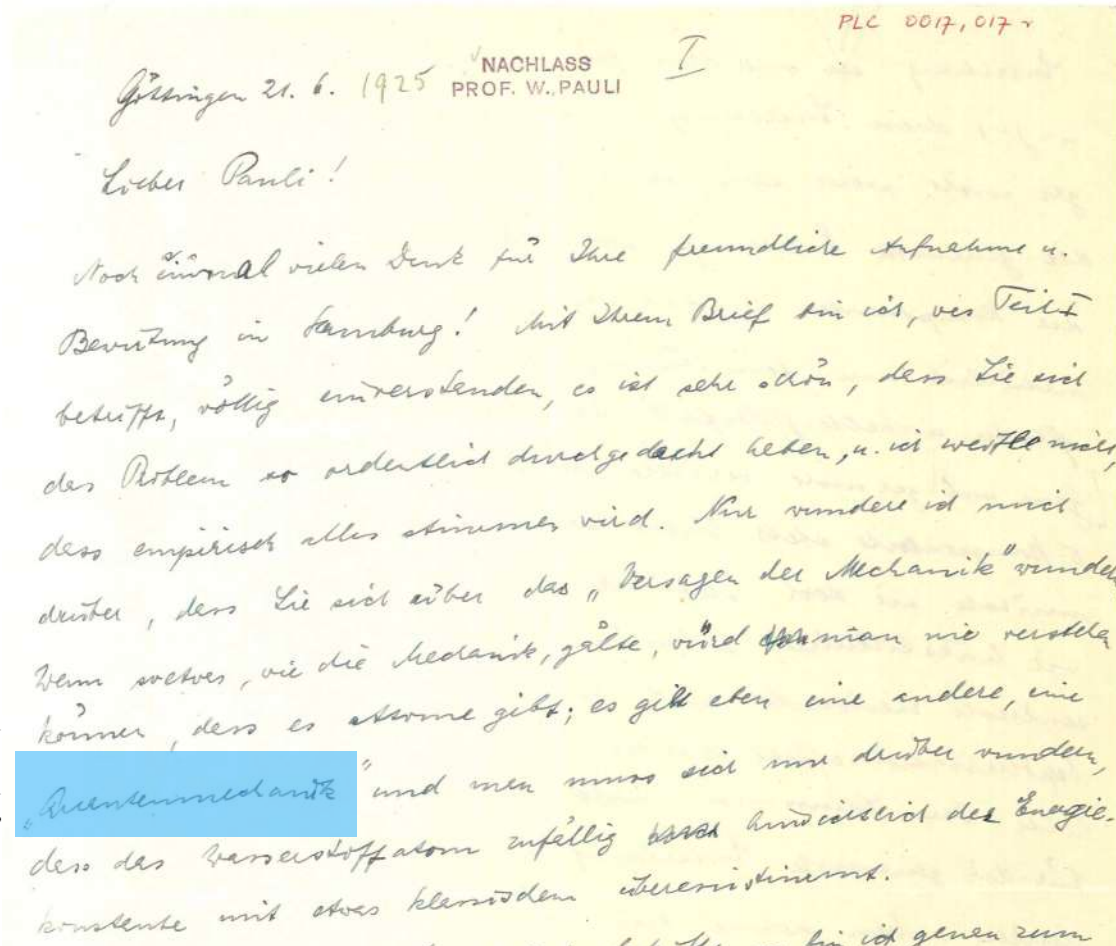
(Eingegangen am 27. September 1925.)

Die kürzlich von Heisenberg gegebenen Ansätze werden (zunächst für Systeme von einem Freiheitsgrad) zu einer systematischen Theorie der Quantenmechanik entwickelt. Das mathematische Hilfsmittel ist die Matrizenrechnung. Nachdem diese kurz dargestellt ist, werden die mechanischen Bewegungsgleichungen aus einem Variationsprinzip abgeleitet und der Beweis geführt, daß auf Grund der Heisenbergschen Quantenbedingung der Energiesatz und die Bohrsche Frequenzbedingung aus den mechanischen Gleichungen folgen. Am Beispiel des anharmonischen Oszillators wird die Frage der Eindeutigkeit der Lösung und die Bedeutung der Phasen in den Partialschwingungen erörtert. Den Schluß bildet ein Versuch, die Gesetze des elektromagnetischen Feldes der neuen Theorie einzufügen.



Max Born

Jordan



Zur Quantenmechanik. II.

Von **M. Born**, **W. Heisenberg** und **P. Jordan** in Göttingen.

(Eingegangen am 16. November 1925.)

Die aus Heisenbergs Ansätzen in Teil I dieser Arbeit entwickelte Quantenmechanik wird auf Systeme von beliebig vielen Freiheitsgraden ausgedehnt. Die Störungstheorie wird für nicht entartete und eine große Klasse entarteter Systeme durchgeführt und ihr Zusammenhang mit der Eigenwerttheorie Hermitescher Formen nachgewiesen. Die gewonnenen Resultate werden zur Ableitung der Sätze über Impuls und Drehimpuls und zur Ableitung von Auswahlregeln und Intensitätsformeln benutzt. Schließlich werden die Ansätze der Theorie auf die Statistik der Eigenschwingungen eines Hohlraumes angewendet.

100 a Quantentheorie

Pauli
1925 Spin
1926 H-Atom



100 a Quantentheorie



Schrödinger-Gleichung, Anfang 1926

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \right] \psi$$

**Schrödinger konnte 1926 zeigen,
dass dies äquivalent zu Heisenbergs
Matrizenmechanik ist**



**Pauli
1925 Spin
1926 H-Atom**

100 a Quantentheorie



Schrödinger-Gleichung, Anfang 1926

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \right] \psi$$

Schrödinger konnte 1926 zeigen,
dass dies äquivalent zu Heisenbergs
Matrizenmechanik ist



Dirac, 1928

QM + spezielle Relativitätstheorie
=> es gibt Antimaterie



Pauli
1925 Spin
1926 H-Atom

100 a Quantentheorie

Neumann, 1932
*Mathematische Grundlagen
der Quantenmechanik*



Schrödinger-Gleichung, Anfang 1926

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \right] \psi$$

Schrödinger konnte 1926 zeigen,
dass dies äquivalent zu Heisenbergs
Matrizenmechanik ist



Dirac, 1928
QM + spezielle Relativitätstheorie
=> es gibt Antimaterie



Pauli
1925 Spin
1926 H-Atom

100 a Quantentheorie

Seit 1900 viele verschiedene, irritierende, experimentelle Ergebnisse

Klassisch: Licht = Welle, Materie = Teilchen

100 a Quantentheorie

Seit 1900 viele verschiedene, irritierende, experimentelle Ergebnisse

Klassisch: Licht = Welle, Materie = Teilchen

Neu: Licht verhält sich wie Teilchen,
z.B. Hohlraumstrahlung, Photoeffekt, Comptoneffekt

100 a Quantentheorie

Seit 1900 viele verschiedene, irritierende, experimentelle Ergebnisse

Klassisch: Licht = Welle, Materie = Teilchen

Neu: Licht verhält sich wie Teilchen,
z.B. Hohlraumstrahlung, Photoeffekt, Comptoneffekt

Neu: Materie verhält sich wie Wellen,
z.B. Doppelspaltversuch

100 a Quantentheorie

Seit 1900 viele verschiedene, irritierende, experimentelle Ergebnisse

Klassisch: Licht = Welle, Materie = Teilchen

Neu: Licht verhält sich wie Teilchen,
z.B. Hohlraumstrahlung, Photoeffekt, Comptoneffekt

Neu: Materie verhält sich wie Wellen,
z.B. Doppelspaltversuch

Neu: kontinuierliche Größen wie Energie, sind nicht kontinuierlich,
sondern diskret, z.B. H-Atom, Stern-Gerlach Versuch

100 a Quantentheorie

Seit 1900 viele verschiedene, irritierende, experimentelle Ergebnisse

Klassisch: Licht = Welle, Materie = Teilchen

Neu: Licht verhält sich wie Teilchen,
z.B. Hohlraumstrahlung, Photoeffekt, Comptoneffekt

Neu: Materie verhält sich wie Wellen,
z.B. Doppelspaltversuch

Neu: kontinuierliche Größen wie Energie, sind nicht kontinuierlich,
sondern diskret, z.B. H-Atom, Stern-Gerlach Versuch

Welle-Teilchen Dualismus

100 a Quantentheorie

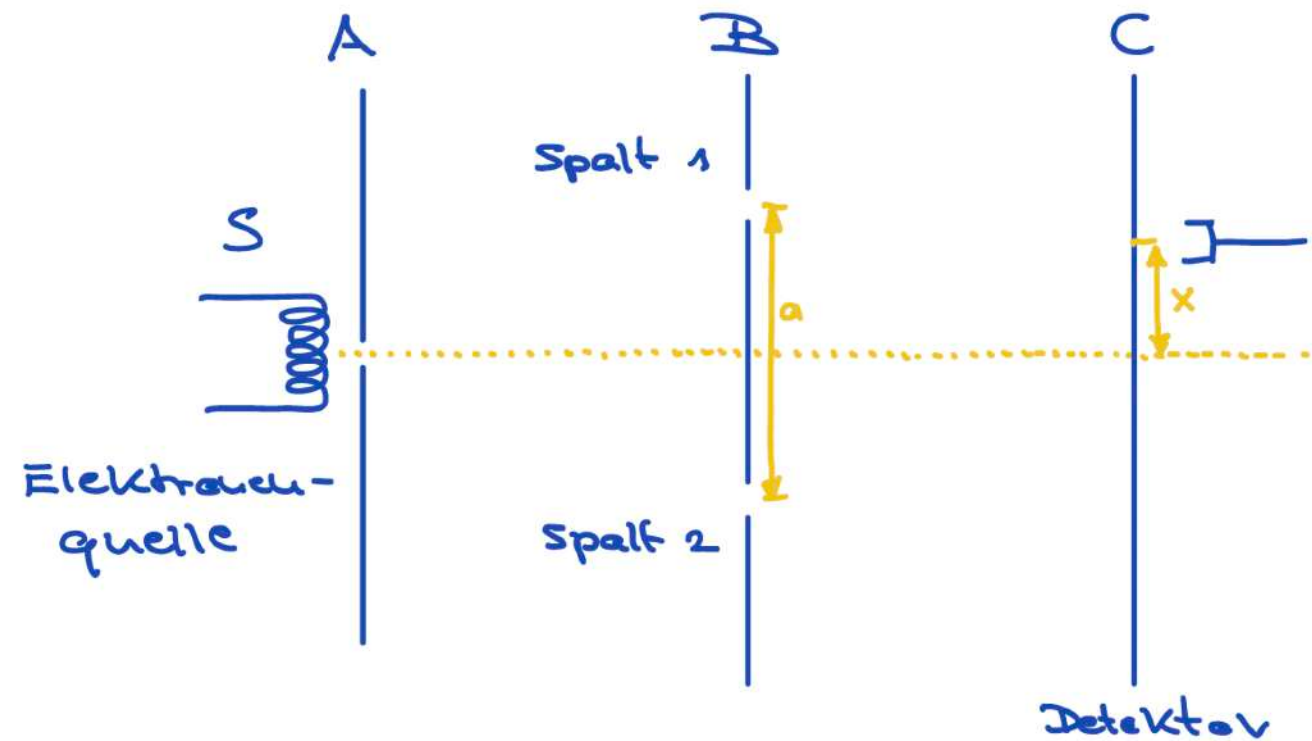
Exp.: Hohlraumstrahlung, Photoeffekt, Comptoneffekt, Stern-Gerlach Versuch



**Pdf Datei kann bei Springer
kostenlos runtergeladen werden**

100 a Quantentheorie

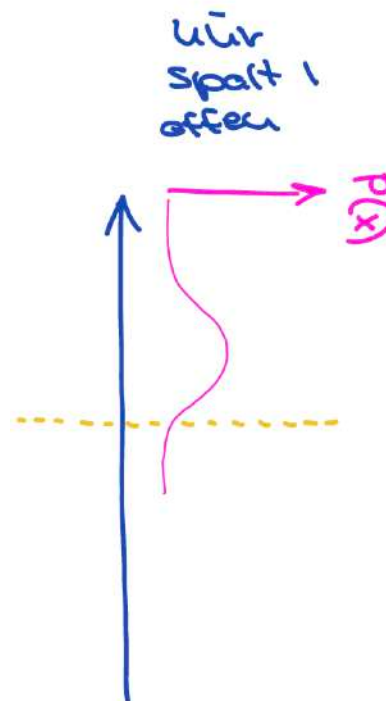
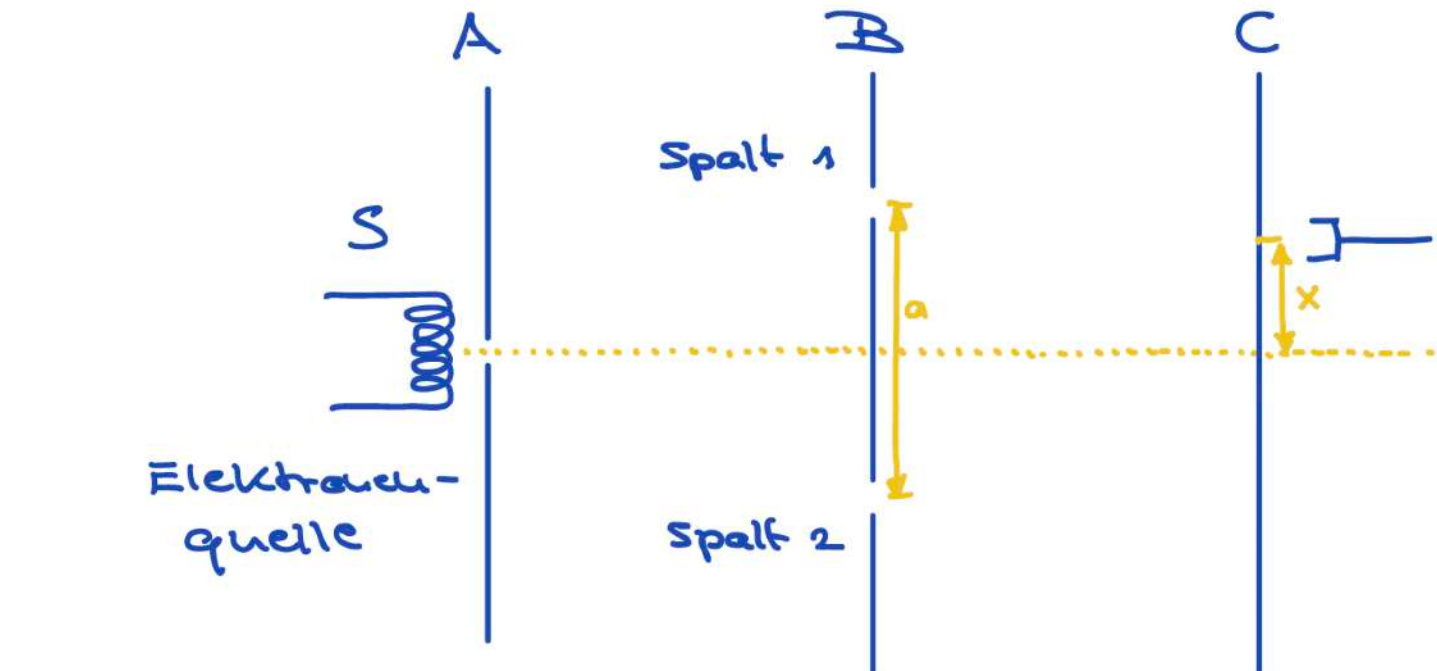
Exp.: Hohlraumstrahlung, Photoeffekt, Comptoneffekt, Stern-Gerlach Versuch



**Pdf Datei kann bei Springer
kostenlos runtergeladen werden**

100 a Quantentheorie

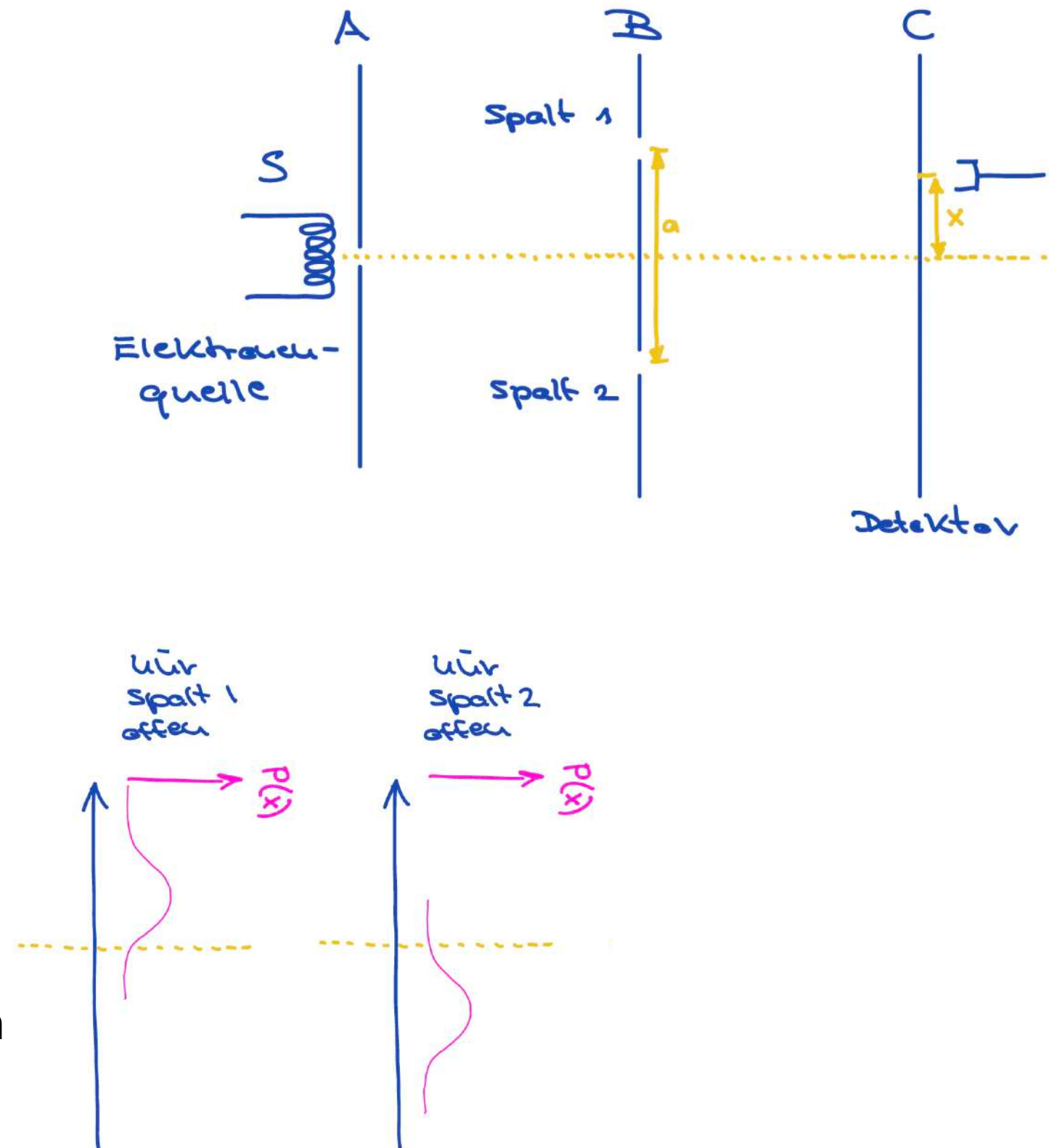
Exp.: Hohlraumstrahlung, Photoeffekt, Comptoneffekt, Stern-Gerlach Versuch



**Pdf Datei kann bei Springer
kostenlos runtergeladen werden**

100 a Quantentheorie

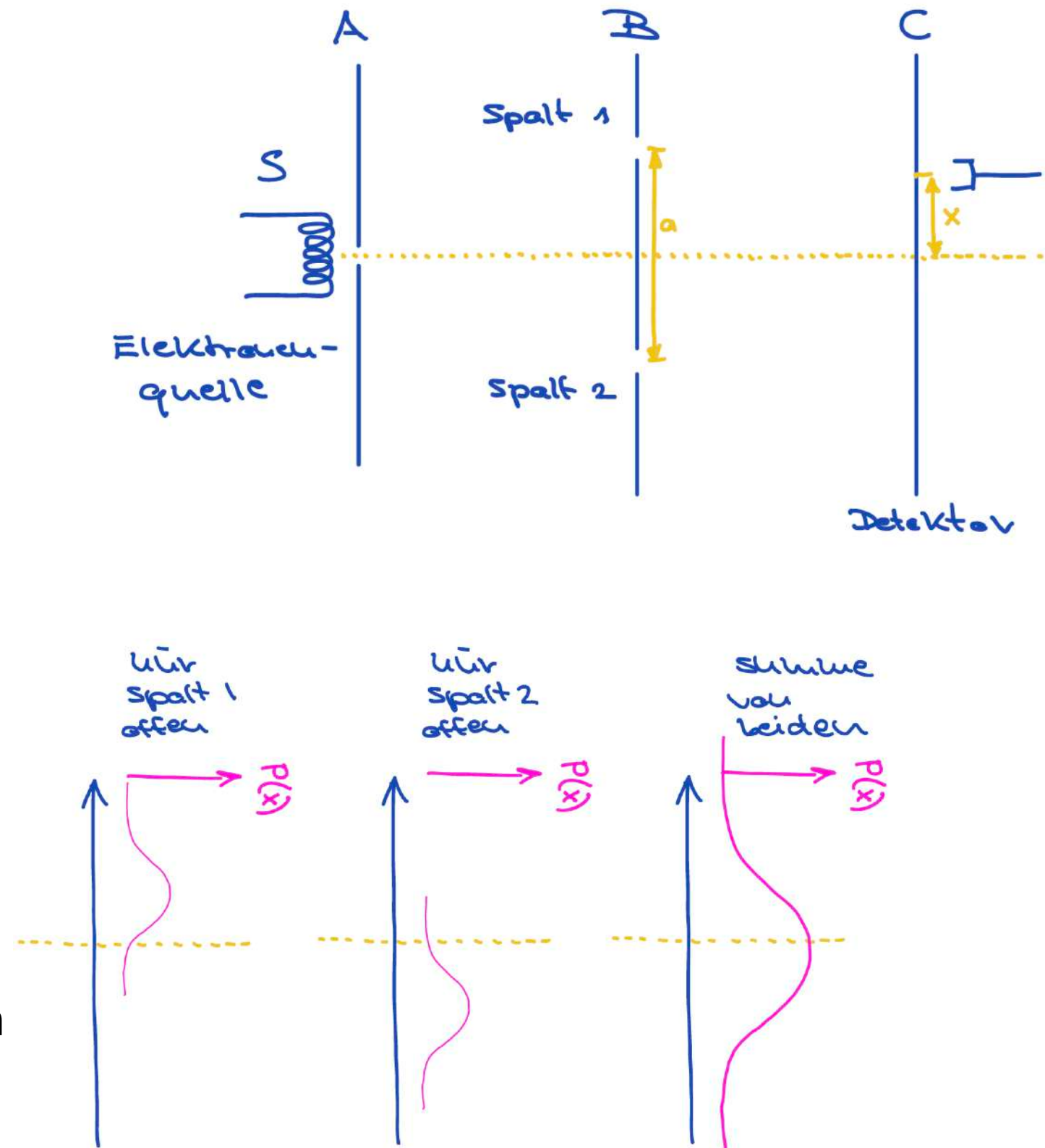
Exp.: Hohlraumstrahlung, Photoeffekt, Comptoneffekt, Stern-Gerlach Versuch



**Pdf Datei kann bei Springer
kostenlos runtergeladen werden**

100 a Quantentheorie

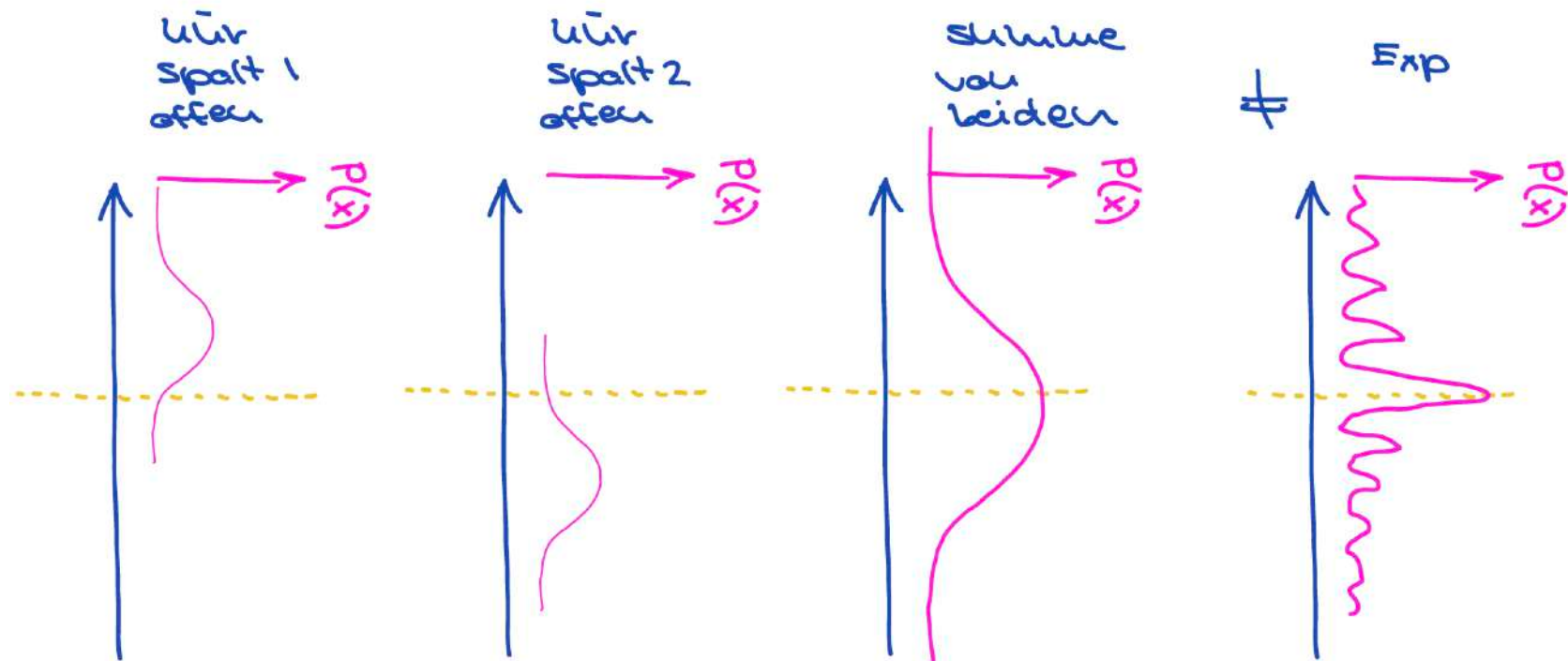
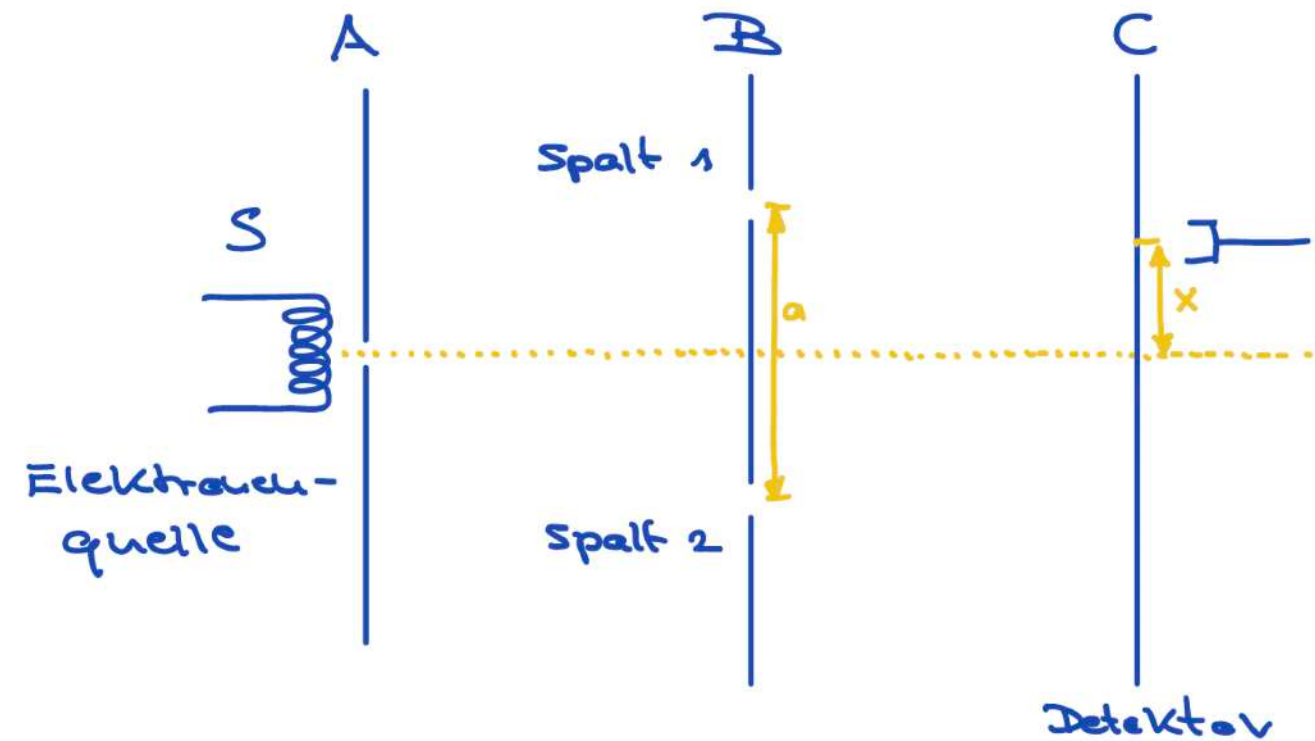
Exp.: Hohlraumstrahlung, Photoeffekt, Comptoneffekt, Stern-Gerlach Versuch



**Pdf Datei kann bei Springer
kostenlos runtergeladen werden**

100 a Quantentheorie

Exp.: Hohlraumstrahlung, Photoeffekt, Comptoneffekt, Stern-Gerlach Versuch



**Pdf Datei kann bei Springer
kostenlos runtergeladen werden**

100 a Quantentheorie

**Zu Beginn (i.e. 1925+x, $x \geq 0$) waren diese Forschungen
reinste Erkenntnisgewinnung,
ohne irgendeinen Bezug zu Anwendung**

100 a Quantentheorie

Zu Beginn (i.e. $1925+x$, $x \geq 0$) waren diese Forschungen
reinste Erkenntnisgewinnung,
ohne irgendeinen Bezug zu Anwendung

Experimente konnte mit Hilfe von
sehr abstrakter Mathematik beschrieben werden
(unendlich dimensional Vektorräume)

100 a Quantentheorie

Zu Beginn (i.e. $1925+x$, $x \geq 0$) waren diese Forschungen
reinste Erkenntnisgewinnung,
ohne irgendeinen Bezug zu Anwendung

Experimente konnte mit Hilfe von
sehr abstrakter Mathematik beschrieben werden
(unendlich dimensional Vektorräume)

Article PDF

Kapitel I. Matrizenrechnung.

§ 1. Elementare Operationen. Funktionen. Wir rechnen mit quadratischen unendlichen Matrizen¹⁾, die wir hier mit fetten Buchstaben bezeichnen wollen, während schwache Buchstaben stets gewöhnliche Zahlen bedeuten sollen:

$$\mathbf{a} = (a(nm)) = \begin{pmatrix} a(00) & a(01) & a(02) & \dots \\ a(10) & a(11) & a(12) & \dots \\ a(20) & a(21) & a(22) & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

Gleichheit zweier Matrizen bedeutet Gleichheit entsprechender Komponenten:

$$\mathbf{a} = \mathbf{b} \text{ heißt } a(nm) = b(nm). \quad (1)$$

Addition wird definiert durch Addition entsprechender Komponenten

$$\mathbf{a} = \mathbf{b} + \mathbf{c} \text{ heißt } a(nm) = b(nm) + c(nm). \quad (2)$$

Die Multiplikation wird definiert durch die aus der Determinantentheorie bekannte Regel „Zeilen mal Kolonnen“:

$$\mathbf{a} = \mathbf{b} \mathbf{c} \text{ heißt } a(nm) = \sum_{k=0}^{\infty} b(nk) c(km). \quad (3)$$

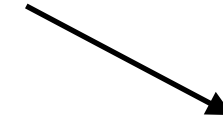
Potenzen sind durch wiederholte Multiplikation zu definieren. Es gilt das assoziative Gesetz für die Multiplikation und das distributive für die Verbindung von Addition und Multiplikation:

$$(\mathbf{a} \mathbf{b}) \mathbf{c} = \mathbf{a} (\mathbf{b} \mathbf{c}): \quad (4)$$
$$\mathbf{a} (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = \mathbf{a} \mathbf{b} + \mathbf{a} \mathbf{c}. \quad (5)$$

Dagegen gilt nicht das kommutative Gesetz für die Multiplikation: Die Gleichung $\mathbf{a} \mathbf{b} = \mathbf{b} \mathbf{a}$ ist nicht allgemein richtig. Wenn sie gilt,

100 a Quantentheorie

Zu Beginn (i.e. 1925+x, $x \geq 0$) waren diese Forschungen
reinste Erkenntnisgewinnung,
ohne irgendeinen Bezug zu Anwendung



Experimente konnte mit Hilfe von
sehr abstrakter Mathematik beschrieben werden
(unendlich dimensional Vektorräume)

Warum sind
Atomspektren
diskret?

Article PDF

Kapitel I. Matrizenrechnung.

§ 1. Elementare Operationen. Funktionen. Wir rechnen mit quadratischen unendlichen Matrizen¹⁾, die wir hier mit fetten Buchstaben bezeichnen wollen, während schwache Buchstaben stets gewöhnliche Zahlen bedeuten sollen:

$$\mathbf{a} = (a(nm)) = \begin{pmatrix} a(00) & a(01) & a(02) & \dots \\ a(10) & a(11) & a(12) & \dots \\ a(20) & a(21) & a(22) & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

Gleichheit zweier Matrizen bedeutet Gleichheit entsprechender Komponenten:

$$\mathbf{a} = \mathbf{b} \text{ heißt } a(nm) = b(nm). \quad (1)$$

Addition wird definiert durch Addition entsprechender Komponenten

$$\mathbf{a} = \mathbf{b} + \mathbf{c} \text{ heißt } a(nm) = b(nm) + c(nm). \quad (2)$$

Die Multiplikation wird definiert durch die aus der Determinantentheorie bekannte Regel „Zeilen mal Kolonnen“:

$$\mathbf{a} = \mathbf{b} \mathbf{c} \text{ heißt } a(nm) = \sum_{k=0}^{\infty} b(nk) c(km). \quad (3)$$

Potenzen sind durch wiederholte Multiplikation zu definieren. Es gilt das assoziative Gesetz für die Multiplikation und das distributive für die Verbindung von Addition und Multiplikation:

$$(\mathbf{a} \mathbf{b}) \mathbf{c} = \mathbf{a} (\mathbf{b} \mathbf{c}): \quad (4)$$

$$\mathbf{a} (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = \mathbf{a} \mathbf{b} + \mathbf{a} \mathbf{c}. \quad (5)$$

Dagegen gilt nicht das kommutative Gesetz für die Multiplikation: Die Gleichung $\mathbf{a} \mathbf{b} = \mathbf{b} \mathbf{a}$ ist nicht allgemein richtig. Wenn sie gilt,

100 a Quantentheorie

Zu Beginn (i.e. $1925+x$, $x \geq 0$) waren diese Forschungen
reinste Erkenntnisgewinnung,
ohne irgendeinen Bezug zu Anwendung

Experimente konnte mit Hilfe von
sehr abstrakter Mathematik beschrieben werden
(unendlich dimensional Vektorräume)

Article PDF

Kapitel I. Matrizenrechnung.

§ 1. Elementare Operationen. Funktionen. Wir rechnen mit quadratischen unendlichen Matrizen¹⁾, die wir hier mit fetten Buchstaben bezeichnen wollen, während schwache Buchstaben stets gewöhnliche Zahlen bedeuten sollen:

$$\mathbf{a} = (a(nm)) = \begin{pmatrix} a(00) & a(01) & a(02) & \dots \\ a(10) & a(11) & a(12) & \dots \\ a(20) & a(21) & a(22) & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

Gleichheit zweier Matrizen bedeutet Gleichheit entsprechender Komponenten:

$$\mathbf{a} = \mathbf{b} \text{ heißt } a(nm) = b(nm). \quad (1)$$

Addition wird definiert durch Addition entsprechender Komponenten

$$\mathbf{a} = \mathbf{b} + \mathbf{c} \text{ heißt } a(nm) = b(nm) + c(nm). \quad (2)$$

Die Multiplikation wird definiert durch die aus der Determinantentheorie bekannte Regel „Zeilen mal Kolonnen“:

$$\mathbf{a} = \mathbf{b} \mathbf{c} \text{ heißt } a(nm) = \sum_{k=0}^{\infty} b(nk) c(km). \quad (3)$$

Potenzen sind durch wiederholte Multiplikation zu definieren. Es gilt das assoziative Gesetz für die Multiplikation und das distributive für die Verbindung von Addition und Multiplikation:

$$(\mathbf{a} \mathbf{b}) \mathbf{c} = \mathbf{a} (\mathbf{b} \mathbf{c}): \quad (4)$$

$$\mathbf{a} (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = \mathbf{a} \mathbf{b} + \mathbf{a} \mathbf{c}. \quad (5)$$

Dagegen gilt nicht das kommutative Gesetz für die Multiplikation: Die Gleichung $\mathbf{a} \mathbf{b} = \mathbf{b} \mathbf{a}$ ist nicht allgemein richtig. Wenn sie gilt,

Teilaspekte davon
werden wir in
diesem Semester
lernen

100 a Quantentheorie

2025

EL PAÍS

Science

QUANTUM MECHANICS >

Research inches toward quantum supremacy with results unattainable by classical computing

The experiment attained precise measurements using a processor of only 127 qubits and an error mitigation strategy



START-UP

Ionen in der Falle

VON STEPHAN FINSTERBUSCH - AKTUALISIERT AM 30.11.2023 - 19:54

Zurück zum Artikel



1/4



Der Professor und sein Werk: Christof Wunderlich neben dem ersten Quantencomputer Deutschlands auf dem Emmy-Noether-Campus der Universität Siegen

Bild: AARON LEITHÄUSER



TECHWIRE
ASIA

Insights

Deutscher Quantencomputer

eleQtron erhält ersten »Quantum Effects Award«

12. Oktober 2023, 6:38 Uhr | Heinz Arnold



Matchmaker+

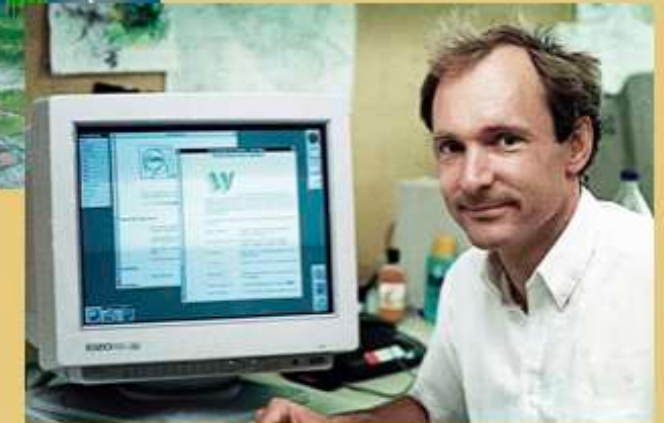
ANBIETER ZUM THEMA:

IBM makes significant breakthrough in quantum computing

100 a Quantentheorie

Grundlagenforschung: Spin-offs

- Quantenmechanik
 - ★ **Laser**
 - ★ **Computer**
 - ★ **Halbleiter**
 - ★ **Quantencomputer**
- Allgemeine Relativitätstheorie
 - ★ **GPS**
- Teilchenphysik
 - ★ **WWW**
 - ★ **Strahlentherapie**
- Ausbildung junger Menschen
 - ★ **Mechaniker im Formel 1-Team**
 - ★ **Die meisten unserer Doktoranden und post-docs gehen in die Wirtschaft**
- Beitrag zur Kultur, Internationalisierung, ...

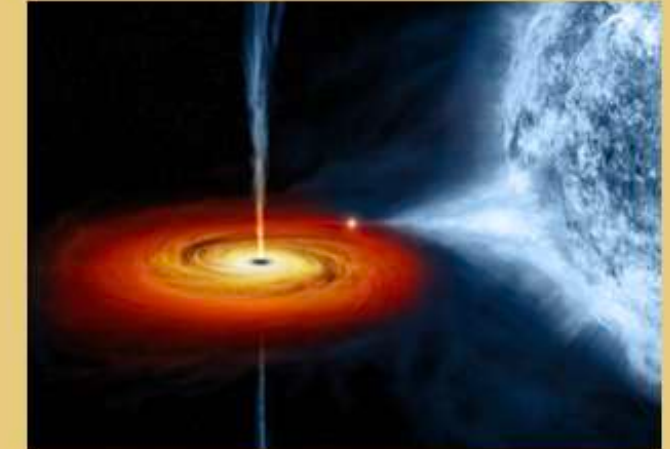


100 a Quantentheorie

Grundlagenforschung/angewandte Forschung

Grundlagenforschung:

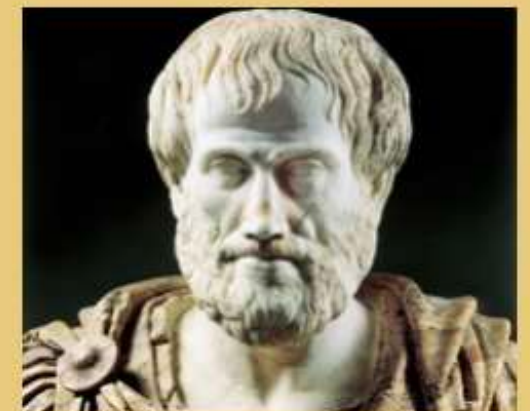
- Erweiterung des menschlichen Wissens
unerwartete Entdeckungen
- Wirtschaftliche Verwertbarkeit ist **nicht** das Hauptziel



Angewandte Forschung:

- Verbesserung von Technologien - erwartete/erhoffte Entdeckungen
- Wirtschaftliche Verwertbarkeit ist ein **vorrangiges** Ziel

Wie immer im Leben:
zu wenig und zu viel tut selten gut

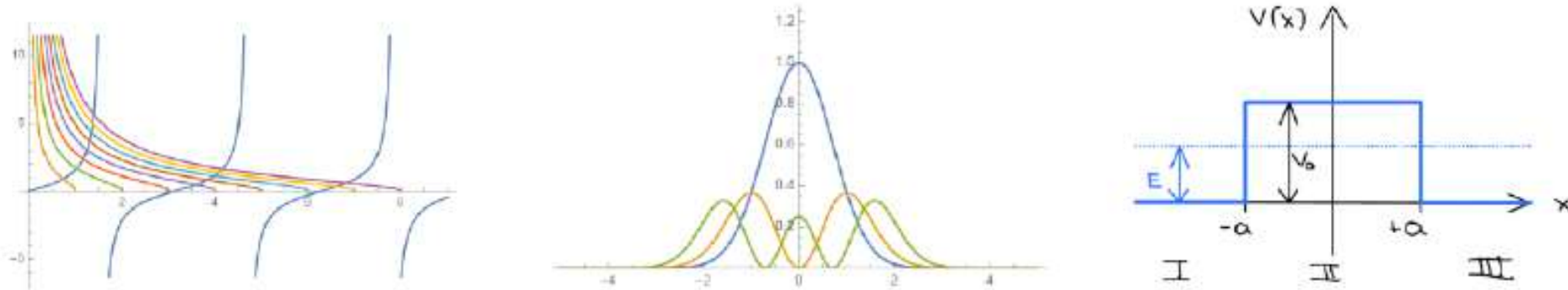


Gesundes Mittelmaß: hätten unsere Vorfahren ausschließlich in angewandte Forschung investiert, dann hätten wir heute die höchstentwickelten Fackeln, aber wir hätten nie die LED erfunden....

Ankündigung für das Sommersemester 2025

Das theoretische Minimum II

Quantenmechanik - Prof. Dr. Alexander Lenz, 4PHY00011V



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

2025 wird weltweit das 100 jährige Jubiläum der Entdeckung der Quantenmechanik gefeiert. Ursprünglich war dies über viele Jahrzehnte lang reinste Grundlagenforschung ohne jegliche Hinweise auf potentielle Anwendungen. 100 Jahre später finden wir, dass ein Großteil der technologischen Errungenschaften der Menschheit im letzten Jahrhundert auf der Quantenmechanik basiert - zuletzt gipfelte dies in den ersten Quantencomputern.

Im Sommersemester 2025 beschäftigen wir uns daher mit einer Einführung in die Grundprinzipien der Quantenmechanik:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{x}, t) = \left[\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(\vec{x}) \right] \Psi(\vec{x}, t)$$

Die Vorlesung richtet sich an Mittwochsakademiker, Oberstufenschülerinnen und -schüler, Lehrkräfte und 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.

Wdh. Mathematik: Ableitung

Betrachte eine kontinuierliche Funktion der Zeit $f(t)$

Zum Zeitpunkt t besitzt die Funktion den Wert $f(t)$

Einen kleinen Zeitpunkt später bezeichnet wir mit $t + \Delta t$

Der Funktionswert zu diesem kleinen Zeitpunkt später lautet $f(t + \Delta t)$

Die Funktion hat sich im Zeitraum von t nach $t + \Delta t$ um den Betrag

$$\Delta f = f(t + \Delta t) - f(t) \text{ geändert}$$

Die Rate dieser Änderung ist gegeben durch $\frac{\Delta f}{\Delta t}$ (sieht aus wie $\frac{0}{0}$!)

Definition: Die Ableitung der Funktion $f(t)$ lautet

$$\frac{df(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t}$$

Wdh. Mathematik: Ableitung

Beispiele:

1. $f(t) = t^2$ damit gilt $f(t + \Delta t) = (t + \Delta t)^2 = t^2 + 2t\Delta t + \Delta t^2$ und somit

$$\frac{df(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{t^2 + 2t\Delta t + \Delta t^2 - t^2}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{2t\Delta t + \Delta t^2}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (2t + \Delta t) = 2t$$

d.h. die Ableitung von t^2 ist $2t$

2. $f(t) = t^n$: beachte $(a + b)^n = a^n + na^{n-1}b + \frac{n(n-1)}{2}a^{n-2}b^2 + \dots + b^n$

und somit

$$\frac{df(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{t^n + nt^{n-1}\Delta t + \dots + \Delta t^n - t^n}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (nt^{n-1} + \dots \Delta t^{n-1}) = nt^{n-1}$$

d.h. die Ableitung von t^n ist nt^{n-1}

$$\frac{d(t^3)}{dt} = 3t^2, \frac{d(1)}{dt} = \frac{d(t^0)}{dt} = 0, \frac{d(t^5)}{dt} = 5t^4, \frac{d\left(\frac{1}{t}\right)}{dt} = \frac{d(t^{-1})}{dt} = -t^{-2} = -\frac{1}{t^2}$$

3. Spezielle Funktionen:

$$\frac{d(\sin t)}{dt} = \cos t, \frac{d(\cos t)}{dt} = -\sin t, \quad \frac{d(e^t)}{dt} = e^t, \frac{d(\log t)}{dt} = \frac{1}{t}$$

Wdh. Rechenregeln für Ableitungen

1. **Ableitung einer Konstanten c mal einer Funktion $f(t)$:**

$$\frac{d(c f(t))}{dt} = c \frac{df(t)}{dt}$$

2. **Ableitung der Summe von zwei Funktionen $f(t)$ und $g(t)$:**

$$\frac{d(f(t) + g(t))}{dt} = \frac{df(t)}{dt} + \frac{dg(t)}{dt}$$

3. **Ableitung des Produktes von zwei Funktionen $f(t)$ und $g(t)$:**

$$\frac{d(f(t)g(t))}{dt} = f(t) \frac{dg(t)}{dt} + g(t) \frac{df(t)}{dt}$$

4. **Kettenregel: $g = g(t)$ und $f = f(g)$**

$$\frac{df}{dt} = \frac{df(g)}{dg} \frac{dg(t)}{dt}$$

Beispiel: $f(t) = \log t^3$? **Ansatz:** $g(t) = t^3$ und $f(g) = \log g$

$$\Rightarrow \frac{df}{dt} = \frac{df(g)}{dg} \frac{dg(t)}{dt} = \frac{1}{g} 3t^2 = \frac{1}{t^3} 3t^2 = \frac{3}{t}$$

Wdh. Umkehrung des Ableitens: Integrieren

Beispiele für Integrale

1.
$$\int a dt = at + c$$

2.
$$\int t dt = \frac{t^2}{2} + c$$

3.
$$\int t^n dt = \frac{t^{n+1}}{n+1} + c$$

4.
$$\int \sin t dt = -\cos t + c$$

5.
$$\int \cos t dt = \sin t + c$$

6.
$$\int e^t dt = e^t + c$$

7.
$$\int \frac{dt}{t} = \ln t + c$$

8.
$$\int af(t) dt = a \int f(t) dt$$

9.
$$\int [f(t) \pm g(t)] dt = \int f(t) dt \pm \int g(t) dt$$

Wdh. Masterclass: Integrieren

Beispiel Partielle Integration

$$\int_a^b g(t) \frac{df(t)}{dt} = f(t)g(t) \Big|_a^b - \int_a^b f(t) \frac{dg(t)}{dt}$$

$$\int_0^{\pi/2} x \cos x \, dx = \int_0^{\pi/2} x \frac{d \sin x}{dx} \, dx = x \sin x \Big|_0^{\pi/2} - \int_0^{\pi/2} 1 \sin x \, dx = \frac{\pi}{2} + \cos x \Big|_0^{\pi/2} = \frac{\pi}{2} - 1$$

Partielle Integration funktioniert erstaunlich oft!

Wdh. Partielle Ableitung

Betrachte Funktionen von mehreren Variablen: $V(x, y)$ oder $V(x, y, z)$

$V(x, y)$: z.B. 3-dimensionale Landschaft: V entspricht der Höhe

**$V(x, y, z)$: schwer anschaulich vorstellbar, taucht aber oft in Mechanik auf,
z.B. Potential mit unterschiedlichen Werten an verschiedenen Raumpunkten**

Die Funktion $V(x, y, z)$ kann nach jeder der 3 Variablen abgeleitet werden:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta V_x}{\Delta x} \text{ mit } \Delta V_x = V(x + \Delta x, y, z) - V(x, y, z)$$

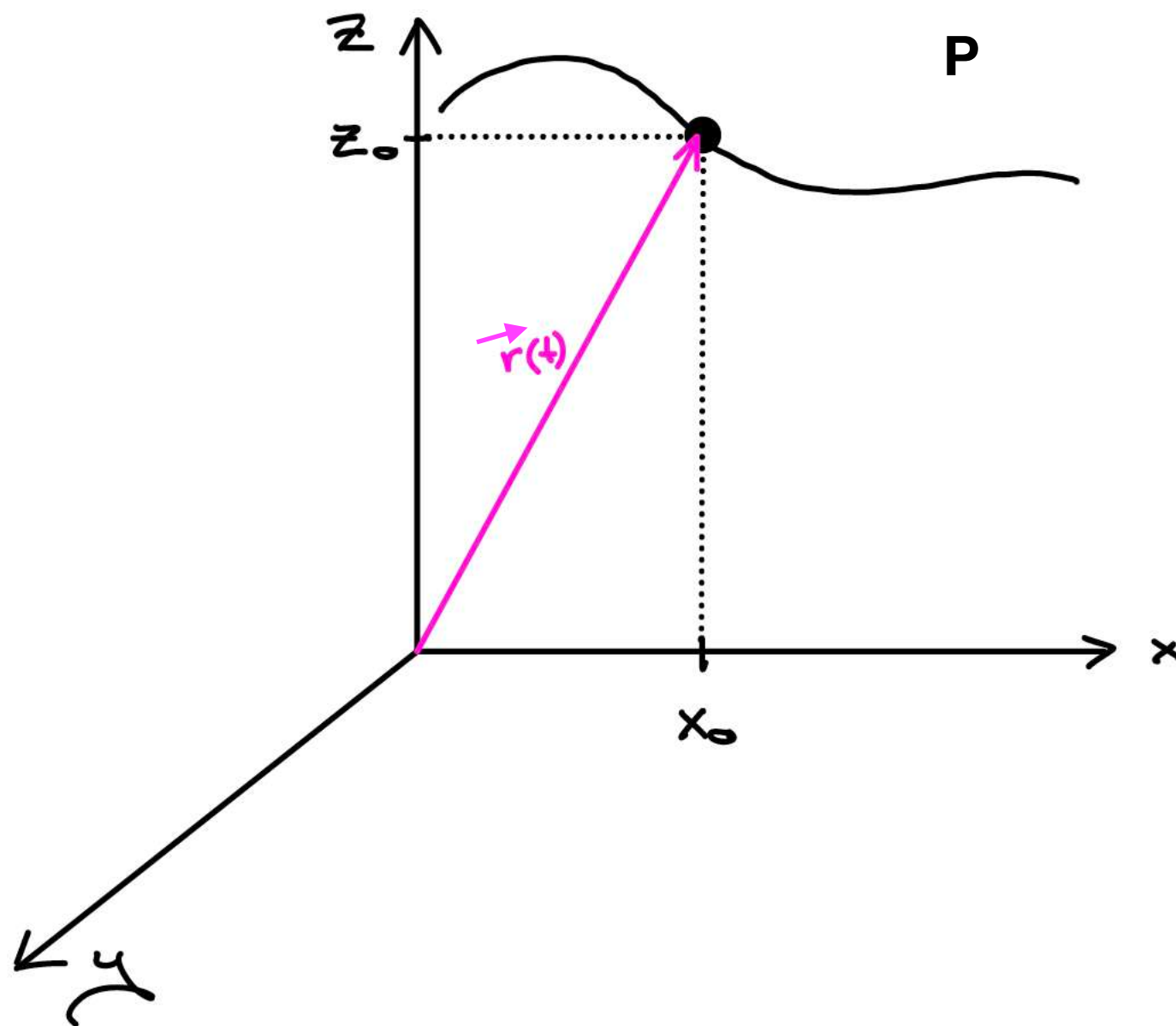
$$\frac{\partial V}{\partial y} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta V_y}{\Delta y} \text{ mit } \Delta V_y = V(x, y + \Delta y, z) - V(x, y, z)$$

$$\frac{\partial V}{\partial z} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta V_z}{\Delta z} \text{ mit } \Delta V_z = V(x, y, z + \Delta z) - V(x, y, z)$$

Wdh: Mathe: Koordinaten, Räume, Vektoren,...

Vektoren

Der Punkt P hat die Koordinaten $(x_0, 0, z_0)$ - die Linie vom Ursprung zum Punkt P nennt man auch den Vektor $\vec{r}$



Man schreibt $\vec{r} = (x, y, z)$.

Ein Vektor hat eine Länge

$$|\vec{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

und eine Richtung.

Vektoren kann man mit normalen Zahlen multiplizieren

$$a\vec{r} = (ax, ay, az).$$

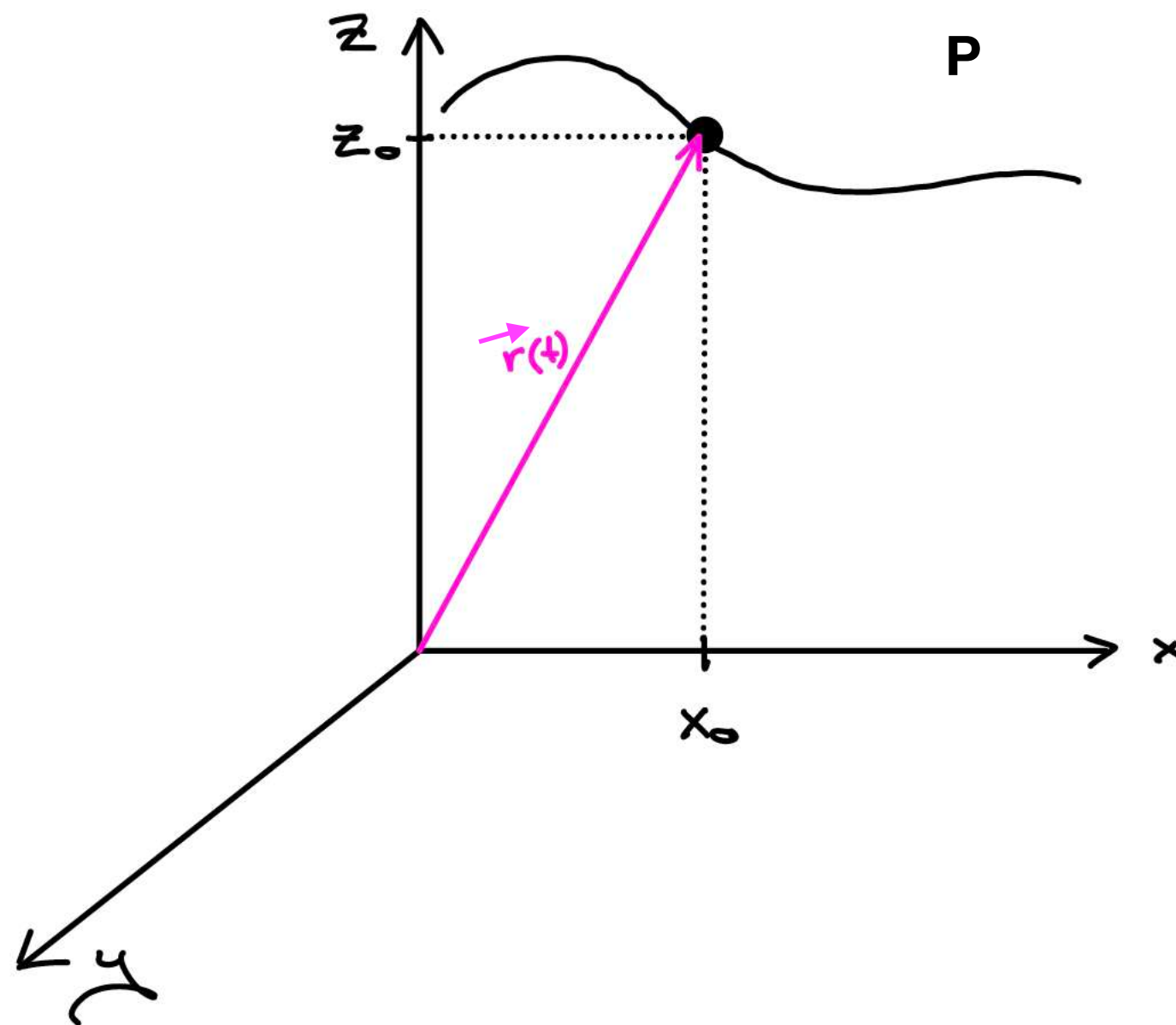
Vektoren werden addiert indem man ihre Komponenten addiert

$$\vec{r}_1 + \vec{r}_2 = (x_1 + x_2, y_1 + y_2, z_1 + z_2).$$

Wdh: Mathe: Koordinaten, Räume, Vektoren,...

Vektoren

Der Punkt P hat die Koordinaten $(x_0, 0, z_0)$ - die Linie vom Ursprung zum Punkt P nennt man auch den Vektor $\vec{r}$



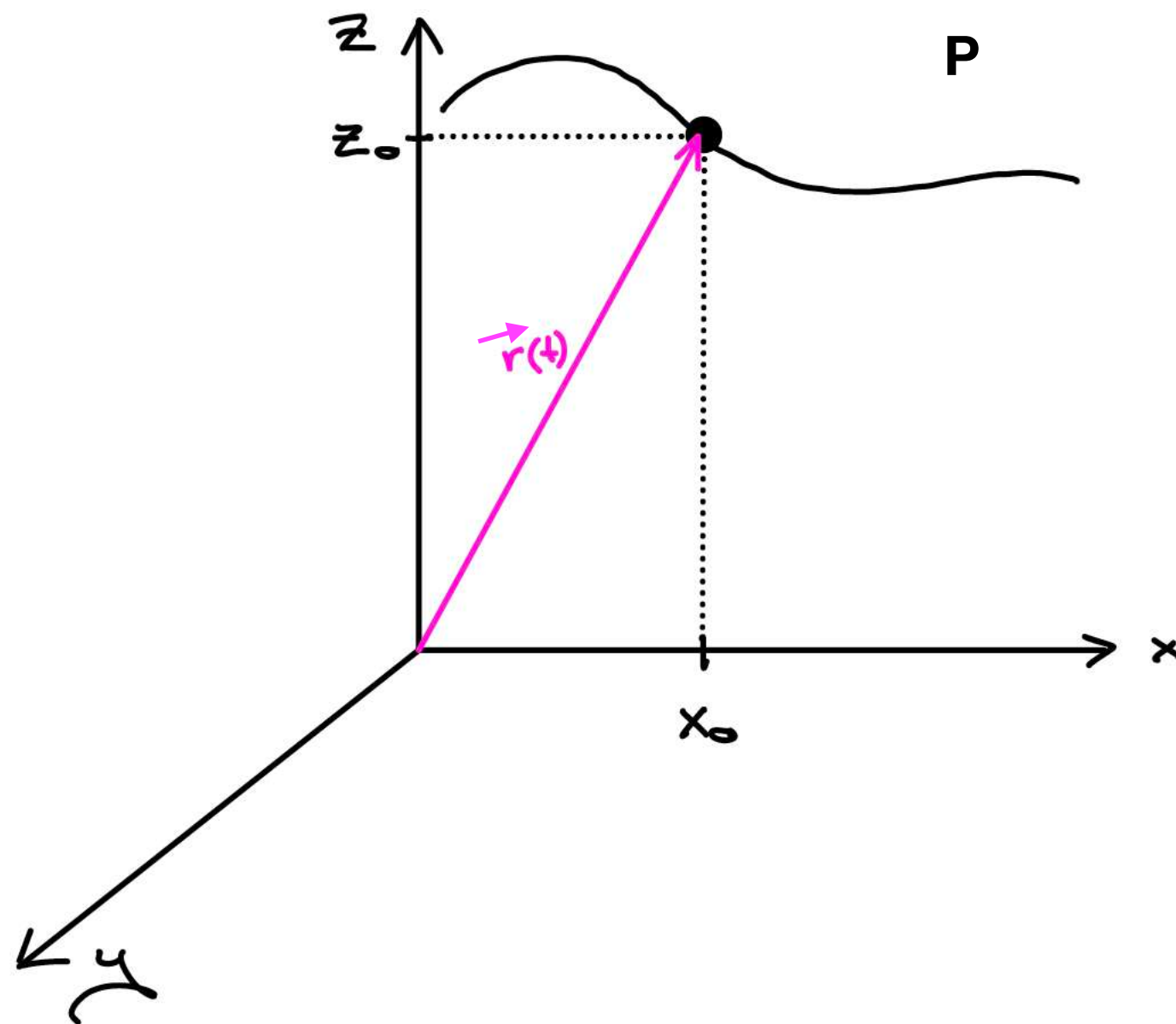
Vektoren kann man auch miteinander multiplizieren
 $\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2 = (x_1x_2 + y_1y_2 + z_1z_2)$

Man kann zeigen
 $\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2 = |\vec{r}_1| |\vec{r}_2| \cos \theta$
wobei θ den Winkel zwischen $\vec{r}_1$ und $\vec{r}_2$ bezeichnet

Wdh: Mathe: Koordinaten, Räume, Vektoren,...

Vektoren

Der Punkt P hat die Koordinaten $(x_0, 0, z_0)$ - die Linie vom Ursprung zum Punkt P nennt man auch den Vektor $\vec{r}$



Man kann die Koordinatenachsen durch folgende Vektoren darstellen:

$$\vec{e}_x = (1, 0, 0),$$

$$\vec{e}_y = (0, 1, 0)$$

$$\vec{e}_z = (0, 0, 1)$$

Damit gilt für einen beliebigen Vektor $\vec{r}$:

$$\vec{r} = x\vec{e}_x + y\vec{e}_y + z\vec{e}_z$$

Dynamische Systeme

Einfachstes Beispiel in der Mechanik

Ein 2-Zustandssystem = 1 Bit

Relativ trivial

Dynamische Systeme

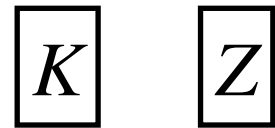
Beispiel: System mit zwei Zuständen

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

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

Kopf: $\sigma = +1$

Zahl: $\sigma = -1$

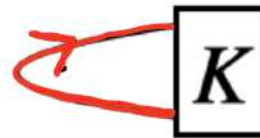


Dynamische Gesetze

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

A) Mache nichts:

KKKKKKKKKKKKKK.....

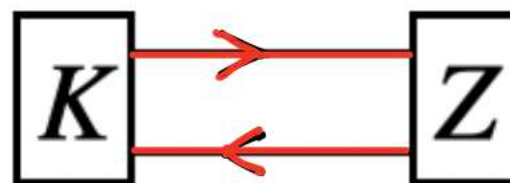


ZZZZZZZZZZZZZZZZZZ.....


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

B) Ändere immer den Zustand:

ZKZKZKZKZKZKZK...



KZKZKZKZKZKZKZ...

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

Mechanik vs. Quantenmechanik

Intuitiv - entspricht unserer
Vorstellungswelt

Unintuitiv - entspricht nicht unserer
Vorstellungswelt

Mechanik vs. Quantenmechanik

Intuitiv - entspricht unserer
Vorstellungswelt

Objekt, wie Ball, hat **klar**
definierten Ort
und Geschwindigkeit

Unintuitiv - entspricht nicht unserer
Vorstellungswelt

Objekt, wie Elektron, hat
keinen klar
definierten Ort
und Geschwindigkeit

Mechanik vs. Quantenmechanik

Intuitiv - entspricht unserer
Vorstellungswelt

Objekt, wie Ball, hat **klar**
definierten Ort
und Geschwindigkeit

Evolution unseres Geistes
hat sich in der
makroskopischen
Welt abgespielt

Unintuitiv - entspricht nicht unserer
Vorstellungswelt

Objekt, wie Elektron, hat
keinen klar
definierten Ort
und Geschwindigkeit

Evolution unseres Geistes
hat sich nicht in der
mikroskopischen
Welt abgespielt

Mechanik vs. Quantenmechanik

Intuitiv - entspricht unserer
Vorstellungswelt

Objekt, wie Ball, hat **klar**
definierten Ort
und Geschwindigkeit

Evolution unseres Geistes
hat sich in der
makroskopischen
Welt abgespielt

Kann mit Mathematik
dargestellt werden

Unintuitiv - entspricht nicht unserer
Vorstellungswelt

Objekt, wie Elektron, hat
keinen klar
definierten Ort
und Geschwindigkeit

Evolution unseres Geistes
hat sich nicht in der
mikroskopischen
Welt abgespielt

Kann mit Mathematik
dargestellt werden

Mechanik vs. Quantenmechanik

Intuitiv - entspricht unserer
Vorstellungswelt

Objekt, wie Ball, hat **klar**
definierten Ort
und Geschwindigkeit

Evolution unseres Geistes
hat sich in der
makroskopischen
Welt abgespielt

Kann mit Mathematik
dargestellt werden

Unintuitiv - entspricht nicht unserer
Vorstellungswelt

Objekt, wie Elektron, hat
keinen klar
definierten Ort
und Geschwindigkeit

Evolution unseres Geistes
hat sich nicht in der
mikroskopischen
Welt abgespielt

Kann mit Mathematik
dargestellt werden

Quantenmechanik (QM) ist fundamentaler als Mechanik
Mechanik kann aus QM abgeleitet werden

Mechanik vs. Quantenmechanik

Was ist so schwierig an QM?

Mechanik vs. Quantenmechanik

Was ist so schwierig an QM?

1) Mathematik?

Mechanik vs. Quantenmechanik

Was ist so schwierig an QM?

1) Mathematik? Ja, aber das gilt auch für Mechanik

Mechanik vs. Quantenmechanik

Was ist so schwierig an QM?

- 1) Mathematik? Ja, aber** das gilt auch für Mechanik
- 2) Mathematische Abstraktion?**

Mechanik vs. Quantenmechanik

Was ist so schwierig an QM?

1) Mathematik? Ja, aber das gilt auch für Mechanik

2) Mathematische Abstraktion?

Wir haben nie die Bewegung eines Elektrons erfahren

Mechanik vs. Quantenmechanik

Was ist so schwierig an QM?

1) Mathematik? Ja, aber das gilt auch für Mechanik

2) Mathematische Abstraktion?

Wir haben nie die Bewegung eines Elektrons erfahren

Aber mathematische Abstraktion gibt es auch in der Mechanik

Mechanik vs. Quantenmechanik

Was ist so schwierig an QM?

1) Mathematik? Ja, aber das gilt auch für Mechanik

2) Mathematische Abstraktion?

Wir haben nie die Bewegung eines Elektrons erfahren

Aber mathematische Abstraktion gibt es auch in der Mechanik

Wirkliche Unterschiede:

Mechanik vs. Quantenmechanik

Was ist so schwierig an QM?

1) Mathematik? Ja, aber das gilt auch für Mechanik

2) Mathematische Abstraktion?

Wir haben nie die Bewegung eines Elektrons erfahren

Aber mathematische Abstraktion gibt es auch in der Mechanik

Wirkliche Unterschiede:

1) In der QM gibt es fundamental unterschiedliche Abstraktionen:

Mechanik vs. Quantenmechanik

Was ist so schwierig an QM?

1) Mathematik? Ja, aber das gilt auch für Mechanik

2) Mathematische Abstraktion?

Wir haben nie die Bewegung eines Elektrons erfahren

Aber mathematische Abstraktion gibt es auch in der Mechanik

Wirkliche Unterschiede:

1) In der QM gibt es fundamental unterschiedliche Abstraktionen:

QM Zustand $\neq$ Mechanik Zustand

Mechanik vs. Quantenmechanik

Was ist so schwierig an QM?

1) Mathematik? Ja, aber das gilt auch für Mechanik

2) Mathematische Abstraktion?

Wir haben nie die Bewegung eines Elektrons erfahren

Aber mathematische Abstraktion gibt es auch in der Mechanik

Wirkliche Unterschiede:

1) In der QM gibt es fundamental unterschiedliche Abstraktionen:

QM Zustand $\neq$ Mechanik Zustand

2) Zustand und Messung

Mechanik vs. Quantenmechanik

Was ist so schwierig an QM?

1) Mathematik? Ja, aber das gilt auch für Mechanik

2) Mathematische Abstraktion?

Wir haben nie die Bewegung eines Elektrons erfahren

Aber mathematische Abstraktion gibt es auch in der Mechanik

Wirkliche Unterschiede:

1) In der QM gibt es fundamental unterschiedliche Abstraktionen:

QM Zustand $\neq$ Mechanik Zustand

2) Zustand und Messung

Mechanik: Zustand $\equiv$ Messung

QM: Zustand $\neq$ Messung

Mechanik: Dynamische Systeme

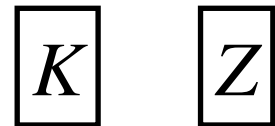
Beispiel: System mit zwei Zuständen

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

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

Kopf: $\sigma = +1$

Zahl: $\sigma = -1$

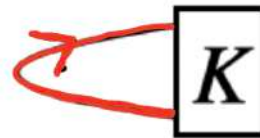


Dynamische Gesetze

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

A) Mache nichts:

KKKKKKKKKKKKKK.....

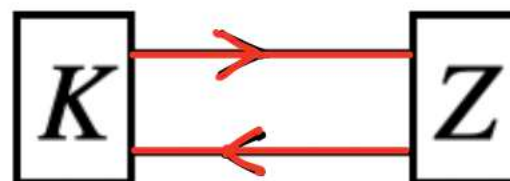


ZZZZZZZZZZZZZZZZZZ.....


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

B) Ändere immer den Zustand:

ZKZKZKZKZKZKZK...



KZKZKZKZKZKZKZ...

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

IMPLIZITE ANNAHME: MESSUNG VOM ZUSTAND $\sigma = \text{Zustand}$

Dynamische Systeme

Einfachstes Beispiel in der Quanten Mechanik

Ein 2-Zustandssystem = 1 Quanten Bit (Qbit)

Höchst nicht-trivial

1 Quanten Bit

Spin: nicht-klassische Eigenschaft eines Elementarteilchens

1 Quanten Bit

Spin: nicht-klassische Eigenschaft eines Elementarteilchens

Elektron hat verschiedene Eigenschaften neben der Position im Raum:

1 Quanten Bit

Spin: nicht-klassische Eigenschaft eines Elementarteilchens

**Elektron hat verschiedene Eigenschaften neben der Position im Raum:
Ladung, Masse und Spin**

1 Quanten Bit

Spin: nicht-klassische Eigenschaft eines Elementarteilchens

Elektron hat verschiedene Eigenschaften neben der Position im Raum:

Ladung, Masse und Spin

$$q_e = - 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

1 Quanten Bit

Spin: nicht-klassische Eigenschaft eines Elementarteilchens

Elektron hat verschiedene Eigenschaften neben der Position im Raum:

Ladung, Masse und Spin

$$q_e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

1 Quanten Bit

Spin: nicht-klassische Eigenschaft eines Elementarteilchens

Elektron hat verschiedene Eigenschaften neben der Position im Raum:

Ladung, Masse und Spin

$$q_e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$s_e \approx \pm 5 \cdot 10^{-35} \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}} = \pm \frac{\hbar}{2} \text{ (Einheit vom Drehimpuls) oft als } \pm 1 \text{ abgekürzt}$$

1 Quanten Bit

Spin: nicht-klassische Eigenschaft eines Elementarteilchens

Elektron hat verschiedene Eigenschaften neben der Position im Raum:

Ladung, Masse und Spin

$$q_e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$s_e \approx \pm 5 \cdot 10^{-35} \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}} = \pm \frac{\hbar}{2} \text{ (Einheit vom Drehimpuls) oft als } \pm 1 \text{ abgekürzt}$$

Kein klassisches Analogon - wird aber trotzdem oft als Pfeil verdeutlicht

1 Quanten Bit

Spin: nicht-klassische Eigenschaft eines Elementarteilchens

Elektron hat verschiedene Eigenschaften neben der Position im Raum:

Ladung, Masse und Spin

$$q_e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$s_e \approx \pm 5 \cdot 10^{-35} \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}} = \pm \frac{\hbar}{2} \text{ (Einheit vom Drehimpuls) oft als } \pm 1 \text{ abgekürzt}$$

Kein klassisches Analogon - wird aber trotzdem oft als Pfeil verdeutlicht

Wir betrachten den Spin - losgelöst vom Elektron

Dies ist ein Beispiel für ein Q-bit

1 Quanten Bit

Spin: nicht-klassische Eigenschaft eines Elementarteilchens

Elektron hat verschiedene Eigenschaften neben der Position im Raum:

Ladung, Masse und Spin

$$q_e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$s_e \approx \pm 5 \cdot 10^{-35} \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}} = \pm \frac{\hbar}{2} \text{ (Einheit vom Drehimpuls) oft als } \pm 1 \text{ abgekürzt}$$

Kein klassisches Analogon - wird aber trotzdem oft als Pfeil verdeutlicht

Wir betrachten den Spin - losgelöst vom Elektron

Dies ist ein Beispiel für ein Q-bit

Wir betrachten einen Spin mit den zwei Einstellungsmöglichkeiten

$$\sigma = +1 \text{ und } \sigma = -1$$

1 Quanten Bit

Spin: nicht-klassische Eigenschaft eines Elementarteilchens

**Elektron hat verschiedene Eigenschaften neben der Position im Raum:
Ladung, Masse und Spin**

$$q_e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$s_e \approx \pm 5 \cdot 10^{-35} \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}} = \pm \frac{\hbar}{2} \text{ (Einheit vom Drehimpuls) oft als } \pm 1 \text{ abgekürzt}$$

Kein klassisches Analogon - wird aber trotzdem oft als Pfeil verdeutlicht

**Wir betrachten den Spin - losgelöst vom Elektron
Dies ist ein Beispiel für ein Q-bit**

Wir betrachten einen Spin mit den zwei Einstellungsmöglichkeiten

$$\sigma = +1 \text{ und } \sigma = -1$$

Erste Frage: Welche Bedeutung hat der Messprozess?

1 Quanten Bit

Spin: nicht-klassische Eigenschaft eines Elementarteilchens

**Elektron hat verschiedene Eigenschaften neben der Position im Raum:
Ladung, Masse und Spin**

$$q_e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$s_e \approx \pm 5 \cdot 10^{-35} \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}} = \pm \frac{\hbar}{2} \text{ (Einheit vom Drehimpuls) oft als } \pm 1 \text{ abgekürzt}$$

Kein klassisches Analogon - wird aber trotzdem oft als Pfeil verdeutlicht

Wir betrachten den Spin - losgelöst vom Elektron

Dies ist ein Beispiel für ein Q-bit

Wir betrachten einen Spin mit den zwei Einstellungsmöglichkeiten

$$\sigma = +1 \text{ und } \sigma = -1$$

Erste Frage: Welche Bedeutung hat der Messprozess?

**Neben dem zu untersuchenden System gibt es den Messapparat $\mathcal{A}$
der den Zustand des Systems misst und dabei mit dem System
wechselwirkt.**

1 Quanten Bit

Annahme:

1) unser System (Spin) hat 2 Zustände ± 1

1 Quanten Bit

Annahme:

1) unser System (Spin) hat 2 Zustände ± 1

**2) Der Messapparat $\mathcal{A}$ wechselwirkt mit dem System
und gibt einen Wert für σ (± 1 bzw. oben/unten) aus**

1 Quanten Bit

Annahme:

- 1) unser System (Spin) hat 2 Zustände ± 1**
- 2) Der Messapparat $\mathcal{A}$ wechselwirkt mit dem System
und gibt einen Wert für σ (± 1 bzw. oben/unten) aus**
- 3) Wir stellen uns den Messapparat $\mathcal{A}$ als “Black Box” vor - d.h. wir kennen
sein Inneres nicht**

1 Quanten Bit

Annahme:

- 1) unser System (Spin) hat 2 Zustände ± 1**
- 2) Der Messapparat $\mathcal{A}$ wechselwirkt mit dem System
und gibt einen Wert für σ (± 1 bzw. oben/unten) aus**
- 3) Wir stellen uns den Messapparat $\mathcal{A}$ als “Black Box” vor - d.h. wir kennen
sein Inneres nicht**
- 4) Die des Messapparat $\mathcal{A}$ wird auch immer angezeigt**

1 Quanten Bit

Annahme:

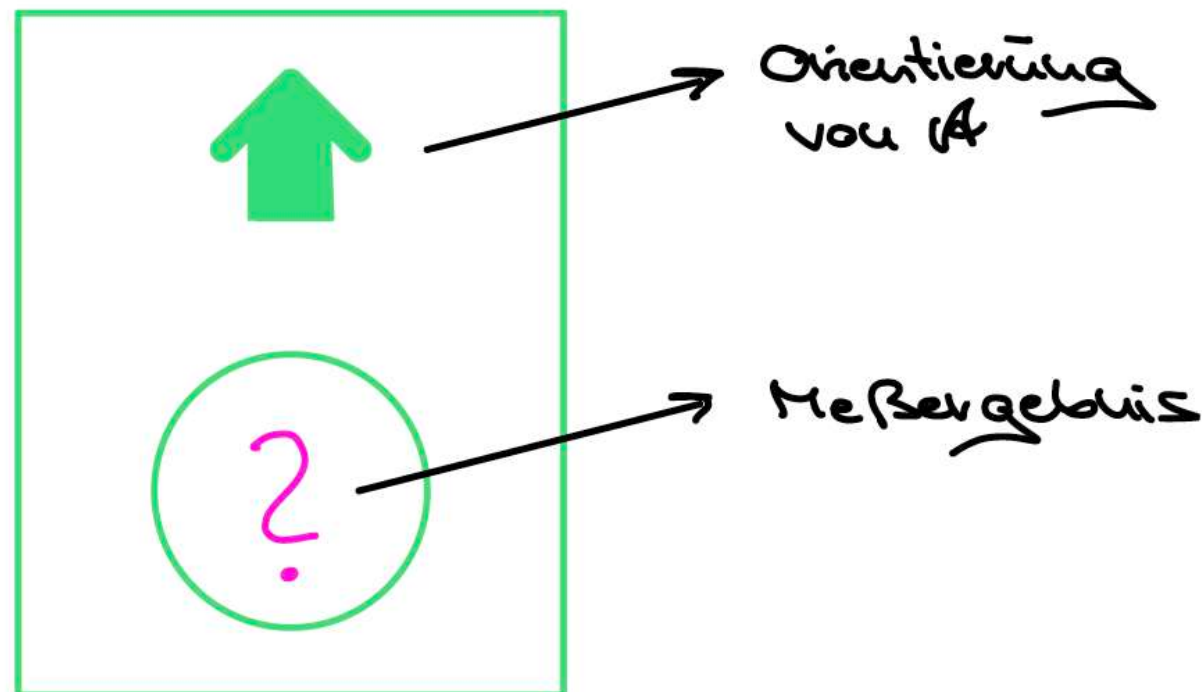
- 1) unser System (Spin) hat 2 Zustände ± 1**
- 2) Der Messapparat $\mathcal{A}$ wechselwirkt mit dem System
und gibt einen Wert für σ (± 1 bzw. oben/unten) aus**
- 3) Wir stellen uns den Messapparat $\mathcal{A}$ als “Black Box” vor - d.h. wir kennen
sein Inneres nicht**
- 4) Die Ausrichtung des Messapparat $\mathcal{A}$ wird auch immer angezeigt**
- 5) Nach einer Messung kann der Messapparat wieder zurückgesetzt werden**

1 Quanten Bit

Annahme:

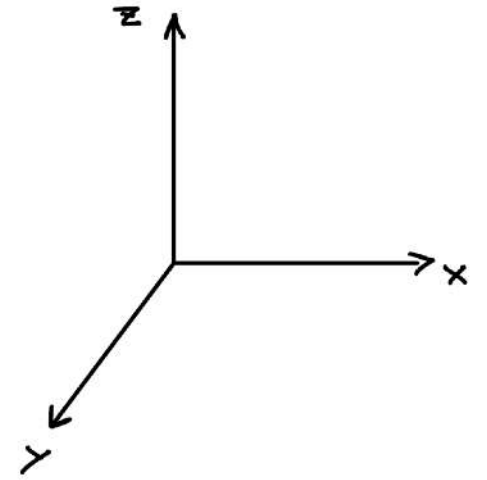
- 1) unser System (Spin) hat 2 Zustände ± 1**
- 2) Der Messapparat $\mathcal{A}$ wechselwirkt mit dem System
und gibt einen Wert für σ (± 1 bzw. oben/unten) aus**
- 3) Wir stellen uns den Messapparat $\mathcal{A}$ als “Black Box” vor - d.h. wir kennen sein Inneres nicht**
- 4) Die Ausrichtung des Messapparat $\mathcal{A}$ wird auch immer angezeigt**
- 5) Nach einer Messung kann der Messapparat wieder zurückgesetzt werden**

Messapparat $\mathcal{A}$



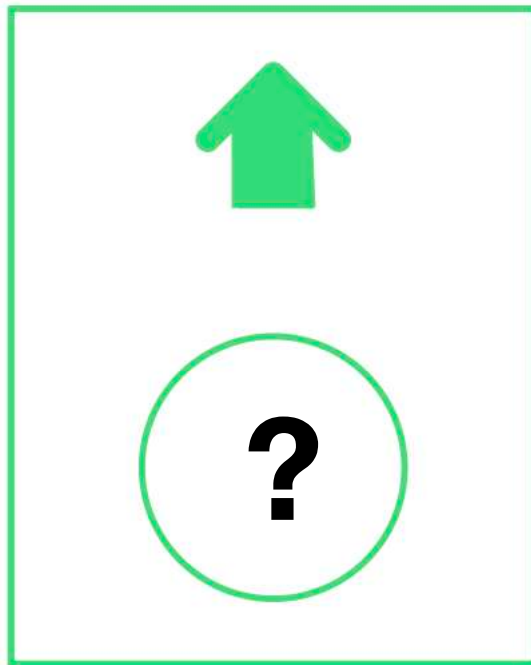
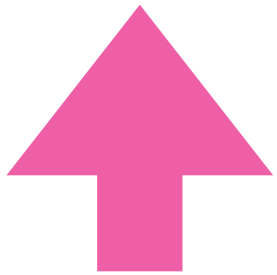
1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:



Vor der Messung

Spin



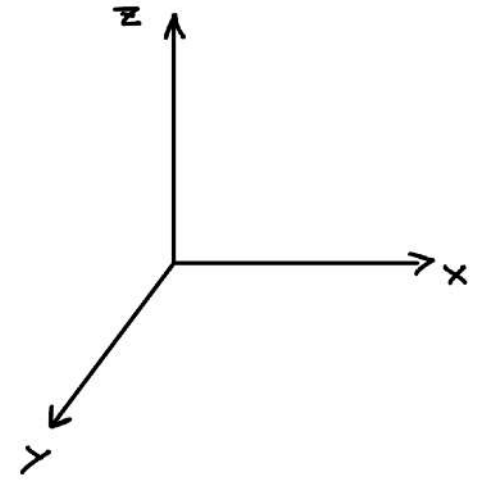
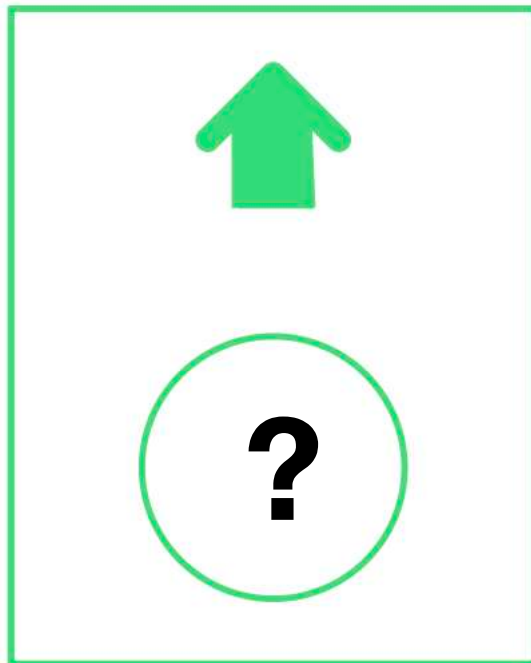
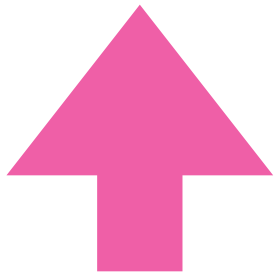
1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

Messung =
Wechselwirkung
von $\mathcal{A}$ mit Spin

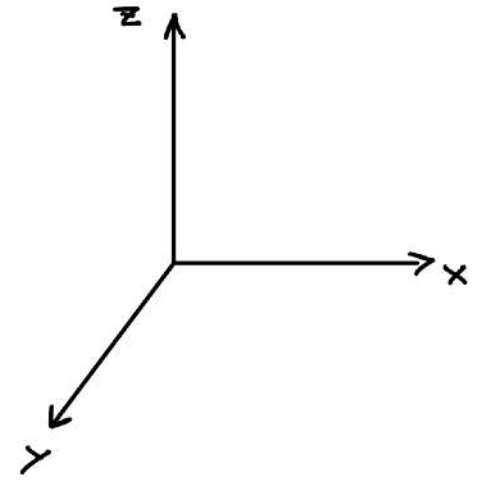
Vor der Messung

Spin



1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

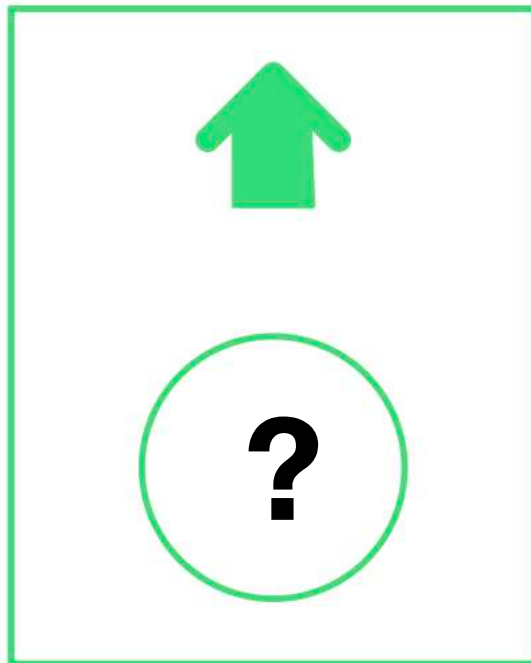
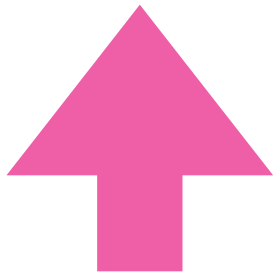


Messung =
Wechselwirkung
von $\mathcal{A}$ mit Spin

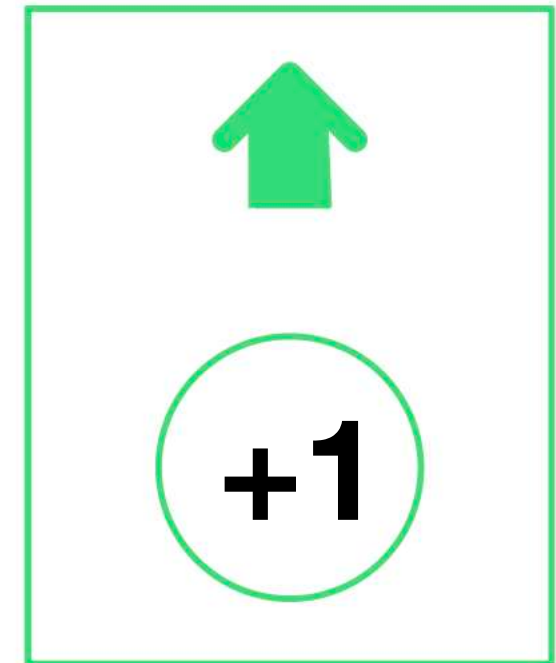
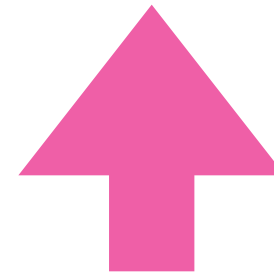
Vor der Messung

Nach der Messung

Spin



Spin



1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

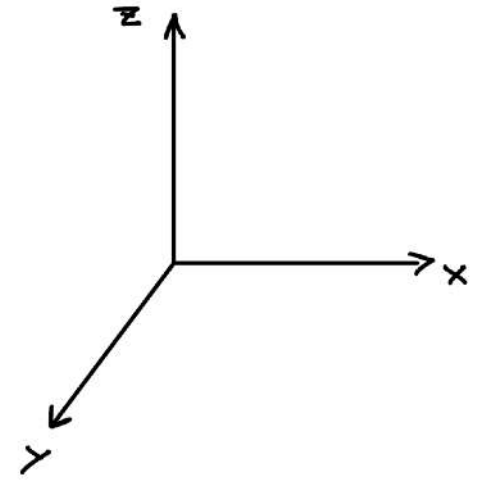
Wenn wir folgendes Zeitentwicklungsgesetz haben

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

**Dann wird auch jede weitere Messung an diesem Spin
den Wert +1 ergeben**

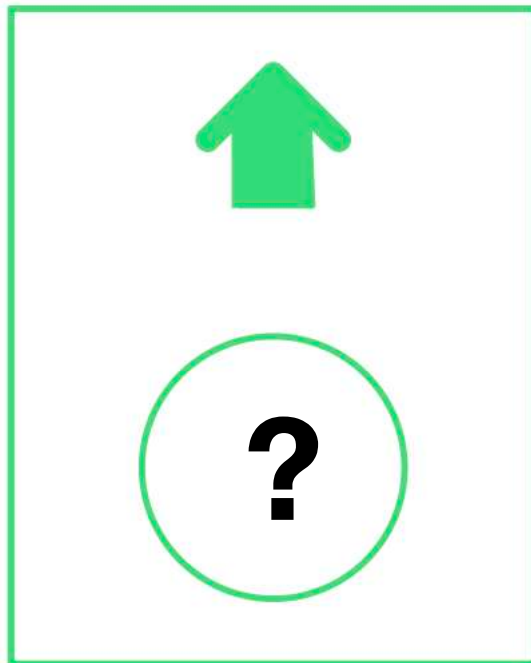
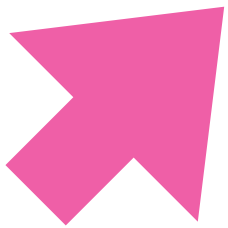
1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:



Vor der Messung

Spin



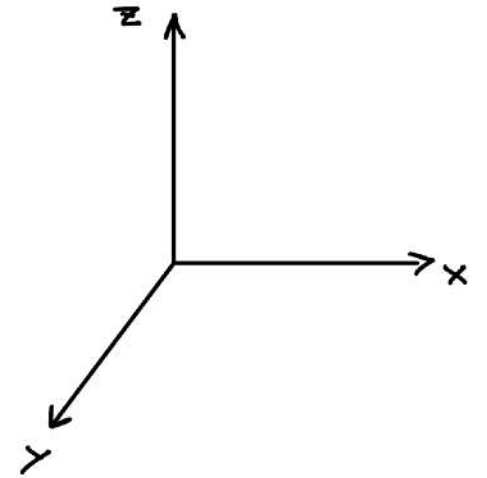
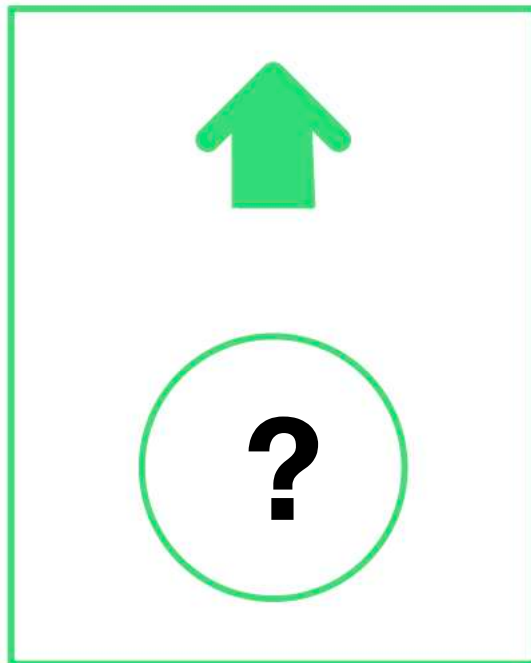
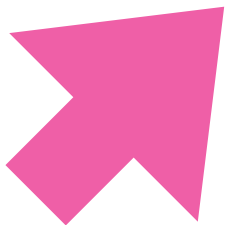
1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

Messung =
Wechselwirkung
von $\mathcal{A}$ mit Spin

Vor der Messung

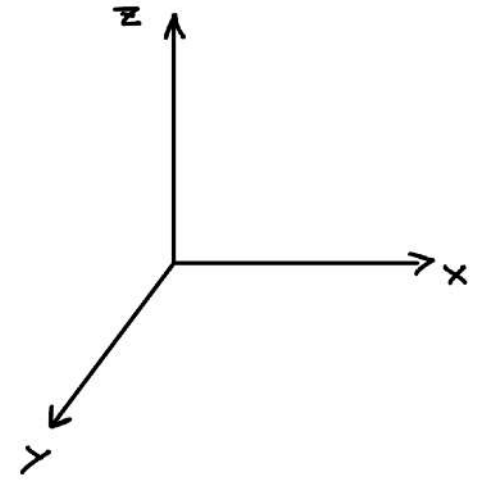
Spin



1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

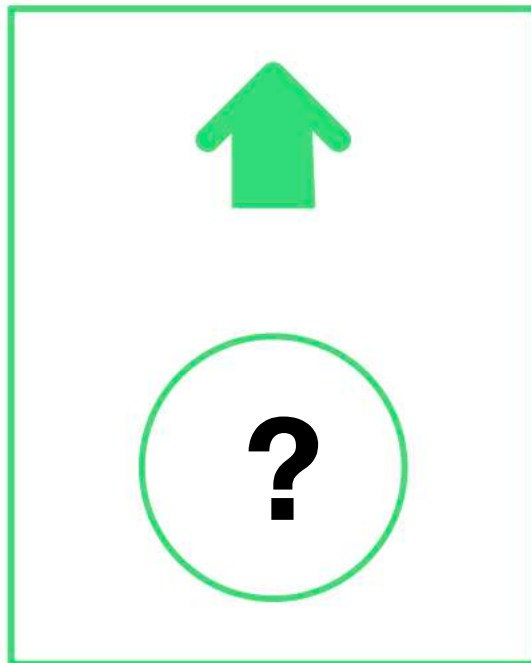
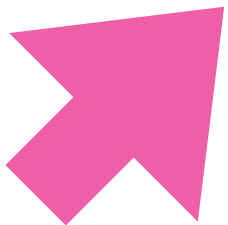
Messung =
Wechselwirkung
von $\mathcal{A}$ mit Spin



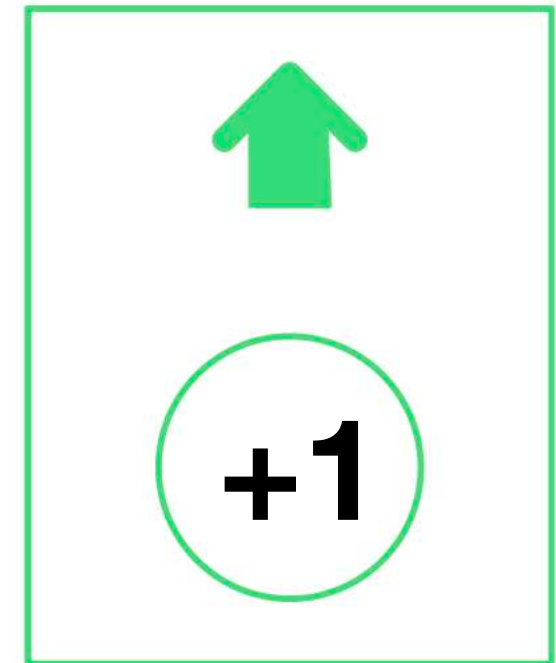
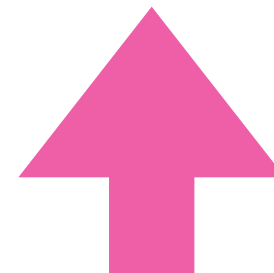
Vor der Messung

Nach der Messung

Spin



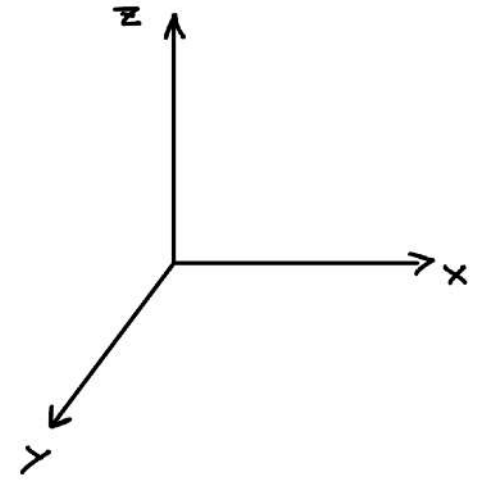
Spin



1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

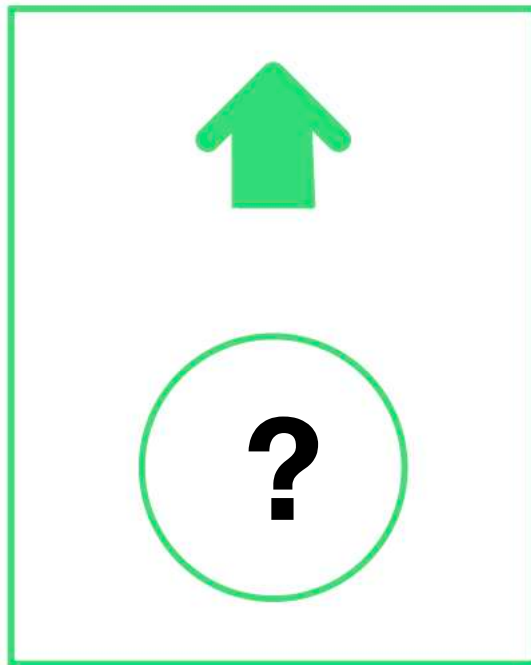
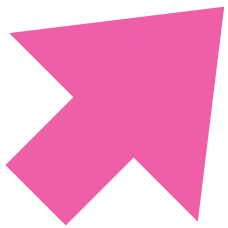
Messung =
Wechselwirkung
von $\mathcal{A}$ mit Spin



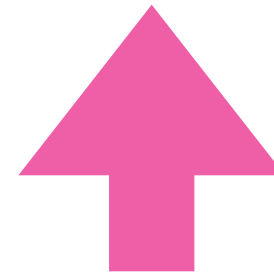
Vor der Messung

Nach der Messung

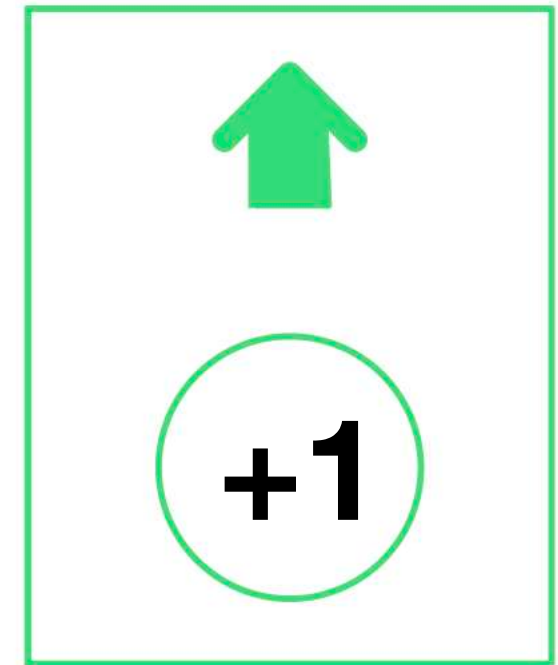
Spin



Spin



Spin ist jetzt
anders
ausgerichtet!



Dieses Ergebnis ist keine logische/offensichtliche Konsequenz
sondern eine experimentelle Tatsache,
die nun verstanden/interpretiert werden muss

1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

Wenn wir folgendes Zeitentwicklungsgesetz haben

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

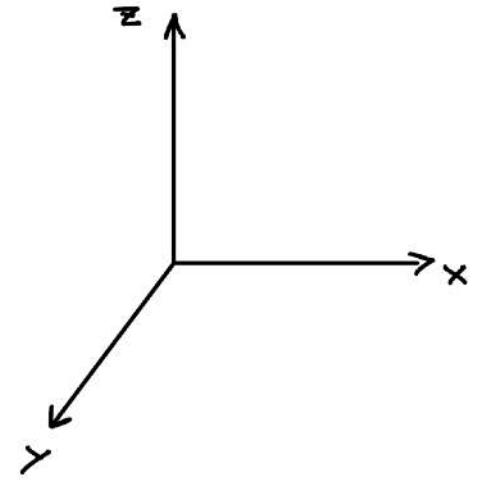
Dann wird auch jede weitere Messung an diesem Spin

den Wert +1 ergeben

Die 1. Messung hat den Spin im Zustand +1 präpariert

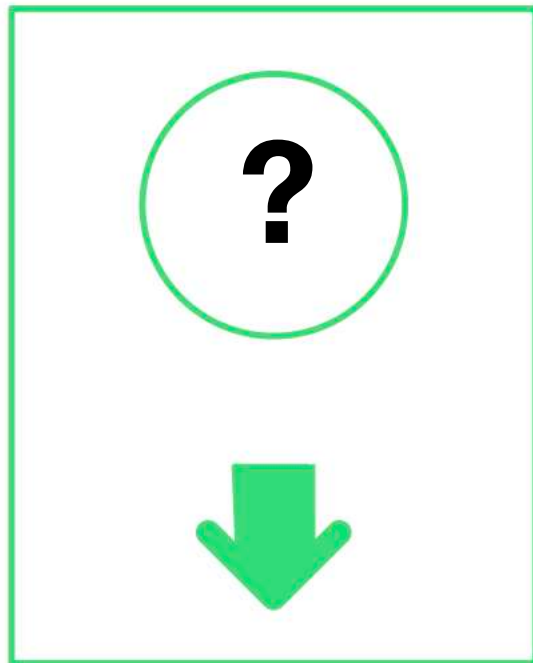
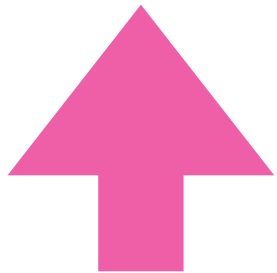
1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:



Vor der Messung

Spin



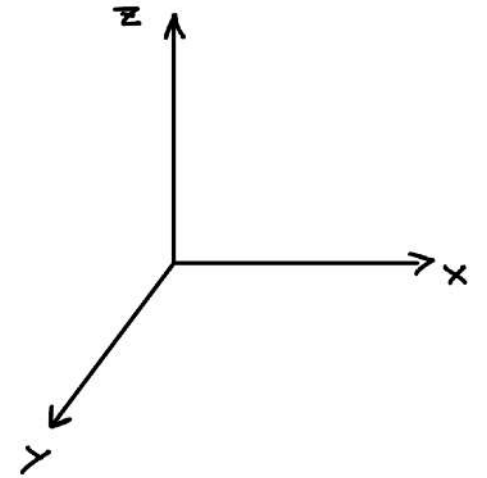
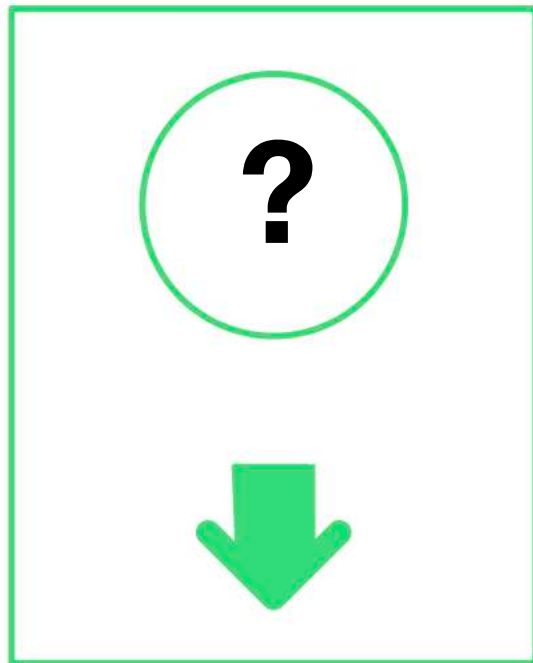
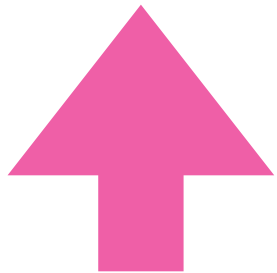
1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

Messung =
Wechselwirkung
von $\mathcal{A}$ mit Spin

Vor der Messung

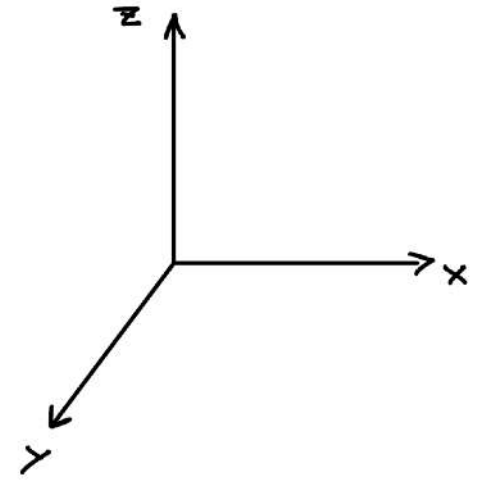
Spin



1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

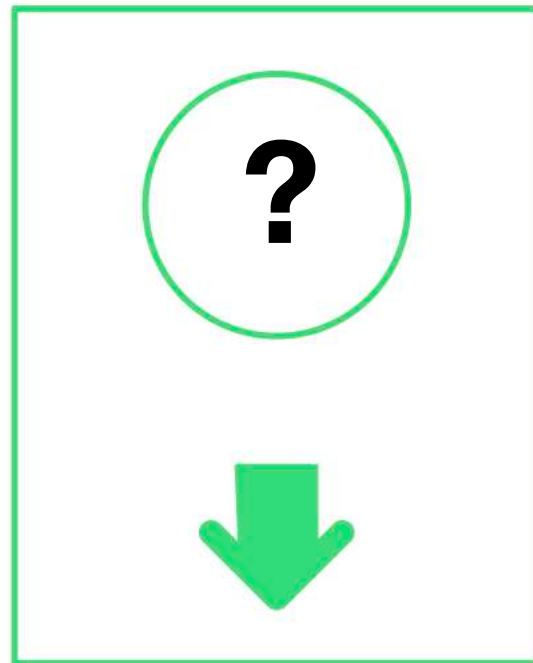
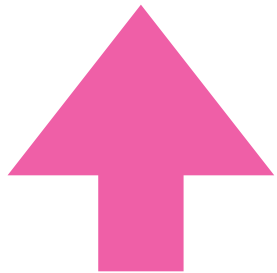
Messung =
Wechselwirkung
von $\mathcal{A}$ mit Spin



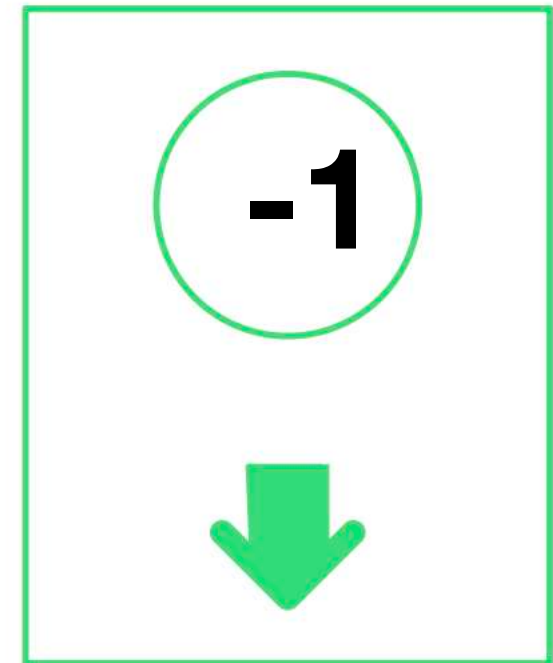
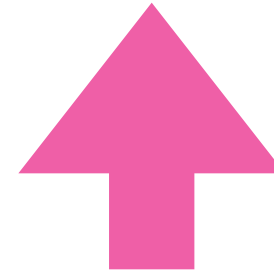
Vor der Messung

Nach der Messung

Spin



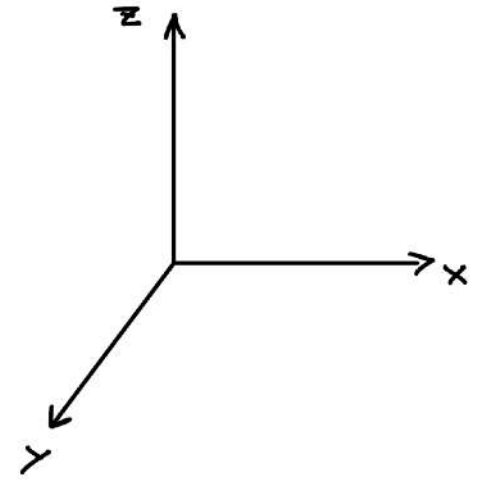
Spin



1 Quanten Bit

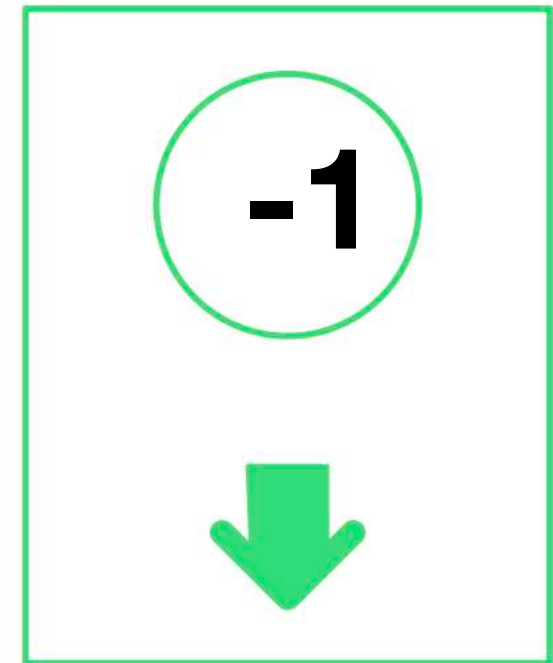
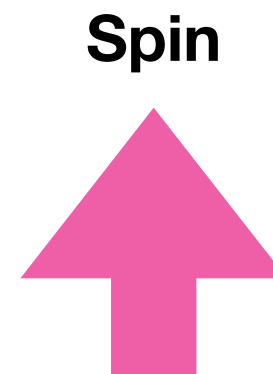
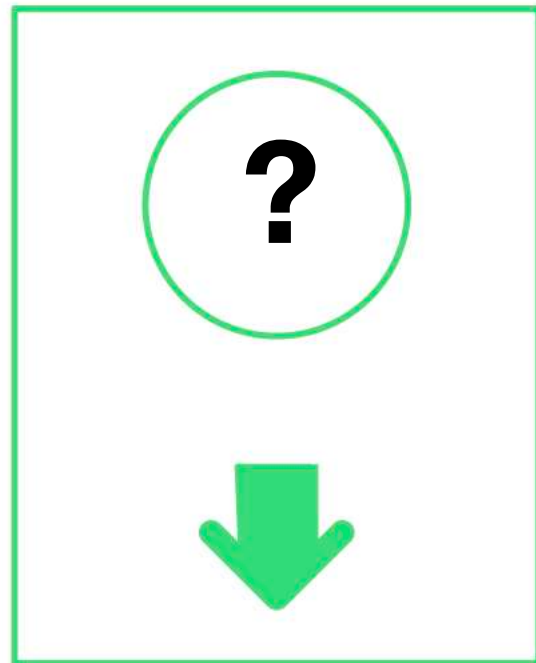
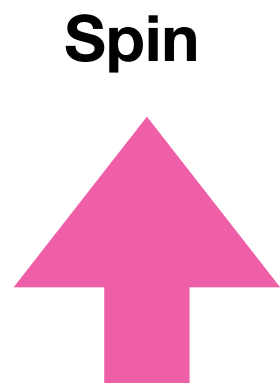
Beispiele für Messergebnisse:

Messung =
Wechselwirkung
von $\mathcal{A}$ mit Spin



Vor der Messung

Nach der Messung



Dieses Ergebnis ist keine logische/offensichtliche Konsequenz
sondern eine experimentelle Tatsache,
die nun verstanden/interpretiert werden muss

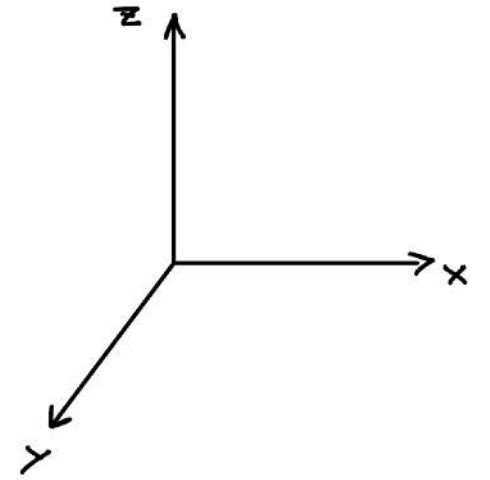
1 Quanten Bit

1. Interpretation:

**Die Messung scheint scheinbar
die z-Komponente des Spins
relativ zur Ausrichtung des Messapparats
anzugeben**

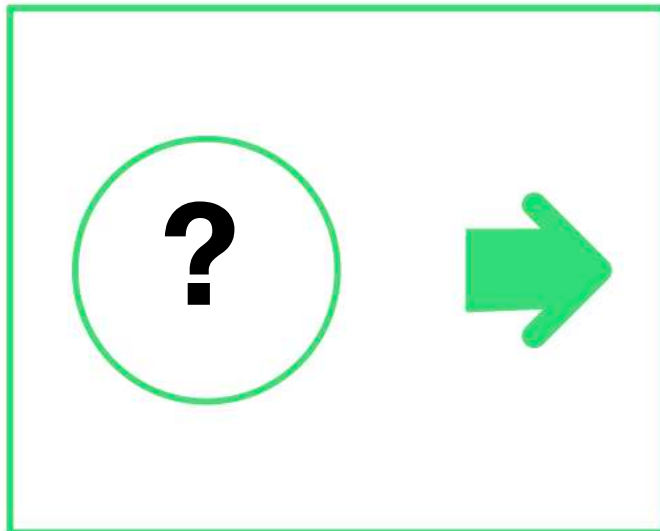
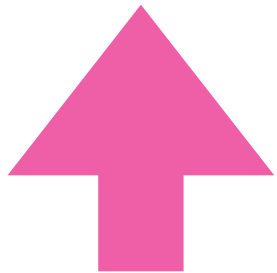
1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:



Vor der Messung

Spin



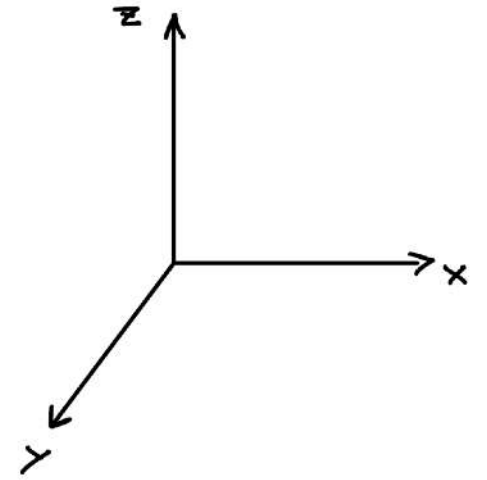
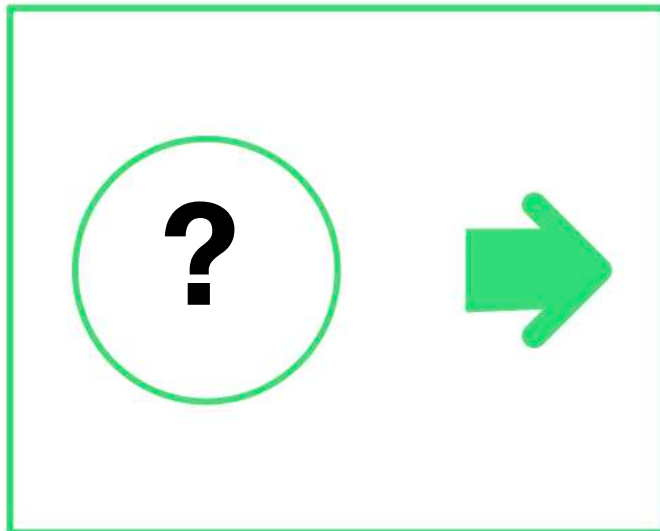
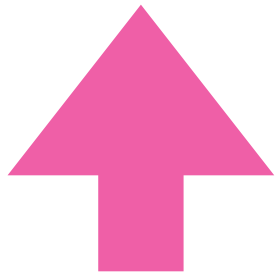
1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

Messung =
Wechselwirkung
von $\mathcal{A}$ mit Spin

Vor der Messung

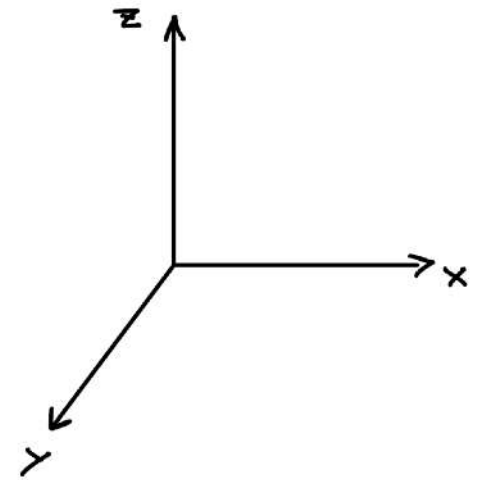
Spin



1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

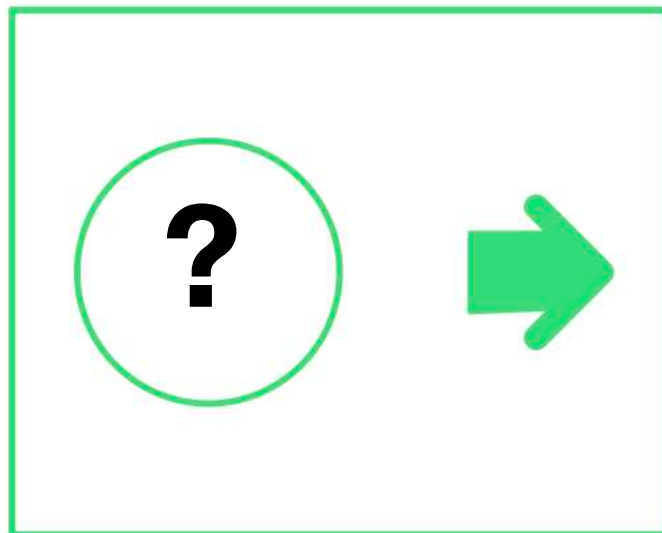
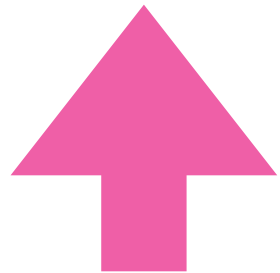
Messung =
Wechselwirkung
von $\mathcal{A}$ mit Spin



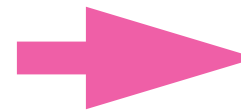
Vor der Messung

Nach der Messung

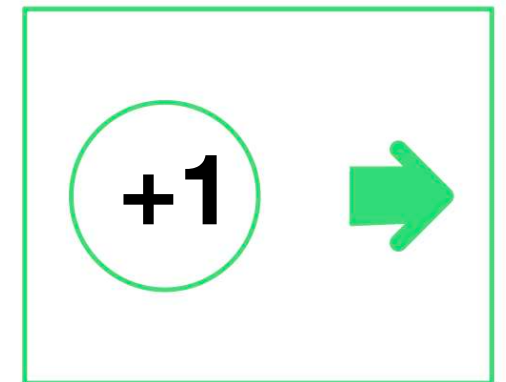
Spin



50%



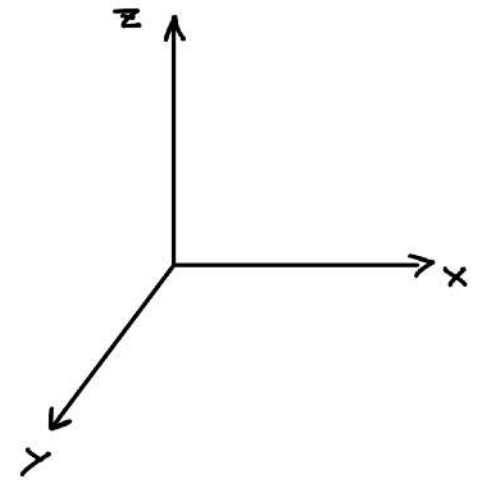
Spin



1 Quanten Bit

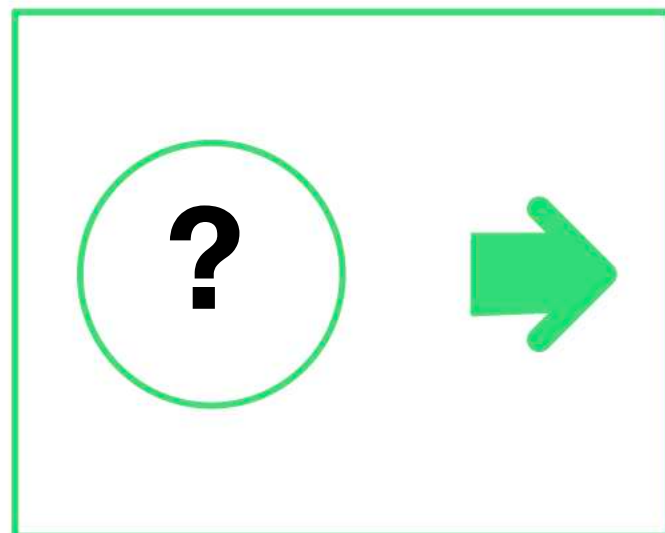
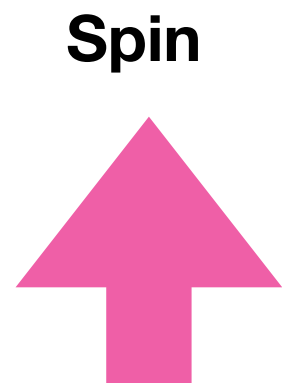
Beispiele für Messergebnisse:

Messung =
Wechselwirkung
von $\mathcal{A}$ mit Spin

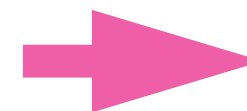


Vor der Messung

Nach der Messung



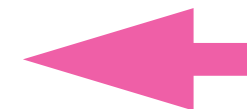
50%



Spin



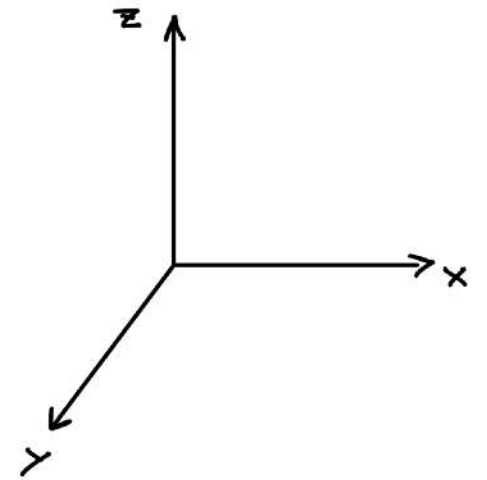
50%



1 Quanten Bit

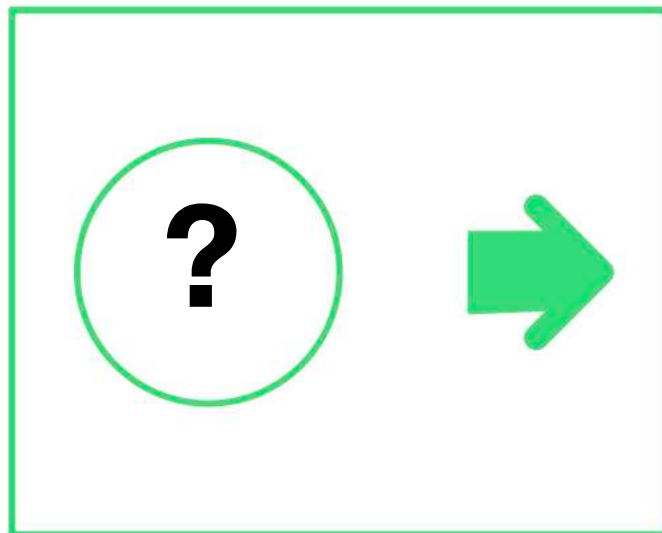
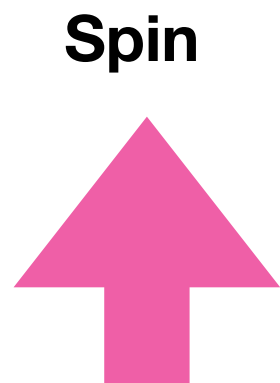
Beispiele für Messergebnisse:

Messung =
Wechselwirkung
von $\mathcal{A}$ mit Spin

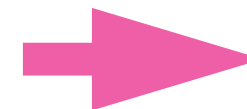


Vor der Messung

Nach der Messung



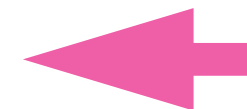
50%



Spin



50%



Dieses Ergebnis ist keine logische/offensichtliche Konsequenz
sondern eine experimentelle Tatsache,
die nun verstanden/interpretiert werden muss

1 Quanten Bit

N unabhängige Messungen bedeutet:

Wir haben N identische Kopien von unserem System mit einem Spin und einem Messapparat und machen dann jeweils eine Messung in jedem System

1 Quanten Bit

N unabhängige Messungen bedeutet:

Wir haben N identische Kopien von unserem System mit einem Spin und einem Messapparat und machen dann jeweils eine Messung in jedem System

**Macht man viele unabhängige Messungen,
dann wird man
eine zufällige Reihe von +1 und -1 bekommen**

+1, +1, -1, +1, +1, -1, -1, 1-,...

1 Quanten Bit

N unabhängige Messungen bedeutet:

Wir haben N identische Kopien von unserem System mit einem Spin und einem Messapparat und machen dann jeweils eine Messung in jedem System

**Macht man viele unabhängige Messungen,
dann wird man
eine zufällige Reihe von +1 und -1 bekommen**

+1, +1, -1, +1, +1, -1, -1, 1-,...

Der Mittelwert der Reihe ist aber gleich Null!

1 Quanten Bit

N unabhängige Messungen bedeutet:

Wir haben N identische Kopien von unserem System mit einem Spin und einem Messapparat und machen dann jeweils eine Messung in jedem System

Macht man viele unabhängige Messungen,
dann wird man
eine zufällige Reihe von +1 und -1 bekommen

+1, +1, -1, +1, +1, -1, -1, 1-,...

Der Mittelwert der Reihe ist aber gleich Null!

Für eine einzelne Messung gibt es keinen Determinismus mehr!
Es kann nur eine Wahrscheinlichkeit angegeben werden.

1 Quanten Bit

N unabhängige Messungen bedeutet:

Wir haben N identische Kopien von unserem System mit einem Spin und einem Messapparat und machen dann jeweils eine Messung in jedem System

Macht man viele unabhängige Messungen,
dann wird man
eine zufällige Reihe von +1 und -1 bekommen

+1, +1, -1, +1, +1, -1, -1, 1-,...

Der Mittelwert der Reihe ist aber gleich Null!

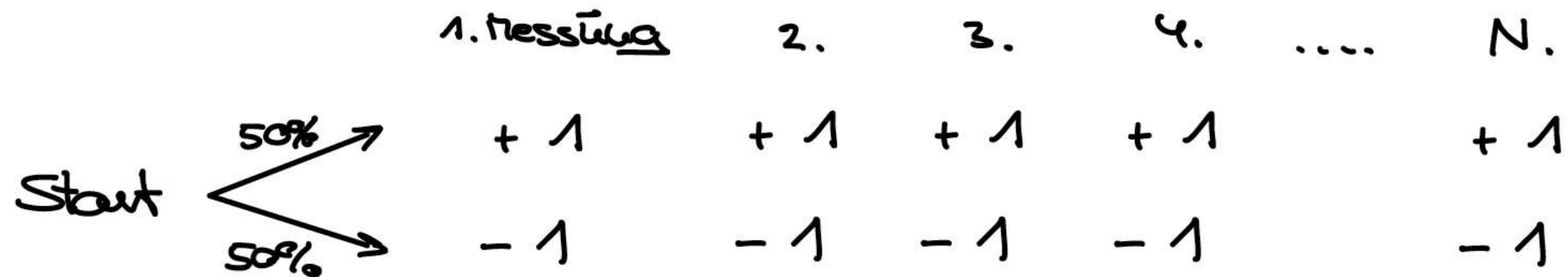
Für eine einzelne Messung gibt es keinen Determinismus mehr!
Es kann nur eine Wahrscheinlichkeit angegeben werden.

Was passiert, wenn wir am selben System N Messungen hintereinander machen

1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

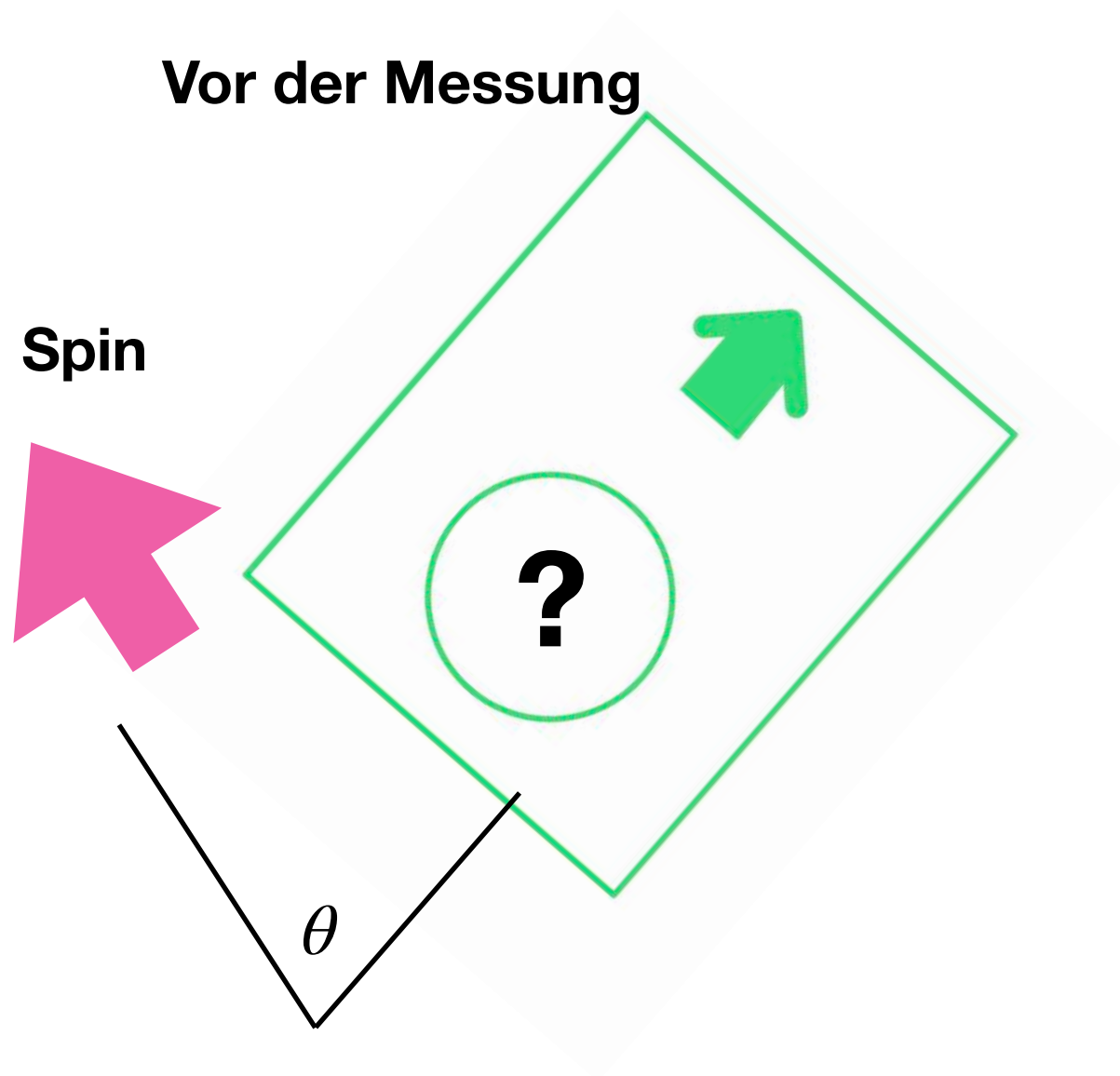
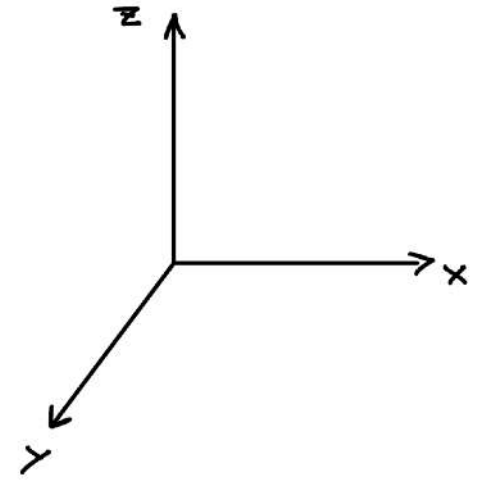
Was passiert, wenn wir am selben System N Messungen hintereinander machen



Die Messung beeinflusst das System!!!!
(Präpariert den Zustand)

1 Quanten Bit

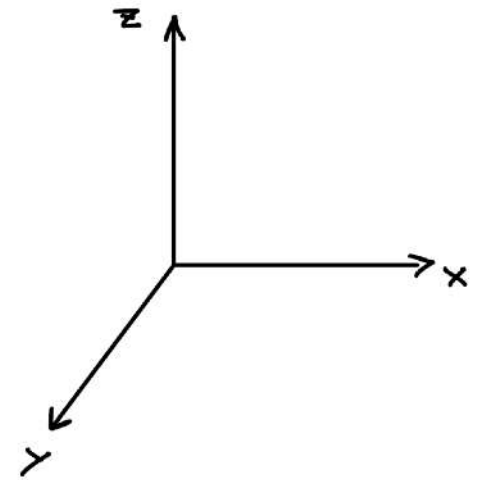
Beispiele für Messergebnisse:



1 Quanten Bit

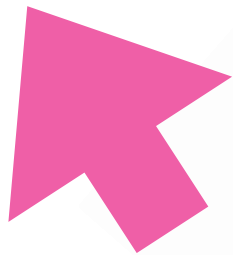
Beispiele für Messergebnisse:

Messung =
Wechselwirkung
von $\mathcal{A}$ mit Spin

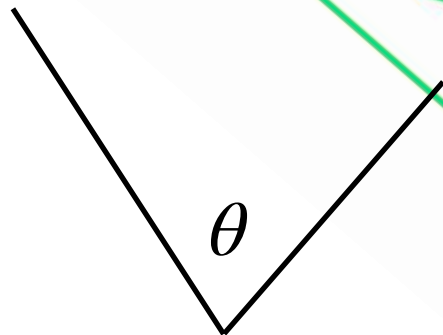


Vor der Messung

Spin



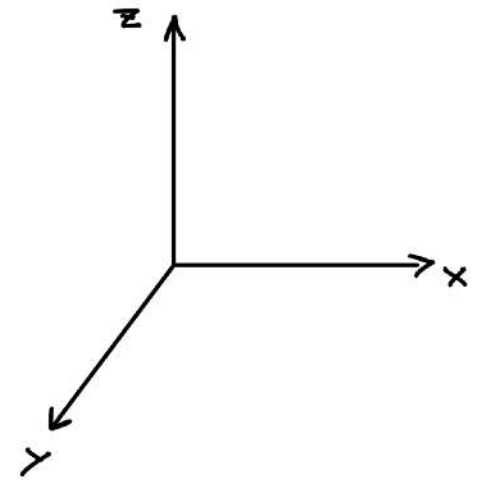
θ



1 Quanten Bit

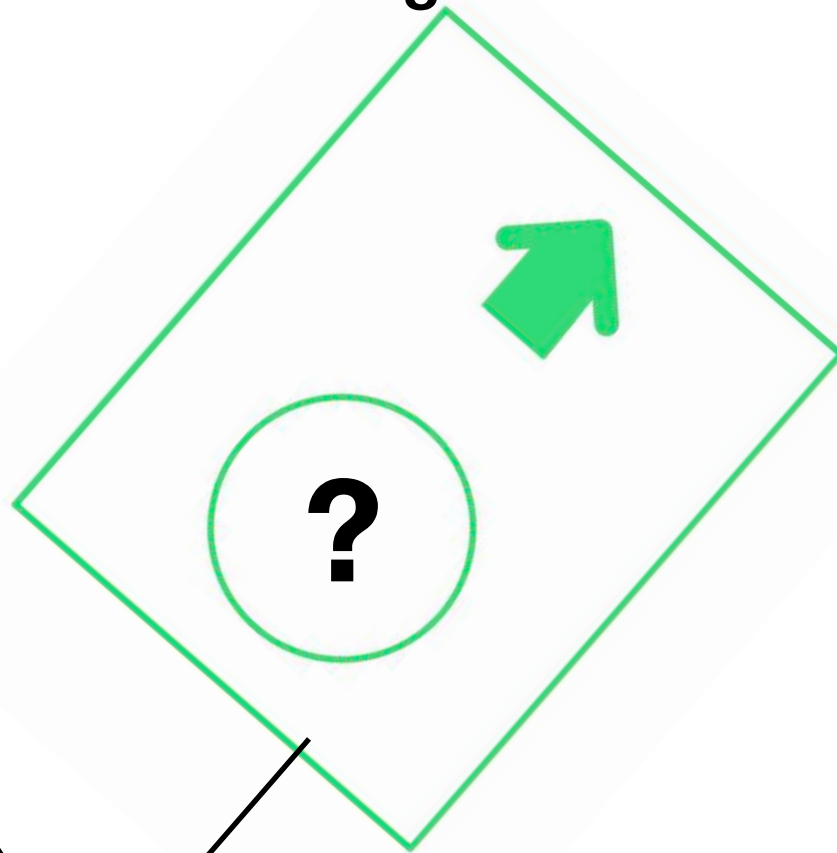
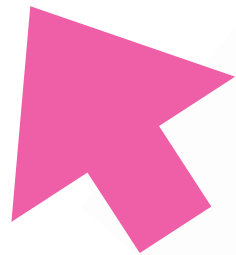
Beispiele für Messergebnisse:

Messung =
Wechselwirkung
von $\mathcal{A}$ mit Spin



Vor der Messung

Spin



θ

Nach der Messung

Spin

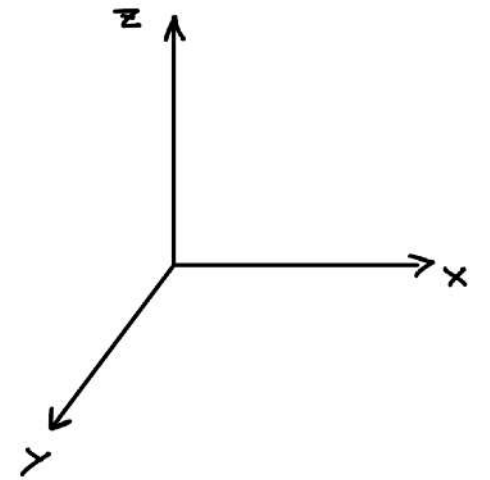


$$\frac{1 + \cos \theta}{2}$$

1 Quanten Bit

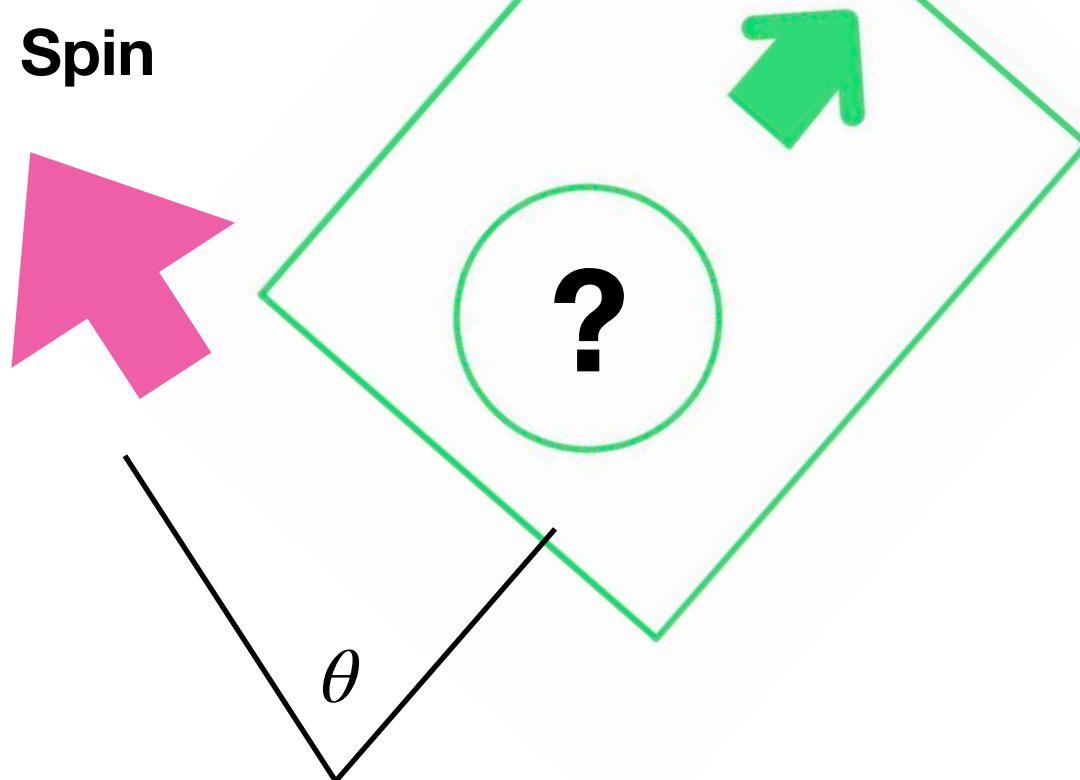
Beispiele für Messergebnisse:

Messung =
Wechselwirkung
von $\mathcal{A}$ mit Spin



Vor der Messung

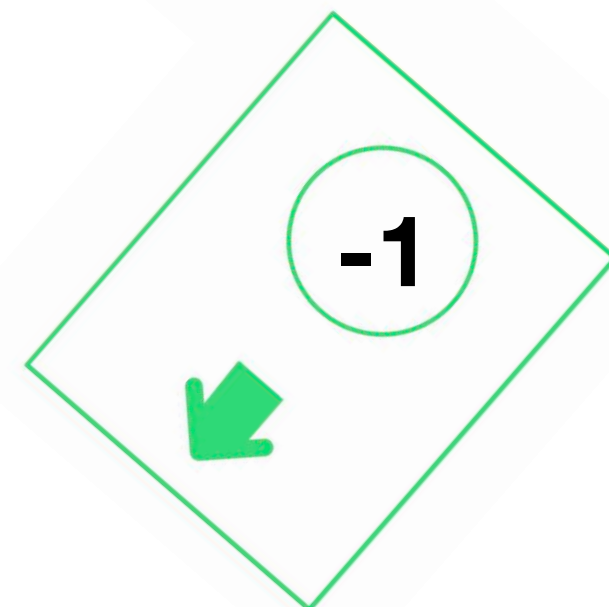
Spin



Nach der Messung

Spin

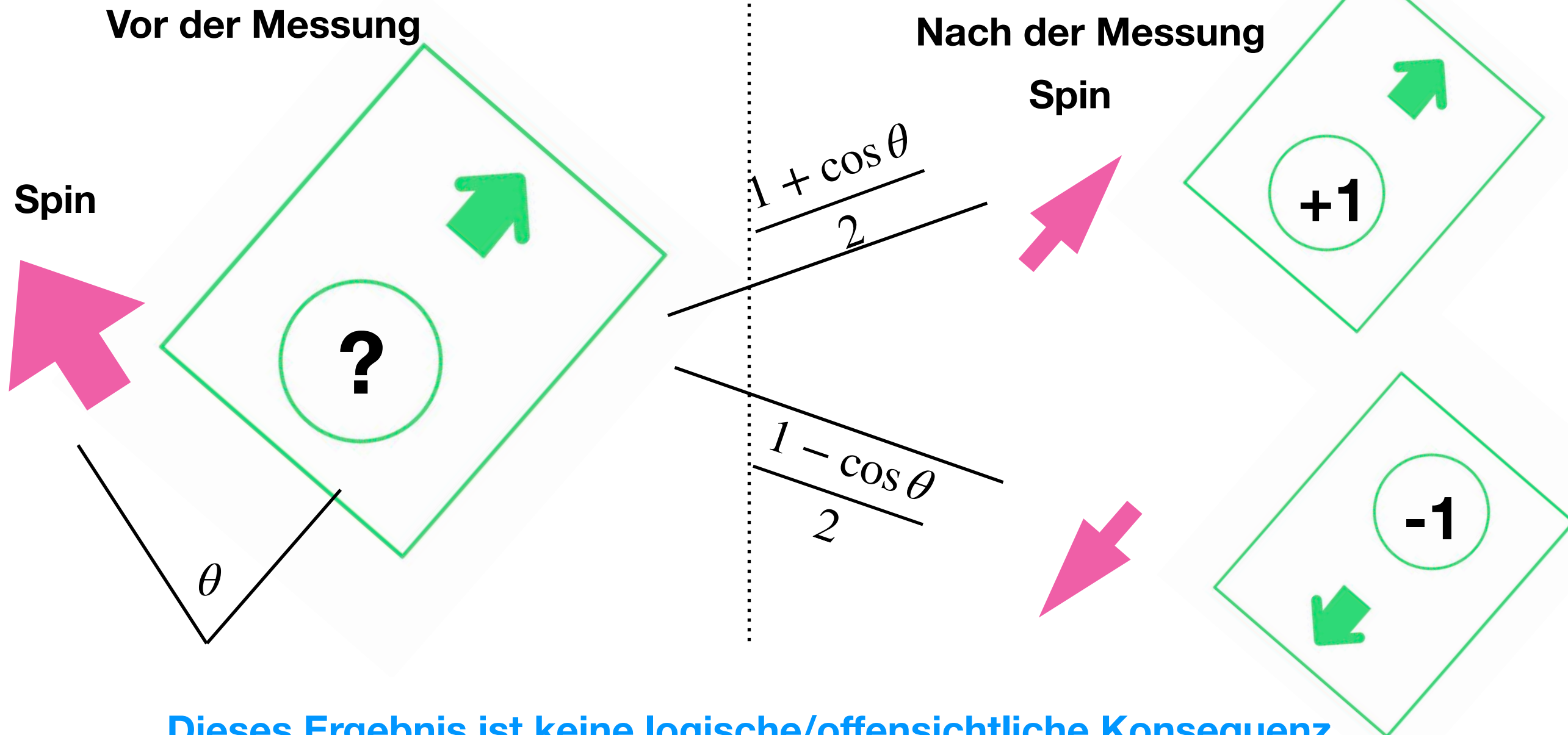
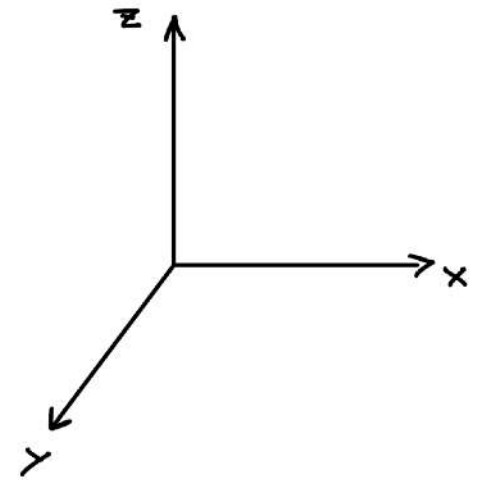
$$\frac{1 + \cos \theta}{2}$$
$$\frac{1 - \cos \theta}{2}$$



1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

Messung =
Wechselwirkung
von $\mathcal{A}$ mit Spin



Dieses Ergebnis ist keine logische/offensichtliche Konsequenz
sondern eine experimentelle Tatsache,
die nun verstanden/interpretiert werden muss

1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

**Macht man viele unabhängige Messungen, dann bekommt
man den Mittelwert**

$$\langle \sigma \rangle = \frac{1 + \cos \theta}{2} (+1) + \frac{1 - \cos \theta}{2} (-1) = \cos \theta$$

1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

Macht man viele unabhängige Messungen, dann bekommt man den Mittelwert

$$\langle \sigma \rangle = \frac{1 + \cos \theta}{2} (+1) + \frac{1 - \cos \theta}{2} (-1) = \cos \theta$$

Dies kann auch als Skalarprodukt der beiden Einheitsvektoren in Richtung des Spin $\vec{s}$ und des Messapparates $\vec{\mathcal{A}}$ geschrieben werden

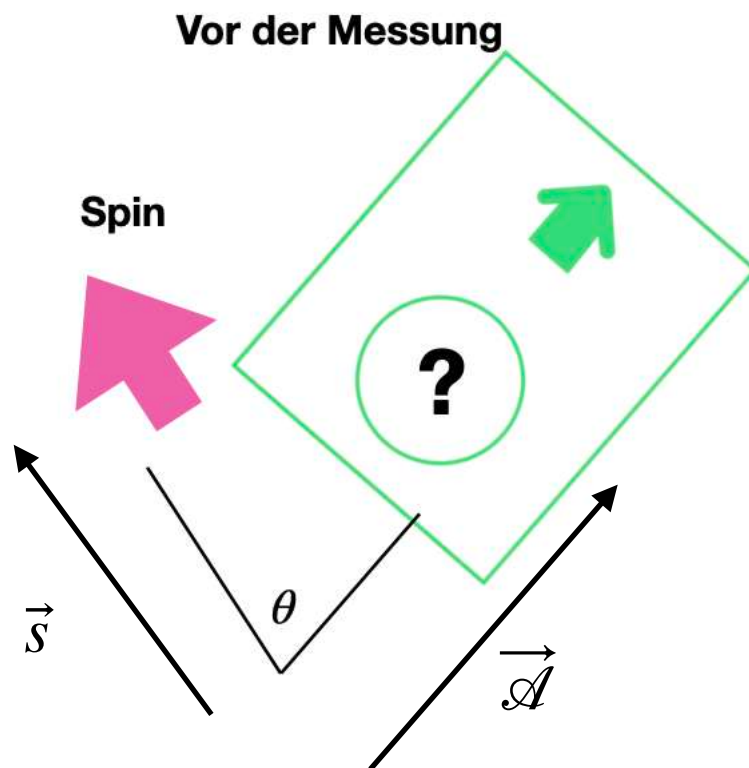
1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

Macht man viele unabhängige Messungen, dann bekommt man den Mittelwert

$$\langle \sigma \rangle = \frac{1 + \cos \theta}{2} (+1) + \frac{1 - \cos \theta}{2} (-1) = \cos \theta$$

Dies kann auch als Skalarprodukt der beiden Einheitsvektoren in Richtung des Spin $\vec{s}$ und des Messapparates $\vec{\mathcal{A}}$ geschrieben werden



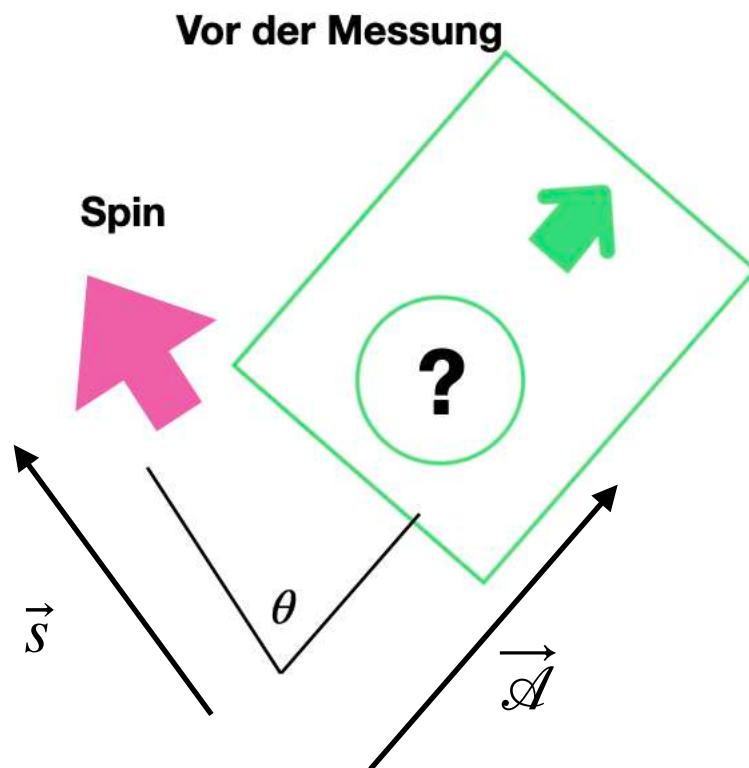
1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

Macht man viele unabhängige Messungen, dann bekommt man den Mittelwert

$$\langle \sigma \rangle = \frac{1 + \cos \theta}{2} (+1) + \frac{1 - \cos \theta}{2} (-1) = \cos \theta$$

Dies kann auch als Skalarprodukt der beiden Einheitsvektoren in Richtung des Spin $\vec{s}$ und des Messapparates $\vec{\mathcal{A}}$ geschrieben werden



$$\langle \sigma \rangle = \vec{s} \cdot \vec{\mathcal{A}} = \cos \theta$$

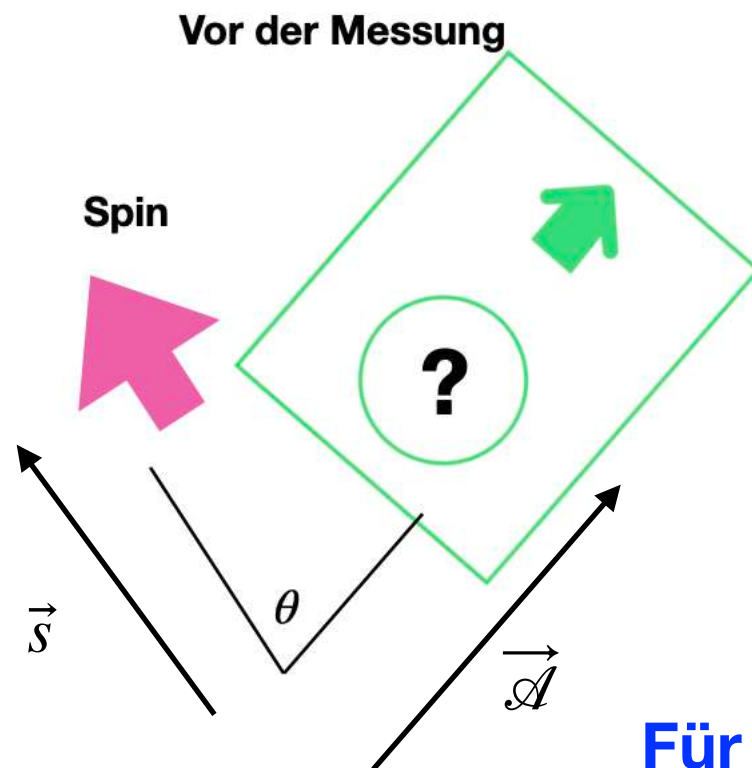
1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

Macht man viele unabhängige Messungen, dann bekommt man den Mittelwert

$$\langle \sigma \rangle = \frac{1 + \cos \theta}{2} (+1) + \frac{1 - \cos \theta}{2} (-1) = \cos \theta$$

Dies kann auch als Skalarprodukt der beiden Einheitsvektoren in Richtung des Spin $\vec{s}$ und des Messapparates $\vec{\mathcal{A}}$ geschrieben werden



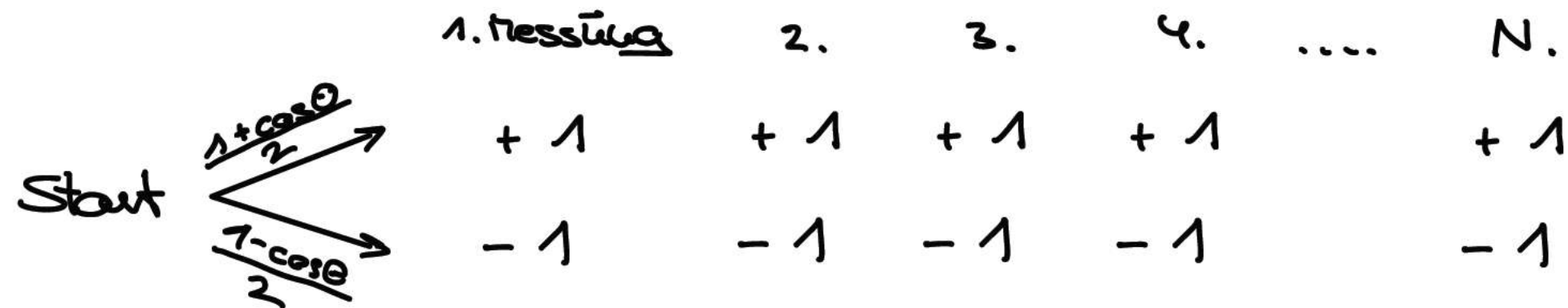
$$\langle \sigma \rangle = \vec{s} \cdot \vec{\mathcal{A}} = \cos \theta$$

Für eine einzelne Messung gibt es keinen Determinismus mehr!

1 Quanten Bit

Beispiele für Messergebnisse:

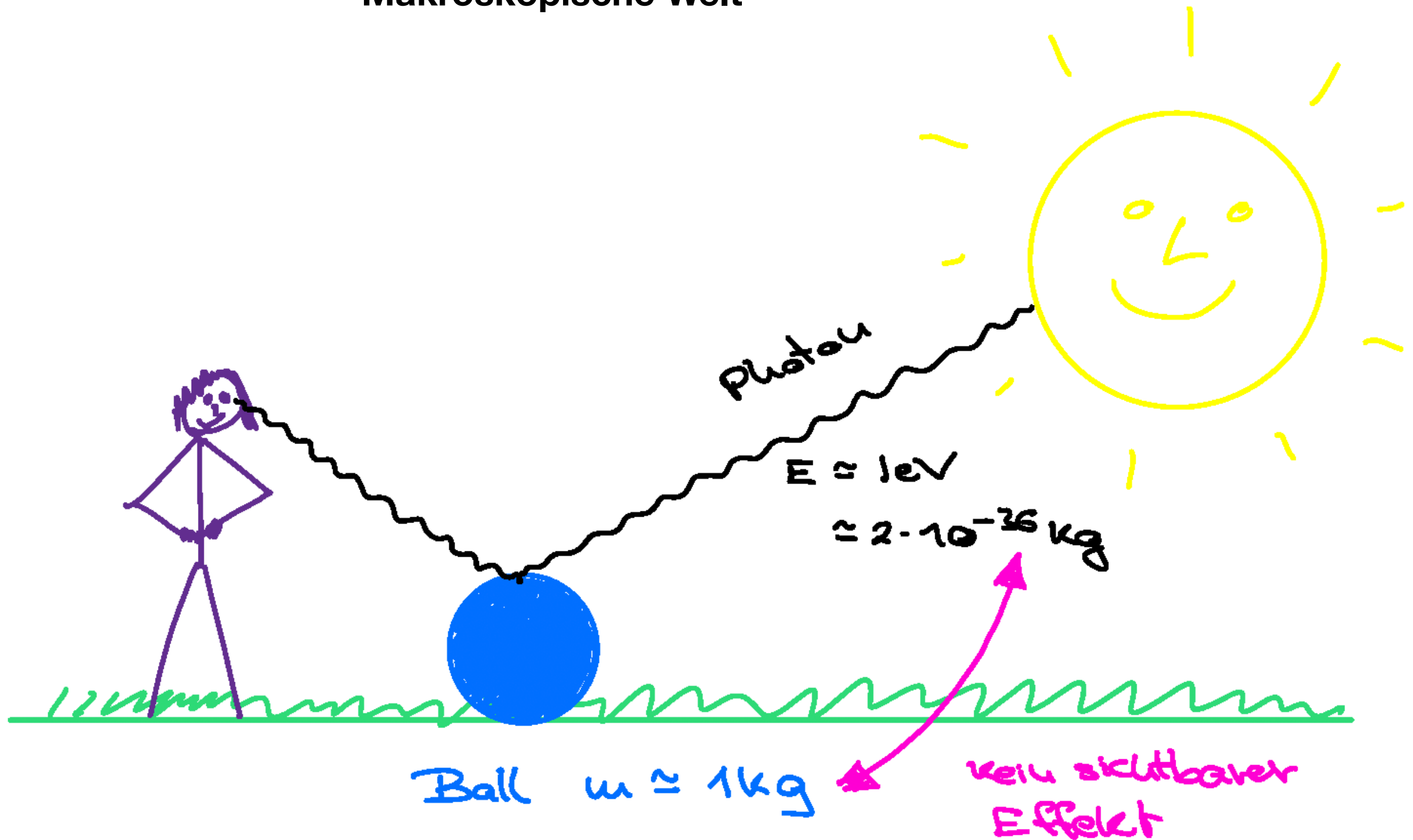
Was passiert, wenn wir am selben System N Messungen hintereinander machen



Die Messung beeinflusst das System!!!!
(Man präpariert den Zustand)

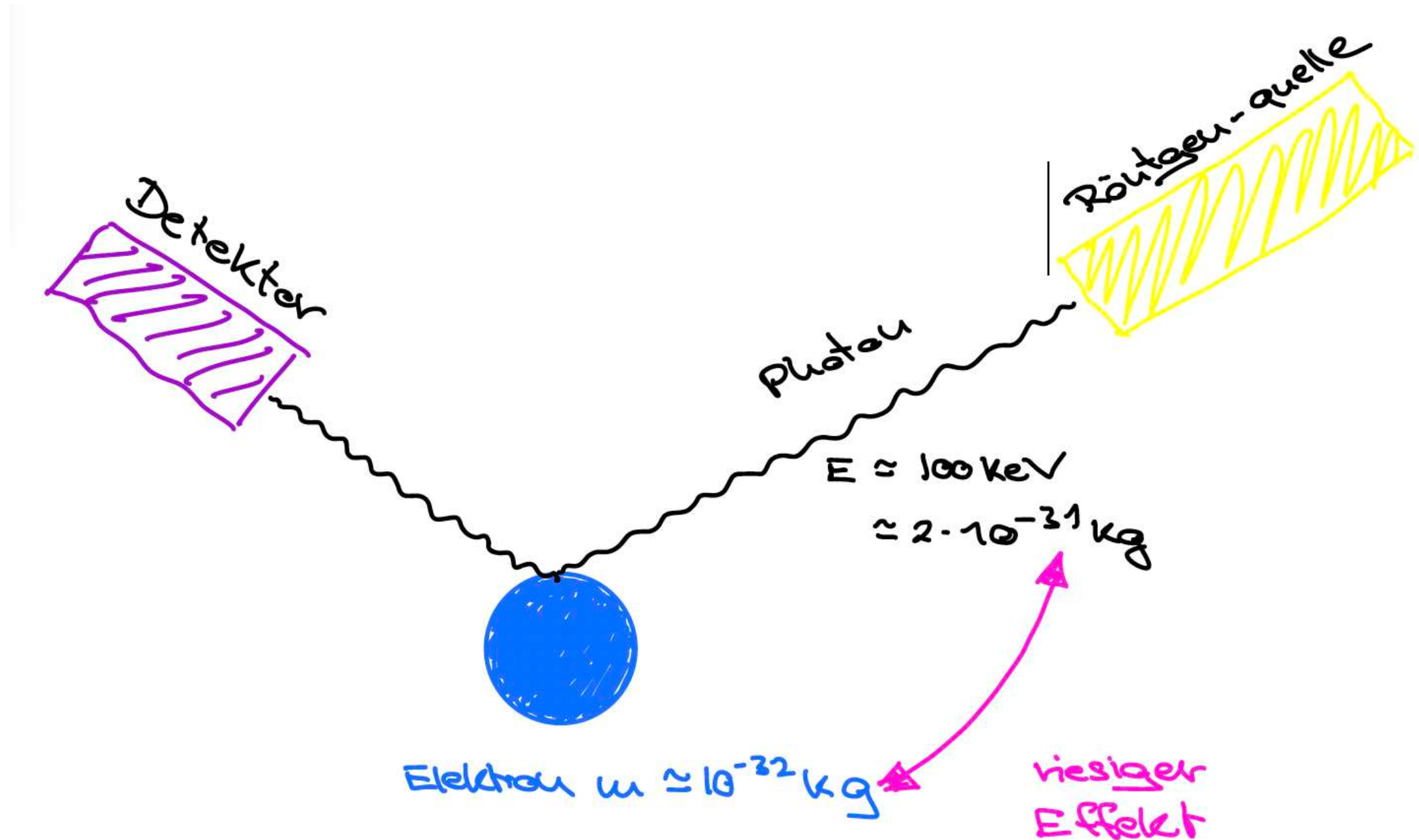
Messungen haben immer einen Einfluss

Makroskopische Welt



Messungen haben immer einen Einfluss

Mikroskopische Welt



Messungen haben immer einen Einfluss

In der mikroskopischen Welt beeinflusst eine Messung immer das System

In unseren vorhergehenden Beispielen wird der Zustand des Systems durch die Messung geändert

**Später sprechen wir von einem
Kollaps der Wellenfunktion
bei der Messung**

Zustände

Komplexe Zahlen

Vektorräume