

# Quantenmechanik

- Grundlage der modernen Physik
- entwickelt zwischen ~1900 - 1925
- experimentell sehr gut bestätigt
- widerspricht dem "gesunden Menschenverstand"



- Quantencomputer

- quantenmechanischer Indeterminismus

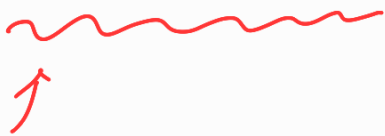
- quantenmechanische Verschränkung

Hintergrund:

"klassische" Physik  $\approx$  physik. Theorien vor 1900

$\rightarrow$  ausgezeichnete Beschreibung der

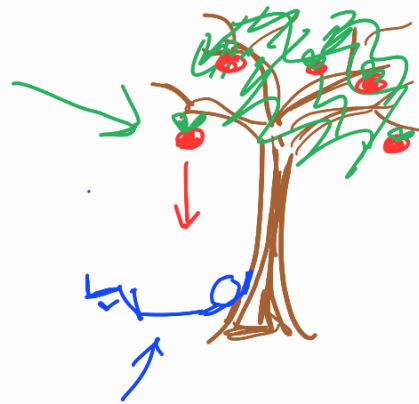
"Makrowelt":



z.B. Murrnen, Hebel, Maschinen, ...

insb. fallender Apfel:

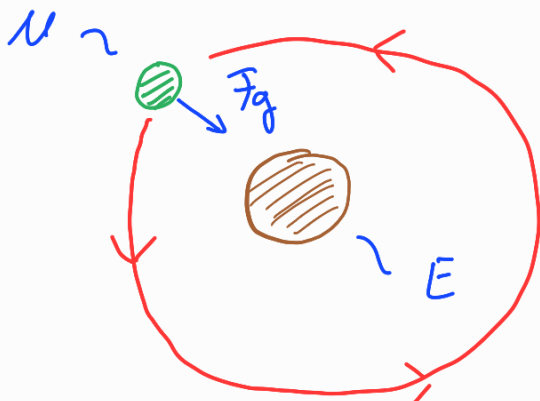
$$h(t) = h_0 - \frac{g}{2} t^2$$



Newton:

"Gesetze der Mechanik gelten  
universell!"

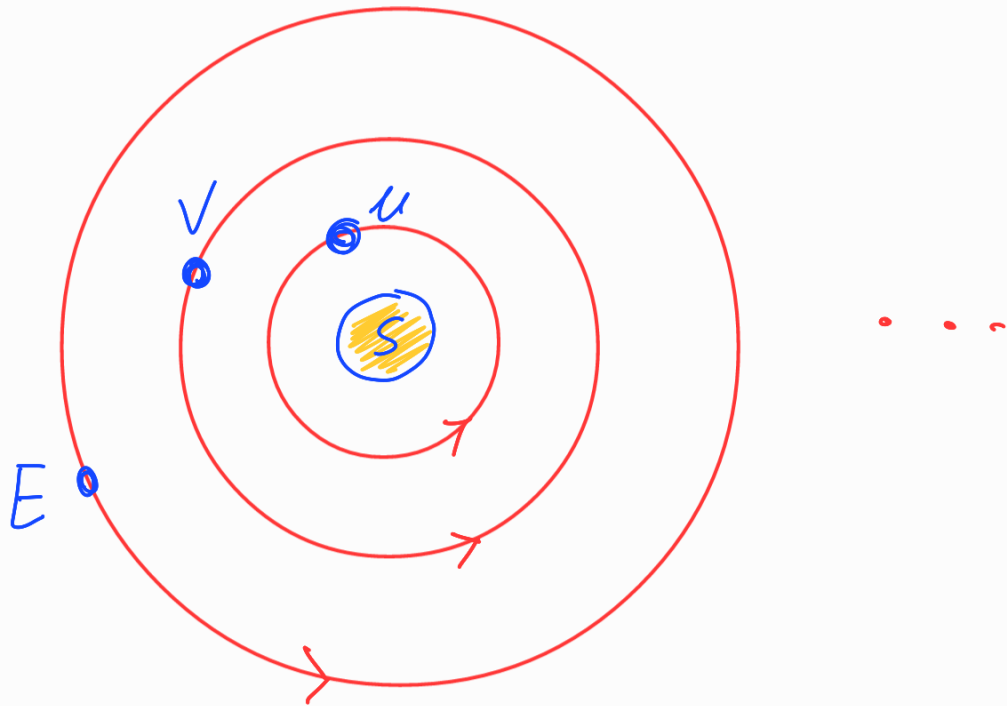
auch für Beweg. des Monds um Erde:



$$F_g \sim \frac{1}{r^2}$$

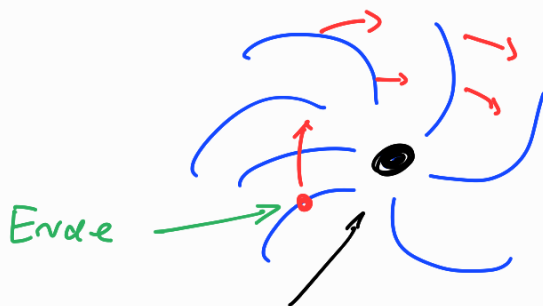
$\rightarrow$  beobachtete  
Mondbahn!

- Planeten um Sonne:



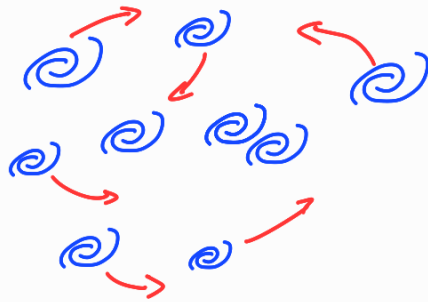
$F_g \sim 1/r^2 \rightarrow$  Bahnen wie von Kepler beobachtet!

- Bewegung der Materie (Sterne, Gas, Staub...) in unserer Galaxie:



( Schwarzes Loch,  $4 \cdot 10^6 m_\odot$ ,  $d = 27000 p_j$  )

- Bewegung von Galaxien im Galaxien-Cluster



Situation gegen Ende des 19. Jhdt.:

universiell gültige klassische Physik  
(Mechanik, Elektrodynamik) beschreibt  
Kosmos und alle Phänomene darin!  
(zumindest im Prinzip....)

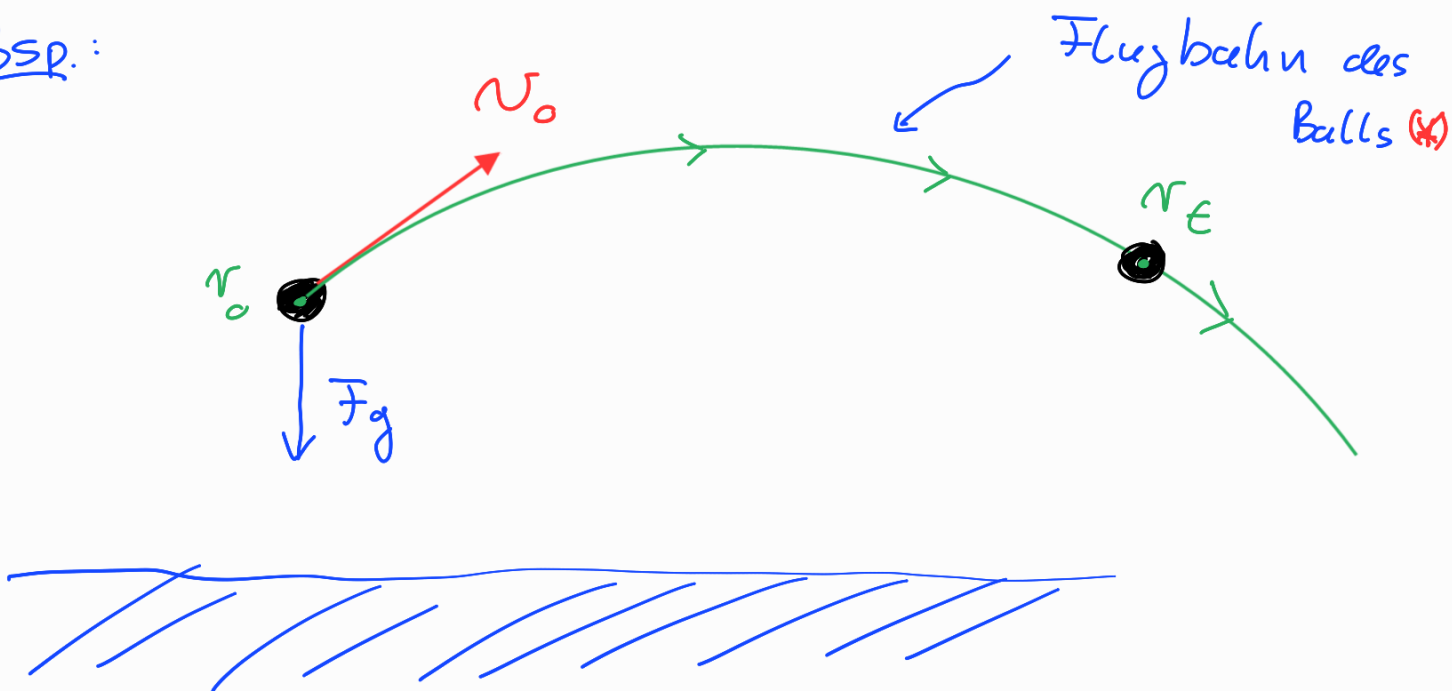


## Konsequenz:

alles zukünftige Geschehen ist vorherbestimmt durch Gesetze der Physik und dem gegenwärtigen Zustand des Universums!

## Determinismus (der kl. Physik)

↳ Bsp.:



(\*) vorherbestimmt durch Anfangs Ort  $r_0$  und Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$

Anekdote:

Laplace zu Napoleon auf die Frage, wo Gott in seiner Beschreibung des Universums zu finden sei:

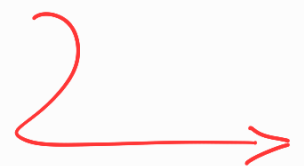
"Ihre Hoheit, dieser Hypothese bedarf es nicht!"

Determinismus der kl. Physik:

- ermöglicht Vorhersagen 😊
- lässt uns keine Handlungsfreiheit



... noch nicht das Ende der Geschichte!



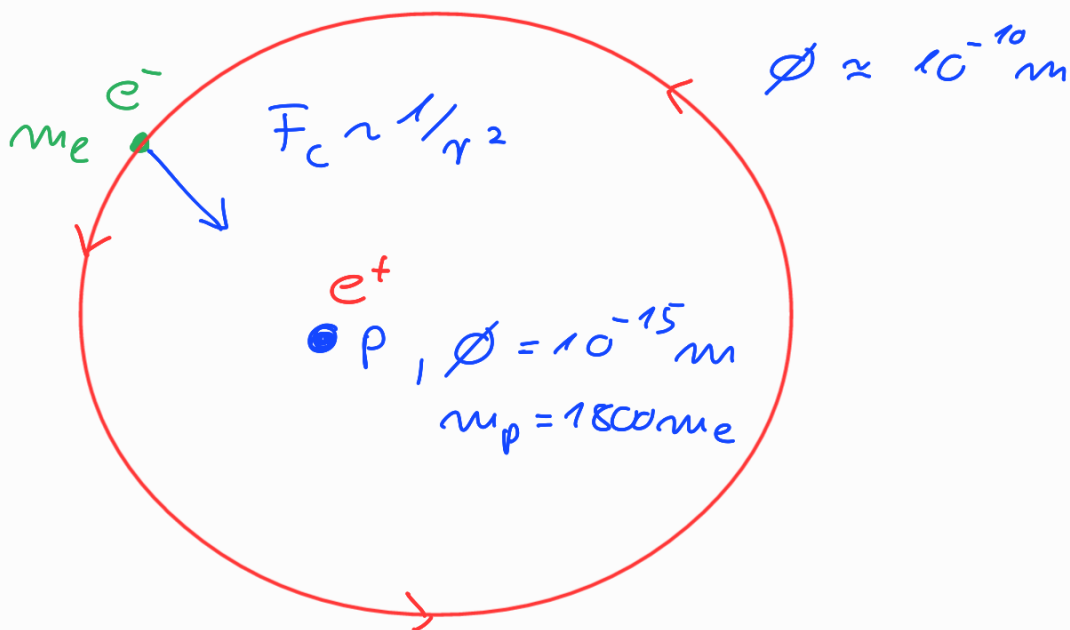
Klassische Physik vollkommen ungeeignet

zur Beschreibung der "Mikrowelt":

→ Atome, Moleküle,  
Elementarteilchen, ...

BSP:

Stabilität des Wasserstoffatoms



↑  
Keplerbahn?

instabil aufgrund Abstrahlung elektromagnetischer Wellen:



ebenso unklarlich:

- Spektrallinien
- Hohlraumstrahlung
- Photoeffekt
- Eigenschaften der Elemente
  - chem. Bindungen
  - 
  - 
  -

↳ Entwicklung einer neuen physik. Theorie:

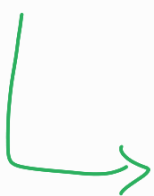
1900: Planck

1905: Einstein

1913: Bohr

1923: Stern & Gerlach

1925: Born, Heisenberg, Jordan, Dirac,  
Schrödinger



Quantenmechanik!



## Quantenmechanik:

- liefert Antworten (bis heute!)
- schwer verständlich (bis heute!)

## Was ist Quantenmechanik?

hier: zwei wesentliche Aspekte

- ① Überlagerungsfähigkeit der Zustände  
(Superpositionsprinzip)
- ② fundamentale Bedeutung der Messung

Bsp.: Teilchen im "Doppelmuldenpotential"

makroskopisch:

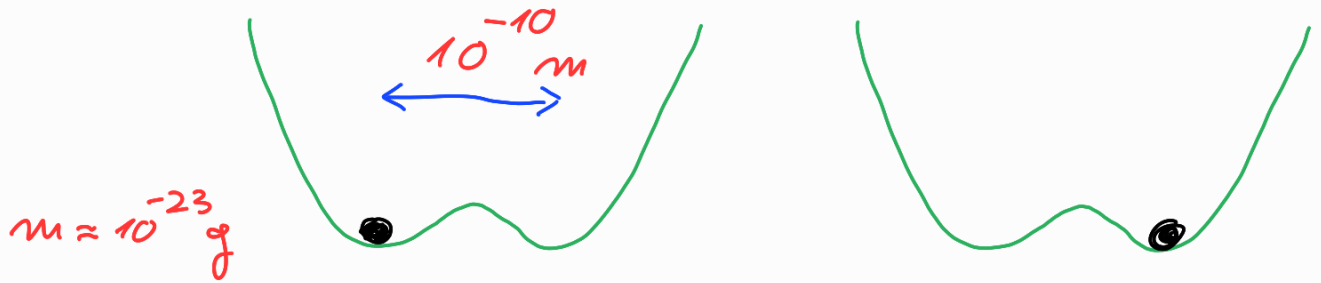


Zustand:

L

R

mikroskopisch:



Zustände:

L

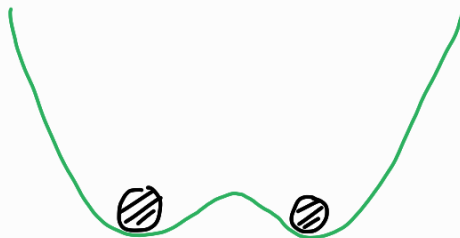
R

QM postuliert: Teilchen kann auch

im Überlagerungszustand (Superposition)

$$" U = L + R " \quad (*)$$

Siehe:

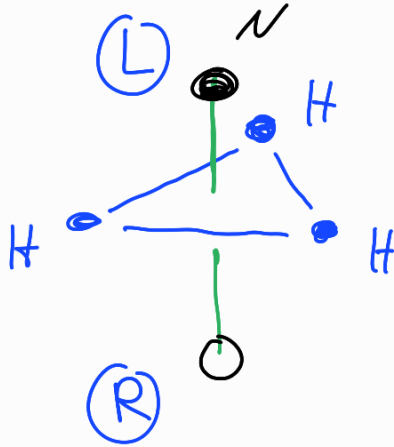


" L + R "

(\*) kann (und muss!) präzise definiert werden; mittels geeigneter Mathematik

┌  
gibt es ein solches System?

z. B. Ammoniak-Molekül:  $\text{NH}_3$ :



physikalische Bedeutung des Zustands

$$U = L + R \quad ?!?$$

ist Teilchen links oder rechts  
oder vielleicht zugleich links  
und rechts ?!?

# Problem:

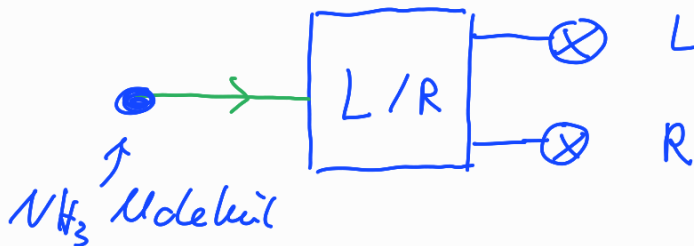
man kann nicht einfach nachschauen!

(da System (=  $NH_3$  Molekül!) viel zu klein!)

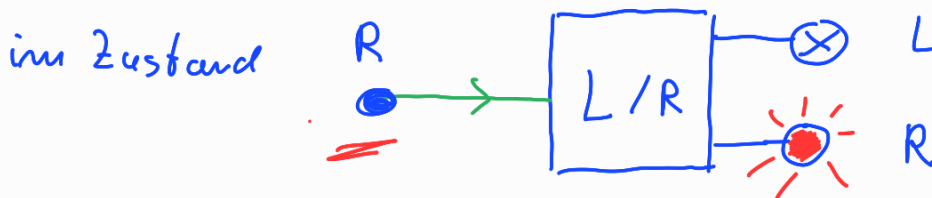
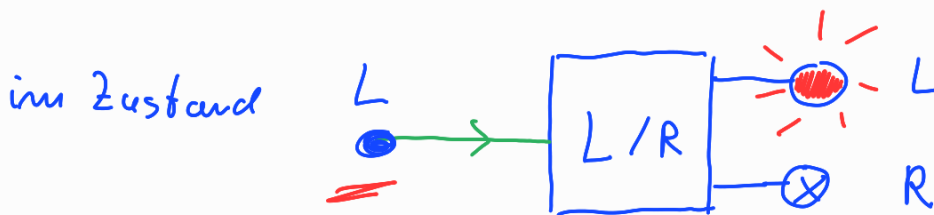
QM "löst" Problem mittels

## ② Messpostulat:

es gibt Messgerät



so, dass



Fortsatzung →

Falls  $NH_3$ -Molekül in einem Zustand

$Z \neq L, R$ , dann Messergebnis  
unbestimmt und zufällig "L" oder "R"

mit Wahrscheinlichkeiten  $P_L$  bzw.  $P_R$ !

$P_L$  und  $P_R$  können für bekannten

Zustand  $Z$  exakt bestimmt werden.

z. B. für "U = L + R":

$$P_L = \frac{1}{2} = P_R$$

( $\rightarrow$  experimentell überprüfbare Vorhersage!)

d.h.: physikalische Bedeutung der

Zustände nur indirekt durch

Wahrscheinlichkeiten d.h. Aussagen über Mess-  
ergebnisse

- T - Überlagerungsfähigkeit der Zust. (1)  
 - Messpostulat (2)  
 (- zeitliche Veränderung der Zust. (3))
- }  $\cong$  QM
- └

Entspricht die Unbestimmtheit der  
 QM einem fundamentalen Unbestimmtheit  
der Natur oder ist sie bloß  
 Ausdruck für die Unzulänglichkeit  
der QM ?

→ dazu zum Abschluss ein

Gedanken-Experiment nach

A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen

(EPR) 1935



Anne in Aachen:



Bernd in Berlin:



$\sim 600\text{km}$



Zustand  $Z_1$ : L

L :  $(L, L)$

Zustand  $Z_2$ : R

R :  $(R, R)$

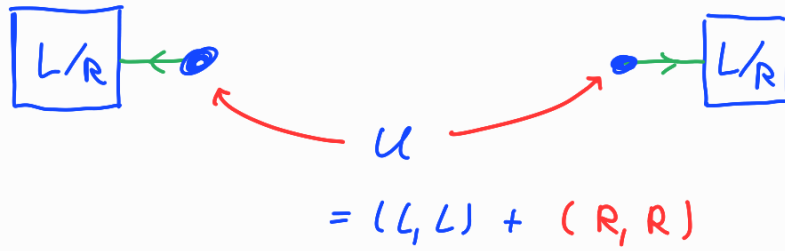
→ QM: es gibt auch Überlagerungszustand

$$U = Z_1 + Z_2 = (L, L) + (R, R) \quad !$$

betrachte simultane L/R-Messungen  
von Anne in Aachen und Bernd in  
Berlin an sehr vielen  $NH_3$ -Paaren,  
jeweils im Zustand  $U$ :

Aachen

Balim



2

Nr.	Aaue	Baue
1	L	L
2	R	R
3	L	L
4	L	L
5	R	R
6	L	L
7	R	R
8	R	R
9	L	L
...	...	...

- zufällige Ergebnisse !
- aber strikte Korrelation !

EPR: 1) Messungen in 600km Distanz

können sich nicht gegenseitig beeinflussen !

2) Messergebnisse müssen vor Messung schon feststehen haben !





Unbestimmtheit der Messergebnisse  
nur scheinbar; QM unvollständig

(sagen EPR)

Verfeinerung des Arguments durch

John S. Bell (~ 1969)

→ experimentell überprüfbare Aussagen!

Was sagen die Experimente?

(u.a. von Clauser, Aspect, Zeilinger)

Aussagen aufgrund der Argumente  
von Einstein, Podolsky, Rosen, Bell treffen  
nicht zu!

d.h. QM nicht wiederlegt !