

Vorlesung 3

Kolloquium diese Woche (21. Oktober, 15:15)



Physikalisches Kolloquium

Fachgruppe Physik/Astronomie der Universität Bonn



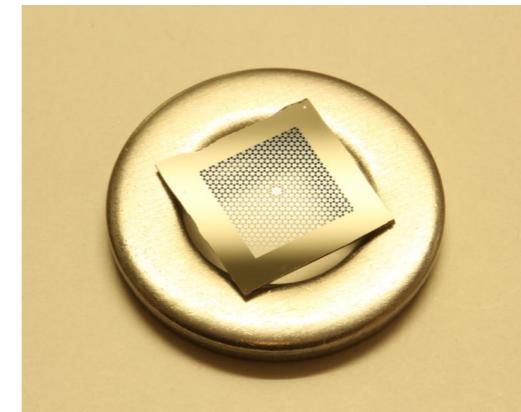
Freitag, 21. Oktober 2022, 15 Uhr c.t. im Hörsaal I des Physikalischen Instituts



Eugene S. Polzik

Niels Bohr Institute, Copenhagen University

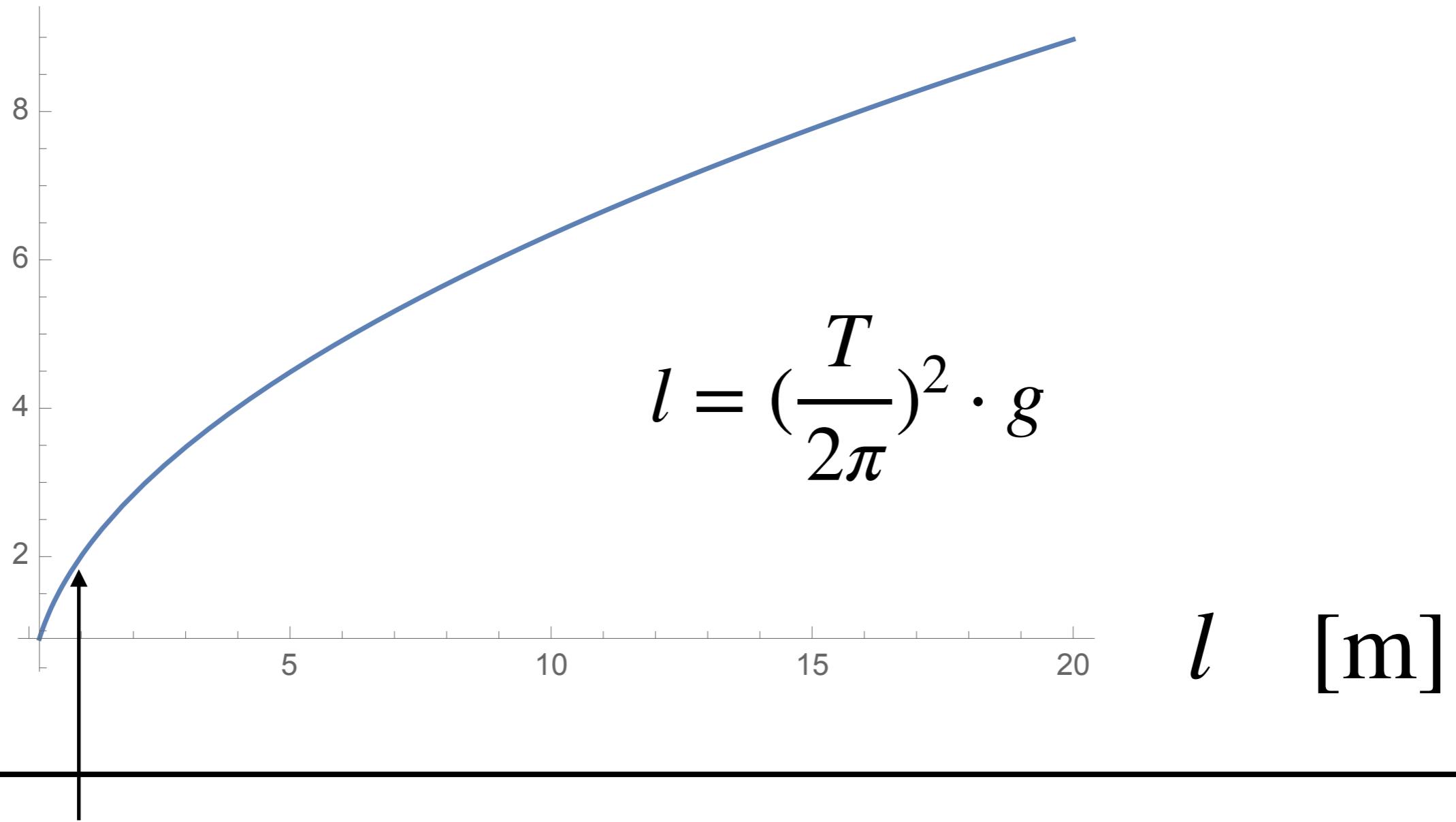
**„Quantum physics with
macroscopic objects“**



Recent ideas and technological developments have made possible studies of macroscopic objects deep in the quantum regime. In the talk I will discuss experiments where an entangled Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) state has been generated between distant mechanical and atomic oscillators. The concept of an oscillator with an effective negative mass crucial for those experiments will be presented. Progress towards application of those ideas to gravitational wave detectors following the proposal will be reported. Another challenge within quantum physics of macroscopic objects is generation of Fock states corresponding to single quantum excitations of an oscillator. Progress along those lines with Fock states of motion and of a collective atomic spin will be presented.

Es gelten die Corona-Regelungen des Landes Nordrhein-Westfalen

T [s]



z.B. für $T = 2$ s benötigt
man ein Pendel der Länge

für $T = 1$ s

$$l = \left(\frac{2 \text{ s}}{2\pi}\right)^2 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0.994 \text{ m}$$

$$l = \left(\frac{1 \text{ s}}{2\pi}\right)^2 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0.248 \text{ m}$$

Versuch: Galilei-Pendel

bis 1956: $1 \text{ s} = \frac{1}{60 \cdot 60 \cdot 24}$ eines mittleren Sonnentages

Sonnentag:

Wenn die Erde mit Winkelgeschw. ω_E um ihre eigene Achse rotiert dann

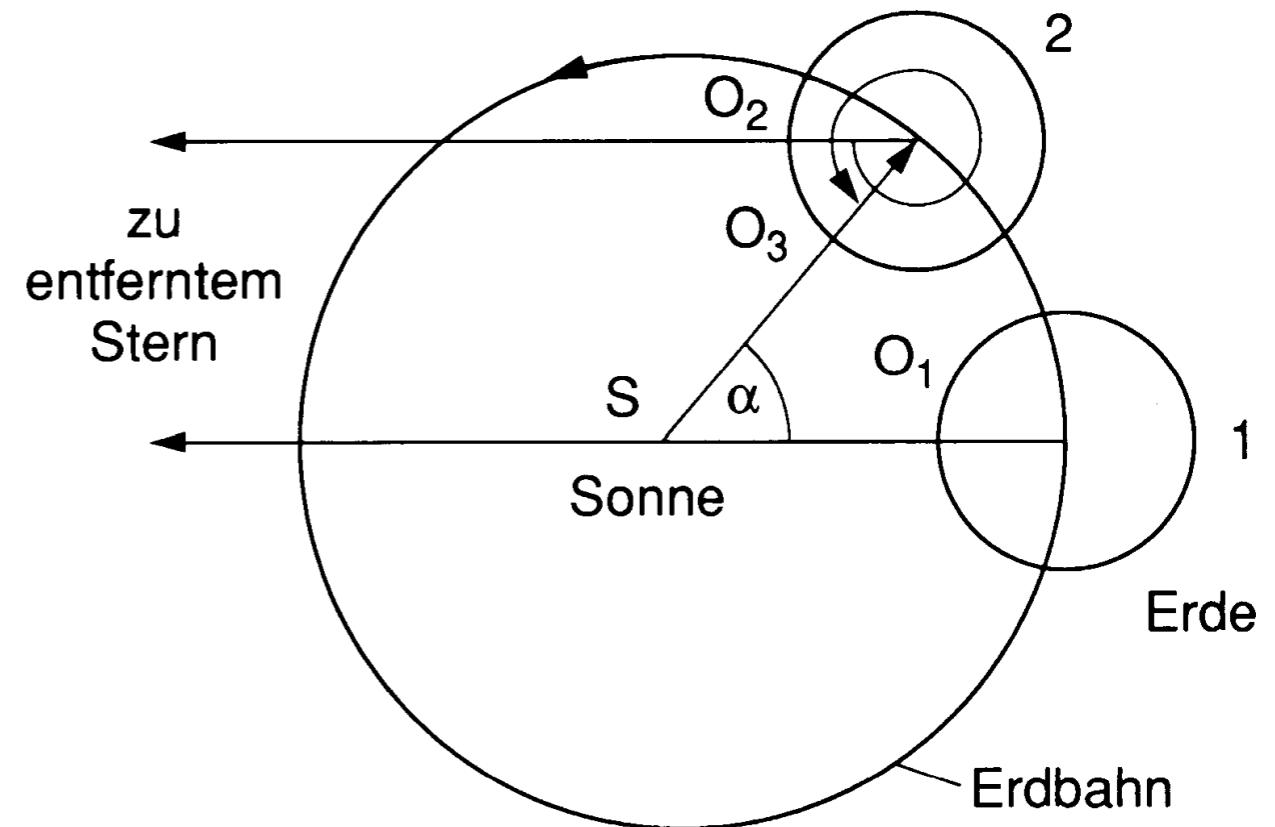
$$d_{\odot} = (2\pi + \alpha)/\omega_E$$

mit $\alpha \approx 2\pi/365$ dem Winkeleffekt durch die Erde um die Sonne.

Sterntag:

Um den Effekt der Relativbewegung der Erde um die Sonne zu reduzieren, kann man auch zwei aufeinander folgende Kulminationen eines weit entfernten Sterns nutzen

$$d_{\text{Stern}} = (2\pi)/\omega_E$$

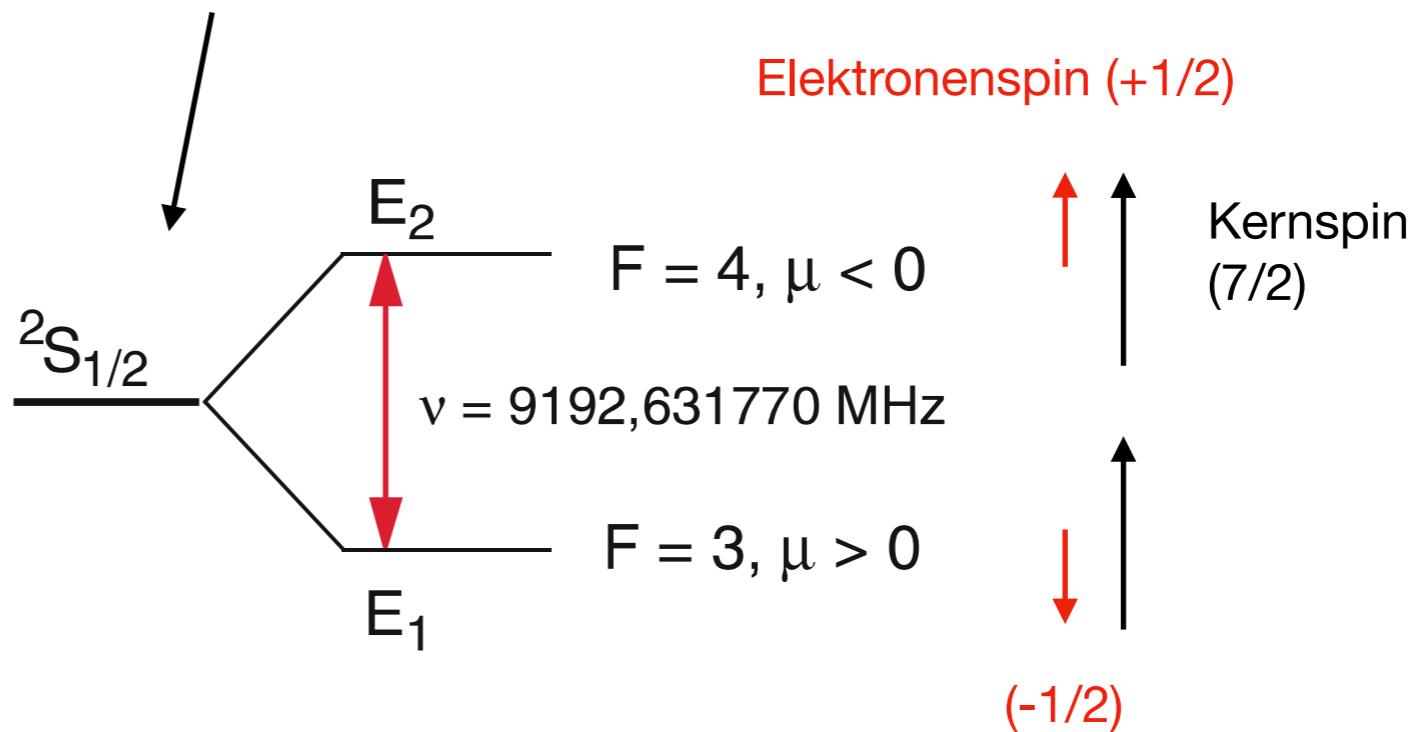
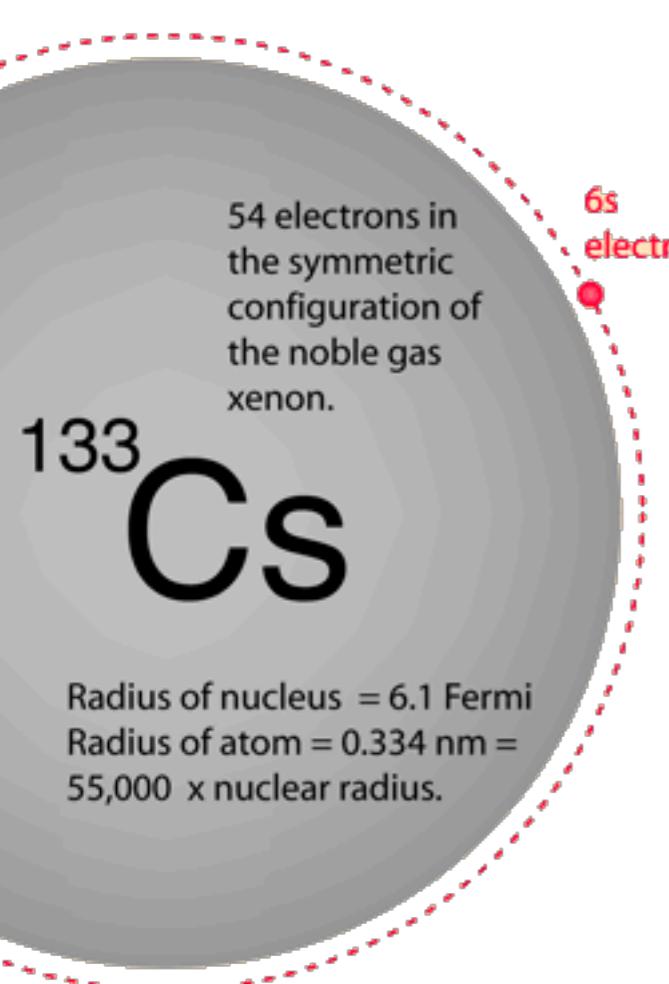


$$1 \text{ a} = 365.25 d_{\odot} = 366.25 d_{\text{Stern}} \approx \pi \cdot 10^7 \text{ s}$$

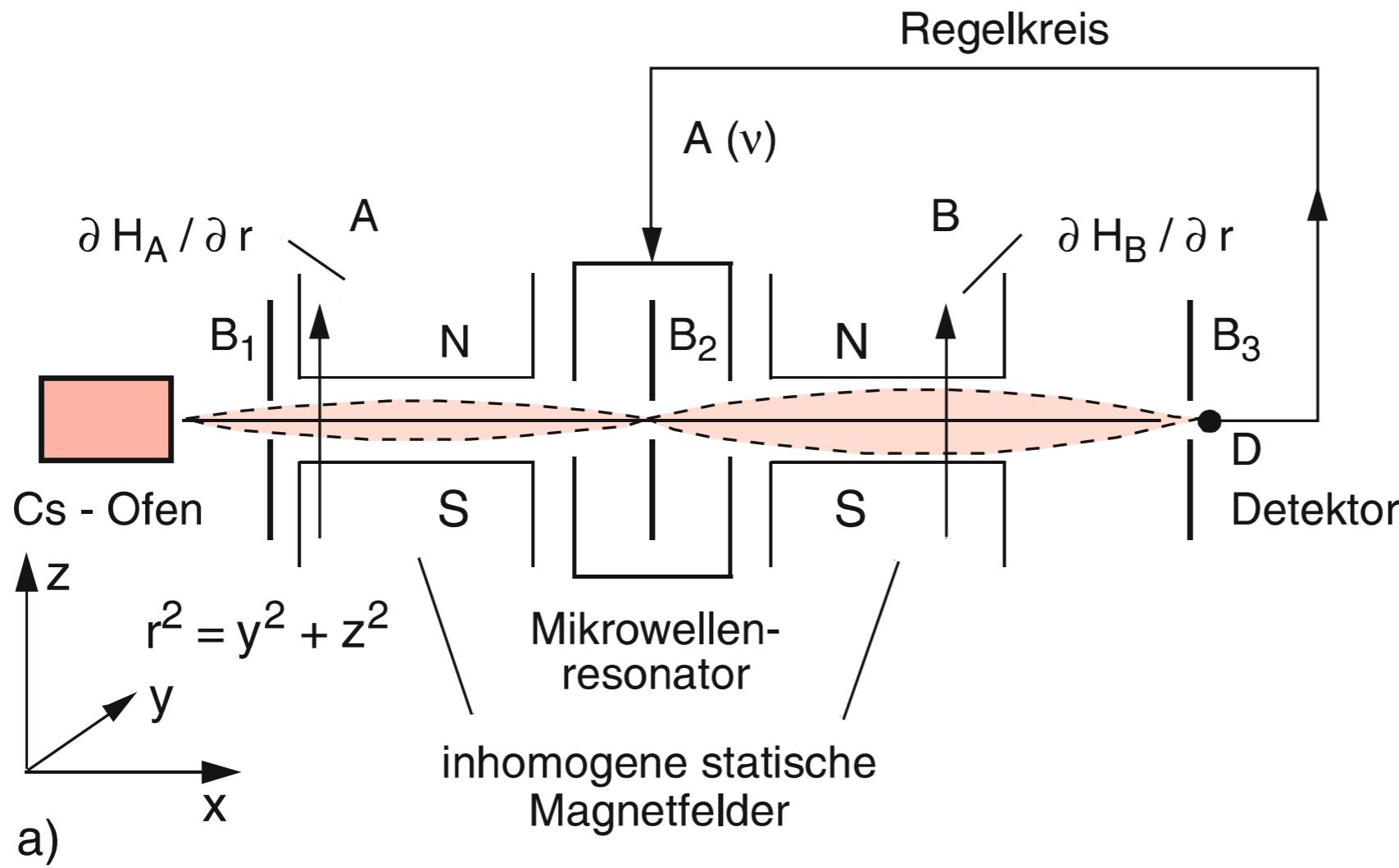
Genauigkeit nur 10^{-7} da $\omega_E \neq \text{const}$

(Wird aber noch genutzt zum Abgleich der Atomzeit mit der Sonnenzeit
 → Schaltsekunde)

Heute: $1 \text{ s} = 9'192'631'770$ -fache der Schwingdauer des $S_{1/2}$
 Übergangs von Cs-133-Atomen

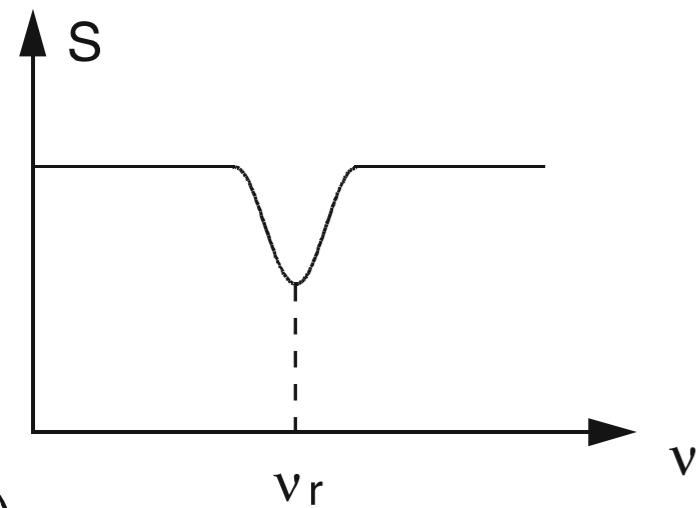


$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu \quad \nu = 9192,631770 \text{ MHz}$$



Cs-Atome verdampfen aus einem Ofen im Vakuum und werden durch Blenden kollimiert.

Signal am Detektor D



Zwischen zwei Sechspolmagneten A und B, welche auf die Atome wie eine optische Linse wirken.

Wenn man im Mirkowellenresonator nun eine Frequenz $\nu = (E_2 - E_1)/\hbar$ einstellt, regt man die Elektronen vom $F = 3 \rightarrow F = 4$ Übergang an, was das magnetische Moment ändert. Dadurch erreichen sie den Detektor D nicht mehr.

Internationale Atomzeit (TAI) aus ca. 2600 Atomuhren bei ca. 60 Zeitinstituten

(In D: PTB Braunschweig)

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx 10^{-14} \quad (\text{heute schon } 10^{-17} \text{ erreicht})$$

Verbreitung über den Langwellensender **DCF77**

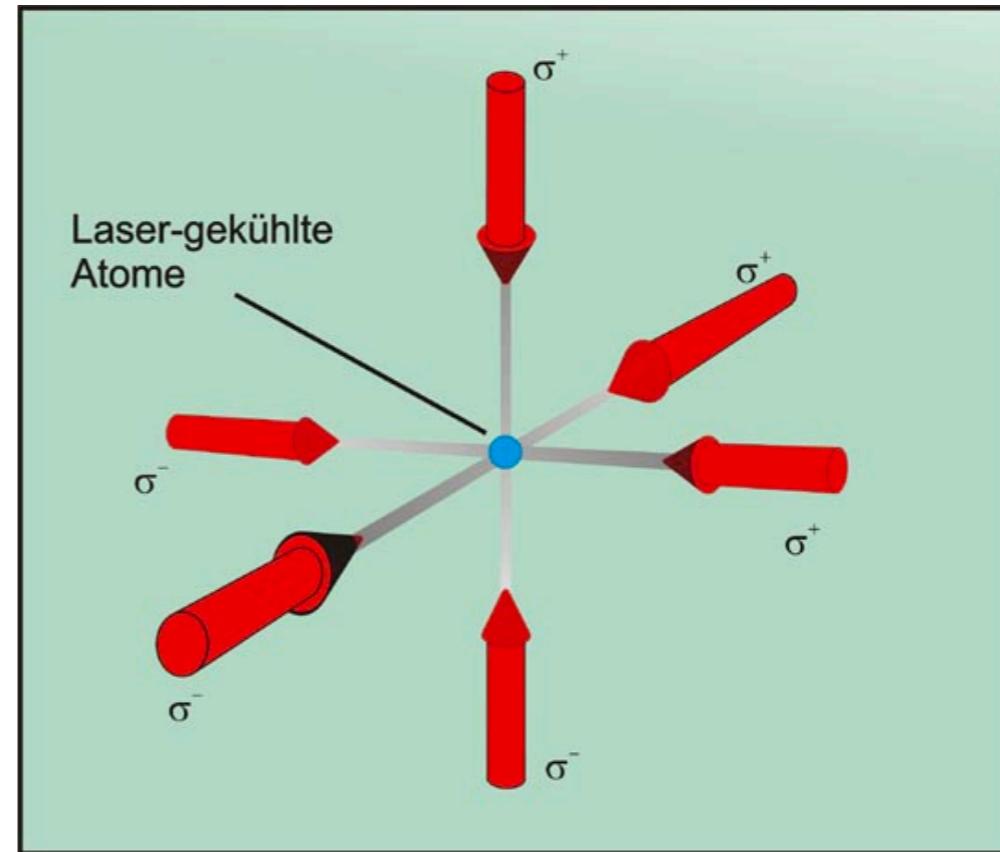
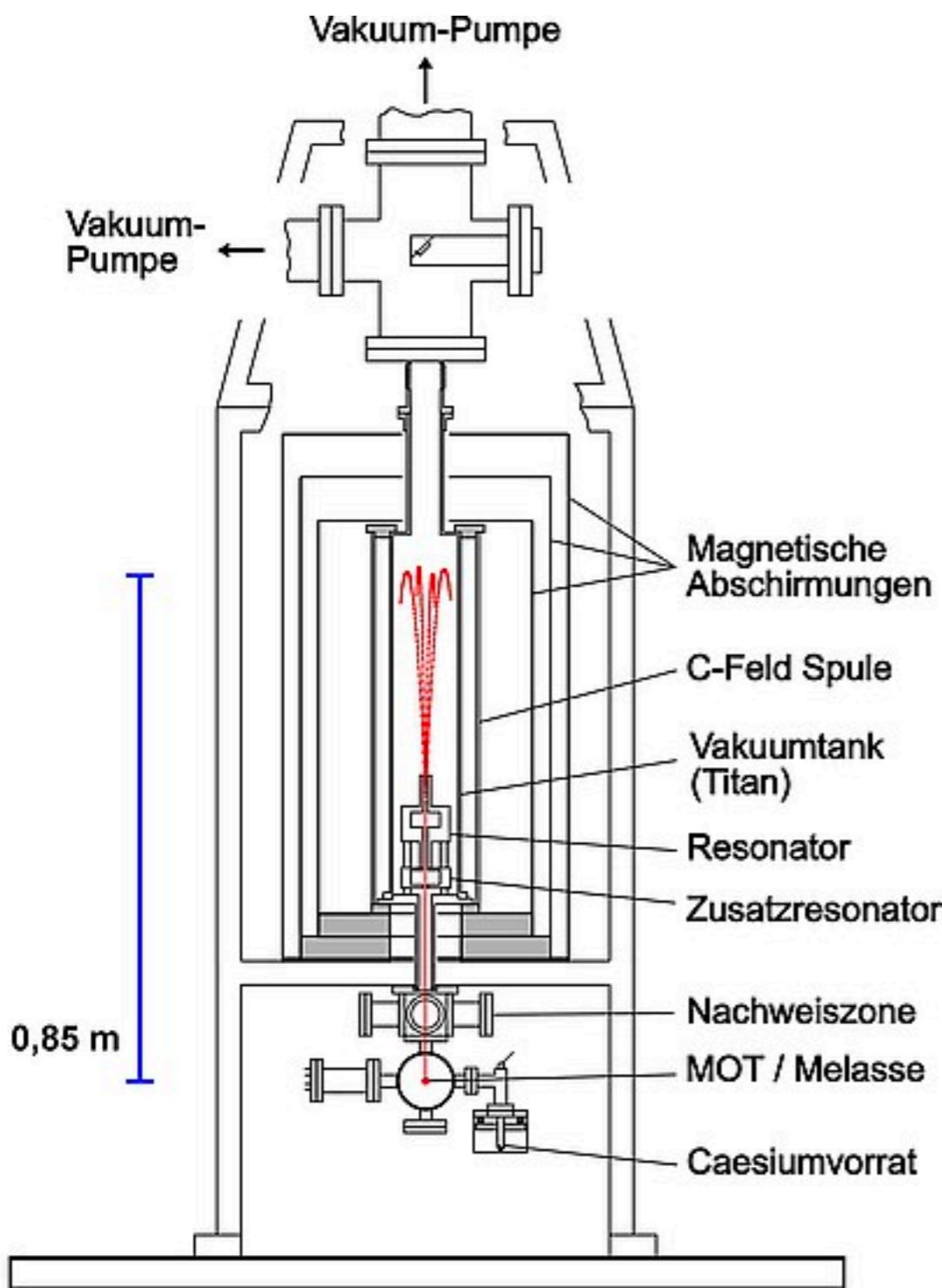
Die Physikalisch Technische Bundesanstalt Braunschweig betreibt eine Gruppe von Atomuhren mit einer rechnerischen Gangabweichung von 1 Sekunde in 1 Million Jahren. Die so erhaltene Uhrzeit wird im BCD-Code kodiert und von einem Langwellensender (77,5 kHz) in Mainflingen bei Frankfurt abgestrahlt (D = Deutschland; C = Langwelle; F = Frankfurt, 77 → 77,5 kHz; DCF 77).



Sendeanlage in Mainflingen; drei der 200 m hohen Maste halten die Antenne mit Dachkapazität für DCF77.



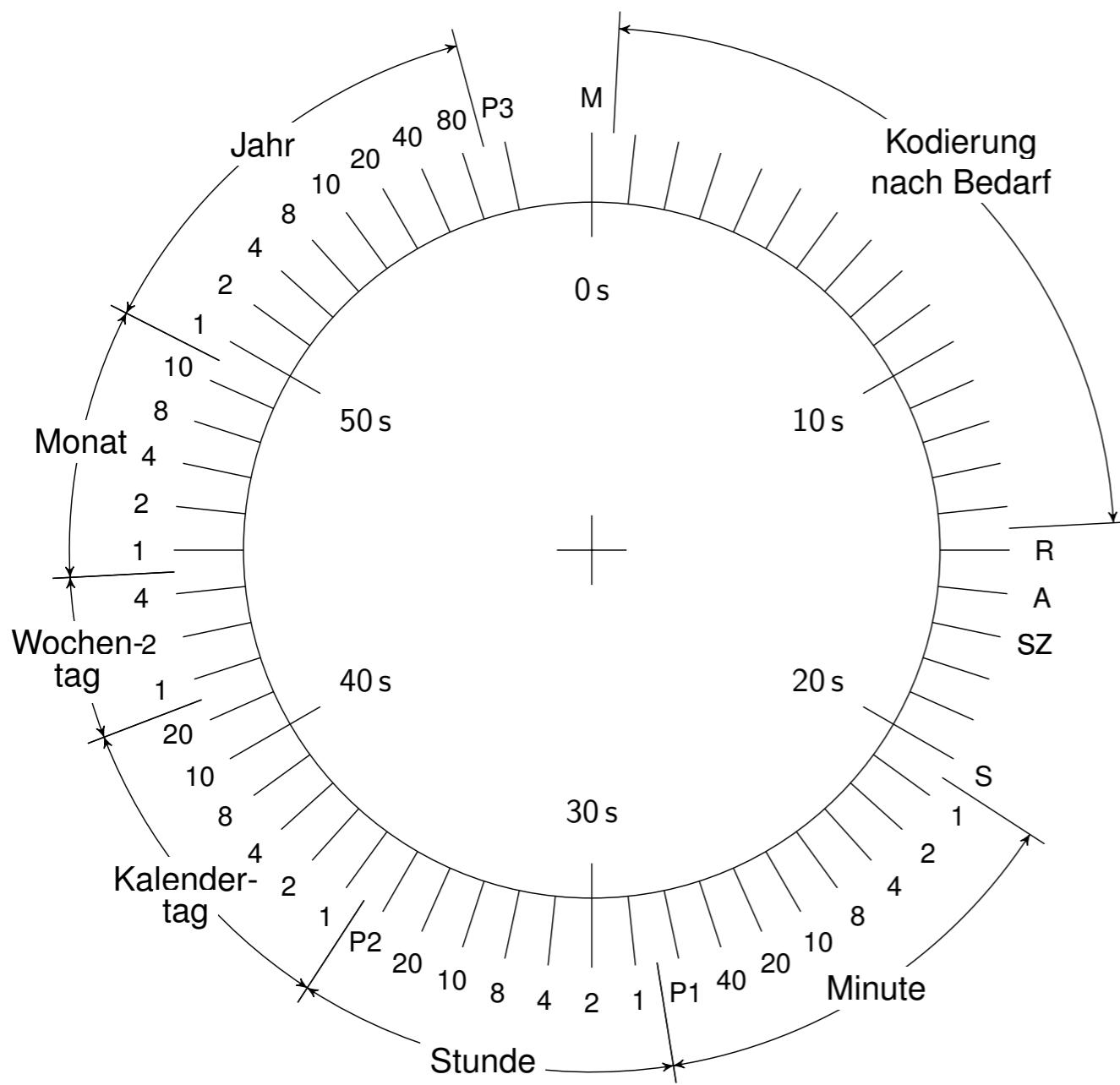




In einer magnetooptischen Falle (MOT) werden ca. 10^7 Cs-Atome aufgesammelt und durch Laserkühlung und sogenannte "optische Melasse" auf eine Geschwindigkeit von einigen cm/s abgebremst. Durch geeignet eingestrahlte Laserfelder wird die Wolke kalter Cs-Atome auf eine Höhe von fast 1 m geworfen. Die Wechselwirkungszeit entspricht der Flugzeit zwischen den beiden Passagen durch den Mikrowellen-Resonator und liegt im Bereich von 0,5 s. Am Ende eines Messzyklus wird mit einem optischen Nachweisverfahren der Energiezustand der Cs-Atome nach der Mikrowellen-Anregung bestimmt.

Zeitcode: Die unterschiedliche Dauer der Sekundenmarken von 0,1 s bzw. 0,2 s wird dazu benutzt, Uhrzeit und Datum mit einem einstelligen binären Code zu übertragen. Dabei entsprechen Sekundenmarken mit einer Dauer von **0,1 s der binären Null** und verlängerte Sekundenmarken mit einer Dauer von **0,2 s der binären Eins**. Da die Zehnerstellen mit der zweiten gesendeten Reihe von bits gesendet werden, haben sie im Kreisschema die Nummern 10, 20 bis 80.

Die Positionen der Sekundenmarken sind hier in einem Kreisschema von 60 s aufgeführt.



Bit	Bedeutung	
20	„1“: Beginn der Zeitinformation	
21		Bit für 1
22	Minute (Einer)	Bit für 2
23		Bit für 4
24		Bit für 8
25	Minute (Zehner)	Bit für 10
26		Bit für 20
27		Bit für 40
28	Parität Minute	
29		Bit für 1
30	Stunde (Einer)	Bit für 2
31		Bit für 4
32		Bit für 8
33	Stunde (Zehner)	Bit für 10
34		Bit für 20
35	Parität Stunde	
36		Bit für 1
37	Kalendertag (Einer)	Bit für 2
38		Bit für 4
39		Bit für 8
40	Kalendertag (Zehner)	Bit für 10
41		Bit für 20
42	Wochentag	Bit für 1
43		Bit für 2
44		Bit für 4

45	Monatsnummer (Einer)	Bit für 1
46		Bit für 2
47		Bit für 4
48		Bit für 8
49	Monatsnummer (Zehner)	Bit für 10
50		Bit für 1
51		Bit für 2
52		Bit für 4
53	Jahr (Einer)	Bit für 8
54		Bit für 10
55		Bit für 20
56		Bit für 40
57	Jahr (Zehner)	Bit für 80
58		Parität Datum

- M = Minutenmarke (angekündigt von einem nicht-gesendeten 59. Impuls) zur Synchro-nisation des Zeitzeichenempfängers
- P1,P2,P3 = Prüfbits
- R = Antennenbit
- A = Ankündigungsbitt für Übergang auf Sommerzeit
- SZ = Sommerzeitbit
- S = Startbit der kodierten Zeitinformation

Bit	Bedeutung	
20	„1“: Beginn der Zeitinformation	
21	Minute (Einer)	Bit für 1
22		Bit für 2
23		Bit für 4
24		Bit für 8
25		Bit für 10
26	Minute (Zehner)	Bit für 20
27		Bit für 40

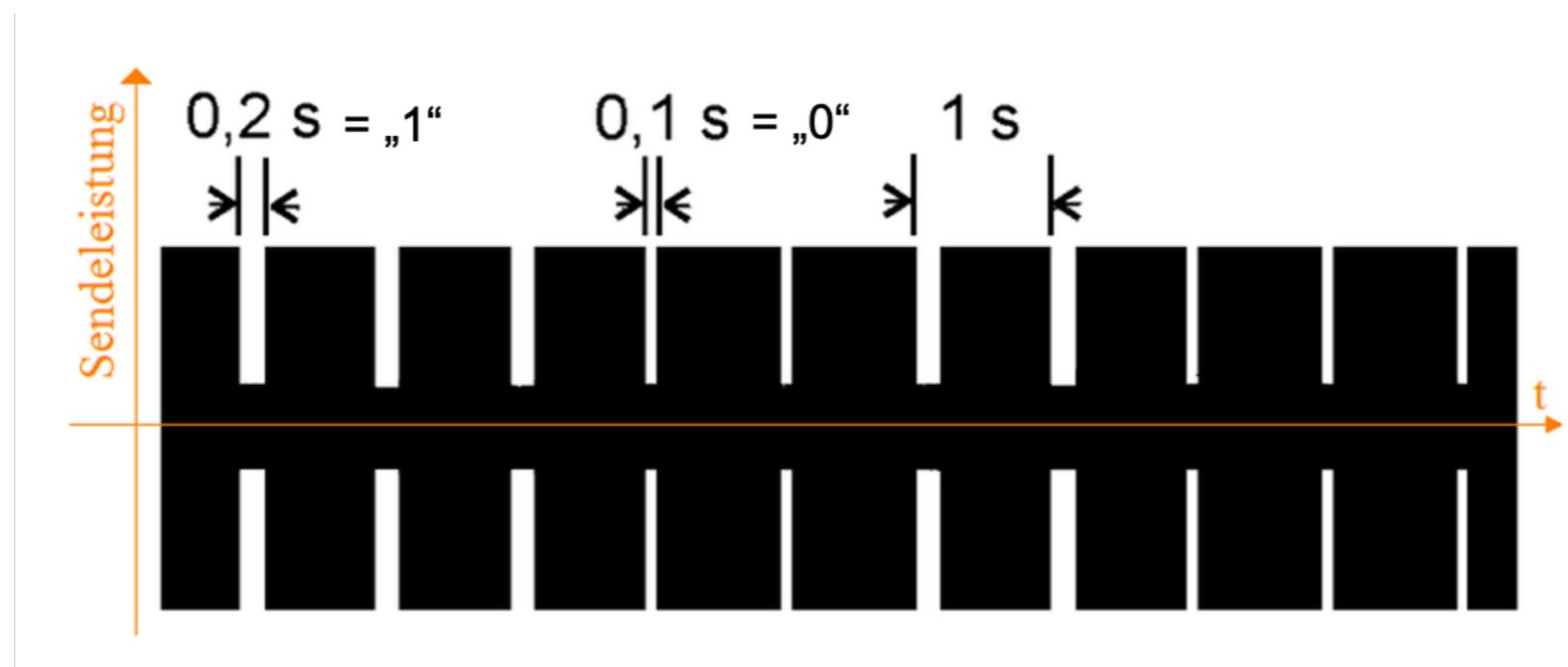
Um 0-9 zu encodieren
benötigen wir **4 bits**

Um 0-5 zu encodieren
benötigen wir **3 bits**

(damit kann man eigentlich
sogar 0-7 encodieren)

Decimal Number	BCD 8421 Code
0	0000 0000
1	0000 0001
2	0000 0010
3	0000 0011
4	0000 0100
5	0000 0101
6	0000 0110
7	0000 0111
8	0000 1000
9	0000 1001
10 (1+0)	0001 0000
11 (1+1)	0001 0001
12 (1+2)	0001 0010
...	...
20 (2+0)	0010 0000
21 (2+1)	0010 0001
22 (2+2)	0010 0010
etc, continuing upwards in groups of four	

DCF77 Zeitsender

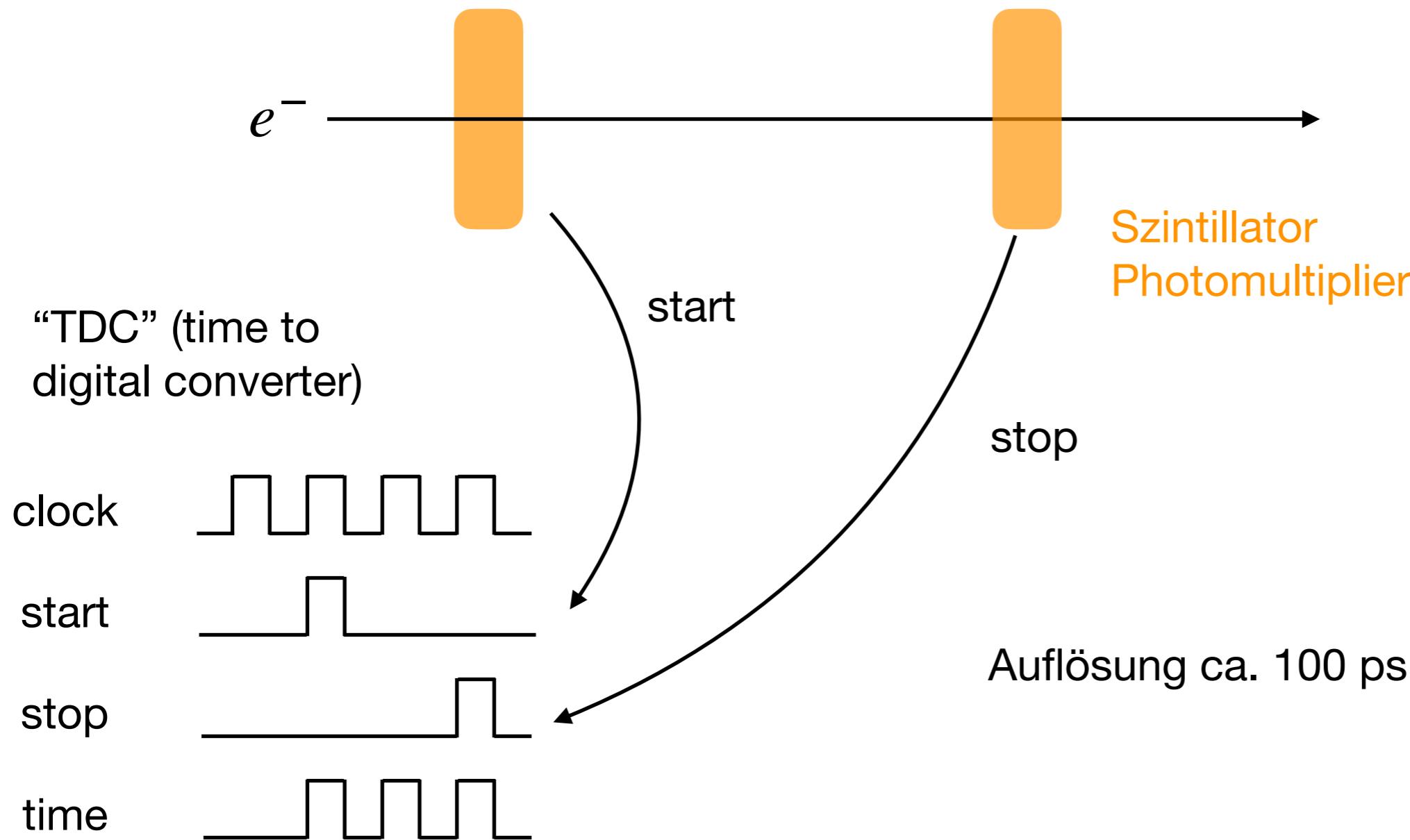


59. Sekunde: keine Signalabsenkung = markiert Beginn der Minute

1.5 Messung kurzer und langer Zeiten

Messung **kurzer** Zeiten:

z.B. Messung der Geschwindigkeit eines Teilchens (hier e^-) mit $v \approx c$



Messung langer Zeiten:

radioaktiver Zerfall

$$t = 0$$

N_0 Kerne

$$t = T_{1/2}$$

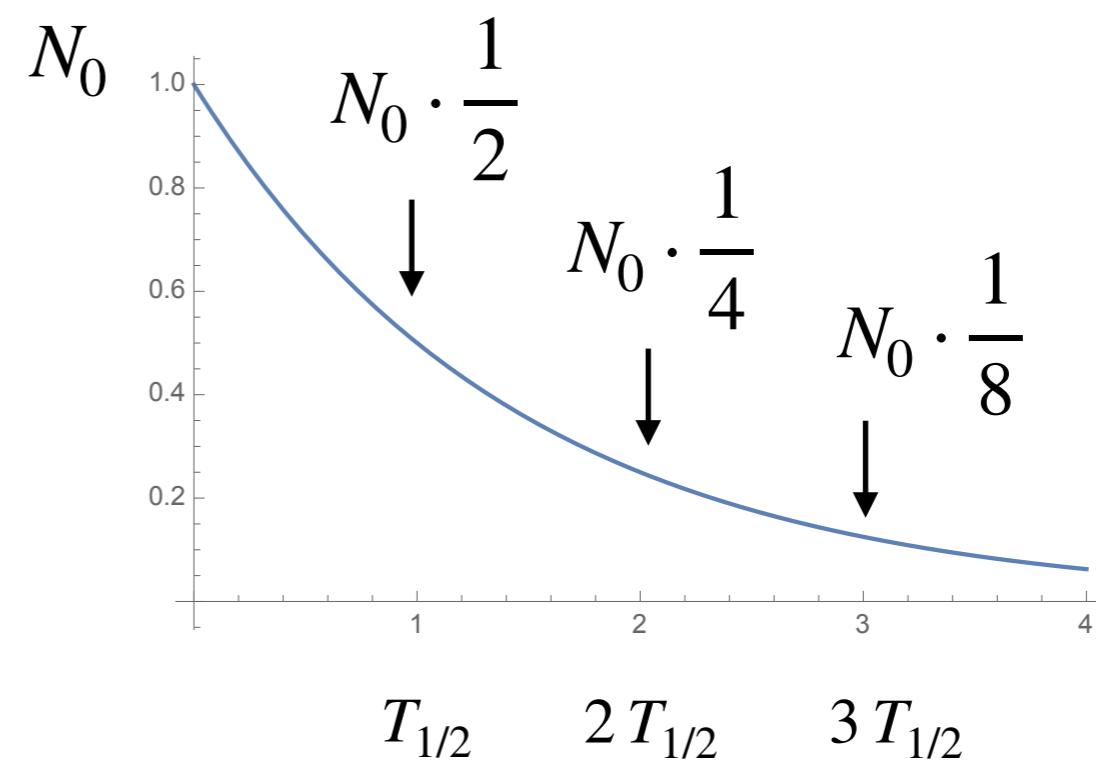
$$N_0 \cdot \frac{1}{2}$$

$$t = 2 \cdot T_{1/2}$$

$$N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2$$

$$t = 3 \cdot T_{1/2}$$

$$N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3$$



$$\Rightarrow N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$$

$$= N_0 \cdot e^{-\ln 2 \frac{t}{T_{1/2}}} \quad \frac{1}{2} = e^{\ln \frac{1}{2}} = e^{-\ln 2}$$

$$= N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Zerfallskonstante $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ $[\lambda] = \text{s}^{-1}$

alternativ: $dN = N(t + dt) - N(t) = -\lambda N(t) dt$

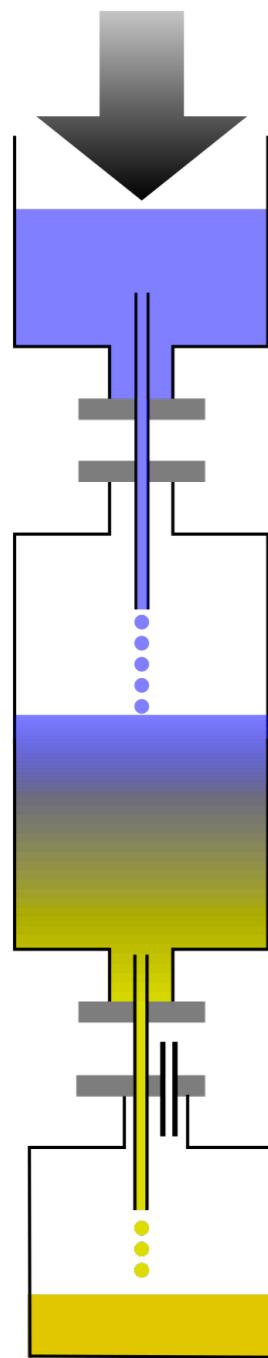
(Änderung \sim Anzahl) $\Rightarrow \frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t)$ Differentialgleichung 1. Ordnung

Lösung: $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

(Lösen durch z.B. raten, überprüfen durch ausprobieren)

Versuch radioaktiver Zerfall

Nutze radioaktiver Zerfall von Cäsium nach Barium:

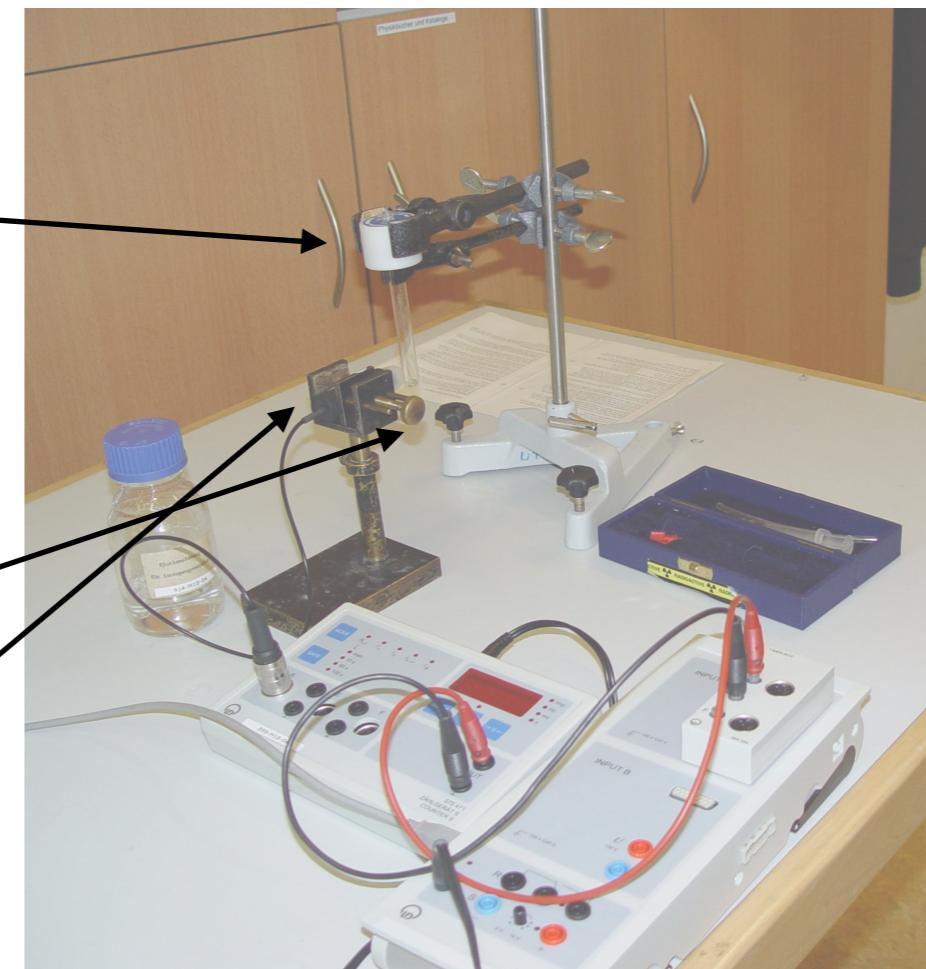
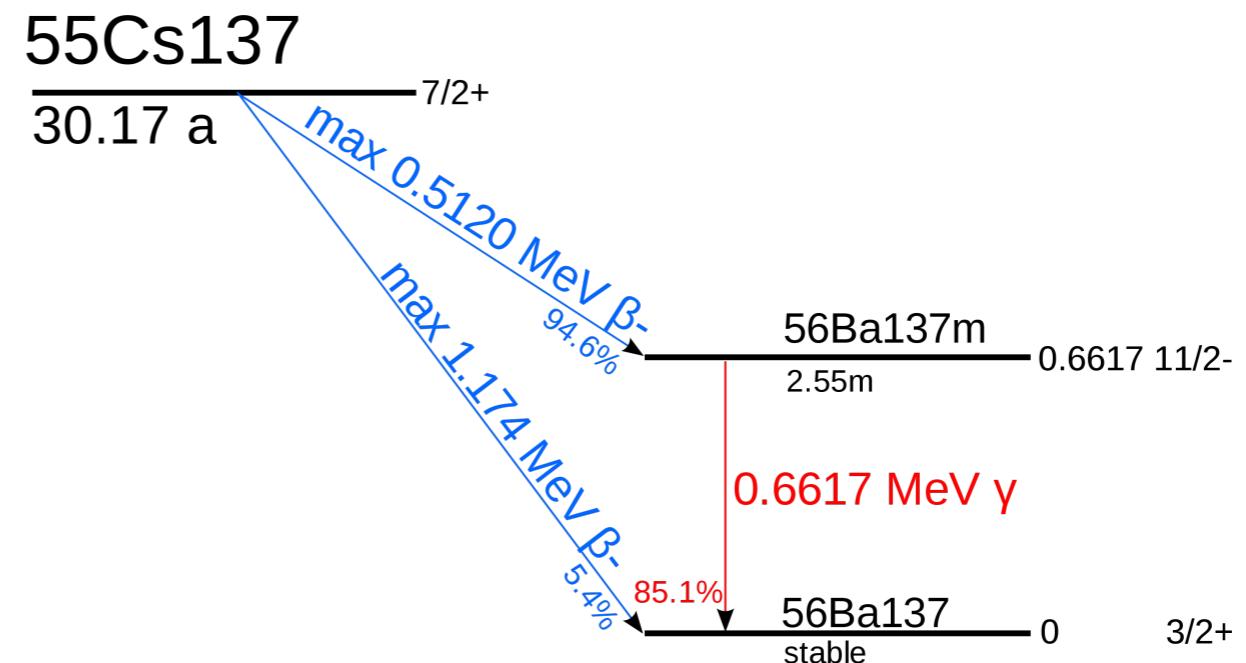


Generator mit radioaktiver Mutter-Substanz

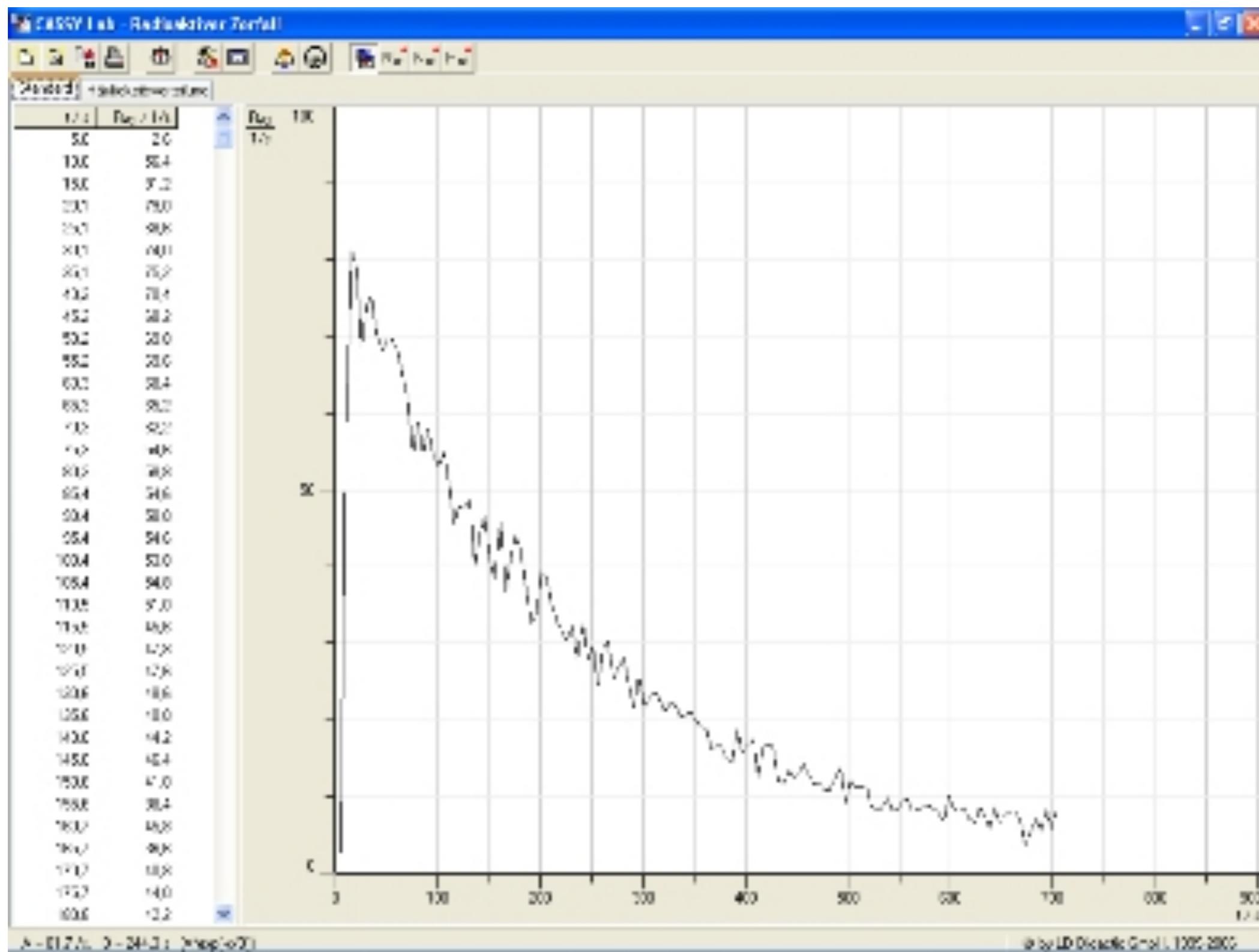
(geb. in einem Salz, da Cäsium chem. stark mit Wasser reagiert)

Auffang-Gefäß

Geigermüller Zählroh
zum Nachweis des **Photons**



Gemessene Rate:



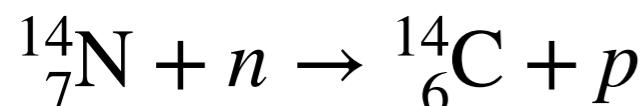
Ausnutzung zur Zeitmessung: $^{14}_{6}\text{C}$

$^{14}_{6}\text{C}$ ist ein instabiles Isotop von Kohlenstoff:



$$T_{1/2} = 5700 \text{ a}$$

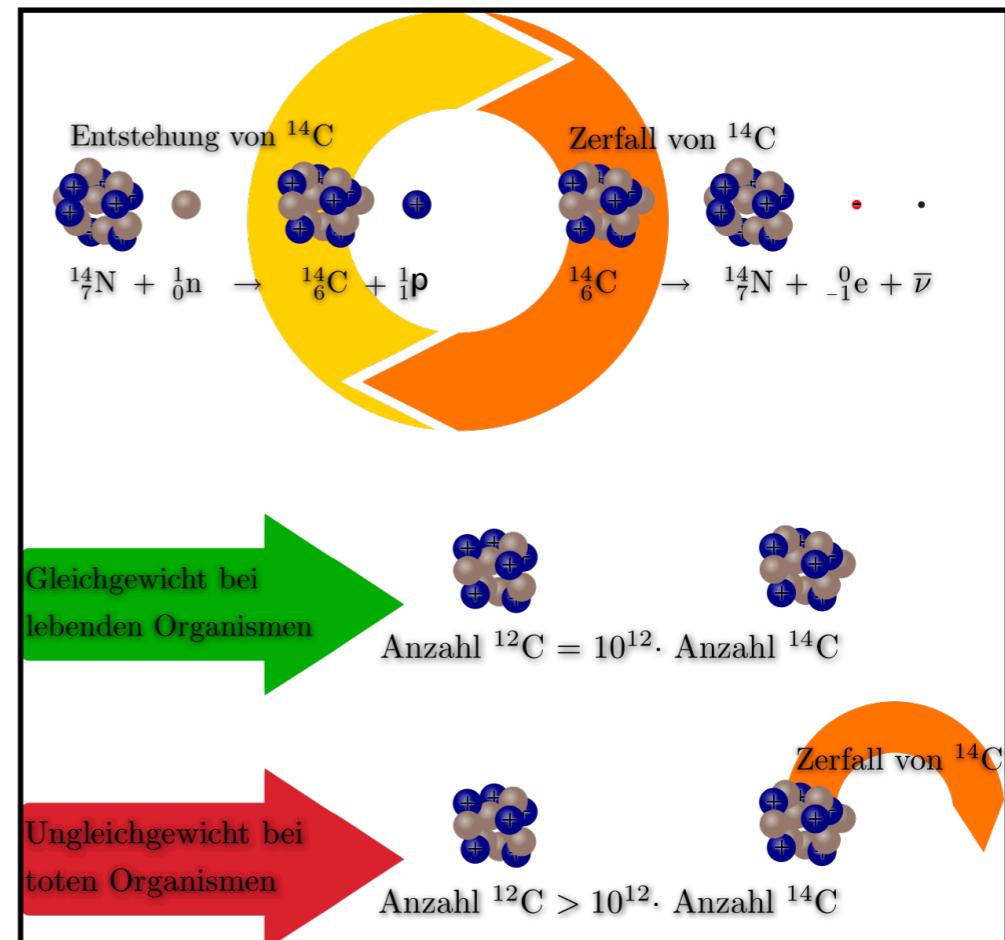
In der Atmosphäre entsteht durch kosmische Strahlung ständig $^{14}_{6}\text{C}$:

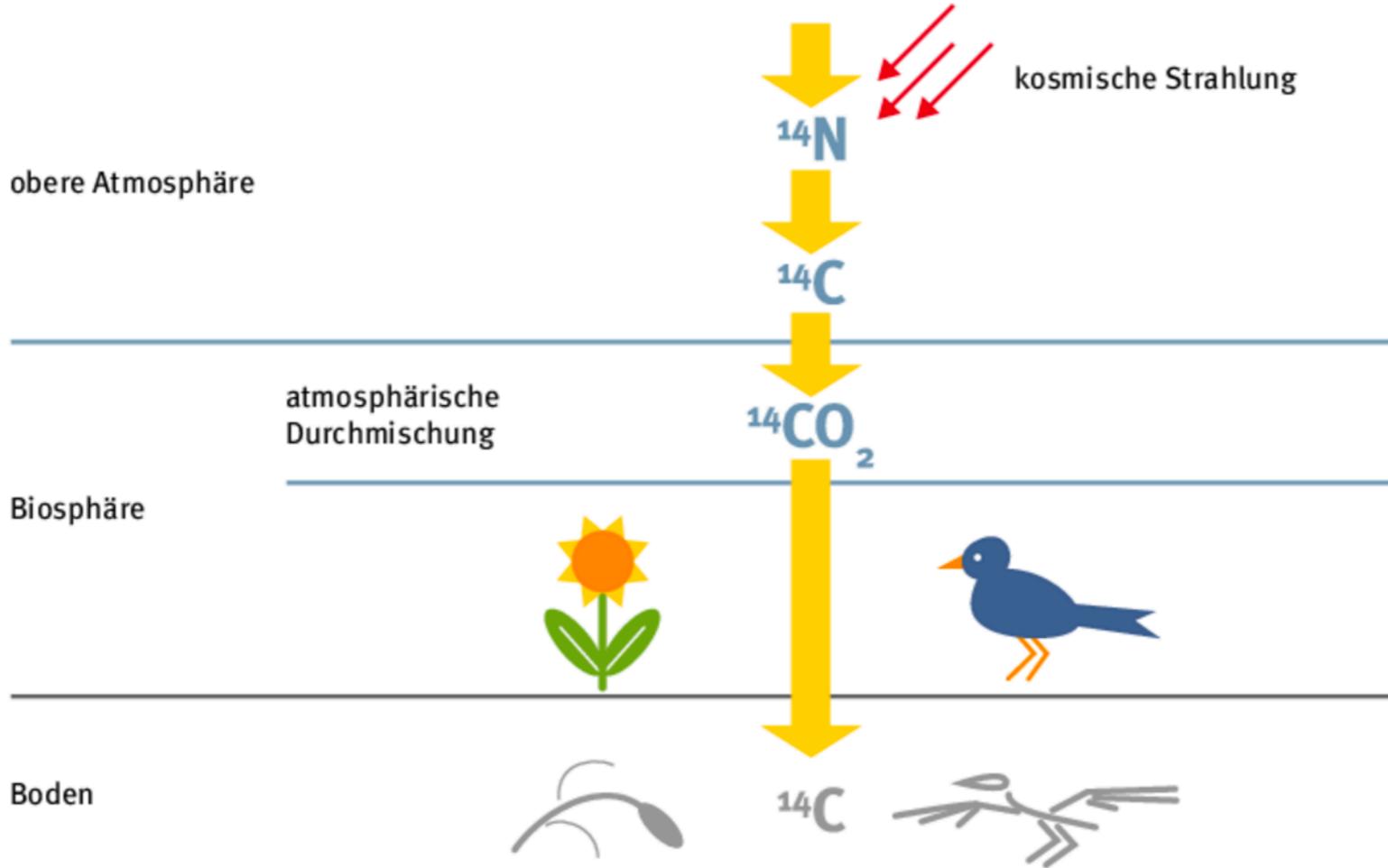


Anteil von $^{14}_{6}\text{C}$ zu $^{12}_{6}\text{C}$ inkl. anderen Isotopen ist ca. $10^{-12} : 1$

Verhält sich chem. identisch wie Kohlenstoff und bindet sich in CO_2 .

Kann zur Altersbestimmung von organischem Material benutzt werden (Radiokarbonmethode), welche Ausnutzt, dass die Konzentration von $^{14}_{6}\text{C}$ in lebenden Pflanzen konstant ist.





Wenn die Pflanze stirbt, erfolgt kein CO_2 Austausch mehr $\Rightarrow {}_{6}^{14}\text{C}$ zerfällt, wobei der Anteil immer stärker abnimmt da sich kein neues ${}_{6}^{14}\text{C}$ mehr ins Gewebe einlagert.

$\Rightarrow {}_{6}^{14}\text{C}$ Aktivität im vergleich zu lebenden Pflanzern erlaubt Bestimmung des Alters

Ähnliche Methoden in der Geophysik mit z.B. ${}^{40}\text{Kr} \rightarrow {}^{40}\text{Ar}$, $T_{1/2} = 1.2 \times 10^9$ a

1.5 Einige Zeiten in der Natur

Alter des Universums	$5 \times 10^{17} \text{ s } (13.8 \times 10^9 \text{ a})$
Alter des Sonnensystems	$(4 \times 10^9 \text{ a})$
erster Mensch	$\sim 10^6 \text{ a}$
Erde um Sonne	$\pi \times 10^7 \text{ s } (1 \text{ a})$
Erde um sich selbst	86400 s
Hörbarer Schall (Kammerton 440 Hz)	2.3 ms
Lichtweg 1m	3 ns
Schwingungsdauer grünes Licht	1.6 fs
Lebensdauer top-Quark	$\sim 1 \text{ ys } (\text{yokto-s}) = 10^{-24} \text{ s}$
> 40 Größenordnungen	

1.5.3 Masse

Masse: Eigenschaft von Körpern

(vgl. Gewicht: abhängig von Beschleunigung)

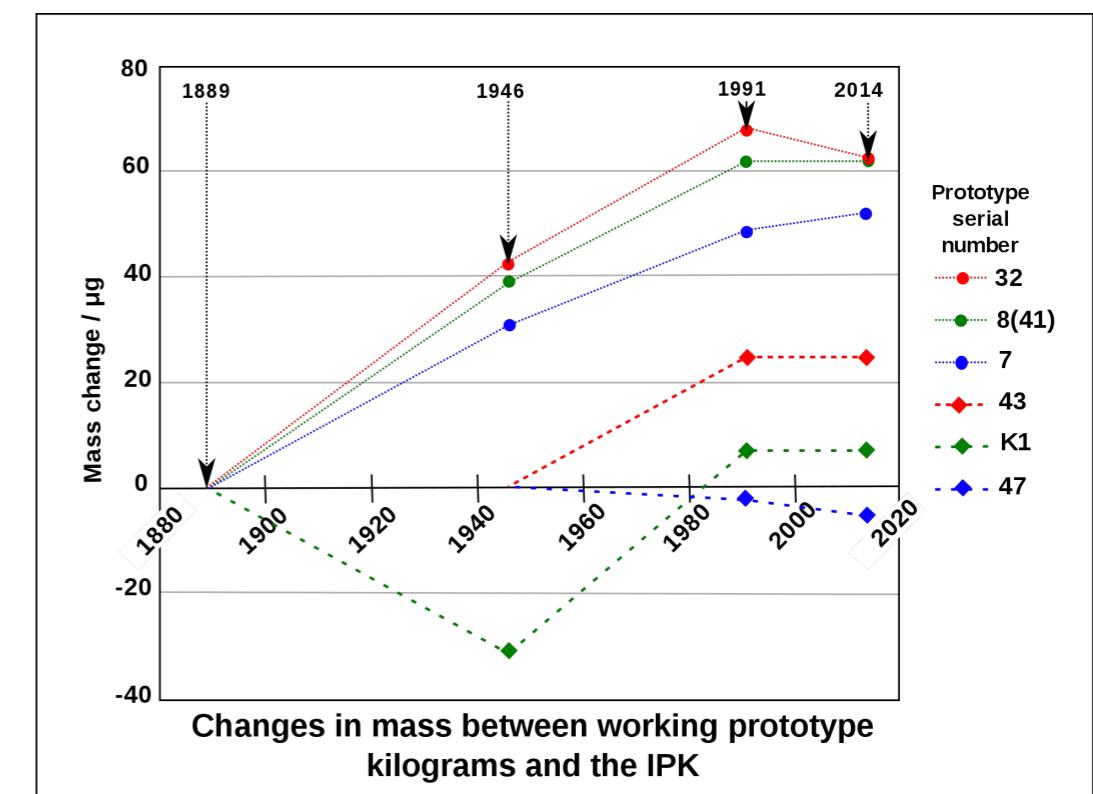
alte Definition: 1 kg = Masse des Urkilogramms (Pt-Ir-Zylinder) in Paris seit 1888

$\approx 1 \text{ dm}^3$ Wasser bei 4° C (Abweichung -0.025 g)

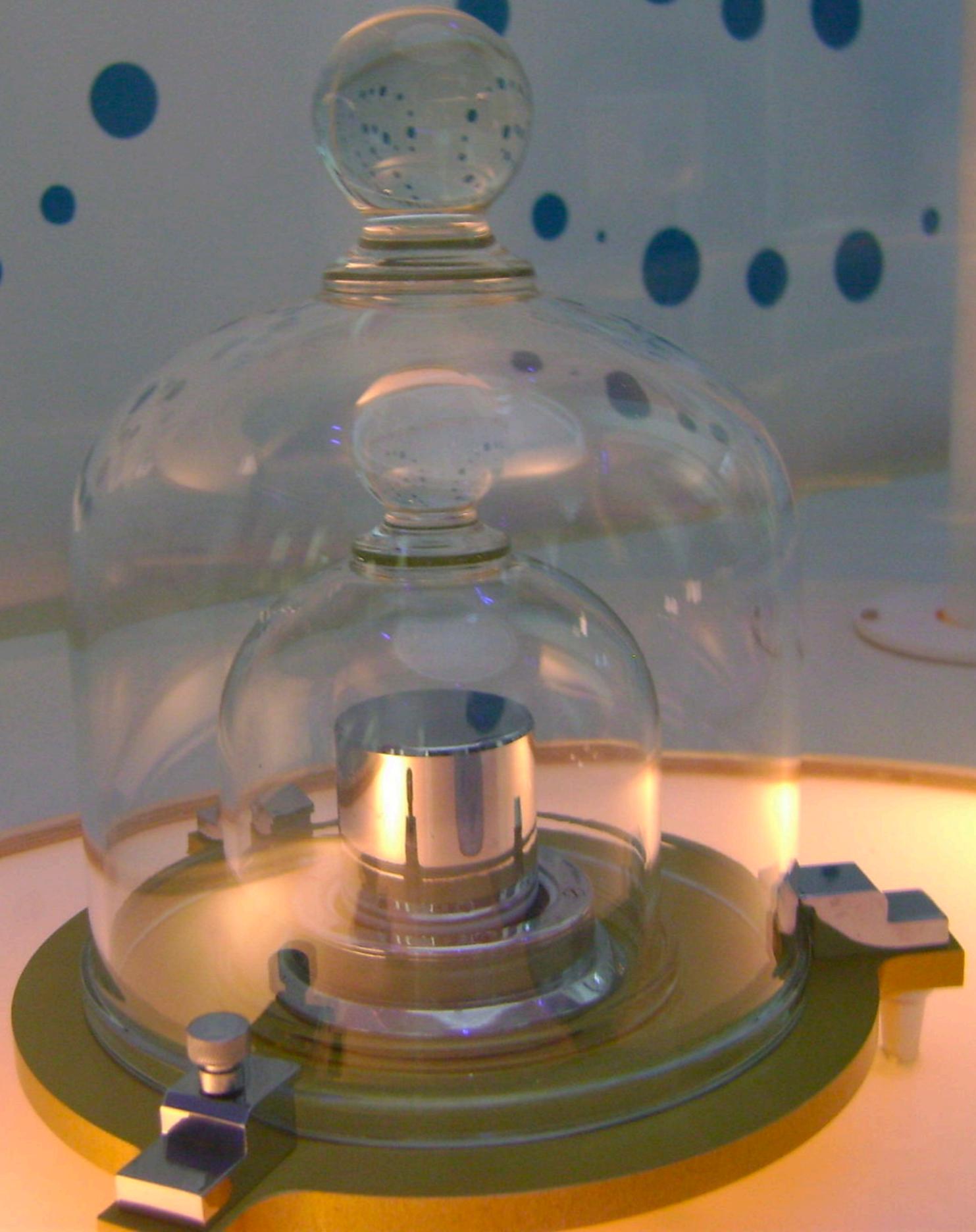
Urkilogramm ist zw. 1950 und 1990 um $50 \mu\text{g}$ leichter geworden als die nationalen Kopien

Effekt nicht im Labor reproduzierbar

Neudefinition über Festlegung durch das Planksche Wirkungsquantum h



Replika des Urkilogramms

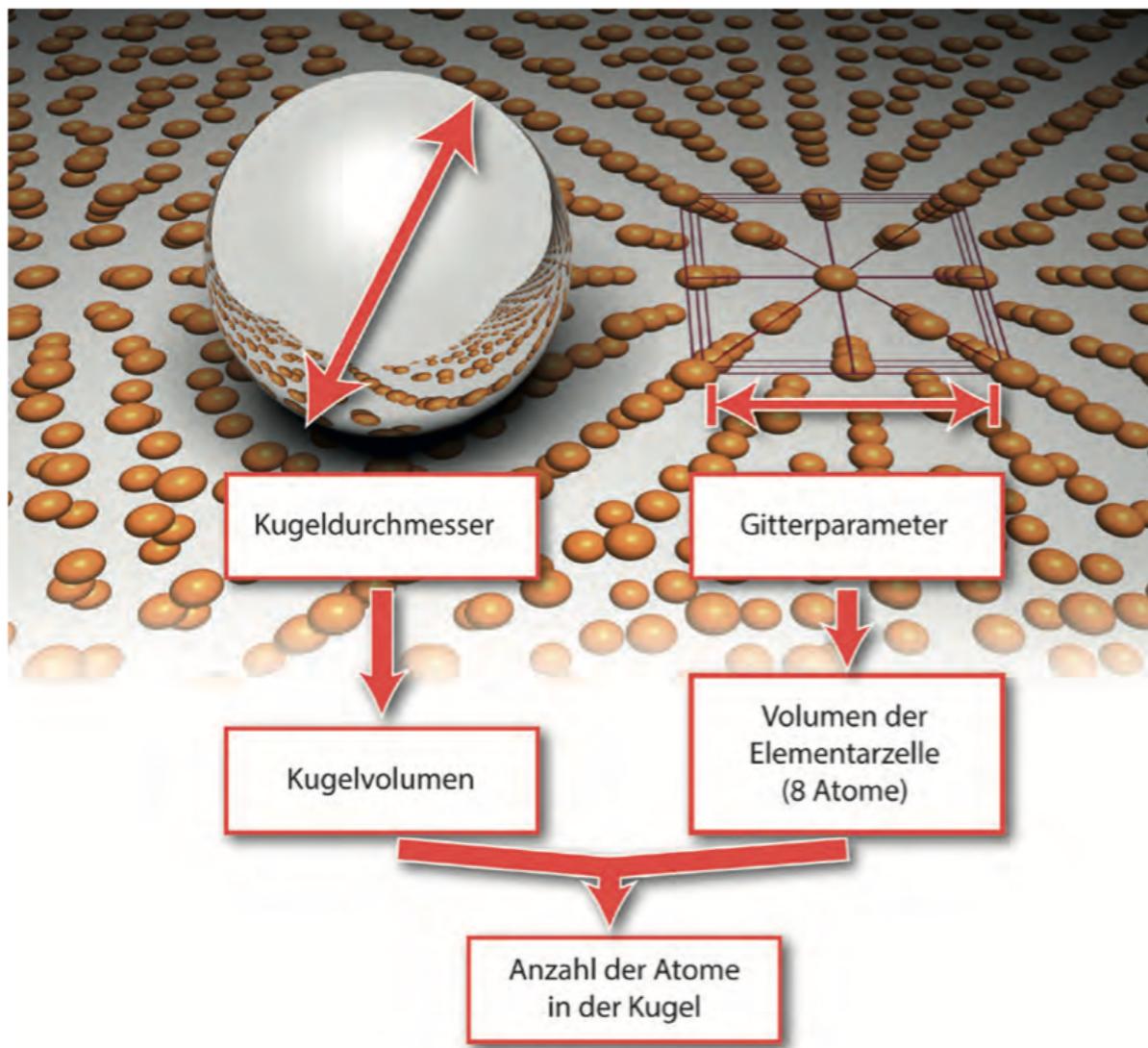


Herstellung einer hochreinen Silizium-Kugel

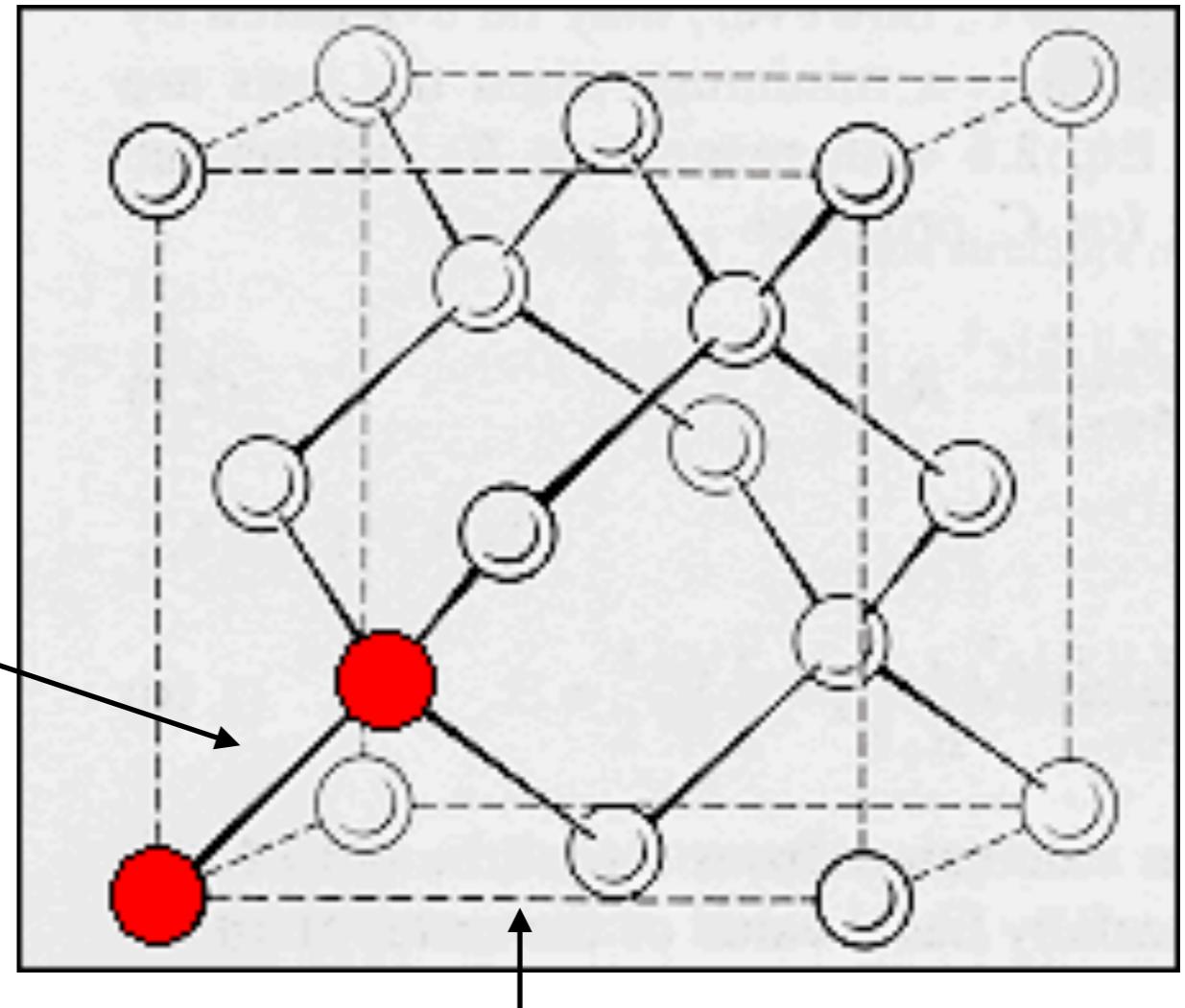
Aus Gitterabstand von Si und Radius der Kugel → Anzahl der Atome kann auf $10^{-13} - 10^{-14}$ genau bestimmt werden
(21,52 Quadrillionen Si-Atome)

Abweichung von Kugelform ~ 50 nm

(Durchmesser 9.37 Zentimeter)



Si ordnet sich in einer kubischen Kristallstruktur an mit einem Gitterabstand von 0.543 nm. Der **nächste Nachbar** von jedem Si ist 0.235 nm entfernt.



Gitterabstand (0.543 nm)

1.5 Einige Massen in der Natur

	kg
Elektron	10^{-30} (~ 511 keV)
Proton	2×10^{-27} (~ 938 MeV)
Eiweißmolekül	$\sim 10^{-22}$
Bakterium	10^{-11}
Mensch	10^2
Erde	6×10^{24}
Sonne	2×10^{30}
Milchstraße	10^{42}
Universum	$10^{53} - 10^{55}$ (?)
>> 80 Größenordnungen	

1.5.4 Atomare Masseneinheit und Stoffmenge

#131

Atomare Masseneinheit:

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} m_{^{12}\text{C}} = 1.6605656 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Stoffmenge: 1 mol = Stoffmenge eines Systems, das aus ebenso vielen Teilchen wie **12 g Kohlenstoff (^{12}C)** besteht

$$N = n \cdot N_A$$

Anzahl
↓
Stoffmenge in Einheiten von mol

Avogardokonstante oder -zahl: $N_A = 6.02214179(30) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

1 mol $\simeq 6.02214179(30) \cdot 10^{23}$ Teilchen

$$1 \text{ mol } {}^{16}\text{C} \simeq 16 \text{ g}$$

1 mol ^{235}U \simeq 235 g

etc. (bis auf Massendefekt,
→ Kernphysik)

Weitere SI-Einheiten (K,A,cd) später