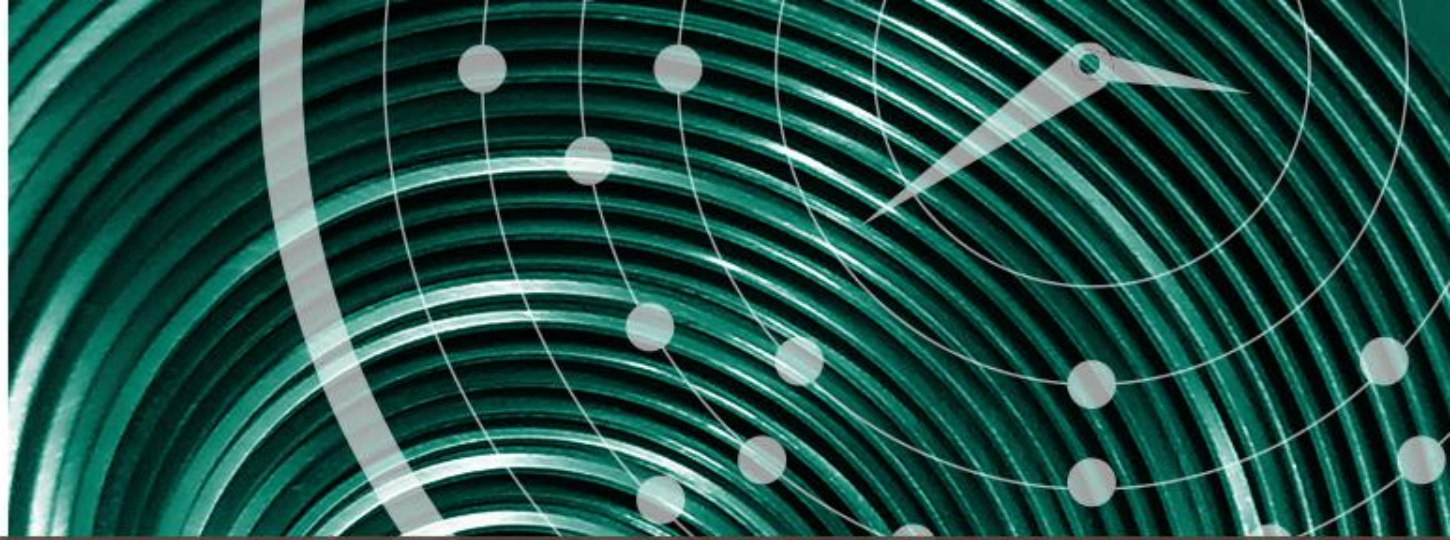


nu@lock



# nu@lock

## Eine „Kernuhr“ mit Thorium-229

**Thorsten Schumm**

TU Wien  
ATOMINSTITUT  
[WWW.NUCLOCK.EU](http://WWW.NUCLOCK.EU)

TU Wien  
LMU München  
TOPTICA Photonics  
Universität Jyväskylä

PTB Braunschweig/Berlin  
MPI für Quantenoptik Garching  
MPI für Kernphysik Heidelberg  
Universität Heidelberg



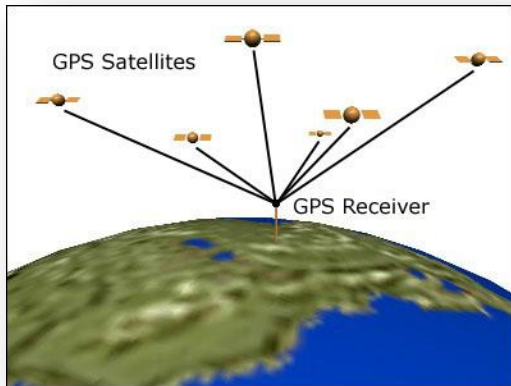
# Outline

1. Motivation: eine neue Uhr für Forschung und Anwendung
2. Funktionsweise einer Uhr
3. State of the Art: die Atomuhr
4. Vision of nuClock: die Kernuhr
5. Das Proposal



# Motivation: Warum brauchen wir bessere Uhren?

## Beispiel 1: Anwendung - GPS Navigation



### Derzeitige Technologie:

- „thermische“ Dampfzellen-MW-Atomuhren
- Rubidium + Cäsium
- GPS und GLONASS aktiv
- Galileo, Beidou, IRNSS im Aufbau

**Genauigkeit der Lokalisierung: 1 – 10 m**

**Ziel:** Lokalisierung auf Zentimeter – Millimeter

- Autonome Fahrzeuge
- Fracht- Maschinentracking
- ...

### Anforderungen:

- bessere Uhren ( $10^{-16}$  –  $10^{-18}$ )
- **robust, klein, leicht, geringer Stromverbrauch,...**

# Motivation: Warum brauchen wir bessere Uhren?

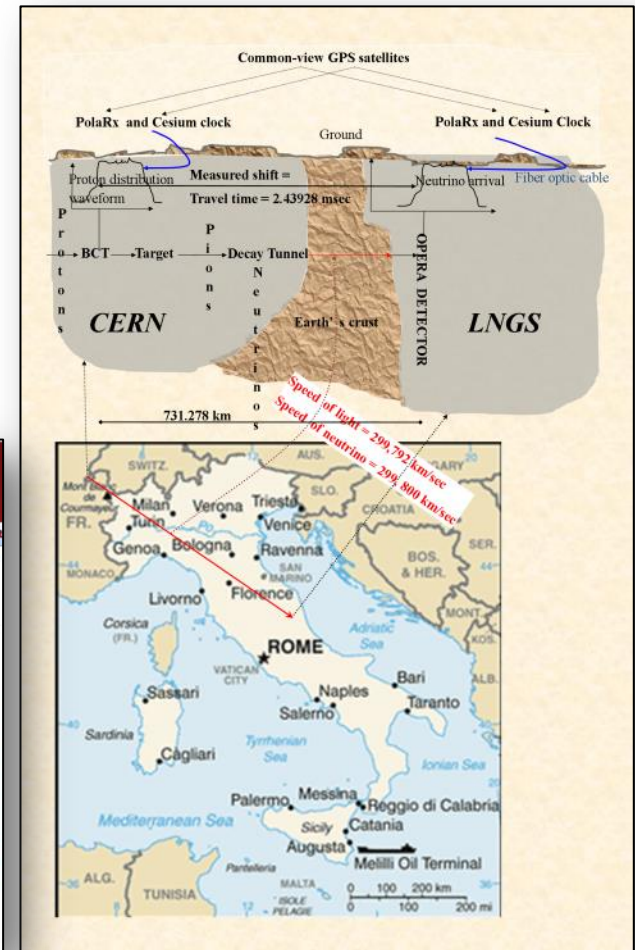
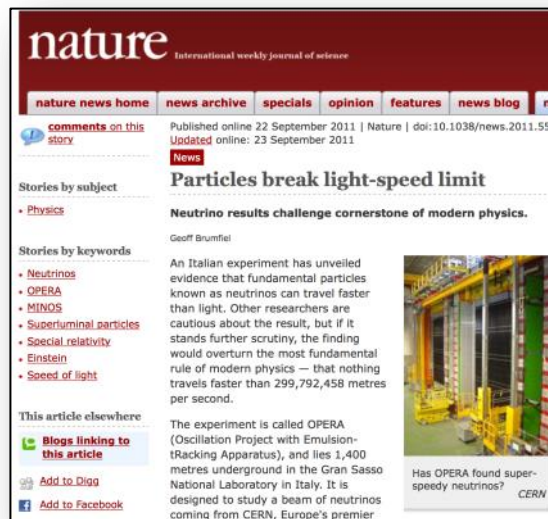
## Beispiel 2: Grundlagenforschung

### Derzeitige Technologie:

- „common view“ GPS

### Anforderungen:

- „Globale“ Synchronisierung (Glasfaser)
- **Ultimative Präzision**
- **Zuverlässigkeit**



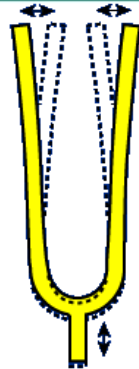
# The Vision of nuClock

Eine bessere Uhr:

- Genauer als bestehende Technologie ( $\sim 10^{-19}$ )
- Ein anderes Funktionsprinzip („Kern“-Uhr)
- Robuster gegen äußere Einflüsse (Störfelder)
- Klein, kompakt, integriert (Festkörper)
- (sensibel auf Variation der Wechselwirkungen)



# Funktionsweise einer Uhr



periodisches Ereignis  
Schwingung



Zählwerk

Beispiele:

- Erdrotation, Mondphasen
- Pendel, Feder
- Quarzkristall
- **Atomare Übergänge**
- **Kern-Übergänge ?**

Beispiele:

- Sonnenuhr
- Mechanische Uhren
- „Digital“-Uhren
- Mikrowellen, Laser

Ansteigende Frequenz ↓

# Funktionsweise einer Uhr

## Was gibt es überhaupt...? (stark vereinfacht)

- Mechanische Uhren:



Genauigkeit: 1s / Tag  
Weltrekord NIST: 1s / Jahr

- Quarzuhren:



Genauigkeit: 1s / Monat  
Weltrekord:  $10^{-12}$

- Atomuhren:

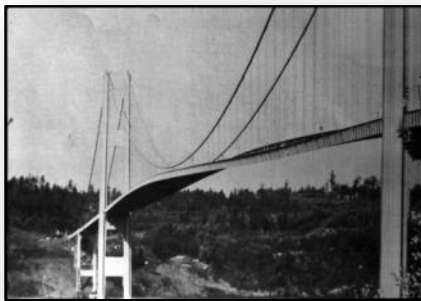


Genauigkeit:  $10^{-14}$   
Weltrekord:  $10^{-18}$

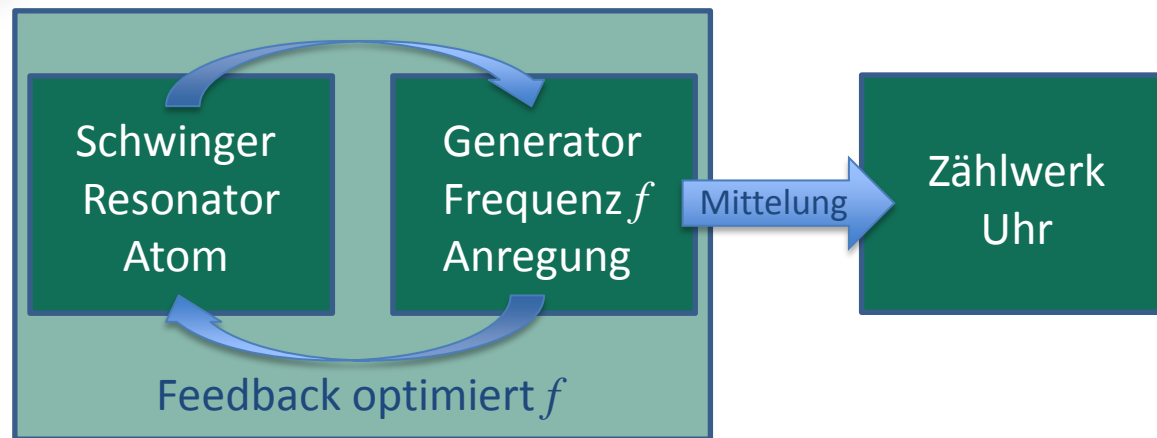
- Kernuhren?

# Funktionsweise einer Uhr

## Kontinuierlicher Betrieb: Feedback auf Resonanz



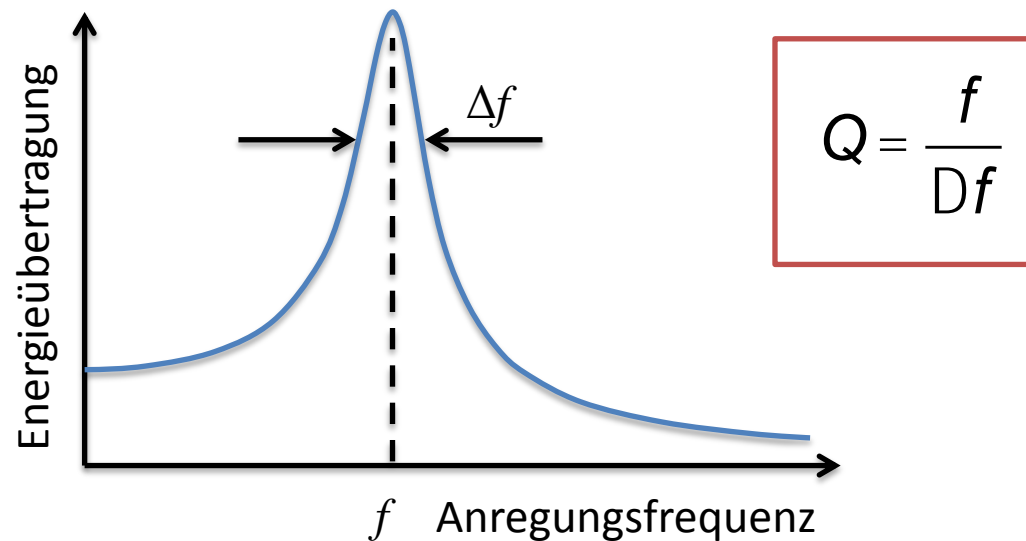
Viele Systeme haben eine (mehrere) Resonanzfrequenzen:  
Energieübertragung optimal bei einer genau bestimmten Anregungsfrequenz  
(Dämpfung verhindert „Resonanzkatastrophe“)





# Wie gut kann eine Uhr sein?

## Der Qualitätsfaktor $Q$



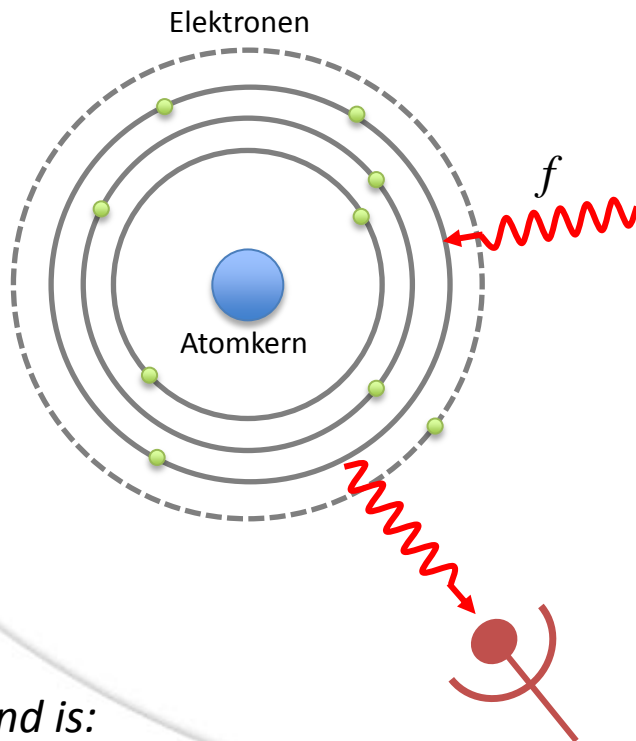
Beste Uhr:

- höchstmögliche Schwingungsfrequenz ( $f$  groß)
- so genau als möglich definiert ( $\Delta f$  klein)

→ Atomuhren!

# State of the art: Die Atomuhr

## Resonanz = Elektronenanregung



Breite der Resonanzkurve:

~ 1 Hz (Lebensdauer, Beobachtungsdauer)

Übergangsfrequenzen:

- Mikrowellenbereich : 1-10 GHz
- Laserbereich: ~ 100 THz

Qualitätsfaktoren:

- MW-Uhren:  $Q \sim 10^{10}$
- „Optische Uhren“:  $Q \sim 10^{14}$

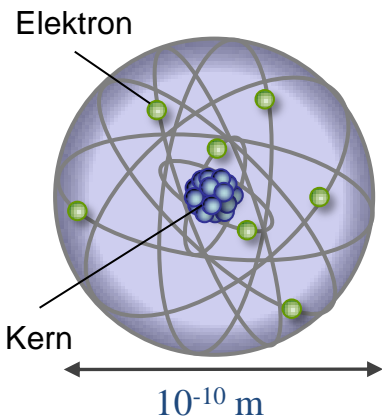
**Kernuhr: >  $10^{15}$ ???**

*1 second is:*

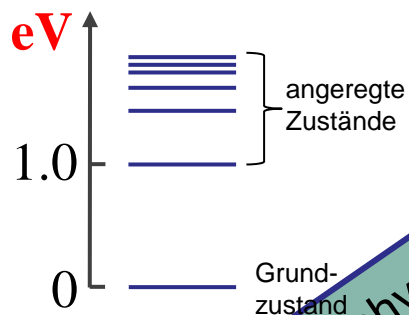
*The duration of 9,192,631,770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the cesium-133 atom*

# Atomphysik vs. Kernphysik: 2 Welten?

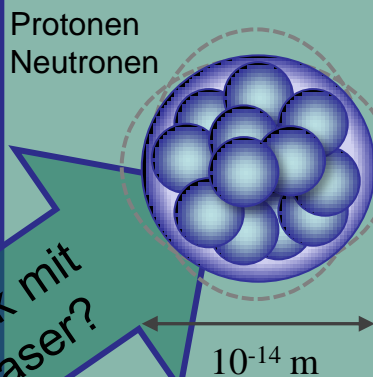
## Atomphysik



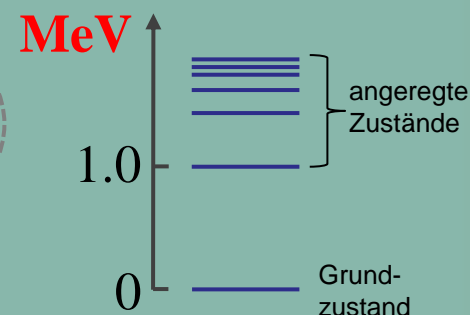
Diskrete Energieniveaus



## Kernphysik



Diskrete Energieniveaus



Kernphysik mit einem Laser?



Werkzeug der Untersuchung:  
**MW- / Laser-Spektroskopie**

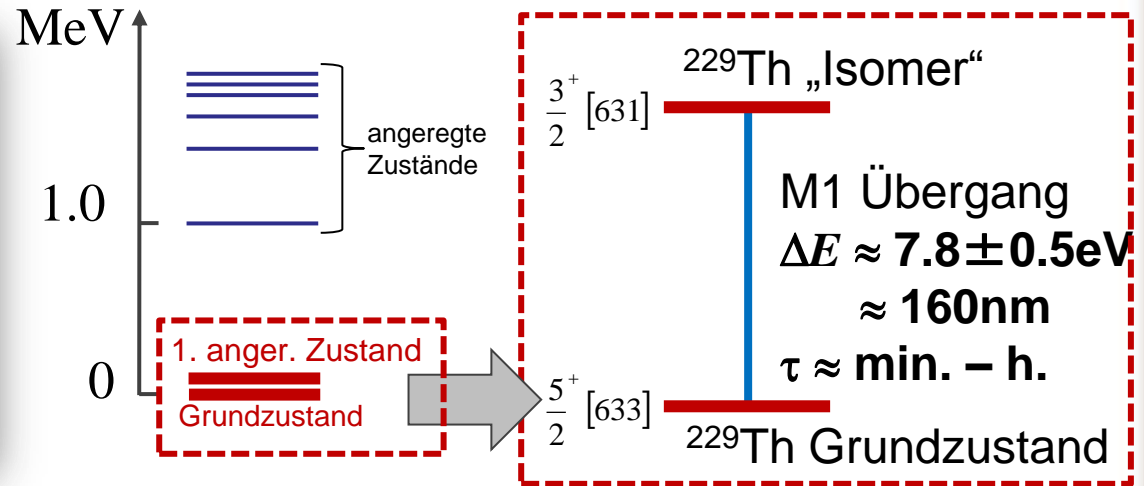
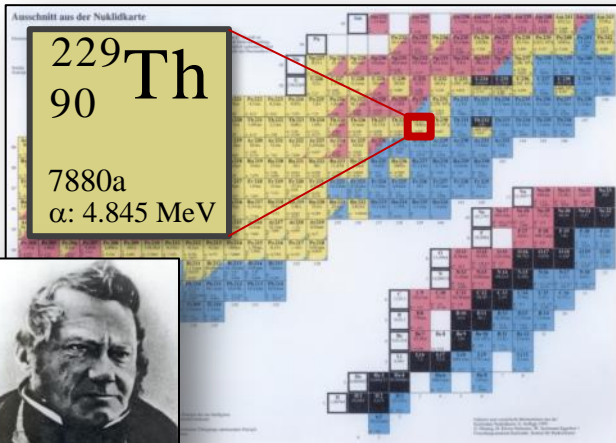


Werkzeug der Untersuchung:  
**Teilchen-Beschleuniger**

Viele Anwendungen im Bereich Metrologie, Spurenanalytik...

Bisher reine Grundlagenforschung

# Thorium-229: Eine Brücke zwischen Atom- und Kernphysik



- Thorium-229 ist das **EINZIGE** Isotop, bei dem der **KERN** mit einem **Laser** angeregt werden kann\*
  - **Qualitätsfaktor** für eine Uhr:  $Q = 10^{15} - 10^{17}$  (besser als jede Atomuhr!)
    - **ABER:** Weder die Energie  $\Delta E$  (Frequenz  $f$ ) noch die Lebensdauer  $\tau$  sind je direkt beobachtet oder gemessen worden

**Ziel von nuClock: Messung von  $\Delta E$  und  $\tau$**

# Eine Thorium-Uhr: what's the problem?

- Verfügbarkeit von Thorium-229:

- radioaktiv, 8000 Jahre (Besitz, handling)
- Rein künstlich → extrem selten (Zugang, Kosten)

Kernphysik

Radiochemie

- Laserspektroskopie von Thorium-229

- Quasi keine verfügbaren Laser
- Zu großer Suchbereich (Kernübergang)
- Kaum bekannte elektronische Struktur
- Thorium-Probe für Spektroskopie (Atomfallen)

Laserentwicklung

$\gamma$ -Spektroskopie

Laserspektroskopie

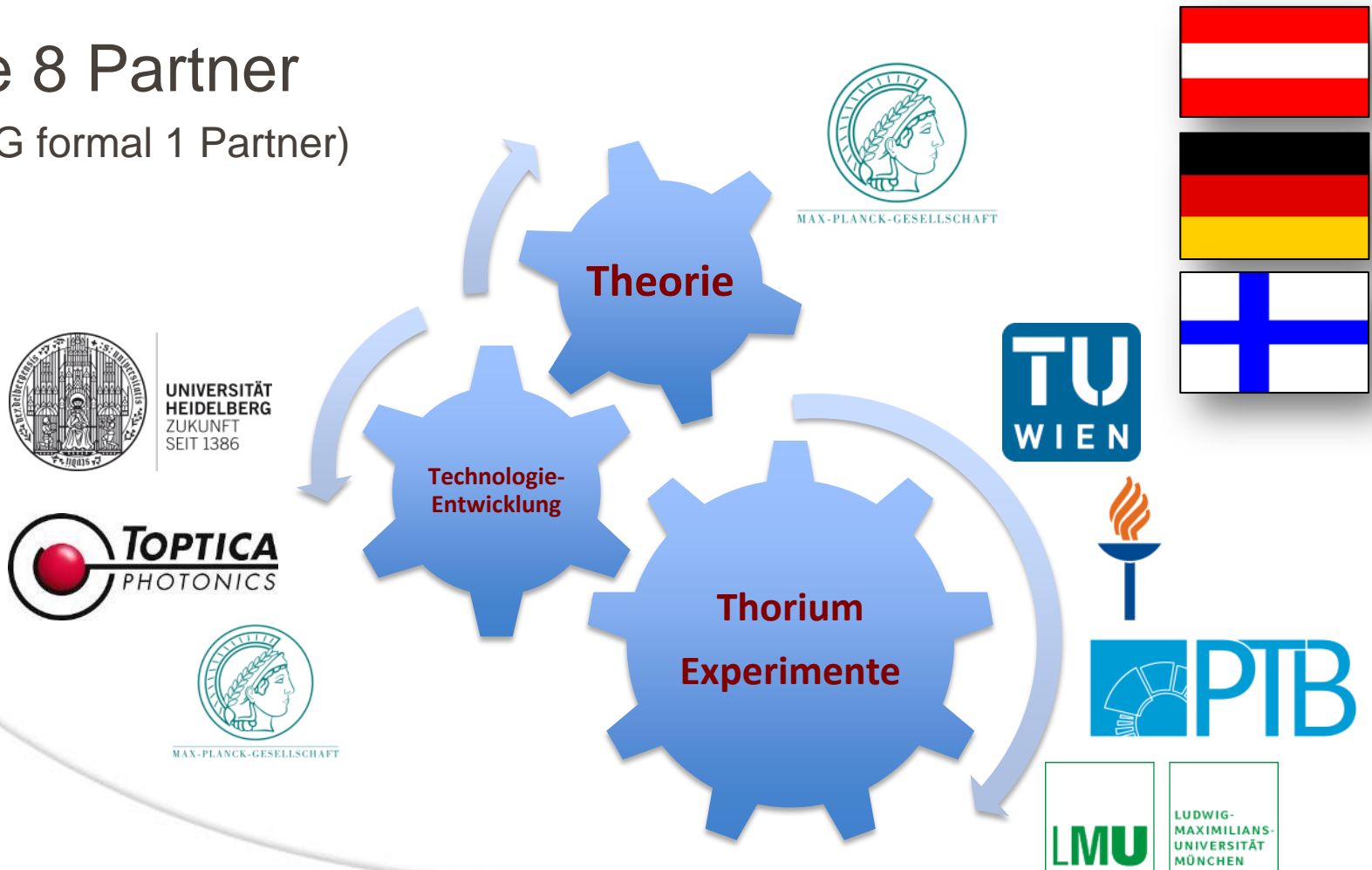
Fallentechniken

**Benötigt state-of-the-art Techniken in  
vielen unterschiedlichen Bereichen**

**→ nuClock consortium**

# Das nuClock Konsortium

## Die 8 Partner (MPG formal 1 Partner)



# Das nuClock Konsortium

Experimentalgruppen:  
 Verschiedene Ansätze zur Messung  
 von  $E$  und  $\lambda$

		$^{229m}\text{Th}$ isomer state population	
		nuclear decay of $^{233}\text{U}$ , IGISOL ion collision	excitation from ground-state $^{229}\text{Th}$
Th isomer energy measurement	direct	measurement of emitted VUV photon	LMU $^{233}\text{U} \rightarrow ^{229m}\text{Th}$ recoil ion beam ATI $^{233}\text{U}$ -doped crystal ATI $^{229}\text{Th}$ -doped crystal PTB $^{229}\text{Th}^+$ ion trap
		measurement of electronic or nuclear level structure	UHEI $^{233}\text{U} \rightarrow ^{229m}\text{Th}$ solid-state sample JYV IGISOL $^{229m}\text{Th}$ ion beam PTB $^{229}\text{Th}^+$ ion trap
	indirect		

Figure 2: Methodology of nuClock. Schemes populating the isomer state through a nuclear reaction (centre column) are investigated in WP1, whereas schemes employing an optical excitation into the isomer state (last column) are studied in WP2.



- Thorium im **Festkörper**
- „radioactive sample hub“
- Projektkoordination
- Dissemination, Outreach



- Thorium in **Ionenfallen**
- Zugang zum Berlin Synchrotron
- „Gründungsvater“ des Gebiets
- Einziges nat. Metrologieinstitut



- Thorium im **Atomstrahl**
- sehr renommierte Gruppe
- „sure shot“



- Thorium als **Fusionsprodukt**
- Großforschungsanlage (GSI/FAIR out of order)

# Das nuClock Konsortium

## Technologiegruppen:

Bisher keine Verbindung zum Thorium/Kernuhr



Stuhler

- **Dauerstrich** VUV Laser
- Weltmarktführer Spektroskopielaser (Dioden)
- (Zugang zu KBBF)
- Entwickeln Lasersystem spezifisch für nuClock (1 Mio €)



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



Udem

- **Gepulste** VUV Laser (Frequenzkamm)
- Nobelpreisträger T. Hänsch
- Identisch mit bestehender Entwicklung



UNIVERSITÄT  
HEIDELBERG  
ZUKUNFT  
SEIT 1386



Ens

- Gamma-Spektrometer
- Führend in Europa
- Bestehende Kollaboration mit TU Wien



# Das nuClock Konsortium

## Theorie:

Kern-Licht Wechselwirkung, Thorium



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



Palffy

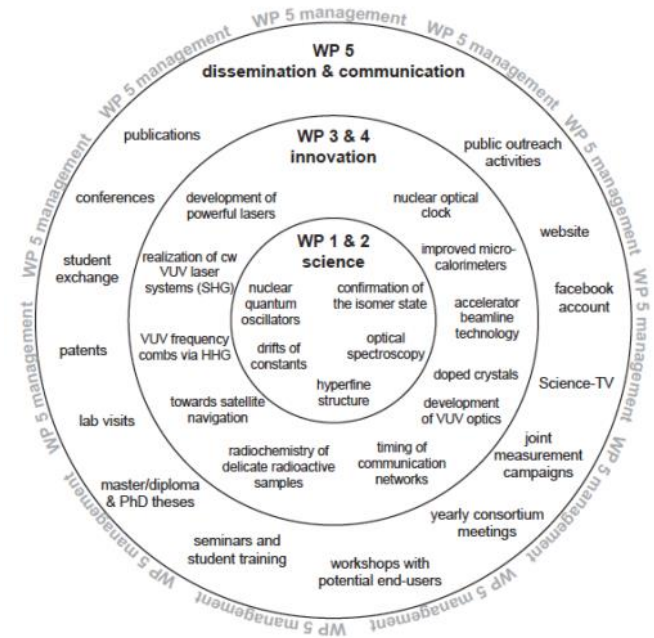
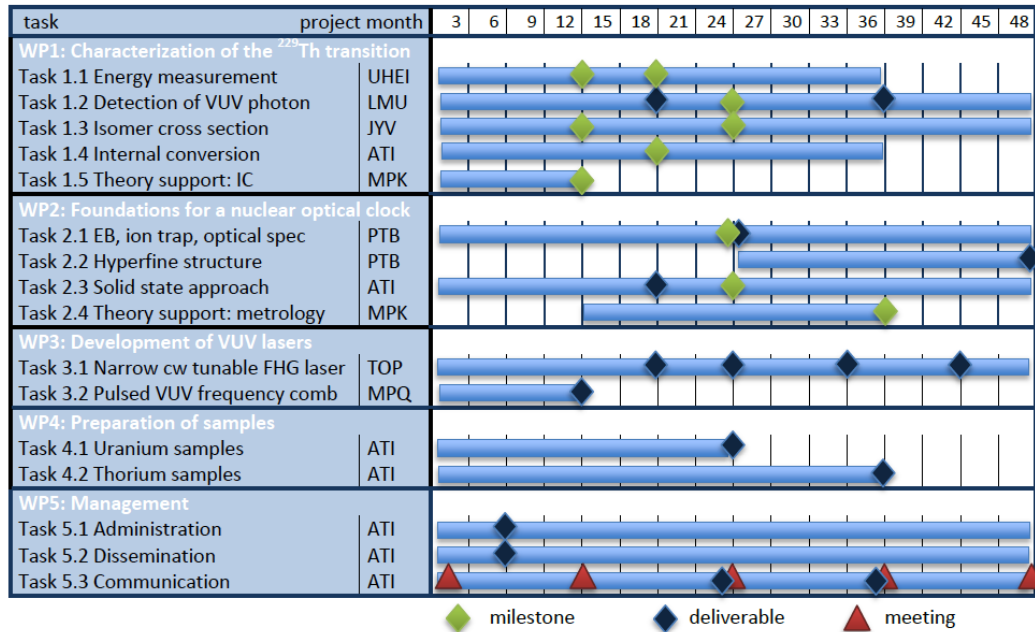
- Theorie der Elektronen-Kern-Wechselwirkung
- Bestehende Kollaborationen mit quasi allen exp. Partnern
- Frau

# Das nuClock Konsortium

Kick-off meeting September 2015 LMU München



# nuClock Forschungsprogramm



N.	Proposer name	Country	Total Cost	%	Grant Requested	%
1	TECHNISCHE UNIVERSITAET WIEN	AT	900,000	22.67%	900,000	22.67%
2	PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT	DE	656,250	16.53%	656,250	16.53%
3	LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITAET MUENCHEN	DE	606,250	15.27%	606,250	15.27%
4	MAX PLANCK GESELLSCHAFT ZUR FOERDERUNG DER WISSENSCHAFTEN E.V.	DE	327,500	8.25%	327,500	8.25%
5	RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITAET HEIDELBERG	DE	288,750	7.27%	288,750	7.27%
6	JYVASKYLAN YLIOPISTO	FI	247,828	6.24%	247,828	6.24%
7	TOPTICA PHOTONICS AG	DE	943,750	23.77%	943,750	23.77%
Total:			3,970,328		3,970,328	

# Setting up nuClock: what worked for us



## Der „Gute Diktator“:

- Koordinator entscheidet Partner (zum Wohle des Projekts)
- 1 Planungsmeeting (2 Tage):
  - Forschung der Projektpartner (Kurzvorträge)
  - Finanzen (Kuchen verteilen...)
  - Technische Fragen (Ansprechpartner...)
- Koordinator erstellt workpackages, milestones, ...
- 1 Runde „technischer“ Input (template, 1/2 Seite + Formales)
- Koordinator schreibt alles, + Logo, Webseite...
- Iterationen mit (einigen) Partnern, national contact points!

# Setting up nuClock: what worked for us

## Zeitplan der Bewerbung

May	June	July	August	September
	1	1	SUBMISSION	1
	2	2		2
	3	3	comments	3
	4	4	from all	4
workshop	5	5	partners	5
Vienna	6	6		6
	7	7	(ICAP)	7
	8	8		8
	9	9		9
individual	10	10		10
contributions	11	11		11
of all	12	12		12
partners	13	13	final corrections	13
	14	14		14
	15	15		15
	16	16		16
	17	17		17
	18	18		18
	19	19		19
	20	20		20
	21	21		21
	22	22		22
	23	23	ATI	23
	24	24	final draft	24
	25	25	preparation	25
	26	26		26
	27	27	final draft	27
ATI	28	28		28
draft	29	29		29
preparation	30	30		30
	31	31		31
				DEADLINE

# Scores

## Evaluation Summary Report

- Total Score: 4.65
- Excellence: 5.0
- Impact 4.0
- Implementation: 4.25


24 Anträge von 643 Einreichungen erfolgreich

→ Förderquote von 3.7 %

2 x AT, 4 x FR, 4 x UK, 2 x DE

**Good luck!**

Ref. Ares(2015)884634 - 02/03/2015

 **EUROPEAN COMMISSION**  
Research Executive Agency (REA)  
Fostering Novel Ideas: FET-open  
Head of Unit

Brussels,

**Thorsten SCHUMM**  
**TECHNISCHE UNIVERSITAET WIEN**  
**KARLSPLATZ 13**  
**1040 WIEN**  
**AUSTRIA**

**Subject: Result of Evaluation of proposals / Invitation to grant preparation**  
Programme/Call: H2020 — H2020-FETOPEN-2014-2015-RIA  
Proposal: 664732 — nuClock

Dear **Thorsten SCHUMM**,

We are pleased to inform you that the aforementioned proposal has been **favourably evaluated** by the Agency. Consequently, we wish to proceed to the preparation of the Grant Agreement based on your proposal.

You will find the Evaluation Summary Report (ESR) for your proposal together with this letter in the "**My Area**" section of the Research *Participant Portal*. The ESR reflects the comments of the evaluators.

You will also find under chapter "Other Information" in this letter or available in the Participant Portal, the outcome of the Ethics Review (including the outcome of the Ethics screening/ Ethics Assessment), which may include elements to be taken into account during the grant preparation.

**Invitation to grant preparation**

With reference to the submitted proposal and its evaluation, the grant preparation shall be based on the following:

1. **Proposal No:** 664732 - nuClock - RIA
2. **Topic:** FETOPEN-RIA-2014-2015 - FET-Open research projects
3. **Project Officer:**

Mr. Roumen BORISSOV  
Roumen.BORISSOV@ec.europa.eu  
+32 22969024  
Fostering Novel ideas, FET-Open

