



Frithjof Nolting :: Head LSC :: Paul Scherrer Institut :: [www.psi.ch/sls](http://www.psi.ch/sls)

## Das Synchrotron im PSI: Einblicke in Unsichtbares

22.11.2023, NWG-Vortragsreihe Herbst-Semester 2023

1

## Verklungene Zukunftsmusik

Raumpatrouille Orion (1966)



Astroscheibe

[wikipedia.org](http://wikipedia.org)



ASG: Armbandsprechgerät

[www.pinterest.com](http://www.pinterest.com)

Page 2

2

# Smartphone

Heute:



<http://www.itproportal.com>

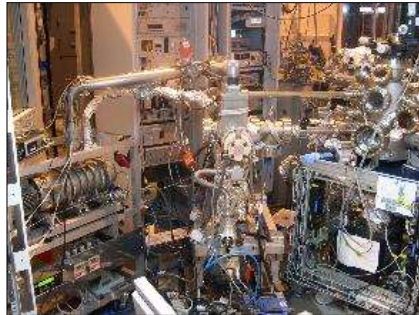


<http://www.huffingtonpost.com>



<http://www.techweez.com>

Dazwischen:



# Smartphone



1973



1983

ca. 1kg  
Akku: bis zu 30 Minuten  
mehrere Tausend Franken



ca. 1990  
ca. 350 g  
2500 Dollar

Ab 2007 Boom  
startete mit dem  
iPhone

2023



## Festplatte (Meisterwerk der Nanotechnologie)



**RAMAC - first HDD**

- 5 MegaBytes
- Fifty 24" disks
- 1200 RPM
- 2 kbits/in<sup>2</sup>
- 70 kbits/s
- \$10,000/Mbyte



1956  
RAMAC  
0.005 Gbytes  
10'000'000\$/Gbyte

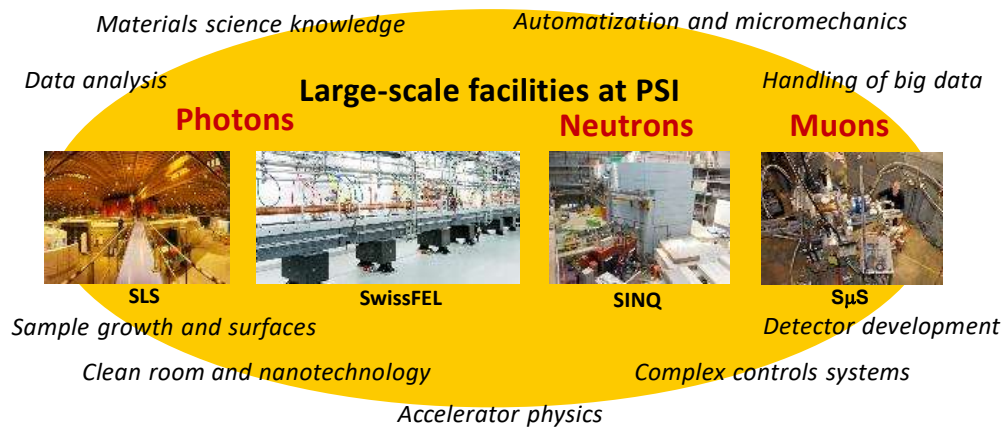
© 2008 Hitachi Global Storage Technologies

Fortschritt durch Kombination von Grundlagen- und angewandter Forschung wie auch Design- und Ingenieurkunst (und Marketing etc.)

5

## Advanced analytics

Modern communication devices are full of fascinating physics and advanced materials



6



## Large Research Infrastruktur



## Erweitern unseres Sehsinns

- Kleine Details sehen
  - Höhere Auflösung möglich durch Verwendung anderer Wellenlängen
- In Materialien hineinschauen
  - Durchdringen von Materialien möglich durch Verwenden von höheren Energien
- Andere Informationskanäle als das Auge
  - Streuung/Beugung
  - Spektroskopie



9



10



Patch of grass, 1887

Vincent van Gogh (1853 – 1890)

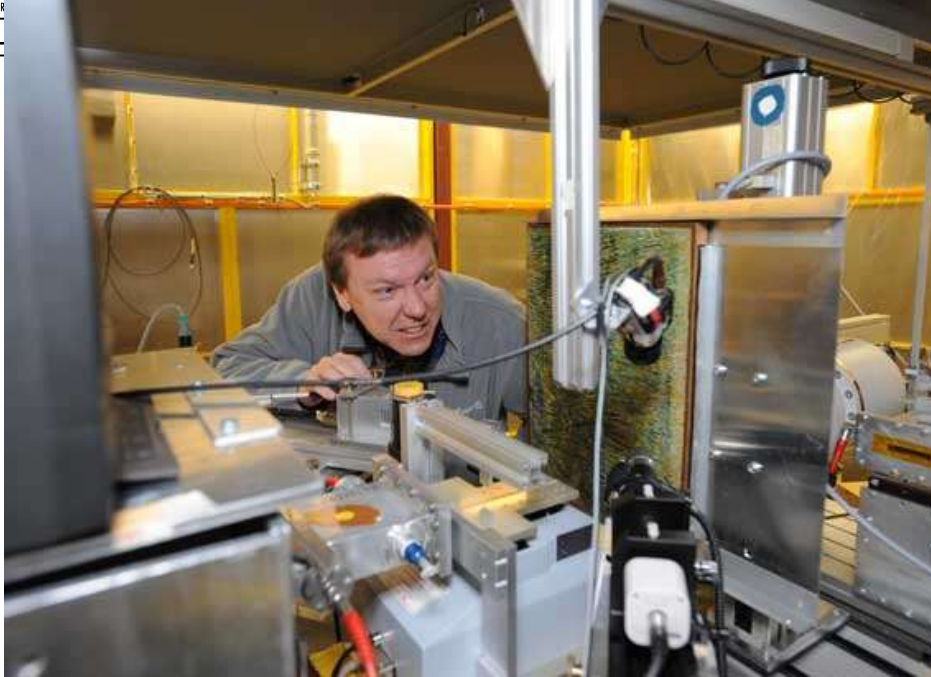
## Untersuchung der verborgenen Tiefen des Gemäldes

XRF

XRF-Spektrum

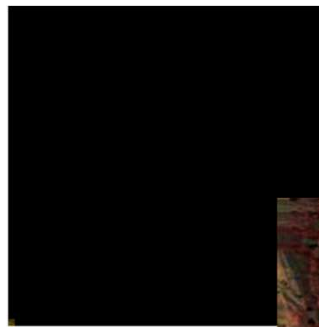
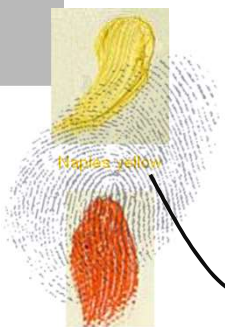
Courtesy Philip Willmott





Beamline L, DORIS Synchrotron, Hamburg

13



Naples Yellow  
(Antimony)



Vermillion  
(Quecksilber)



Rekonstruktion

175 x 175 mm<sup>2</sup>  
0.5-mm Schritte  
2 s/Schritt  
⇒ 2.84 Tage  
(122'500 Spektren)

Dik *et al.*, Anal. Chem. **80** (2008) 6436

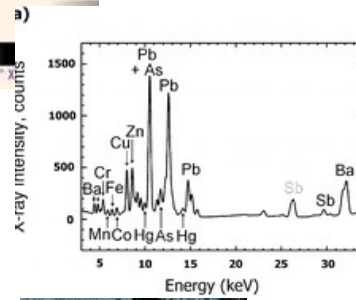
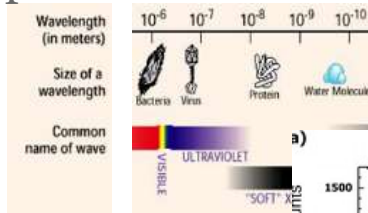
Courtesy Philip Willmott

14

# Spektroskopische Information – Röntgenstrahlen



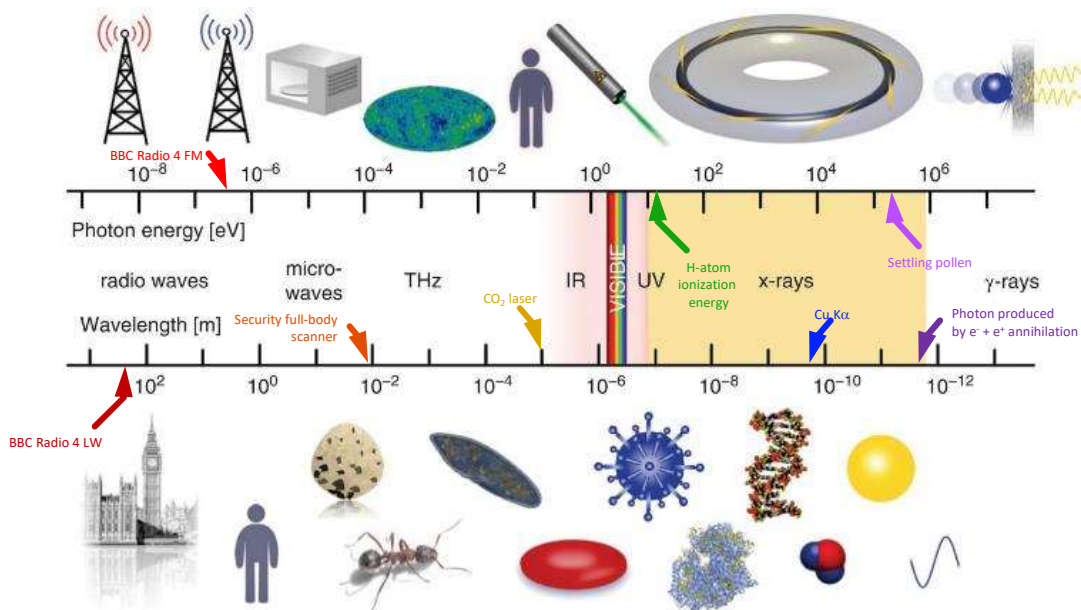
The 1887 floral painting by van Gogh, "Patch of Grass".



Dik et al., Anal. Chem. 80 6436 (2008).

15

# Das elektromagnetische Spektrum



Courtesy Philip Willmott

16





1895 Discovery of X-rays by Wilhelm Röntgen  
1901 Nobel prize in physics

Image of hand of Albert von Kölliker  
this is the second image, the first one, very similar is said to be the hand of his wife

## Weiterentwicklung



Absorption image  
Conventional radiography  
(since 1895...)



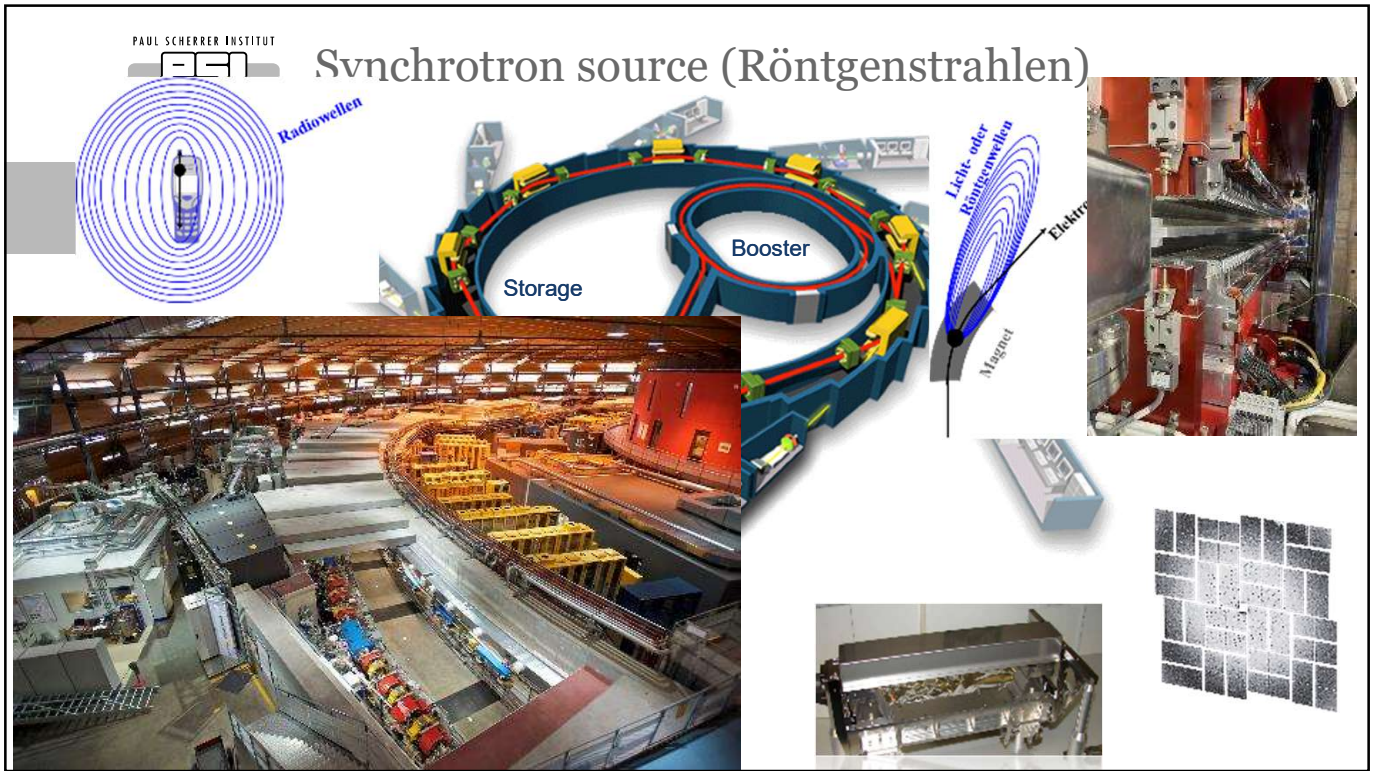
"Differential Phase image"



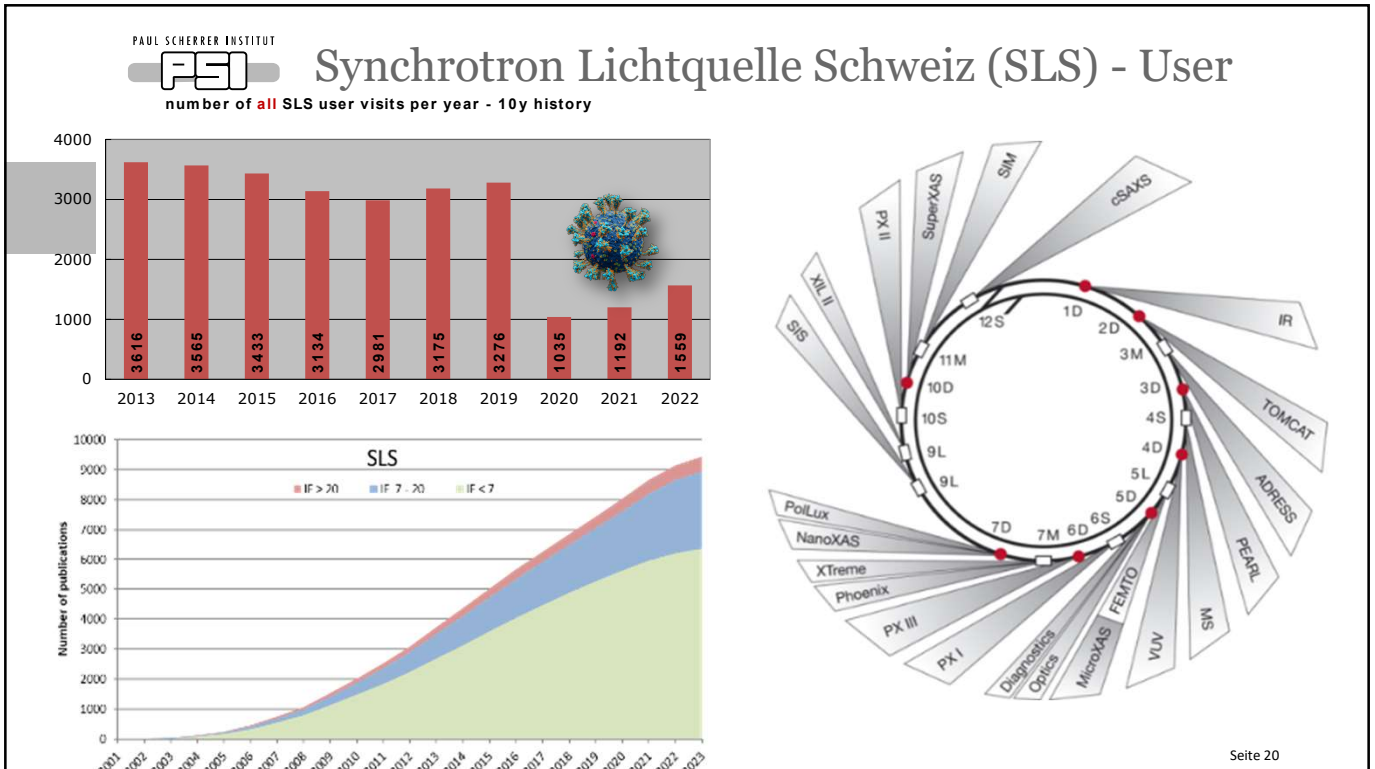
"Scatter image"

Index of refraction:  $n = 1 - \delta - i\beta$

$\Phi = 2\pi\delta(\lambda) / \lambda$  Phase Absorption  $\mu = 4\pi\beta(\lambda) / \lambda$



19



Seite 20

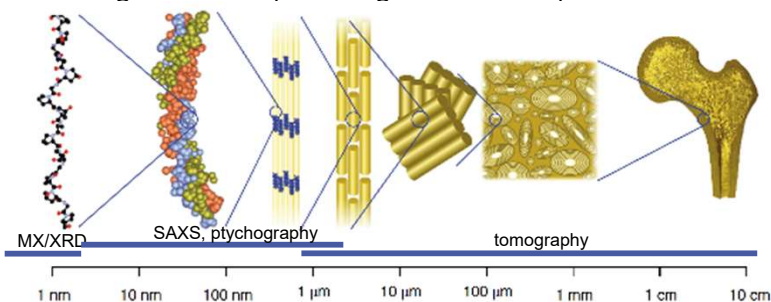
20



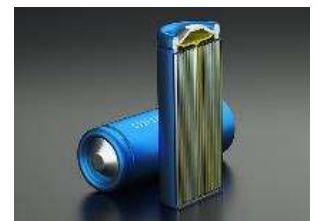
## Ziele der Synchrotronexperimente

### Abbildungen

- Mikron- bis Angstrom-Skala (z.B Collagen ⇒ Knochen)



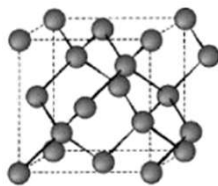
- Elektronische Eigenschaften neuartiger Materialien
- Chemie und Umweltwissenschaft
- Kulturelles Erbe
- Medizin/Pharma



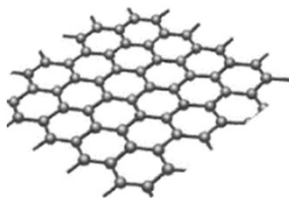
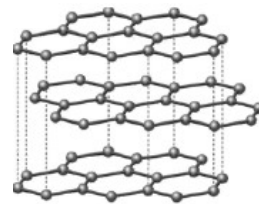
Courtesy Philip Willmott



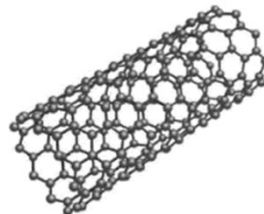
Diamond



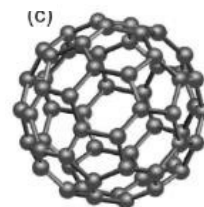
Graphite



Graphene

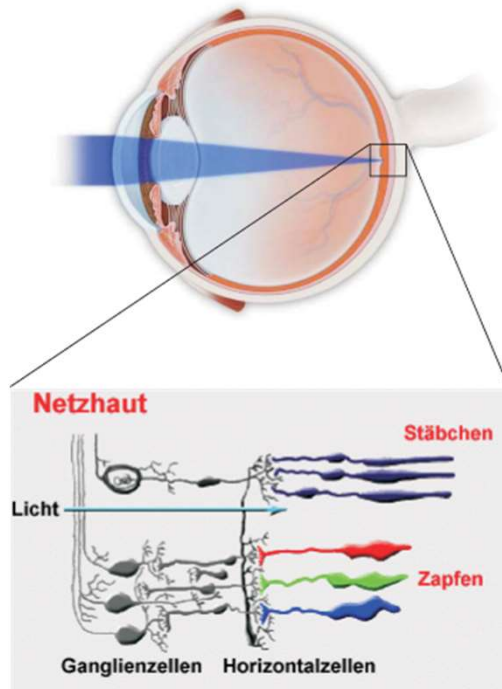


Carbon-nanotubes



Buckyminster fullerene(C60)

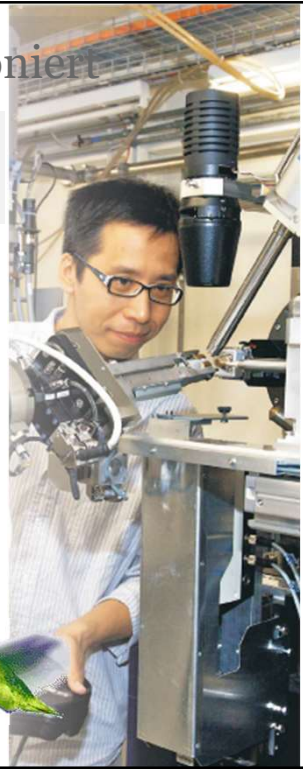
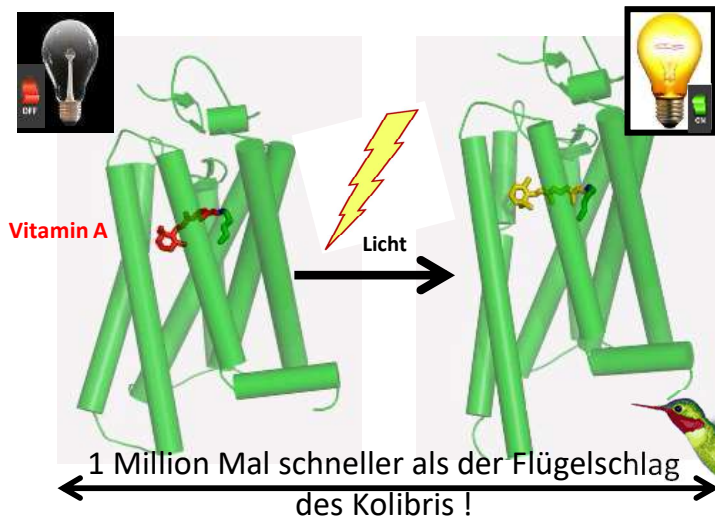




Sehen ist ein chemischer Vorgang

## Wie der Lichtschalter funktioniert

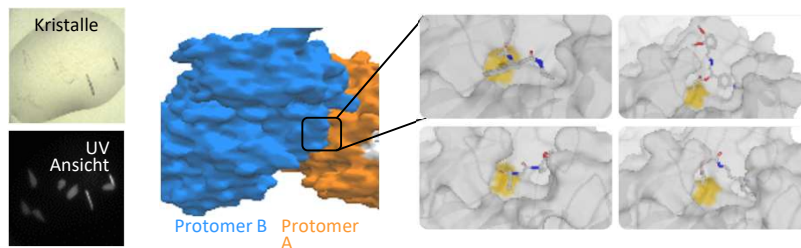
Protein-Strahllinien zeigen den chemischen Aufbau des Lichtsensors Rhodopsin ... auch in Aktion



## Präklinisches Projekt zur Wirkstoffentwicklung für die COVID-19 Hauptprotease

Die virale Hauptprotease (Mpro, auch 3CLpro genannt) ist an der Bildung des Coronavirus-Replikationskomplexes und damit an der Vervielfältigung des Virus beteiligt. Sie stellt ein attraktives Ziel für eine Therapie dar.

In einer kristallografischen Untersuchung von **180 niedermolekularen Verbindungen** wurden 4 Proben identifiziert, die an die Hauptprotease binden und dadurch von therapeutischer Bedeutung sein könnten.



<https://www.psi.ch/de/media/forschung-zu-covid-19>

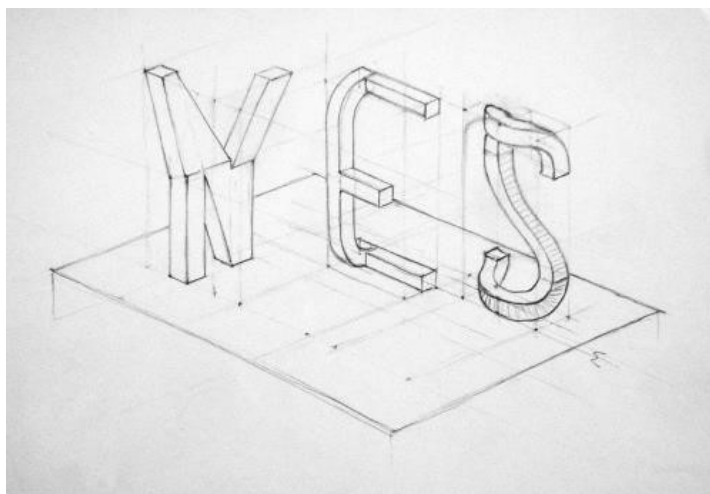
## Lass uns ein Bild davon machen - Imaging

# Der Schein kann trügen

Patrick Hughes Reverspective  
<https://www.patrickhughes.co.uk>

29

PAUL SCHERRER INSTITUT  
**PSI**

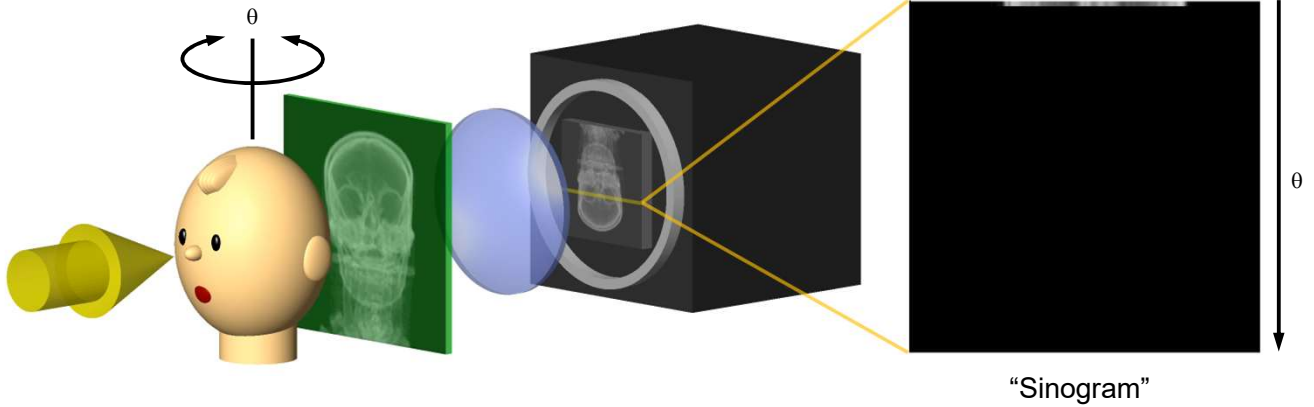


»yes/no« by markus raetz

Page 30

30

## 3 Dimensional: XTM-Versuchsanordnung

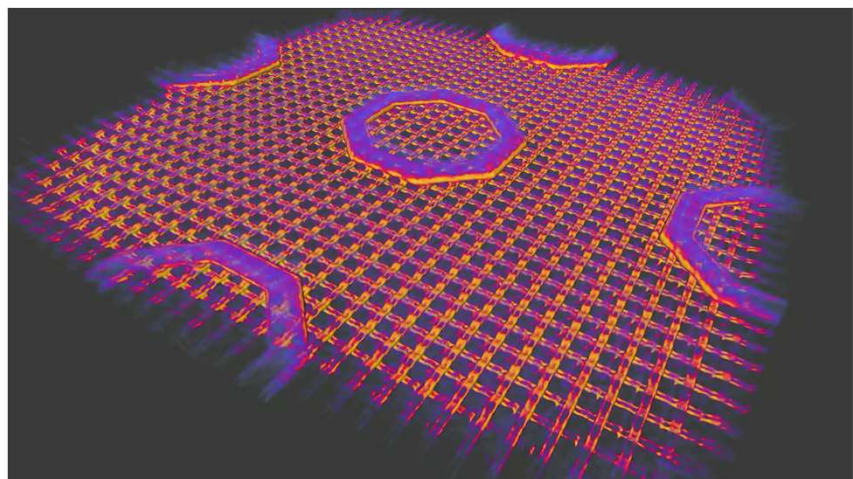


Courtesy Philip Willmott

31

## Mit Synchrotron Licht können wir in Chips reinschauen

Die Bildqualität ermöglichte die Auflösung aller Chipschichten und Verbindungen bis zur untersten Schicht. Die maximale Auflösung betrug bei diesem Experiment 18,9 nm.



3 dimensionale Ansicht eines Computerchips

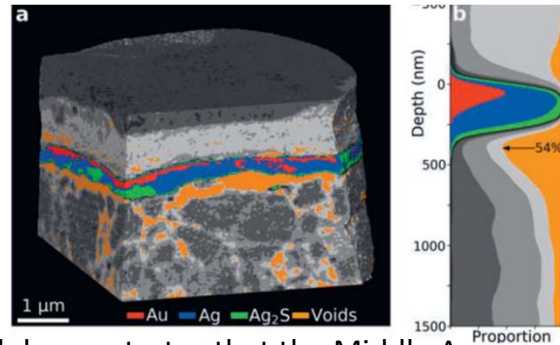
Mirko Holler, Manuel Guizar-Sicairos, Esther H. R. Tsai, Roberto Dinapoli, Elisabeth Müller, Oliver Bunk, Jörg Raabe, Gabriel Aeppli, Nature <https://www.psi.ch/en/media/our-research/3-d-x-ray-imaging-makes-the-finest-details-of-a-computer-chip-visible>

Seite 32

32



# Zwischgold – The Secret Nanomaterial of Medieval Gilding



The revelation of nanomaterials in Zwischgold demonstrates that the Middle Ages was not the Dark Ages but rather a climax epoch that produced exquisite art technologies.

Q. Wu, K. Soppa, E. Müller, J. Müller, M. Odstrcil, E. H. R. Tsai, A. Späth, M. Holler, M. Guizar-Sicairos, B. Butz, R.H. Fink, B. Watts Nanoscale

Page 33

33

**Zungenstruktur der Pantherchamäleon dank Röntgentechnik**  
 Marianne Liebi PSI/EPFL  
 Jonathan Avaro Empa  
 In close collaboration with Zurich University and the Zoo Zurich

ZOOh!  
ZÜRICH

PAUL SCHERRER INSTITUT  
PSI

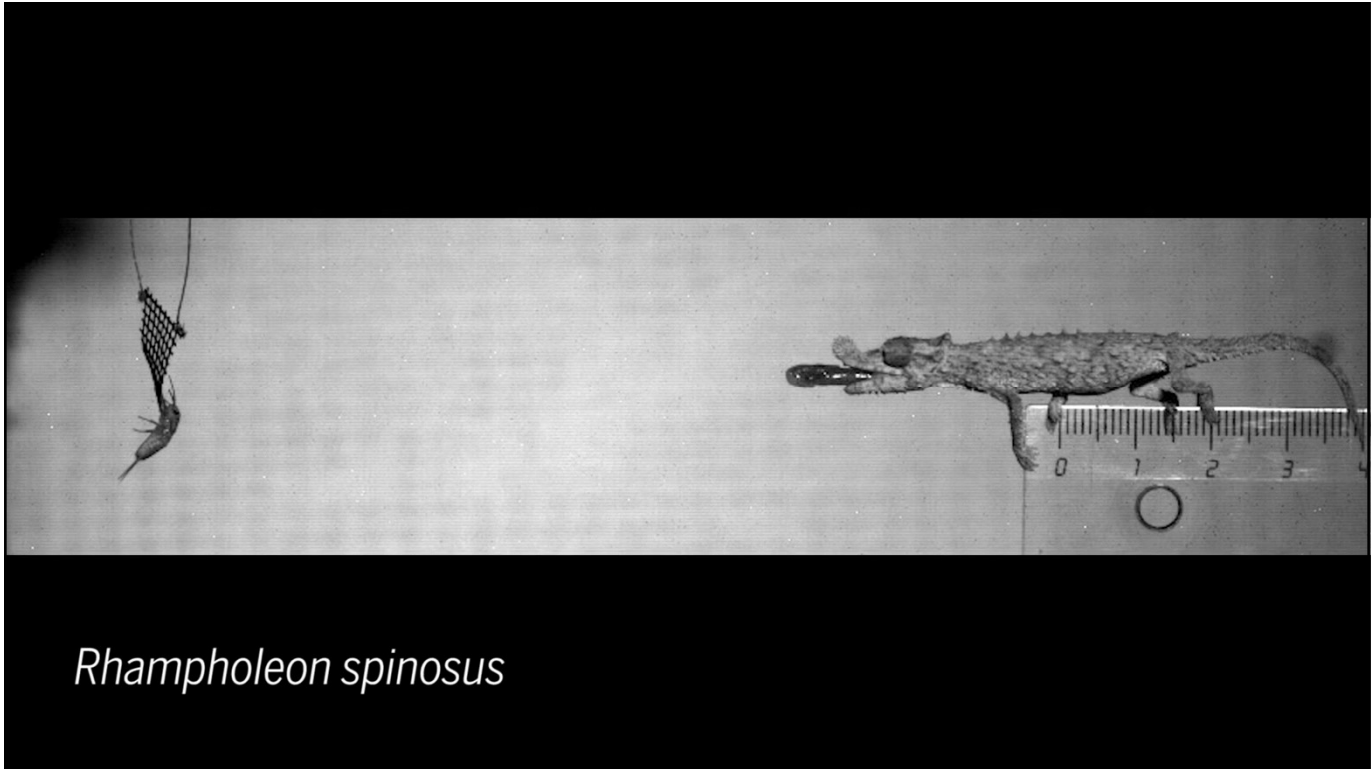
Empa

EPFL

CHALMERS

Universität Zürich UZH

34



*Rhampholeon spinosus*

35

PAUL SCHERRER INSTITUT  
PSI SAXS tensor tomographie

Kollagenschicht zeigt gekreuzte Orientierungen

- stark funktionalisiertes Bindegewebe
- Adaptierte **Nanostruktur** um starke Kräfte und Beschleunigungen zu überstehen

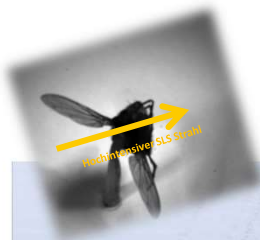
Mineralisiertes Gewebe

ceratobranchial  
hyoglossus complex  
entoglossal process  
intralingual sheaths  
tongue  
hyoid  
Beschleunigungsmuskel  
m. accelerator  
tongue pouch  
tongue pad  
Intralinguale Schichten

36

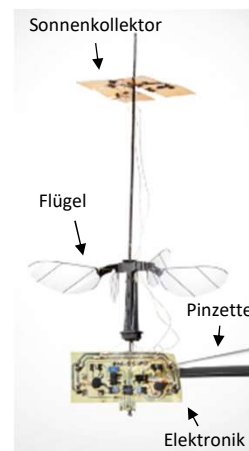
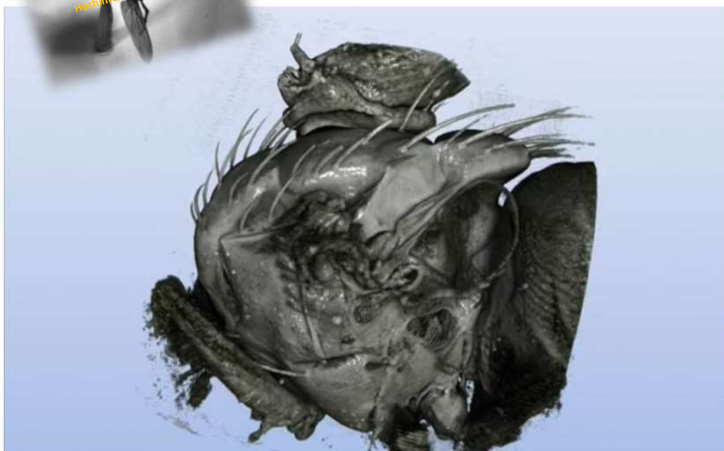
# Lass uns einen Film davon machen – Verstehen der Dynamik

# Bioinspirierter Schlagflügelflug



## Schlagflügelroboter

- Sehr agil und wendig
- Ruhig
- Weniger gefährlich



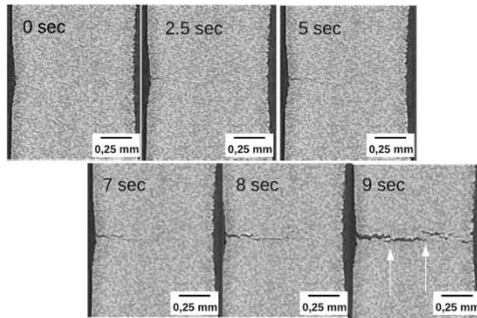
Walker et al., PloS Biology (2014) & Moko et al., SciRep (2015)  
Breuer et al., Nature 2019



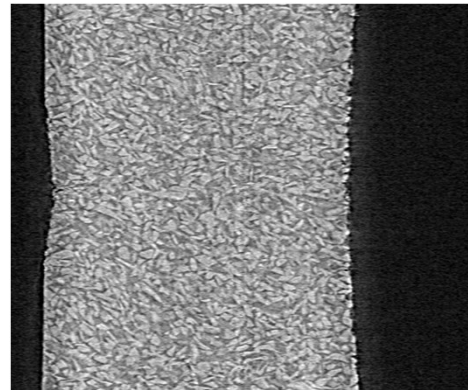
## Looking into materials - dynamic

Tomcat beamline

Crack propagation dynamics under tensile load @ 20 Hz  
Alumina particle reinforced aluminium composite



E. Maire, et. al., *Int J Fract* 1 (2016).

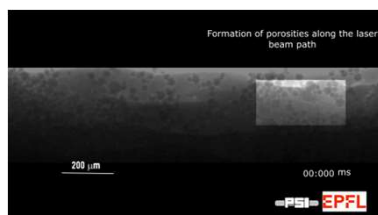


Movie playing in real time (9 seconds, 180 frames)

TOMCAT beamline SLS at PSI, [www.psi.ch/sls](http://www.psi.ch/sls)

39

## 3D-Drucken von Metallen optimieren



Zusammenhang der Mikrostruktur und Laserbewegung verstehen

Helena van Swygenhoven (PSI/EPFL), Steven van Petegem (PSI) et al  
Seite 40

40



# SLS – ein sehr vielseitiges Werkzeug für Forschung und Entwicklung

27. Juli 2021

## Secret of Stradivarius violins revealed

Research Using Synchrotron Light | Large Research Facilities  
Materials Research | Matter and Material

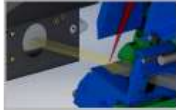
As an international team of researchers discovered, the old Italian masters Stradivari and Guarneri relied on unexpected chemical additives.



17. Januar 2022

## Direct observation of crack formation mechanisms with operando Laser Powder Bed Fusion X-ray radiography

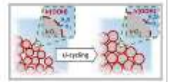
Operando high speed X-ray radiography experiments reveal the cracking mechanism during 3D laser printing of a Ni superalloy.



29. Juli 2019

## Operando X-ray Characterization of High Surface Area Iridium Oxides to Decouple their Activity Losses for the Oxygen Evolution Reaction

The increasingly popular power-to-gas technology for the utilization of hydrogen as a clean energy vector involves the use of electrolyzers to convert water into  $H_2$  and  $O_2$ . The oxygen evolution reaction (OER) is the least efficient among these processes, and a catalyst is required to speed up its kinetics at the high potentials (customarily  $\approx 1.4$  V vs. the reversible hydrogen electrode) at which the reaction takes place.



30. August 2021

## Nanobodies against SARS-CoV-2

In a study published in *MBio* journal, researchers at the Max Planck Institute for Biophysical Chemistry, Göttingen, Germany, developed nanobodies that efficiently block the coronavirus SARS-CoV-2 and its variants.

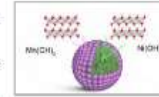


KaobN.ch/ps

17. November 2023

## "Core-shell" cathodes for high performance Li-ion batteries

"Li-rich Ni-rich" core-shell particles are engineered as layered cathode materials for high energy Li-ion batteries, including a controllable outer "Li-rich Mn-rich" shell improving cyclability.



## Semiconductors reach the quantum world

Media Releases | Research Using Synchrotron Light | Materials Research | Matter and Material | Quantum Research

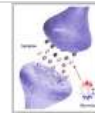
Boosted with superconductivity: Semiconductor technology can get a new twist by exploiting quantum effects in superconductors.



17. März 2020

## Can skyrmions read?

Can a skyrmion-based device be used to read a handwritten text? In this work, an international scientist collaboration led by the Korea Institute of Technology and the IBM Watson research center could provide a first answer to this question by fabricating a proof-of-principle single-neuron artificial neural network, using X-ray magnetic microscopy at the Swiss Light Source to investigate its performances.



# Meine Forschung



Swiss Nanoscience Institute  
Exzellenzzentrum  
der Universität Basel und  
des Kantons Aargau

PAUL SCHERRER INSTITUT



Finanzierung: SNF, EU, PSI, SNI

# Manipulating magnetization

Magnetic field

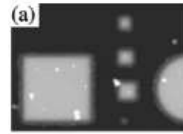


Supermagnet # 42  
4" dia x 2" thick  
(click for larger image)

Electric field



Patterning and size



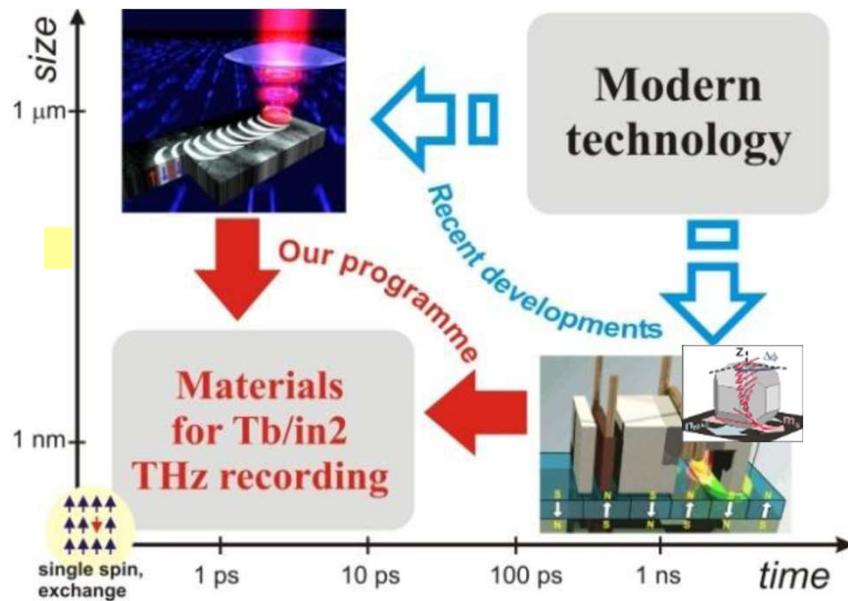
Laser



Interfaces



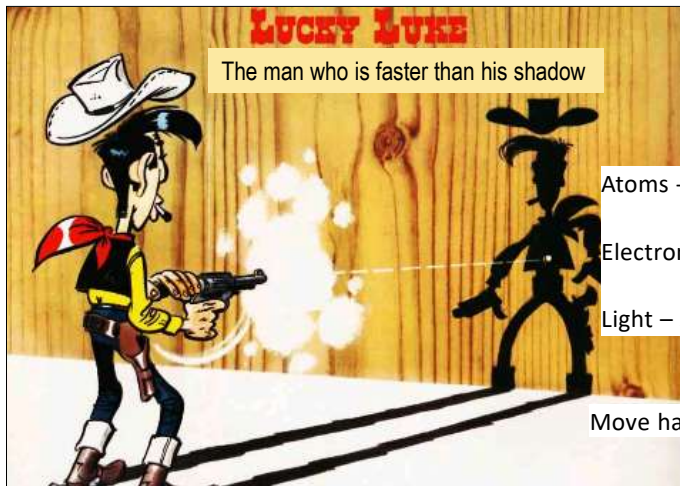
# Small and fast – fascinating physics



Domain size, domain wall width, Exchange length, Spin diffusion length, Spin precession length

## Ultrafast – 100ps down to femtoseconds

50-80 ms Blink of an eye  
320 ms length of time a single frame on TV screen is shown



Atoms - speed of sounds: 1nm / 1ps

Electrons – Fermi velocity: 1nm / 1fs

Light – speed of light: 1nm / 3as

Move hand: 1nm / 30as

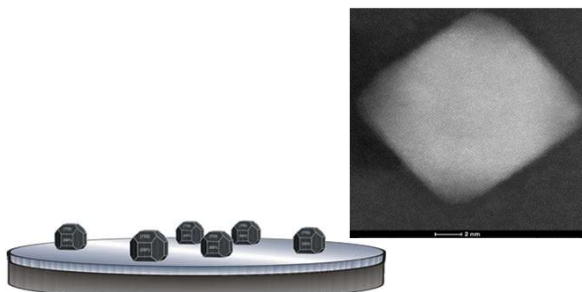
How much time has Lucky Luke?

**About 10 ns**

Page

45

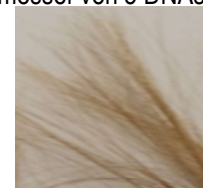
## Wie gross ist Nano?



Strecke, die ein Haar in 3 Sekunden wächst.

10 nm

Durchmesser von 5 DNAs



46

46

## Schalten der Magnetisierung

Mit einem Magnetfeld



Durch Strom



Wie wäre es mit einem Lichtblitz?

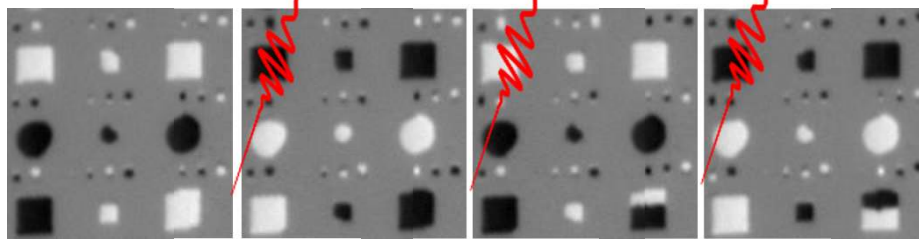
(Laser ermöglichen extrem kurze Lichtblitze)



47

47

## Laser induziertes Schalten von kleinen Strukturen



2  $\mu\text{m}$

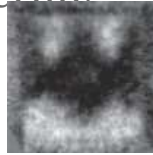
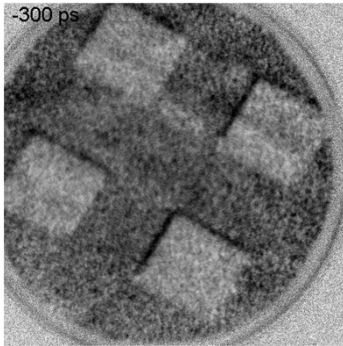
Durch einen sehr kurzen Lichtblitz lässt sich die Magnetisierungsrichtung von kleinen Strukturen gezielt schalten, ohne ein Magnetfeld zu verwenden.

L. Le Guyader, S. El Moussaoui, M. Buzzi, R. V. Chopdekar, L. J. Heyderman, A. Tsukamoto, A. Itoh, A. Kirilyuk, Th. Rasing, A. V. Kimel, and F. Nolting, *App Phys. Lett.* **101**, 022410 (2012).

48

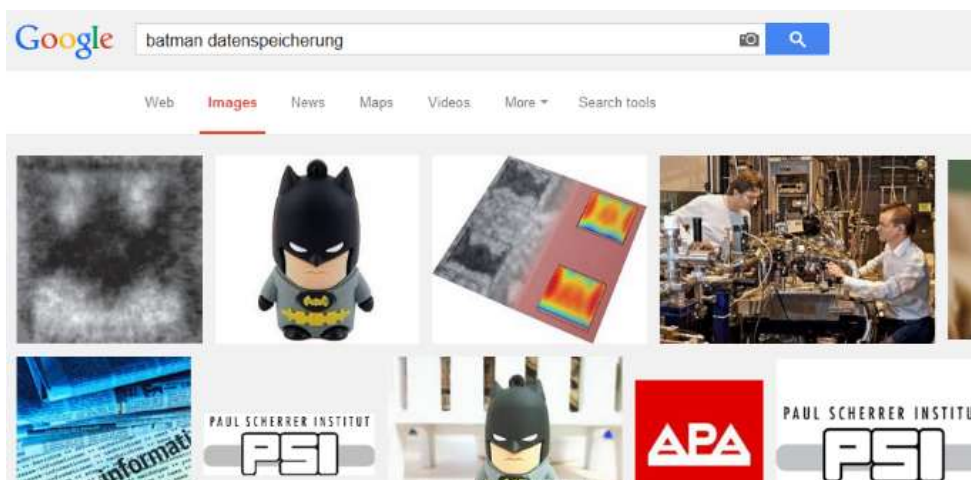


# Batman zeigt den Weg zu kompakter Datenspeicherung

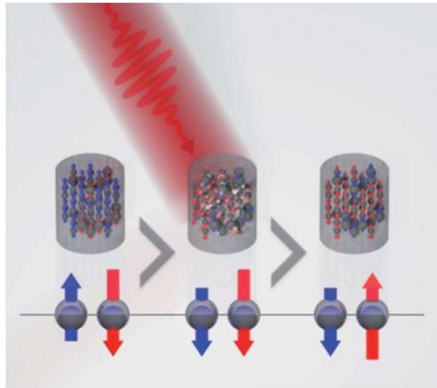


L. Le Guyader, M. Savoini, S.E. Moussaoui, M. Buzzi, A. Tsukamoto, A. Itoh, A. Kirilyuk, T. Rasing, A.V. Kimel, and F. Nolting, Nat. Commun. **6**, 5839 (2015).

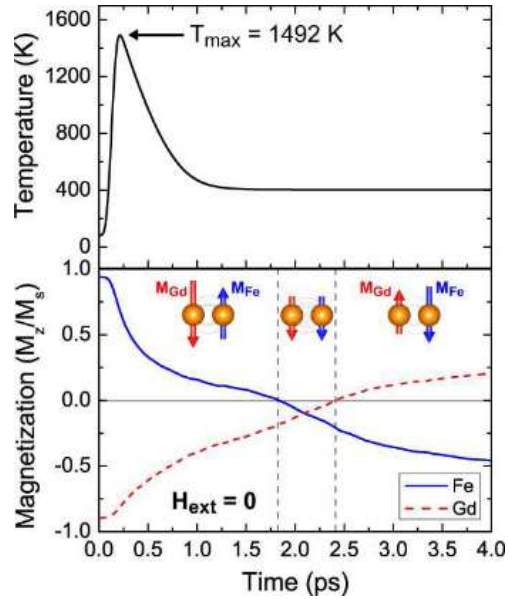
# Websuche



## How does it work



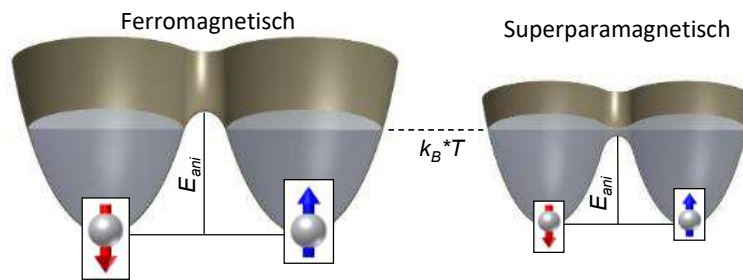
- Different magnetization
- Angular momentum - exchange
- Distinct switching dynamics Fe and Gd
- Anti-parallel coupling



T. A. Ostler, J. Barker, R. F. L. Evans, R. Chantrell, U. Atxitia, O. Chubykalo-Fesenko, S. El Moussaoui, L. Le Guyader, E. Mengotti, L. J. Heyderman, F. Nolting, A. Tsukamoto, A. Itoh, D. Afanasiev, B. A. Ivanov, A. M. Kalashnikova, K. Vahaplar, J. Mentink, A. Kirilyuk, Th. Rasing and A. V. Kimel, Nat. Commun. 3, 666 (2012).

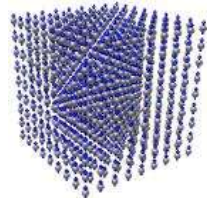
51

## Wie stabil sind Nanomagnete?



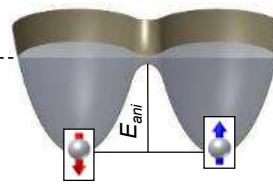
Verhalt sich

wie ein (Permanent-) Magnet



$$V^{1/3} = 14 \text{ nm} \rightarrow \tau = 10^4 \text{ s}$$

$$V^{1/3} = 10 \text{ nm} \rightarrow \tau = 10^{-5} \text{ s}$$



Verhalt sich

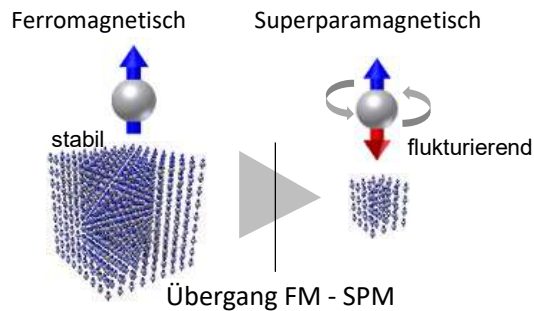
nicht

wie ein (Permanent-) Magnet

52

52

## Untersuchen der Grössenabhängigkeit



Lehrbuchwissen: "rein" vom Volumen abhängig  
 Problem: Die meisten Techniken messen nicht die magnetischen Eigenschaften von einem einzelnen Partikel, sondern von vielen Partikeln gemittelt.

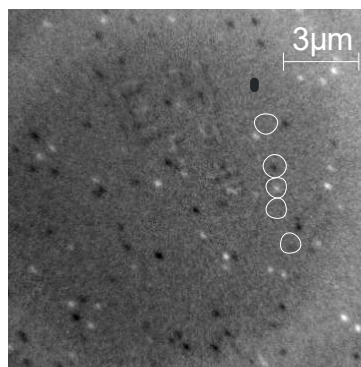
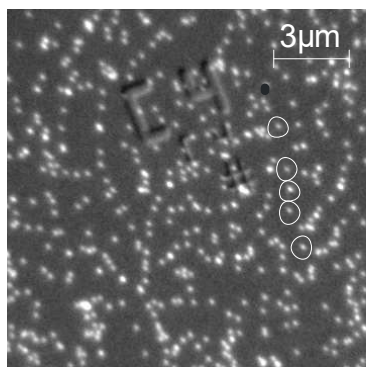
Sind wirklich alle gleich?

Ziel: Entwickeln einer Methode, um das Verhalten von einzelnen Partikeln zu untersuchen.

## 8 - 20 nm Eisennanopartikel auf Si

Elementabbildung

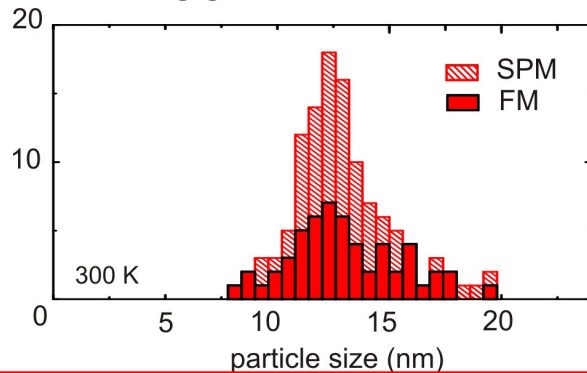
Magnetische Abbildung



Warum sind nicht alle Eisenpartikel magnetisch?

Warum sind überhaupt welche magnetisch?

## Größenabhängigkeit



Eisenpartikel zwischen 8 – 20 nm

Lehrbuchwissen:

- Alle sollten superparamagnetisch sein

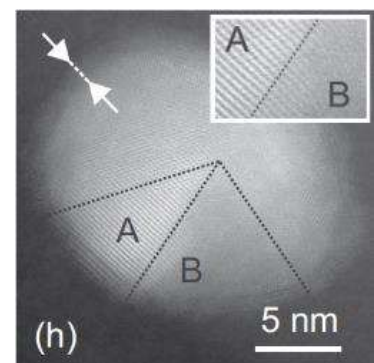
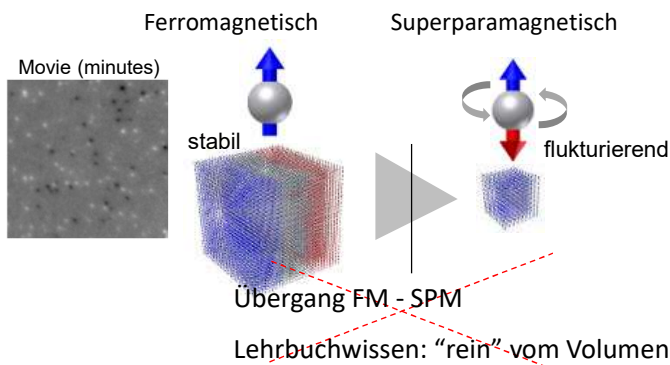
Unser Ergebnis:

- Keine Größenabhängigkeit für ferromagnetisches und superparamagnetisches Verhalten

55

55

## Metastabiler Magnetisierungszustand in Fe Nanopartikeln



- Metastabiler Zustand durch defekte
- Verstehen der Oxidierungsprozesse

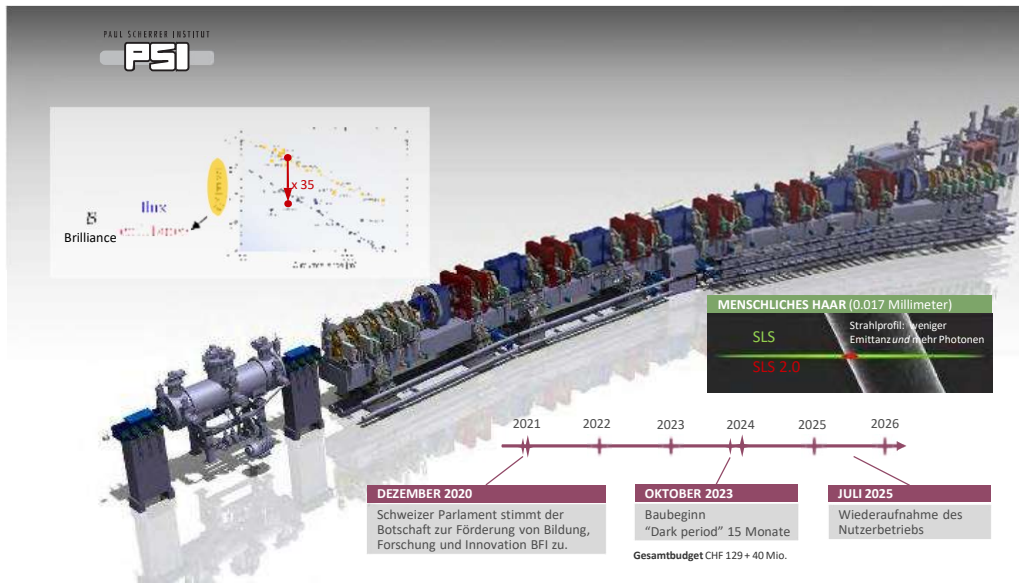
- Armin Kleibert, Ana Balan, Rocio Yanes, Peter M. Derlet, C. A. F. Vaz, Martin Timm, Arantxa Fraile Rodríguez, Armand Béché, Jo Verbeeck, R. S. Dhaka, Milan Radovic, Ulrich Nowak, and Frithjof Nolting, Phys. Rev. B 95, 195404 (2017).
- Jaianth Vijayakumar, Tatiana M. Savchenko, David M. Bracher, Gunnar Lumbeck, Armand Béché, Jo Verbeeck, Štefan Vajda, Frithjof Nolting, C.A.F. Vaz, and Armin Kleibert, Nature Communications, 14, 174 (2023)

56

56

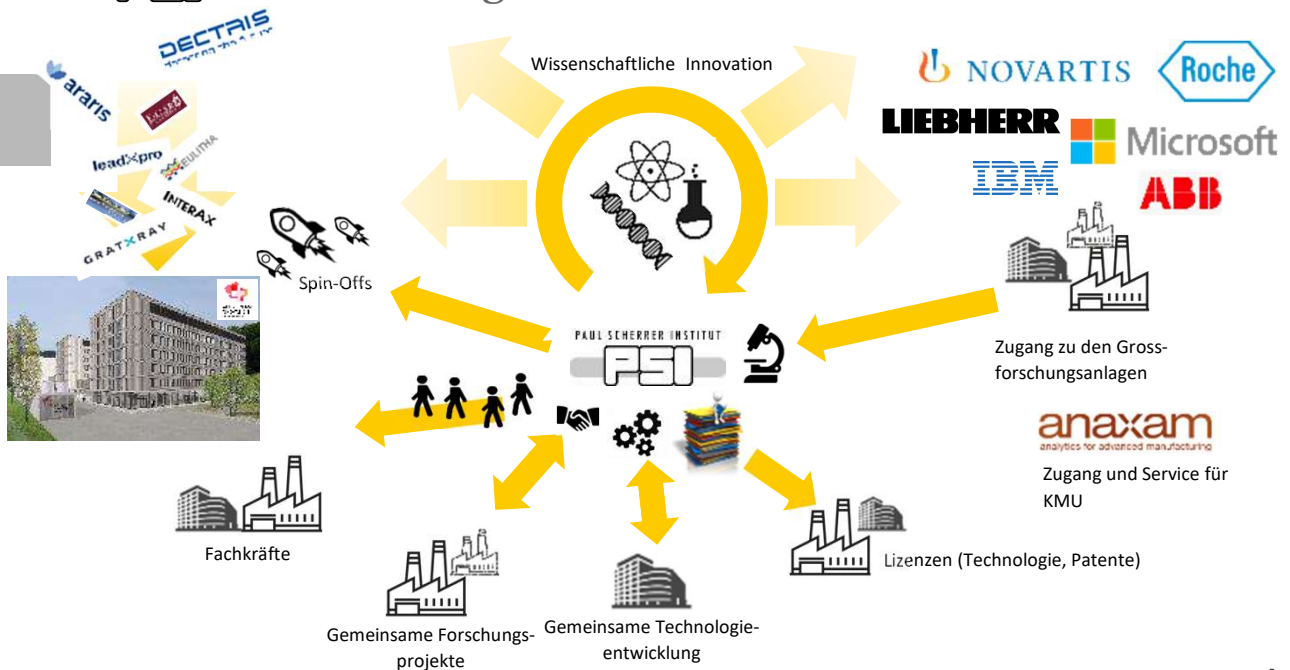


# SLS 2.0: Die Erfolgsgeschichte geht weiter

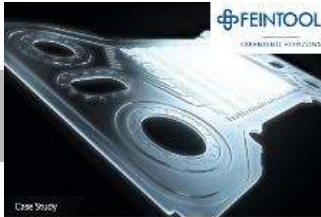


<https://www.psi.ch/de/sls2-0>

# Technologie-Transfer am PSI

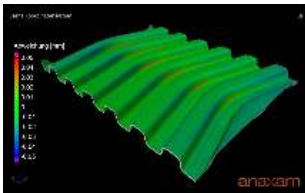


## Beispiele von Projekten



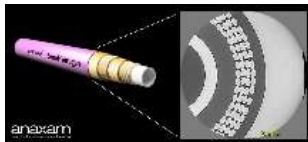
### Untersuchung von Bipolarplatten aus Brennstoffzellen mittels hochauflösender Synchrotron-CT

“ Die Anforderungen an die geometrische Präzision und die Integrität der vertikalenden Wandstärke nach dem Umformen von metallischen Bipolarplatten erfordern den Einsatz von modernsten Messmitteln – ANAXAM bietet uns hierzu ein starkes Tool für die Entwicklung unserer Fertigungstechnologie. “



### Untersuchung der Wasserstoffschlauchstruktur mittels hochauflösender Synchrotron-CT

“ Das Projekt unterstützt unsere Umweltsicherungsprozesse. Das Synchrotron-CT zeigt uns zentralisiert die gesamte Schlauchlänge. Die gewonnenen Erkenntnisse tragen zur ständigen Weiterentwicklung unserer Wasserstoff-Produktion bei! “



### Untersuchung von Elektromotorkomponenten mittels hochauflösender Neutronen CT

“ Die Expertise von ANAXAM ermöglicht uns eine Einzigartigkeit im Bereich bildgebende Verfahren. Mit dem Neutronen-CT erweitern wir unsere Analysemethoden, um eine hochpräzise 3D-Tomographie. “



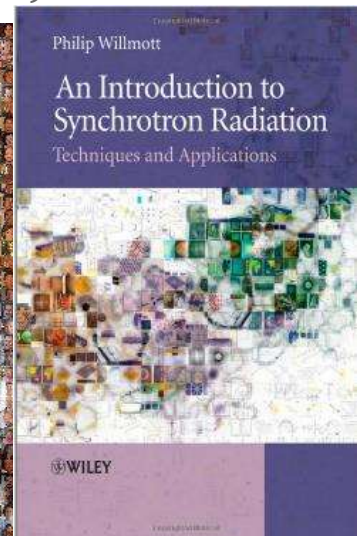
### Mikrostrukturelle Charakterisierung von Materialien und Komponenten für die Entwicklung von Fusionsreaktoren mittels Neutronendiffraktion, Neutronenkleinwinkelstreuung und Neutronenbildgebung

“ Die Zusammenarbeit mit ANAXAM ermöglicht es ENEA, Neutronentechniken für die zerstörungsfreie Charakterisierung von Fusionswerkstoffen und -komponenten einzusetzen, einschließlich bestehender Proben. “

Prof. Roberto Betti, ENEA, Center for Fusion Energy Research and Technology, Frascati, Italy

[www.anaxam.ch](http://www.anaxam.ch)

## Es braucht viele Hände (und Köpfe)



[www.psi.ch/sls](http://www.psi.ch/sls)

[Frithjof.nolting@psi.ch](mailto:Frithjof.nolting@psi.ch)