PAUL SCHERRER INSTITUT

PSI-Besuch einer Gruppe

Betreuung durch Werner Joho

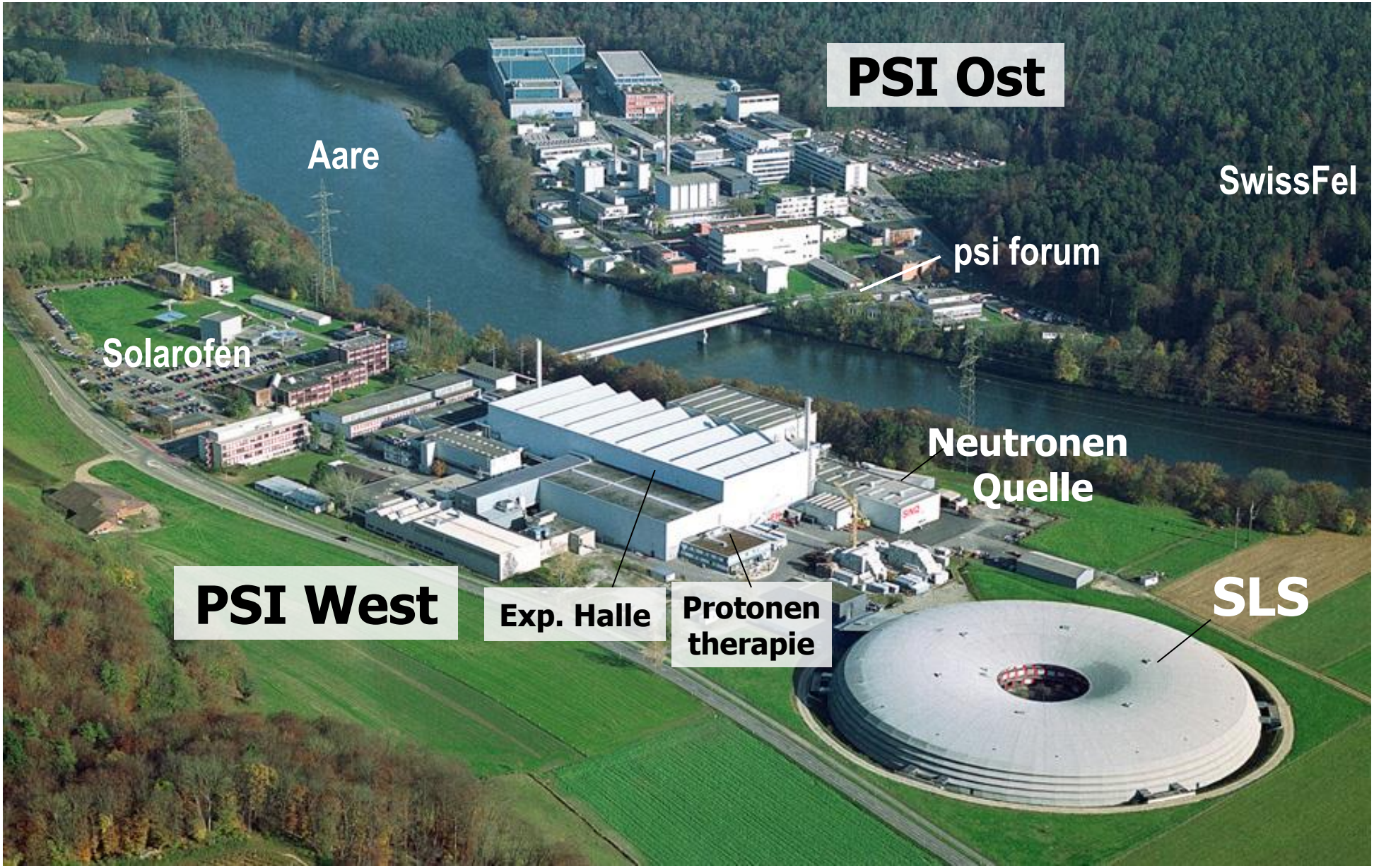
(grosser Foliensatz , Auswahl angepasst an Gruppe)

- das PSI im Überblick
- Energieforschung, Protonentherapie, Neutronenquelle SINQ

  Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS
- 3D-Film, Exponate entdecken
- Getränkepause
- Besuch im PSI West: SLS, Protonentherapie

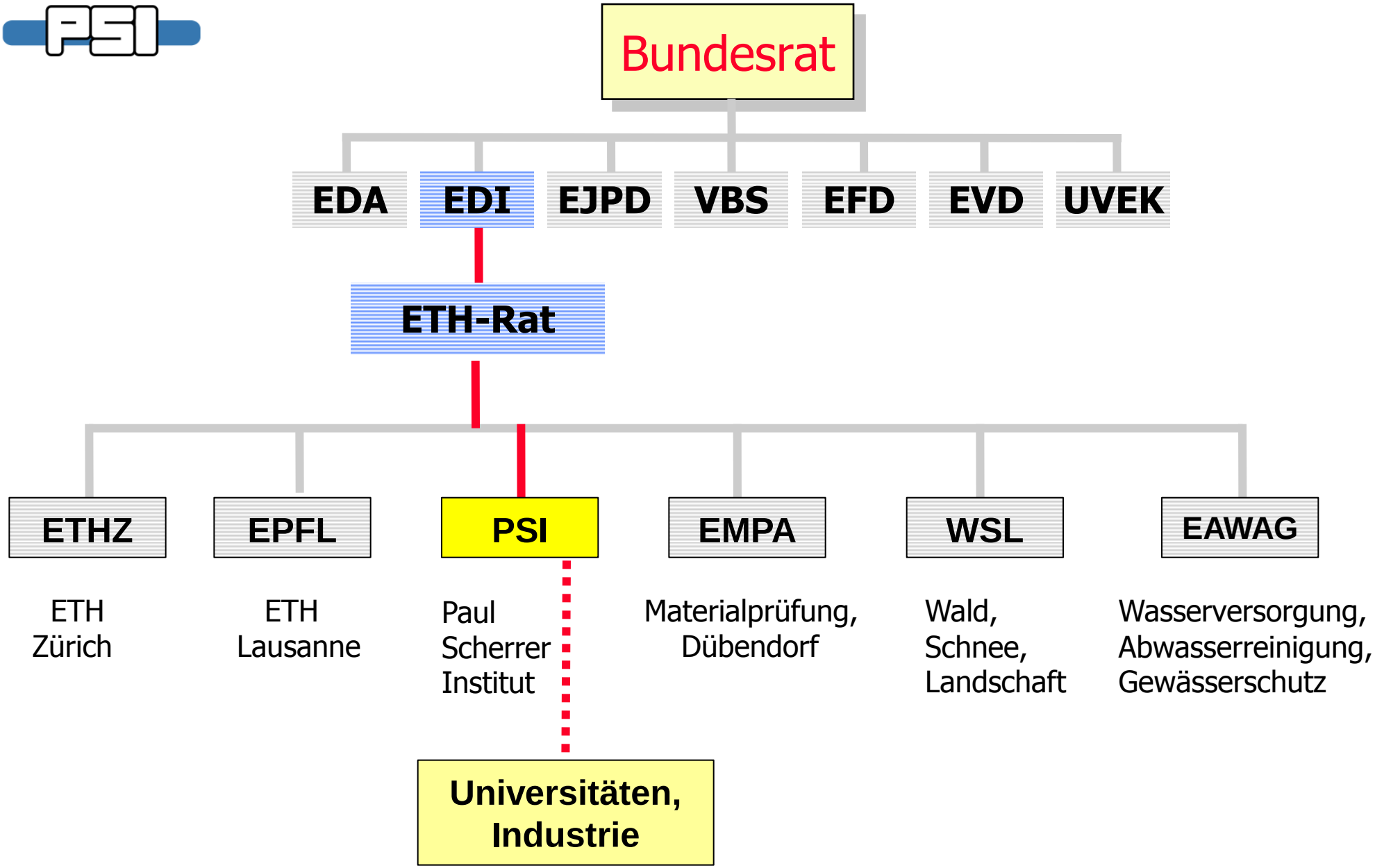
PAUL SCHERRER INSTITUT

Flugaufnahme



W.Joho 2013

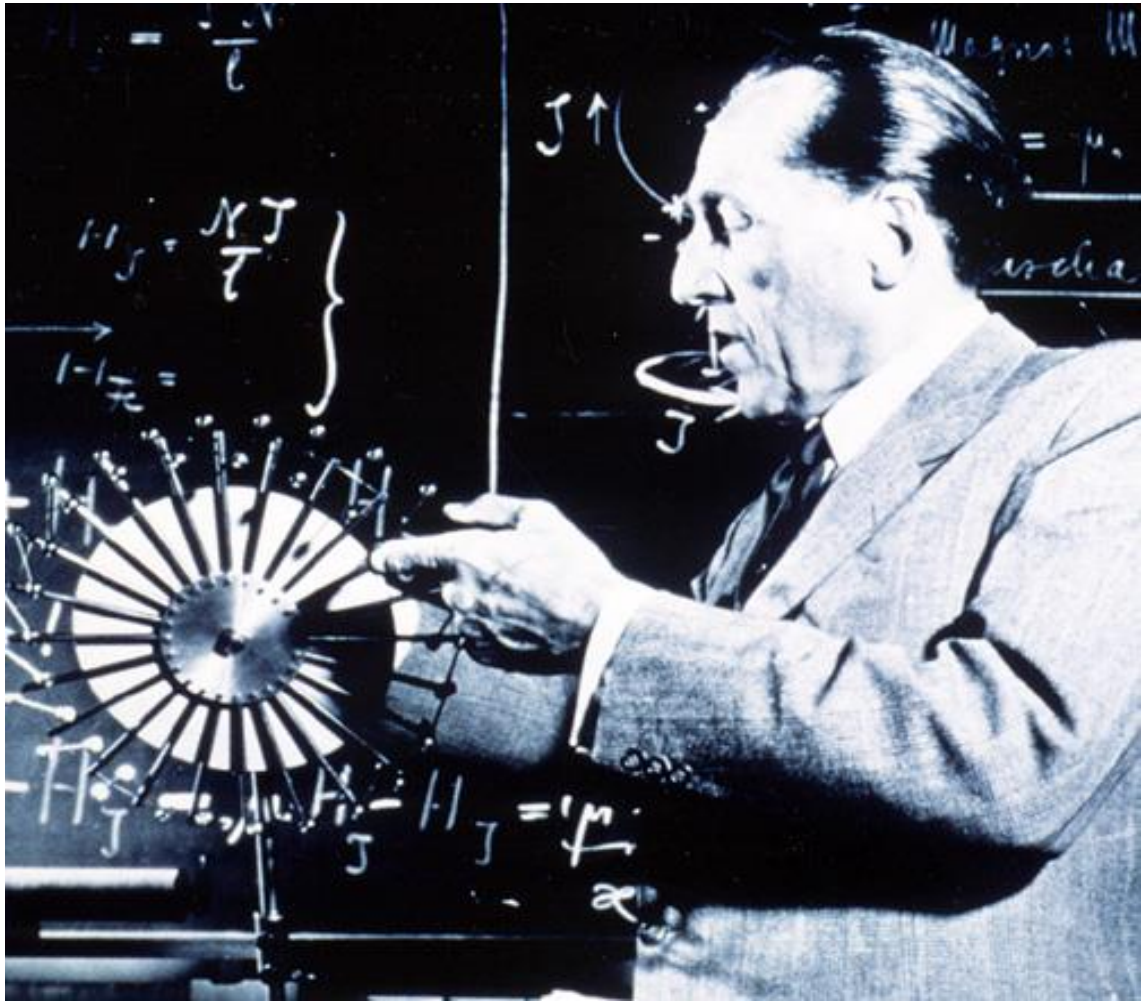
PAUL SCHERRER INSTITUT



W.Joho 2013

PAUL SCHERRER INSTITUT

Paul Scherrer (1890 – 1969)



- Studium Physik / Mathematik
  ETH Zürich, Königsberg, Göttingen
- 1920: Direktor Physik Institut ETH.
  Populäre Physikvorlesungen als shows
- Forschung:
  Röntgenstreuung, Kernphysik
- 1946: Präsident der schweiz.
  Studienkommission für Atom-energie
- Beteiligung an der Gründung des
  CERN in Genf

PAUL SCHERRER INSTITUT

Kennzahlen 2013

PSI Globalbudget	250 Mio. CHF
Drittmittel	80 Mio. CHF

Personal	1‘500
Externe Benutzer	ca. 2‘100
Doktoranden	ca. 300
Lehrlinge	85

PAUL SCHERRER INSTITUT

Mission des PSI

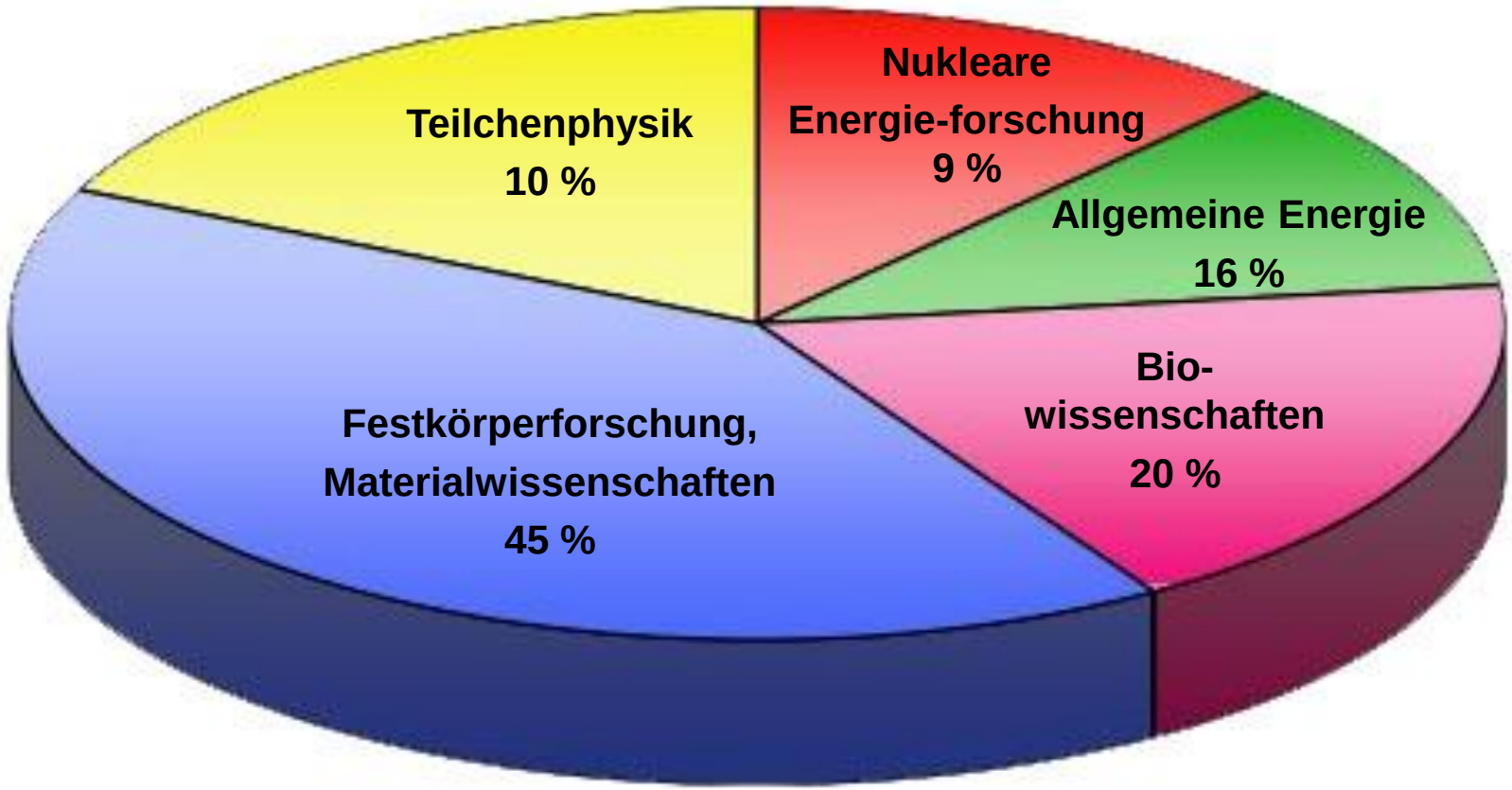
Forschung auf internationalem Niveau

dank komplexen Grossanlagen

- **Materialwissenschaften , Nanotechnologie**
- **Teilchenphysik, Struktur-Biologie**
- **Protonentherapie**
- **Energieforschung**

PAUL SCHERRER INSTITUT

Budget 2013 250 Mill. CHF



PAUL SCHERRER INSTITUT

Energie-Forschung

Alternatif-Energien

- Wasserstoffauto, Brennstoffzellen
- effiziente Batterien
- Solar-Ofen, Solarzellen

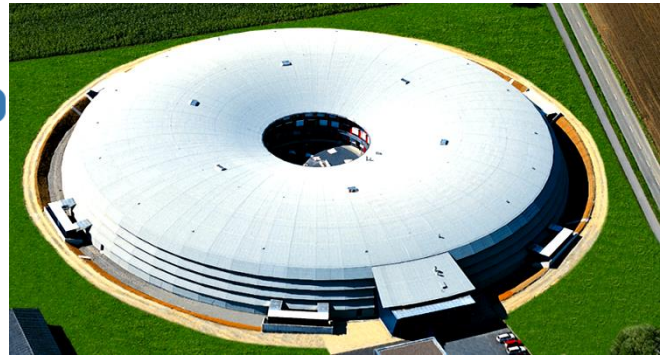
Nukleare Energie

- Sicherheit von AKW's
- Abfallentsorgung
- (Transmutation des Abfalls !?)

PAUL SCHERRER INSTITUT

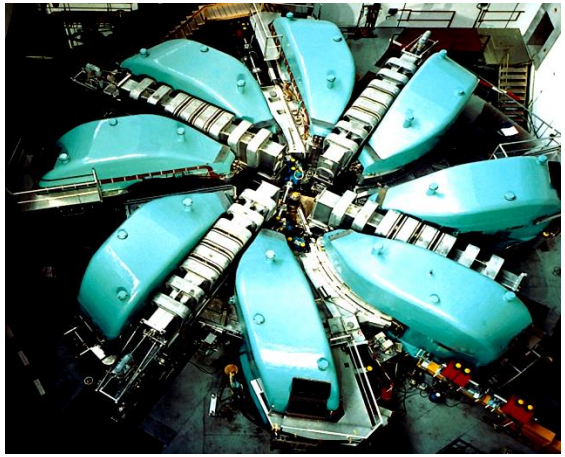
PSI

SLS



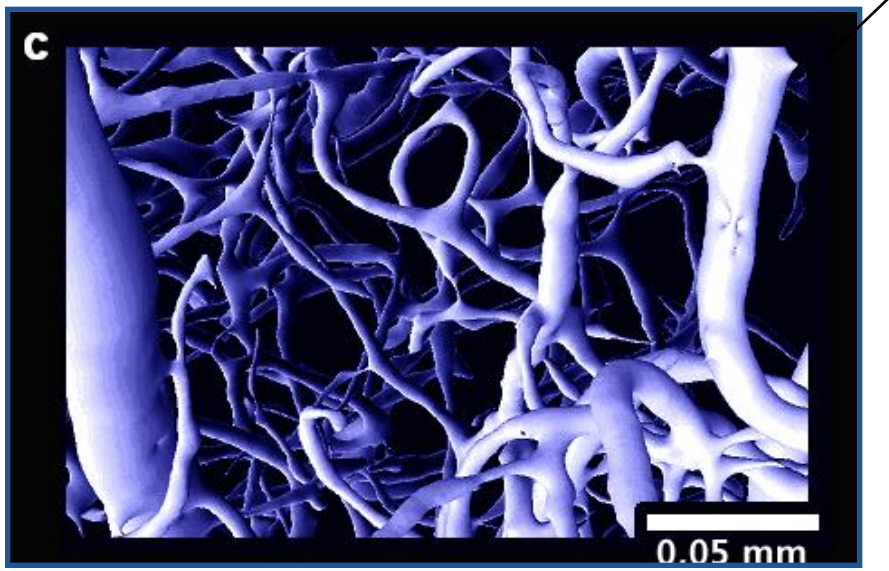
Materialforschung

mit Röntgenstrahlen, Neutronen, Müonen



Zyklotron

Blutgefässe



- Struktur von Biomolekülen für neue Arzneimittel
- magnetische Struktur von Oberflächen
- 3D-Rekonstruktion (Tomographie) von Mikrostrukturen
- Supraleiter
- interne Magnetfelder in Festkörpern
- Radiographie grosser Objekte mit Neutronen

PAUL SCHERRER INSTITUT

Nobelpreis in Chemie 2009 !

V.Ramakrishnan bekommt Nobelpreis in Chemie

einige Messdaten an der

Protein Kristallographie Strahllinie der SLS

Untersuchung von Ribosomen

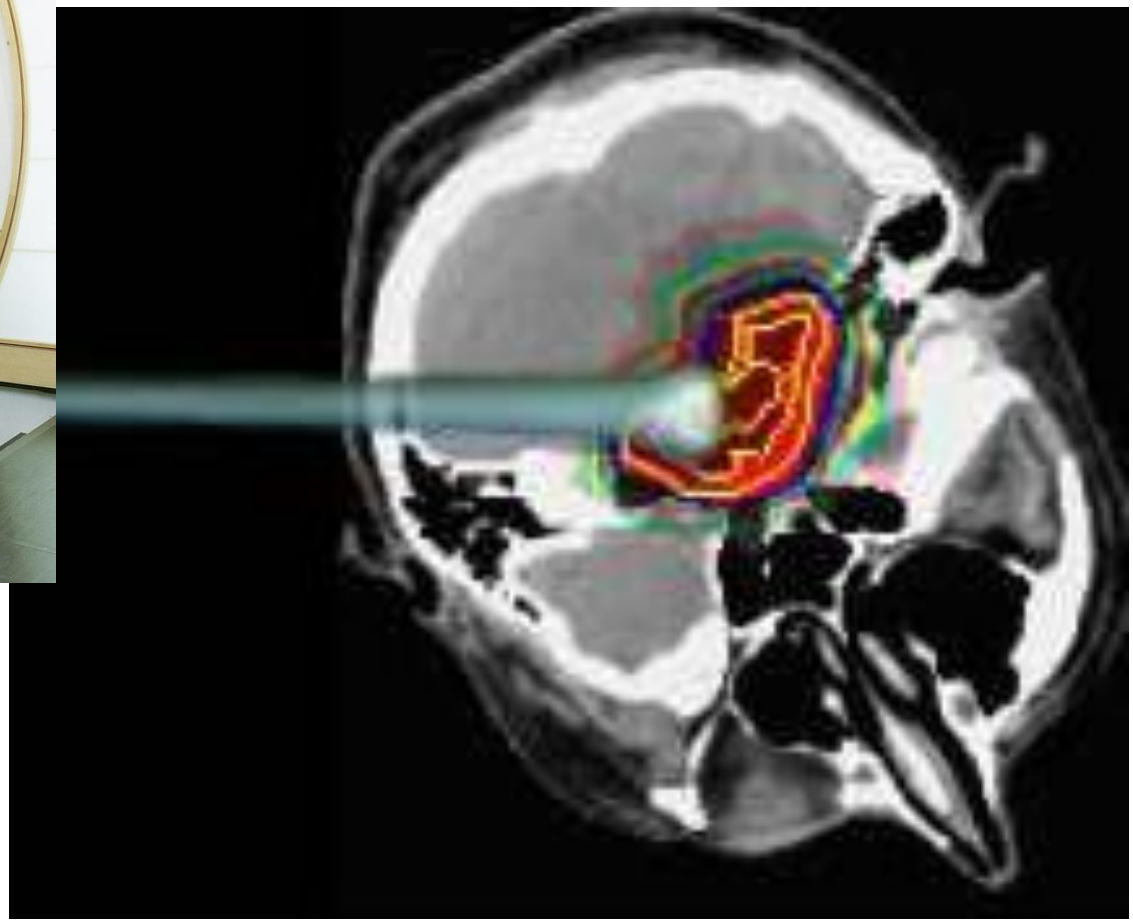
durch Streuung von Röntgen Strahlen

PAUL SCHERRER INSTITUT

Forschung in Medizin

Tumor Therapie mit Protonen

(Hirntumore, Augentumore)



Produktion von Isotopen
für Spitäler

PAUL SCHERRER INSTITUT

W.Joho 2013

PAUL SCHERRER INSTITUT

supraleitendes Zyklotron
250 MeV Protonen
für Strahlentherapie

Augentumore

tief liegende Tumore

2 Bestrahlungs-Stationen

3D-Spot Scanning

PAUL SCHERRER INSTITUT

Strahlentherapie gegen Tumore

Röntgenstrahlen

konventionelle Methode in Spitälern

Nachteil:
auch gesundes Gewebe erhält erhebliche Dosis

Protonenstrahlen

Vorteil: definierte Reichweite, 2-30cm
3-dimensionales scanning

=> **Schonung kritischer Organe**

in der Schweiz vorerst nur am PSI möglich!

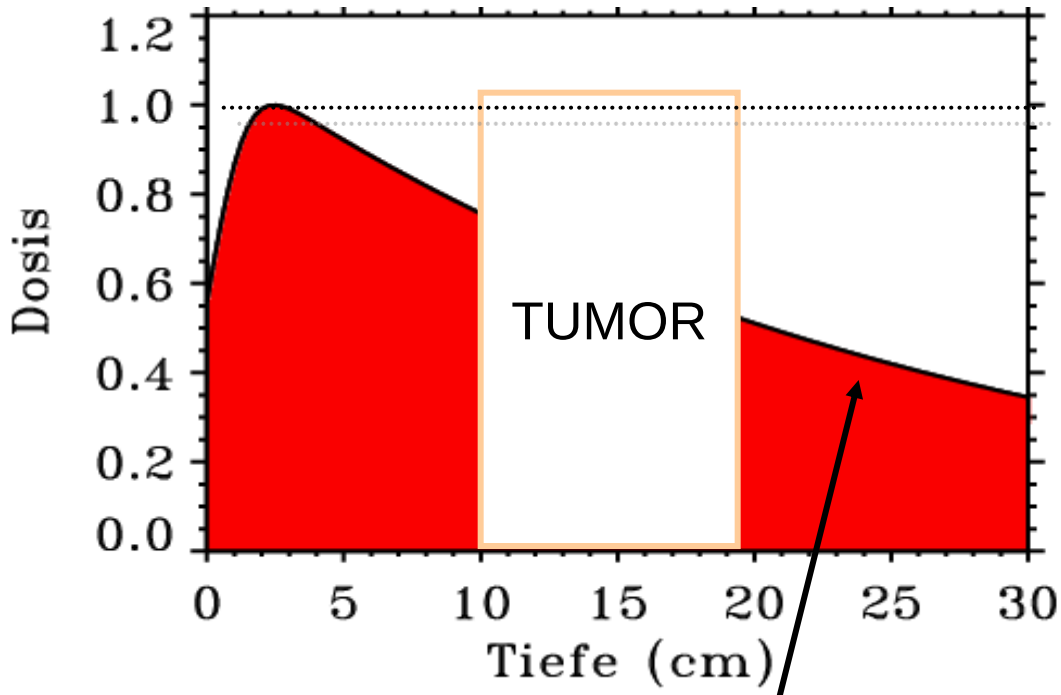
⇒ beschränkt auf spezielle Tumore

⇒ **Augen, Hirn, Wirbelsäule**

PAUL SCHERRER INSTITUT

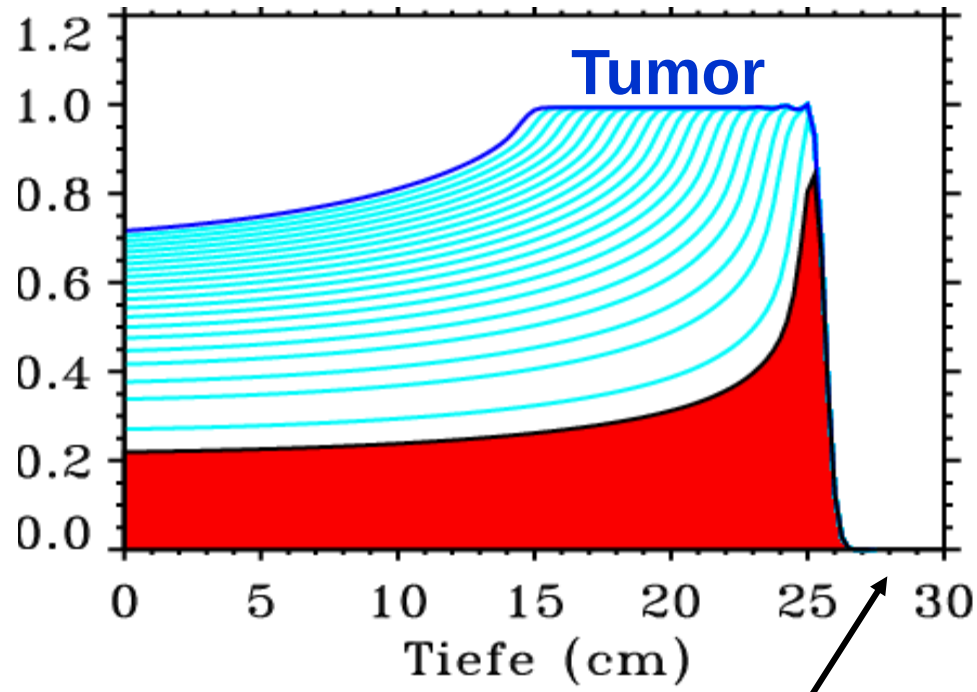
Dosisverteilung im Körper

Röntgenstrahlen: Tiefendosis



erhebliche Dosis
hinter dem Tumor

Protonen: Tiefendosis



keine Dosis
hinter dem Tumor

PAUL SCHERRER INSTITUT

OPTIS
Augentherapie mit Protonen

1984-2011

5‘500 Patienten

Tumor-kontrolle:

> 98%

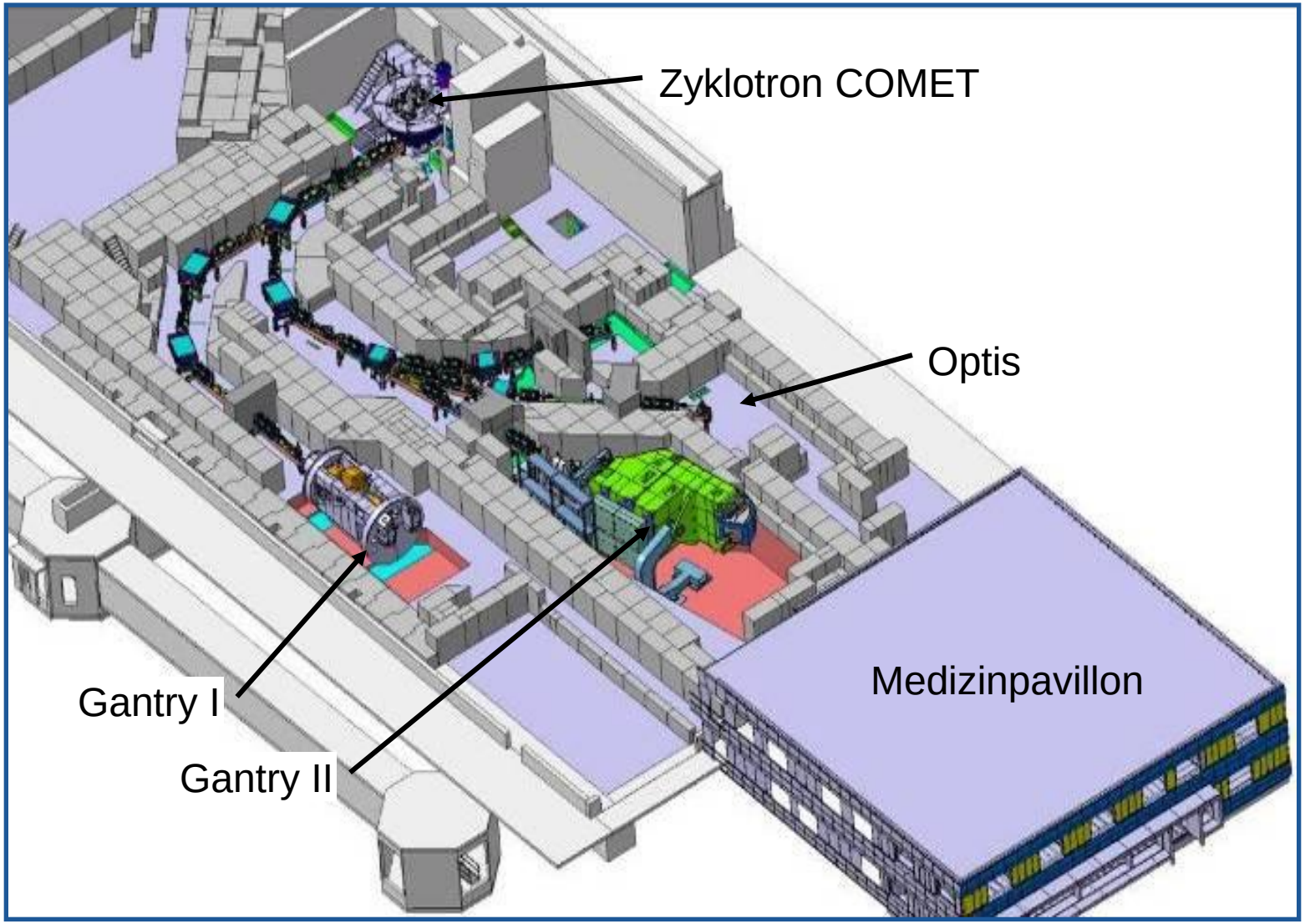
(Kollaboration mit

Spital Lausanne)

Bestrahlung an 4 Tagen

PAUL SCHERRER INSTITUT

The PROSCAN Facility

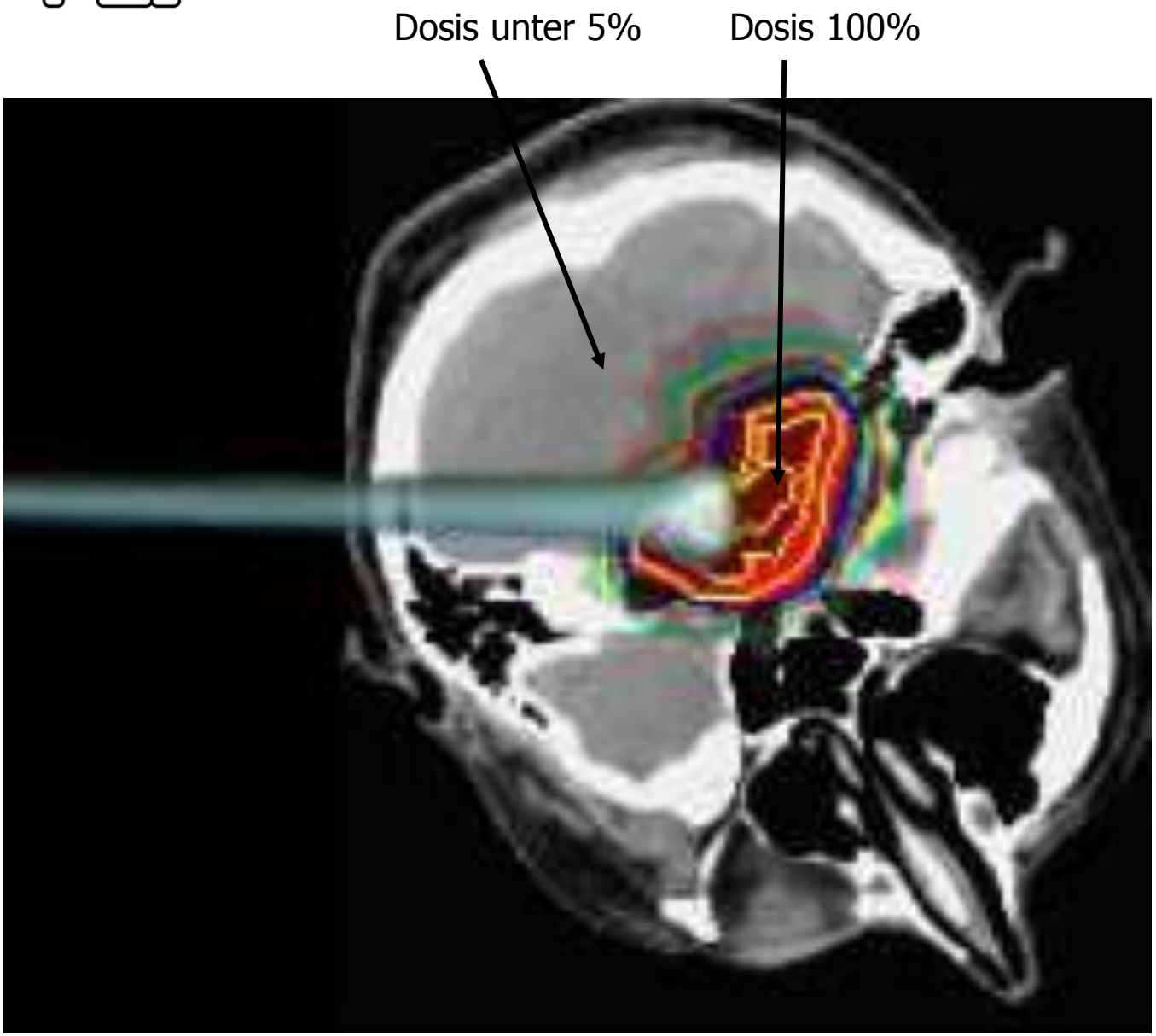


Protonentherapie

Bestrahlung des Tumors mit „Gantry" aus verschiedenen Richtungen

⇒ schont Gewebe an Oberfläche

PAUL SCHERRER INSTITUT



Hirntumor

Bestrahlung mit Protonen durch Spot-scanning

(E.Pedroni, PSI)

PAUL SCHERRER INSTITUT

Kosten für Protonen Therapie

Augentumor:

6'000 Fr. , 4 Bestrahlungen

ca. 200 Patienten/Jahr

Gehirntumor:

40'000 Fr. , 20 Bestrahlungen

jetzt 50 Patienten/Jahr

nach Ausbau ca. 150 Patienten/Jahr

PAUL SCHERRER INSTITUT

Klimaerwärmung !?

Wer zweifelt noch,

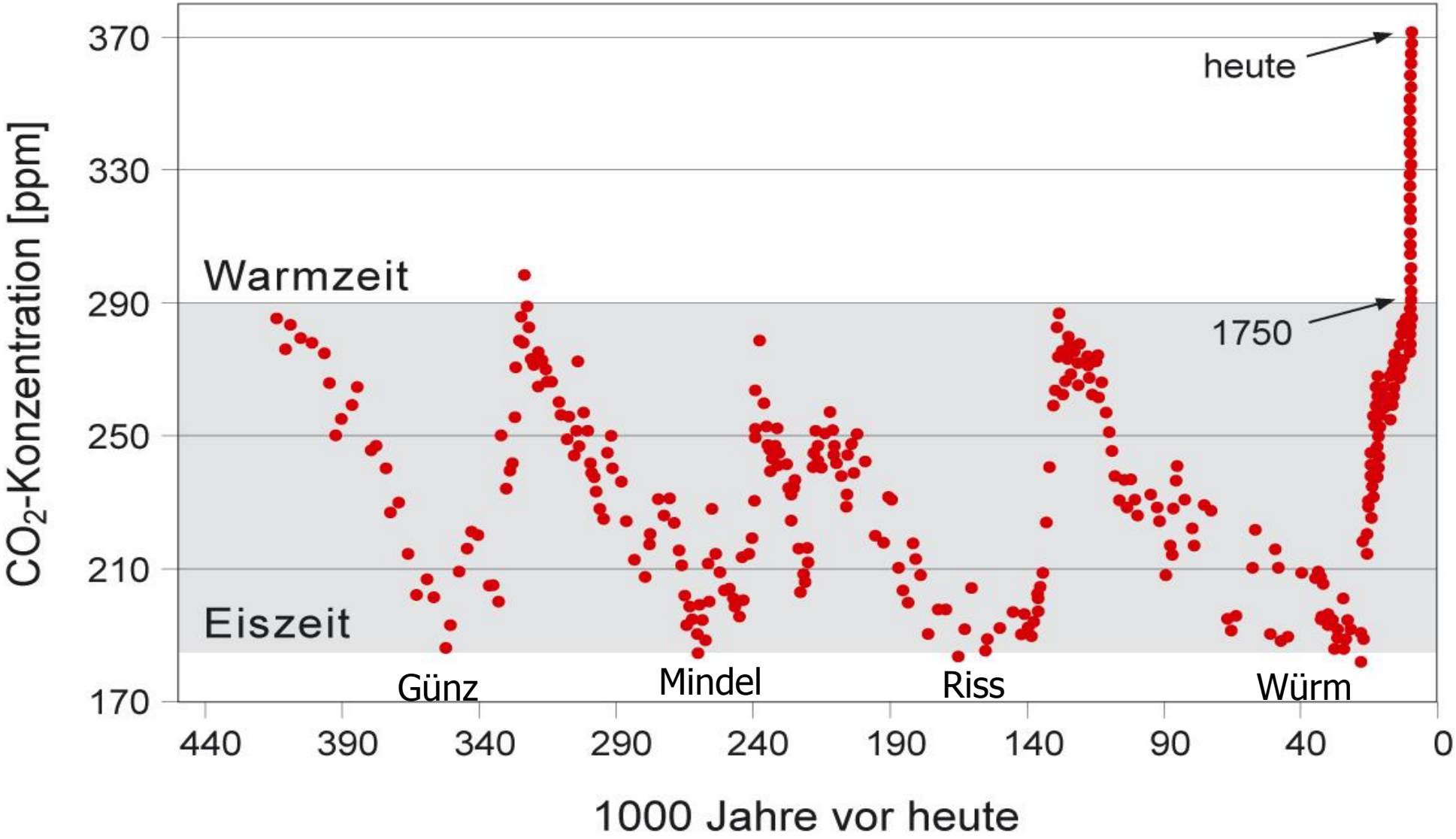
dass es immer wärmer wird?

PAUL SCHERRER INSTITUT

positiver Beweis für Klima Erwärmung

PAUL SCHERRER INSTITUT

CO_2 Konzentration in der Atmosphäre



W.Joho 2013

PAUL SCHERRER INSTITUT

Prognosen für die nächsten 90 Jahre

- Global wir es 2 - 5^0 wärmer => **Ernteausfälle**
- heisse Sommer wie 2003 ....bald die Regel!
- weniger Regen, dafür öfters **Überschwemmungen !**
- das arktische Eis schmilzt , Meeresspiegel steigt 30-60 cm

PAUL SCHERRER INSTITUT

Krisenpotential

- **Übervölkerung** (Afrika !)

  => Migrationsdruck von Süden nach Norden

- **Hunger** (jeder 6.Tote ein Opfer davon)

- **Energie** , Vorräte an Öl und Gas werden knapp

  => Benzin wird extrem teurer => reduzierte Mobilität

- Kampf um **Wasser**

=> Potential für Kriege

PAUL SCHERRER INSTITUT

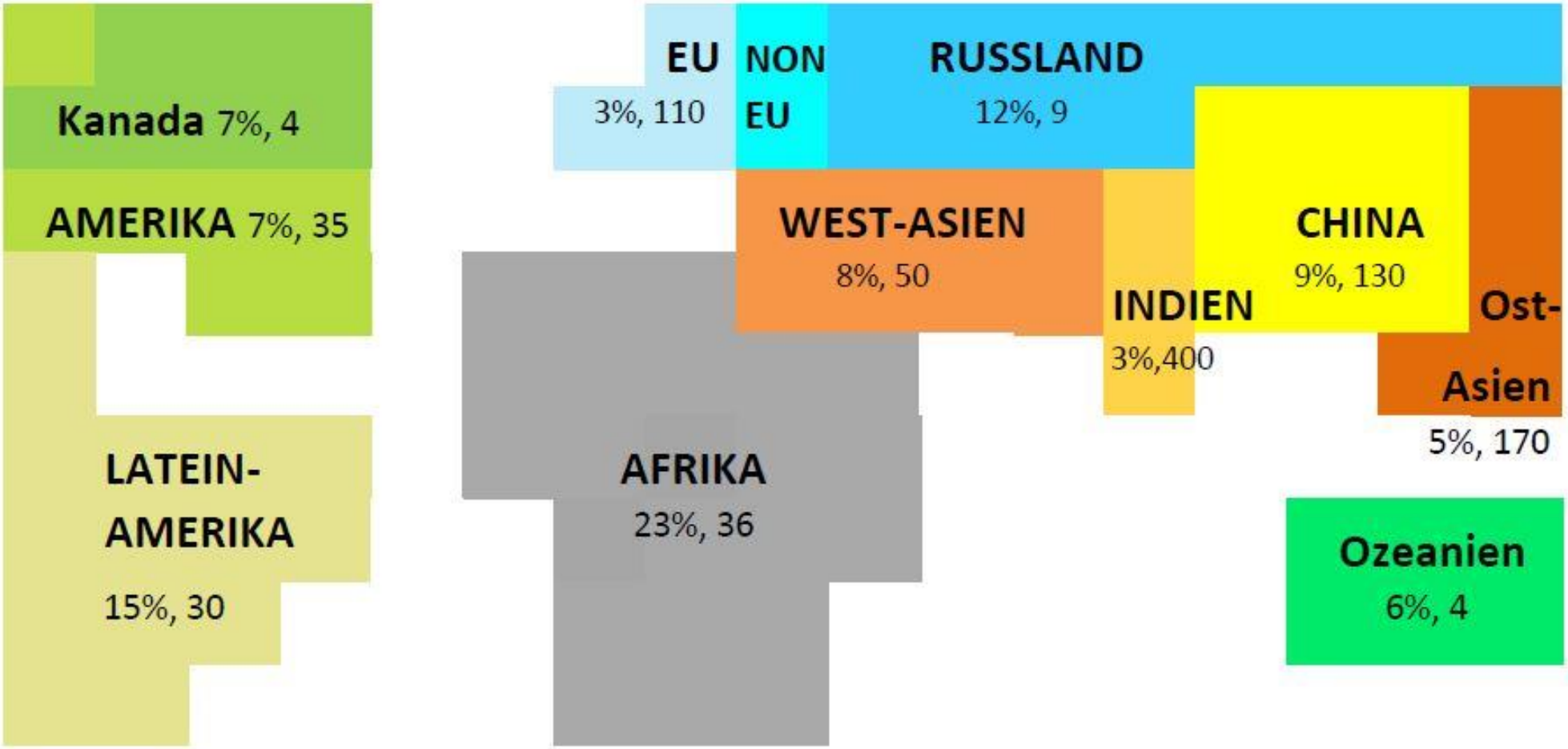
Weltkarte nach Fläche

(ohne Antartica, Grönland)

und Personendichte (pro km²)

1 Quadrat =1%
= 1.3 Mill. km2

Schweiz: 0.03%
= 0.041 Mill. km2



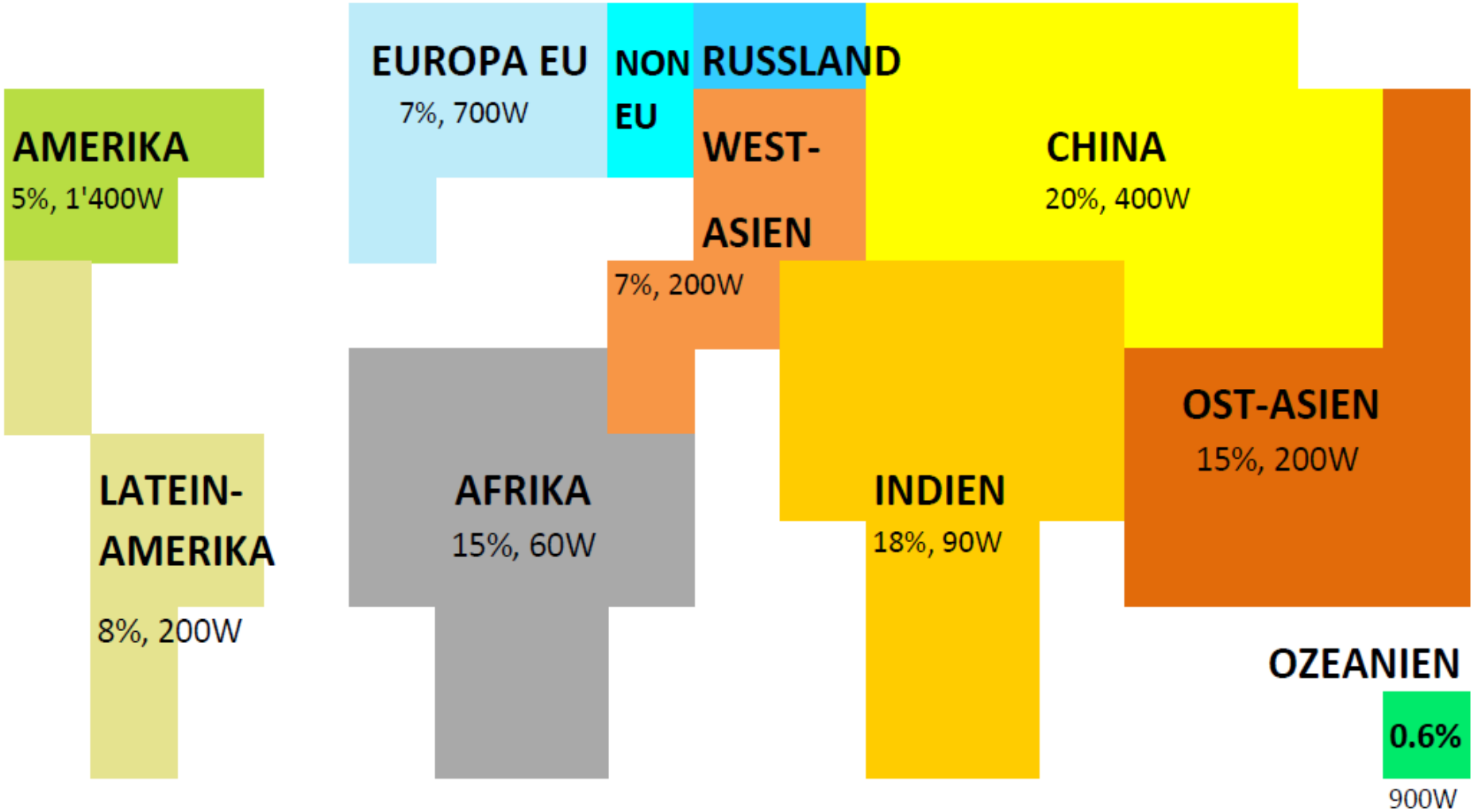
W.Joho 2013

PAUL SCHERRER INSTITUT

Weltkarte nach Bevölkerung
(+mittlerer Stromverbrauch per capita)

1 Quadrat =1%
= 70 Mill. Einw.

Schweiz: 0.1%
= 8 Mill. Einw.



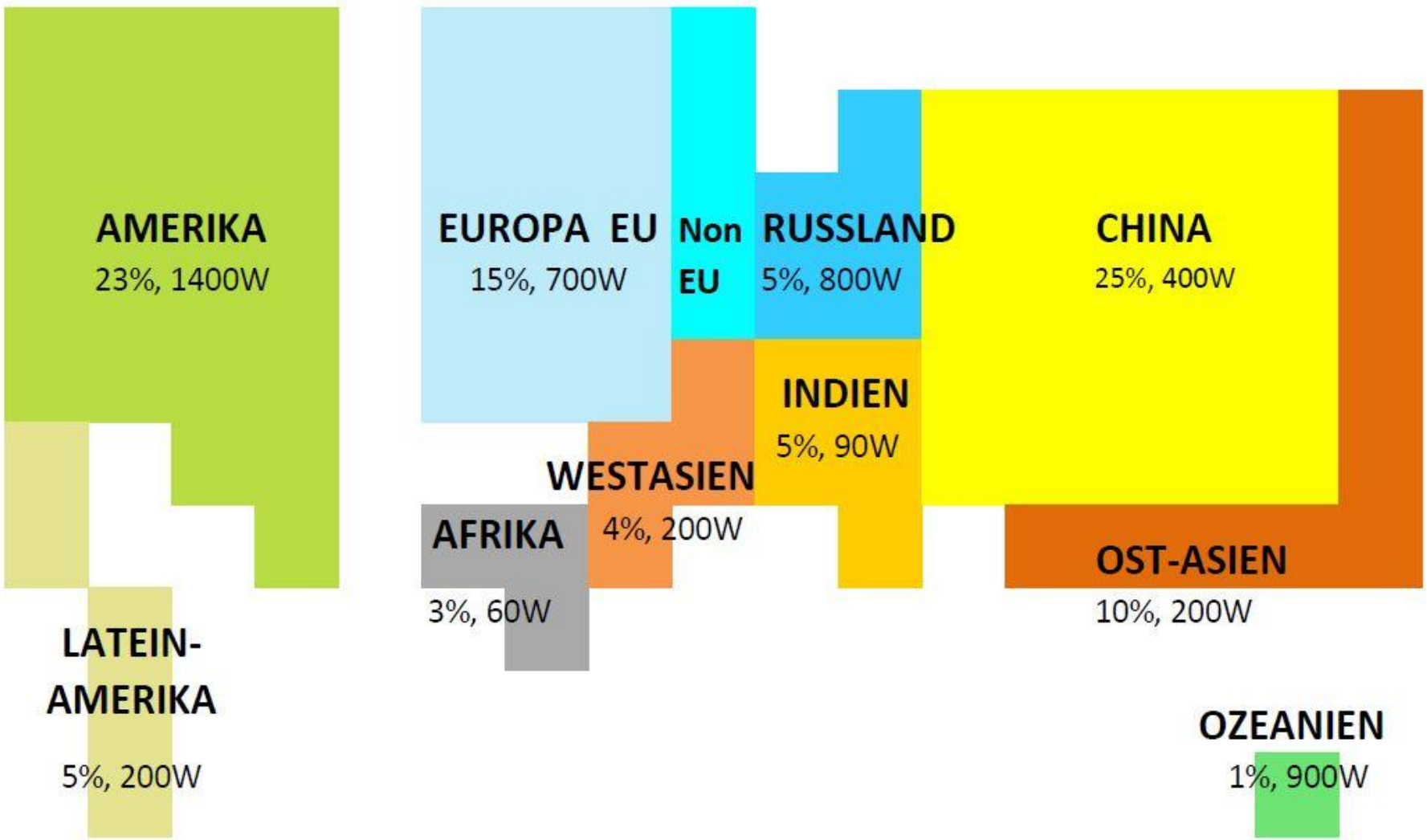
W.Joho 2013

PAUL SCHERRER INSTITUT

Weltkarte nach Stromverbrauch
(+mittlerer Verbrauch per capita, 300W weltweit)

1 Quadrat =1%
= 200TWh/Jahr

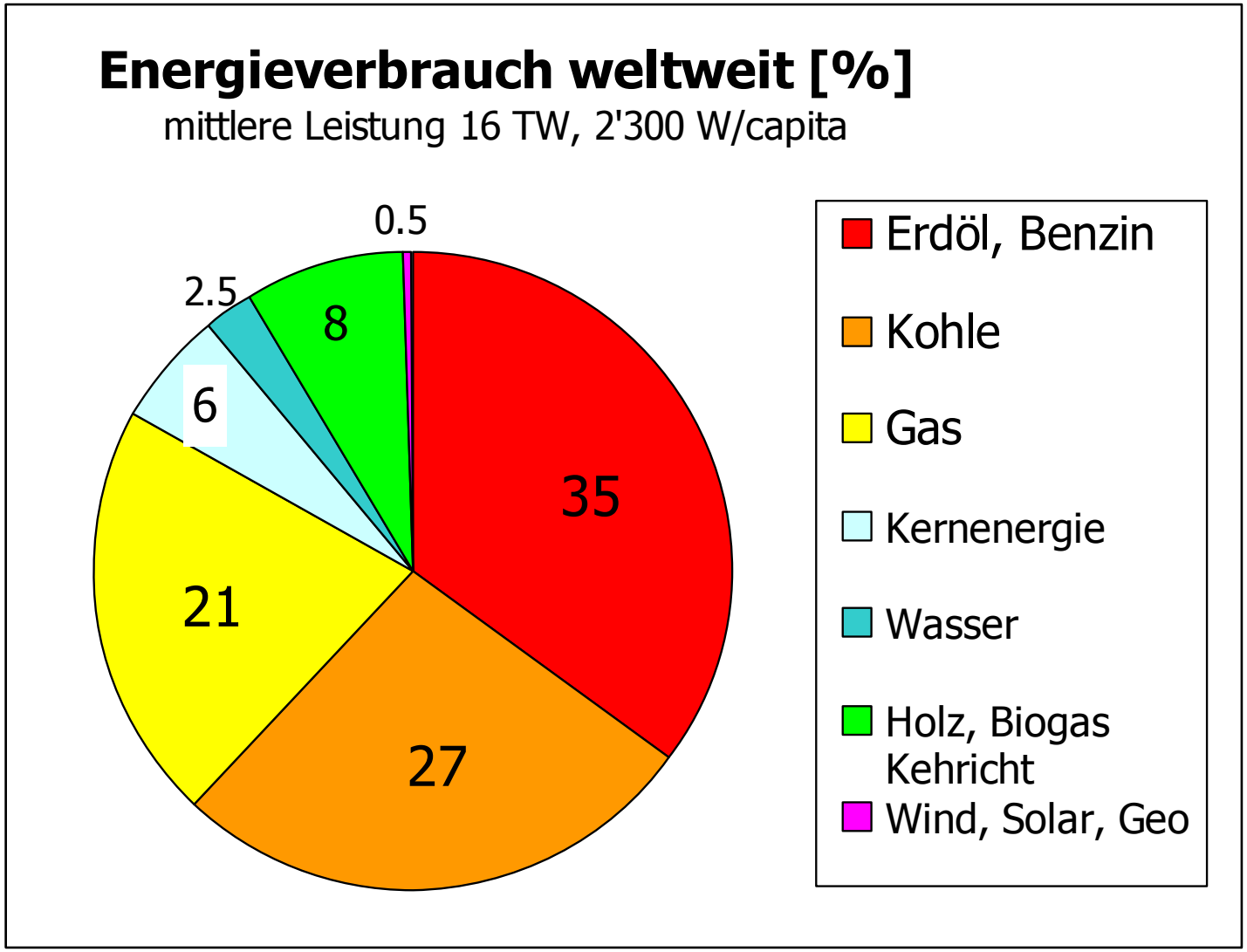
Schweiz: 0.3%
= 60TWh/Jahr,
900W/capita



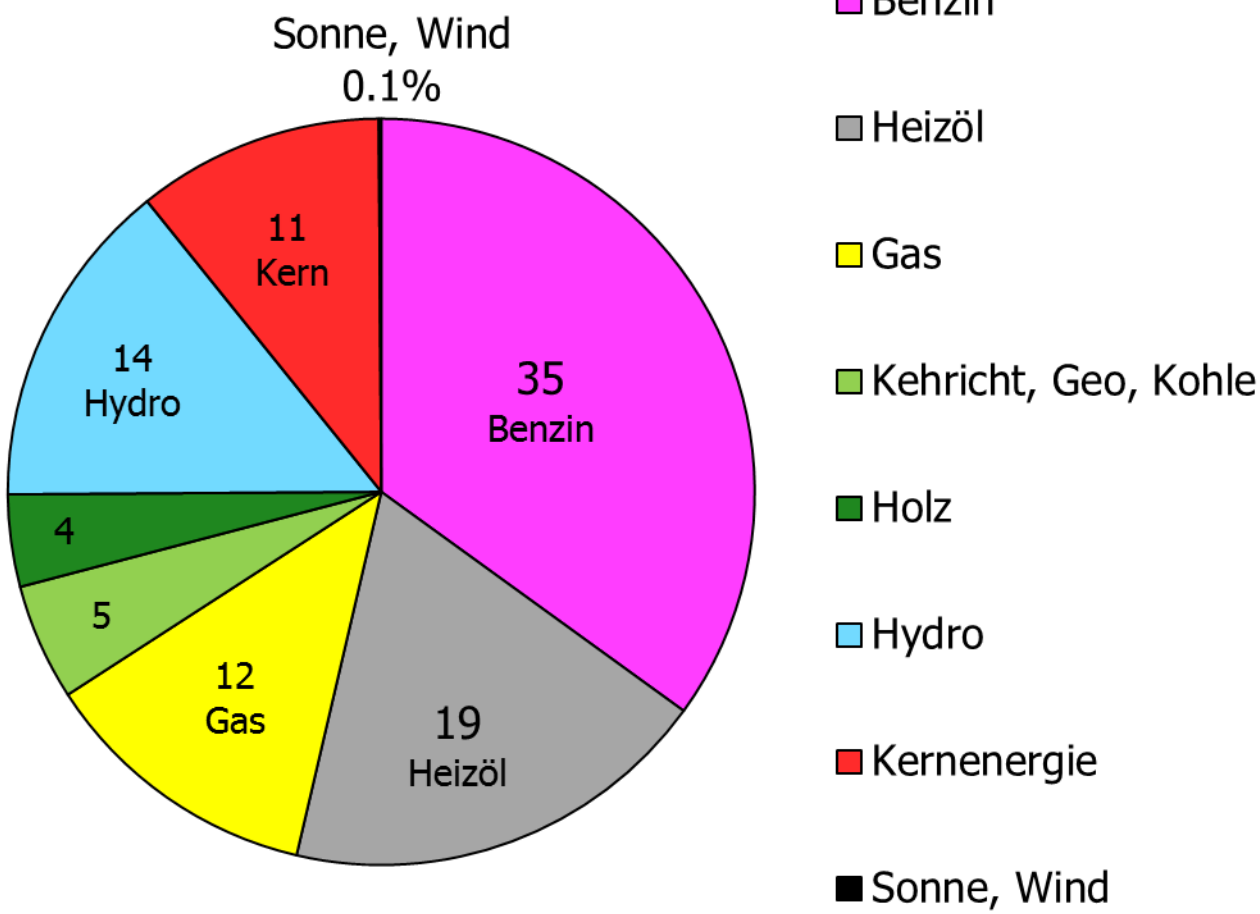
W.Joho 2013

PAUL SCHERRER INSTITUT

Energiequellen



Energie Verbrauch in der Schweiz (%)



Mittelwert: 3.4 kW/Person
(ca. 1kW elektrisch,
davon 1/3 Haushalte)

2‘000 W Gesellschaft ?!

Ersatz von Benzin und Öl :

=> mehr elektr. Energie !

PAUL SCHERRER INSTITUT

Wasserstoff Auto

Kollaboration PSI/Michelin
neu: Hayek (Belenos)

Elektromotor mit

30 kW Brennstoffzellen (H_2/O_2)

45 kW Superkondens.

400 km Reichweite

- keine Abgase !!

- kein Benzin !!

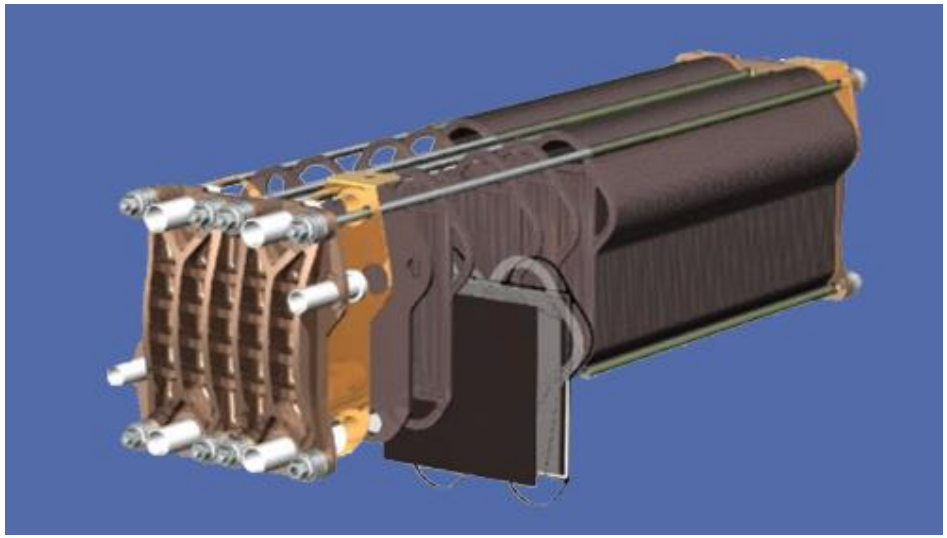
- schnelles Auftanken !

ab 2012 Verkehrsbetriebe Brugg: 5 Autobusse

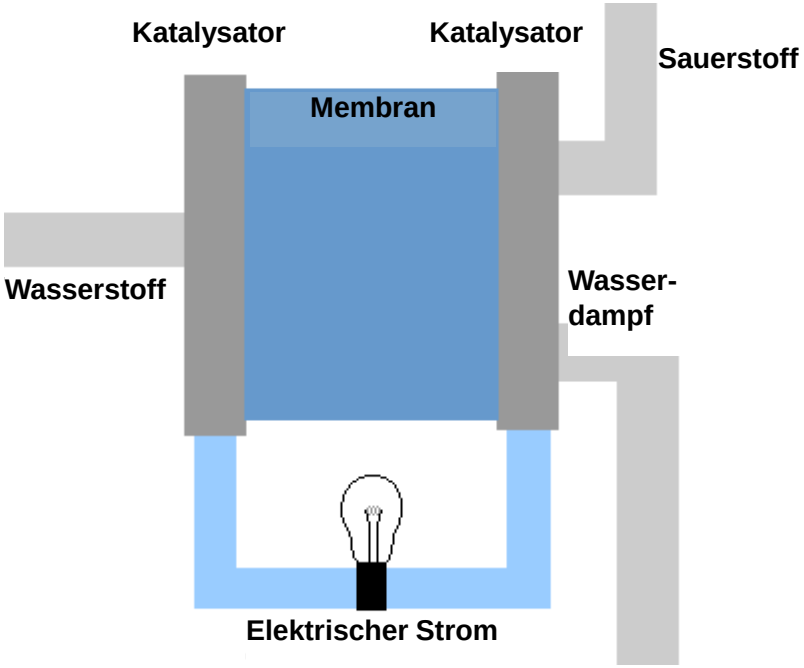
(noch 5 mal teurer als Benzinbusse)

PAUL SCHERRER INSTITUT

Brennstoffzelle



Brennstoffzellenstapel mit 30kW



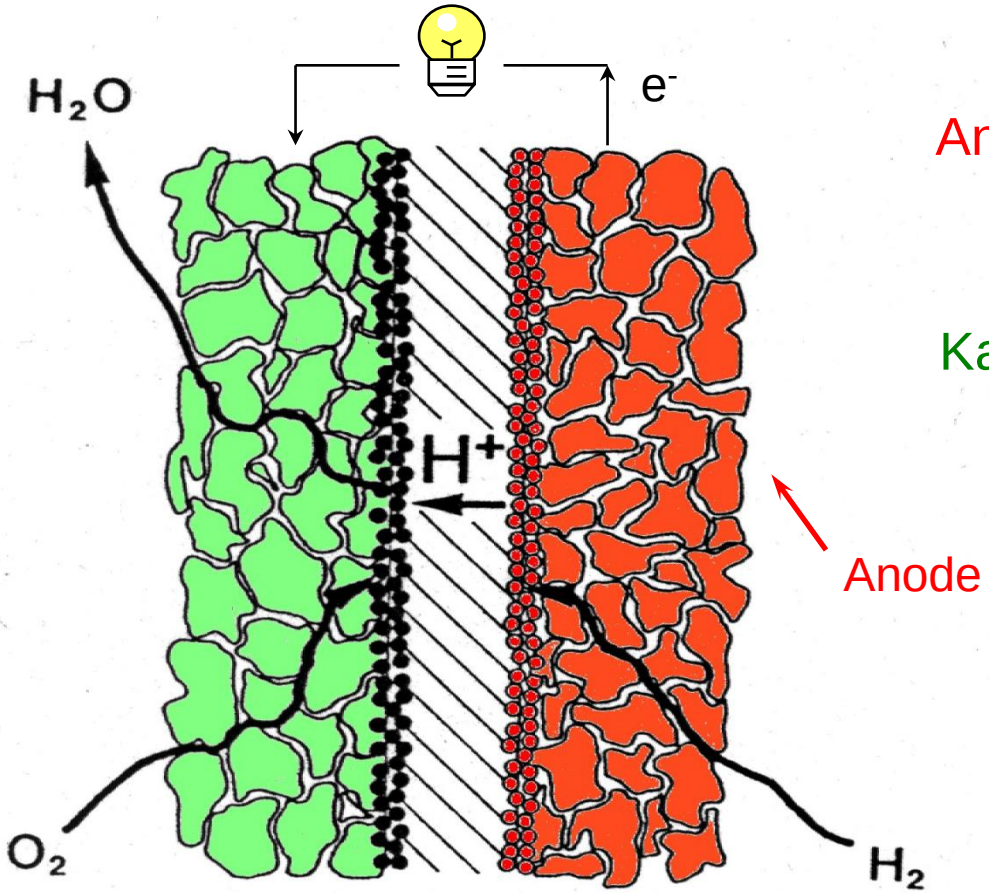
Wasserstoff +Sauerstoff = elektr. Energie (+Wasser)

Wirkungsgrad ca. 60%

Energiepreis des Bundes:

Watt d'Or 2011

Funktion einer Brennstoffzelle



CATHODE

$1/2 O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

ANODE

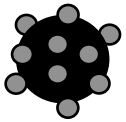
$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Anode:

$$H_2 \longrightarrow 2\,\mathbf{H^+} + 2\,e^-$$

Kathode:

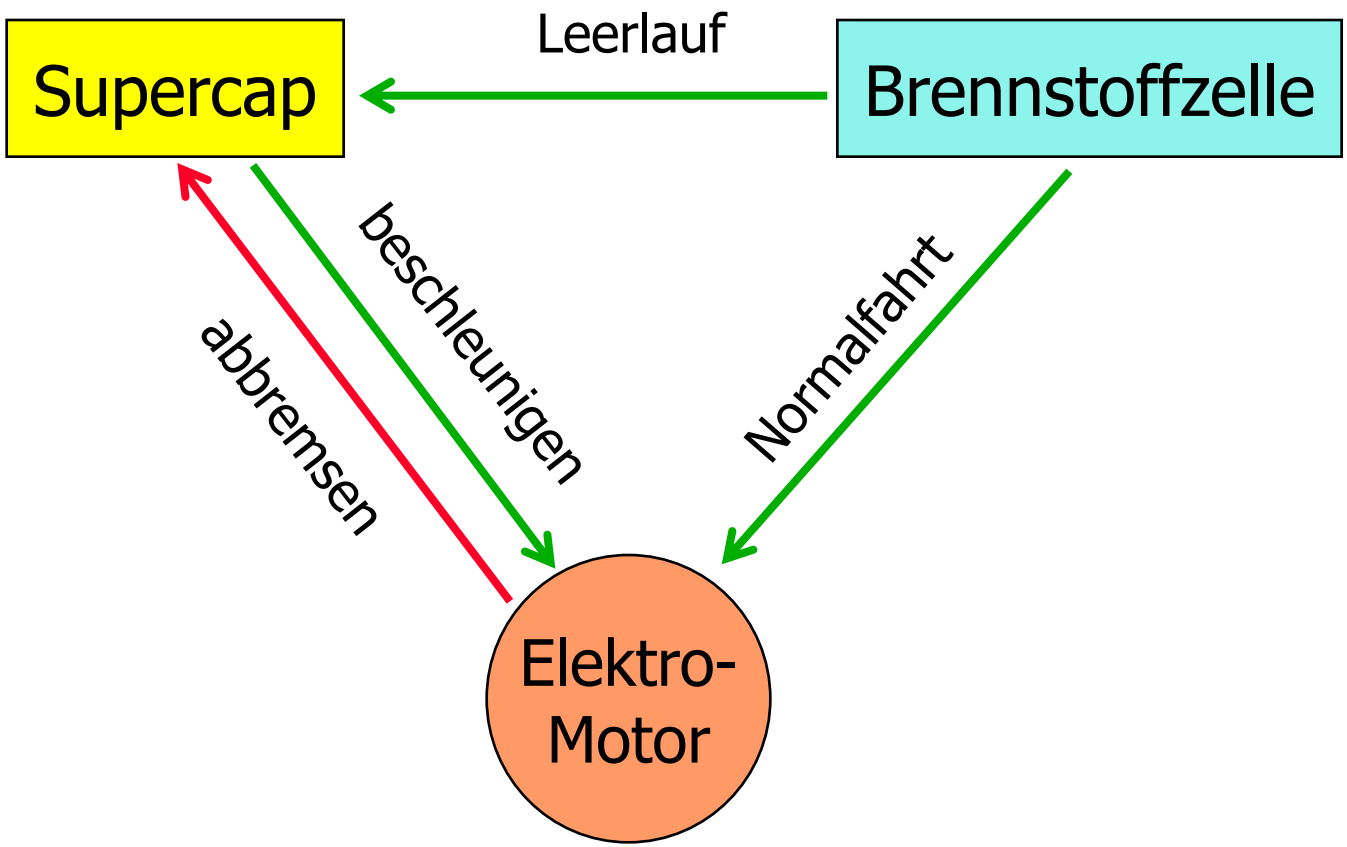
$$1/2\,O_2 + 2\,\mathbf{H^+} + 2\,e^- \longrightarrow H_2O$$



Katalysator:
Russ eingekapselt durch
Platin Nanopartikel

PAUL SCHERRER INSTITUT

Wasserstoff-Auto, Zyklus



PAUL SCHERRER INSTITUT

warum ist ein Wasserstoff-Auto noch zu teuer ?

- Die Brennstoffzellen brauchen Platin (wie ein Katalysator)

  ca. 100g pro Auto; Rohstoffwert ca. 5‘000 Fr., bearbeitet ca. 10‘000-20‘000 Fr.

  => Suche nach Alternativprodukten

- Herstellungskosten der Brennstoffzellen noch sehr teuer

- Wasserstofftank für 200 => 700 bar

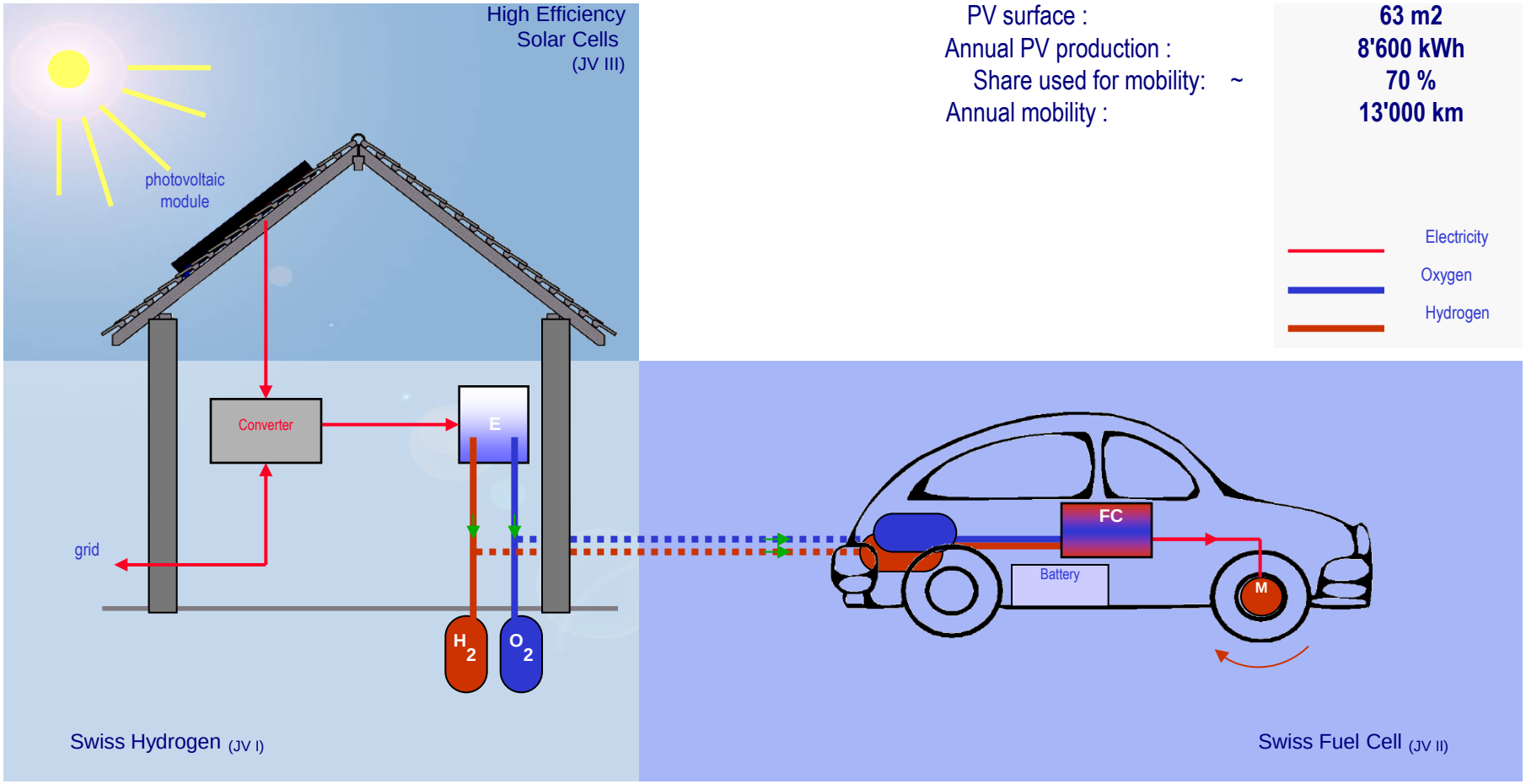
  (Gefahrenpotential ist aber geringer als bei Benzintank!)

PAUL SCHERRER INSTITUT

Wasserstoff-Auto, zu Hause tanken ?!

Belenos Clean Power *Holding*

PV surface :	**63 m2**
Annual PV production :	**8'600 kWh**
Share used for mobility: ~	**70 %**
Annual mobility :	**13'000 km**



W.Joho 2013

PAUL SCHERRER INSTITUT

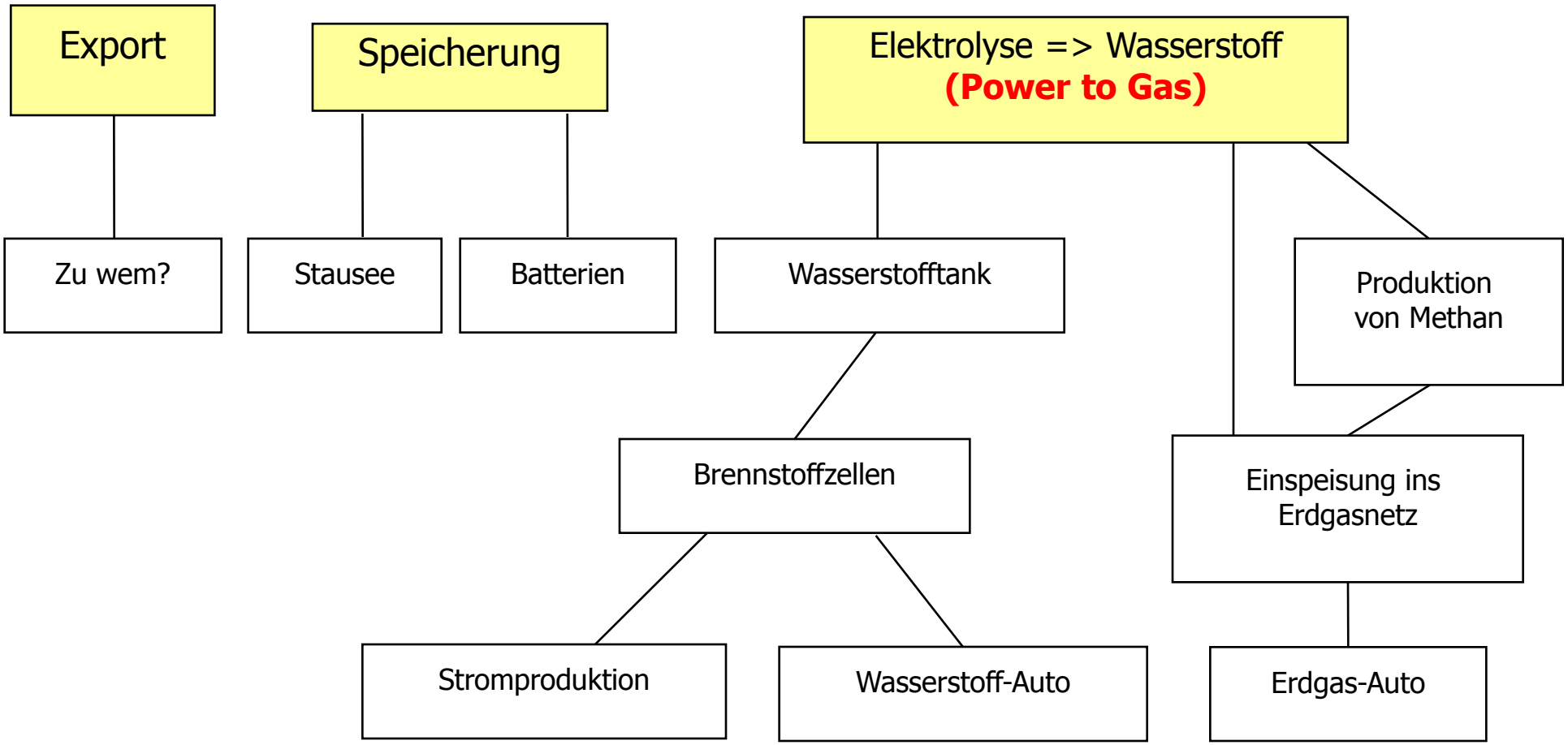
wie gefährlich ist der Wasserstofftank?

Wasserstoff Auto Benzin Auto

nach einigen Sekunden

PAUL SCHERRER INSTITUT

Stromüberschuss Photovoltaik (und Wind)
(an Sommertagen)



PAUL SCHERRER INSTITUT

Power to Gas

- Speicherung von Spitzenstrom: Strom => Gas
- Elektrolyse von Wasser: $2\,H_2O \rightarrow 2\,\mathbf{H_2} + O_2$

a) Produktion von **Methangas**: $4\,H_2 + \mathbf{CO_2} \rightarrow \mathbf{CH_4} + 2\,H_2O$

Einspeisung des Methan (CH4) in Erdgasnetz

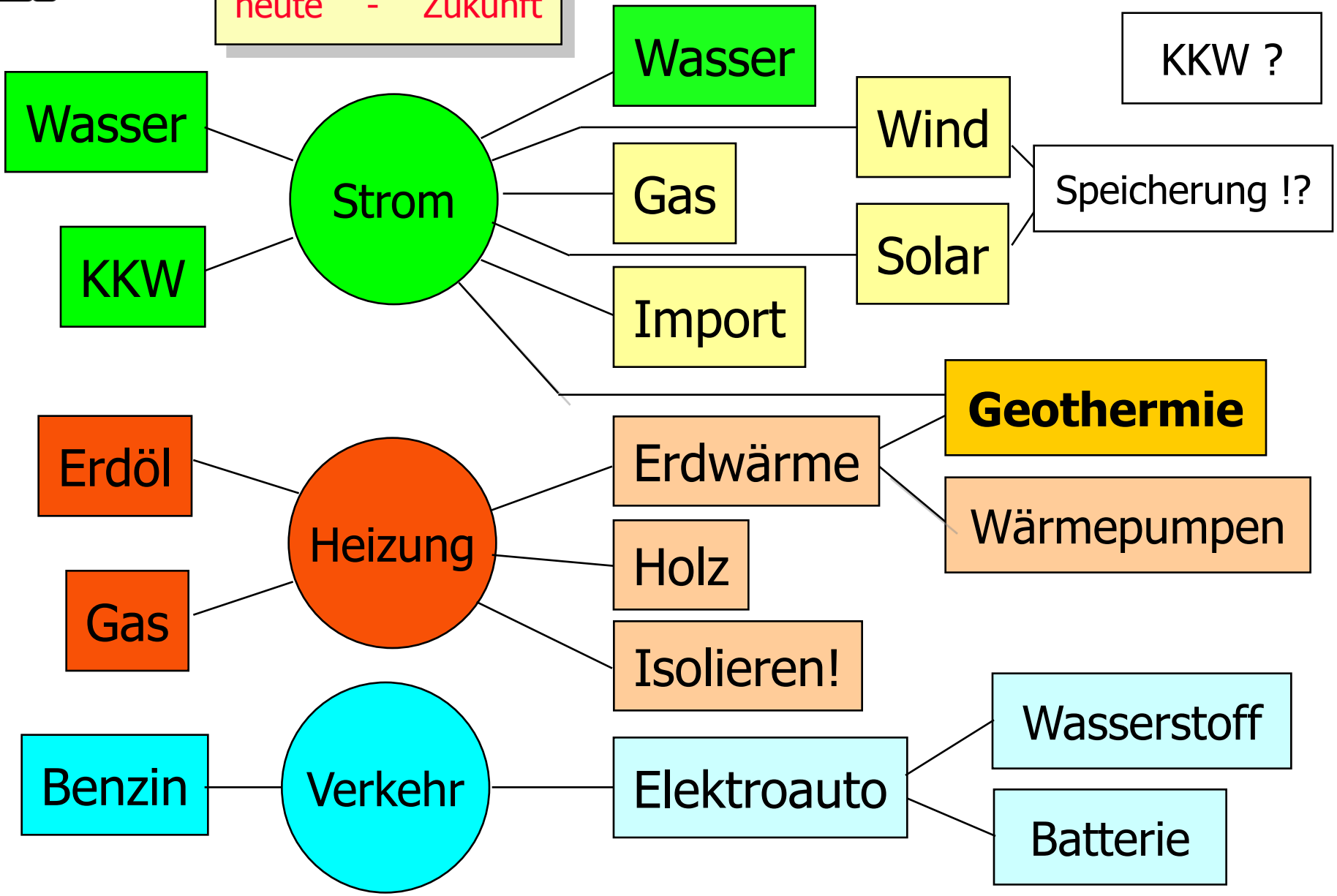
=> **Heizen** oder **Erdgasauto (CO_2 neutral !)**

b) Speicherung von **Wasserstoff**

=> Wasserstoffauto mit Brennstoffzellen

PAUL SCHERRER INSTITUT

Energieträger
heute - Zukunft



W.Joho 2013

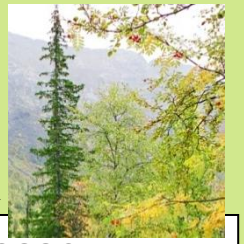
PAUL SCHERRER INSTITUT

Stromquellen 2050
(Schwachpunkte)

- **Wasser**
  - limitiert, Naturschutz
- **Gas**
  - CO_2
- **Import**
  - Kohle KKW's
    - Netzausbau
- **Geothermie**
  - 15% elektr.
  - 85% Fernwärme
- **Wind**
  - Panorama?
    - **Speicherung** => Netzausbau
- **Solar**
  - Winter?
    - **Speicherung** => Netzausbau

Möglichkeiten zur Nutzung der Sonnenenergie

Photosynthese der Pflanzen



Biomasse:
Holz, Gras, Algen…

Mehrere 100 Mio Jahre

Fossile Energieträger:
Erdöl, Kohle…

Licht der Sonne

Photovoltaik

Strom

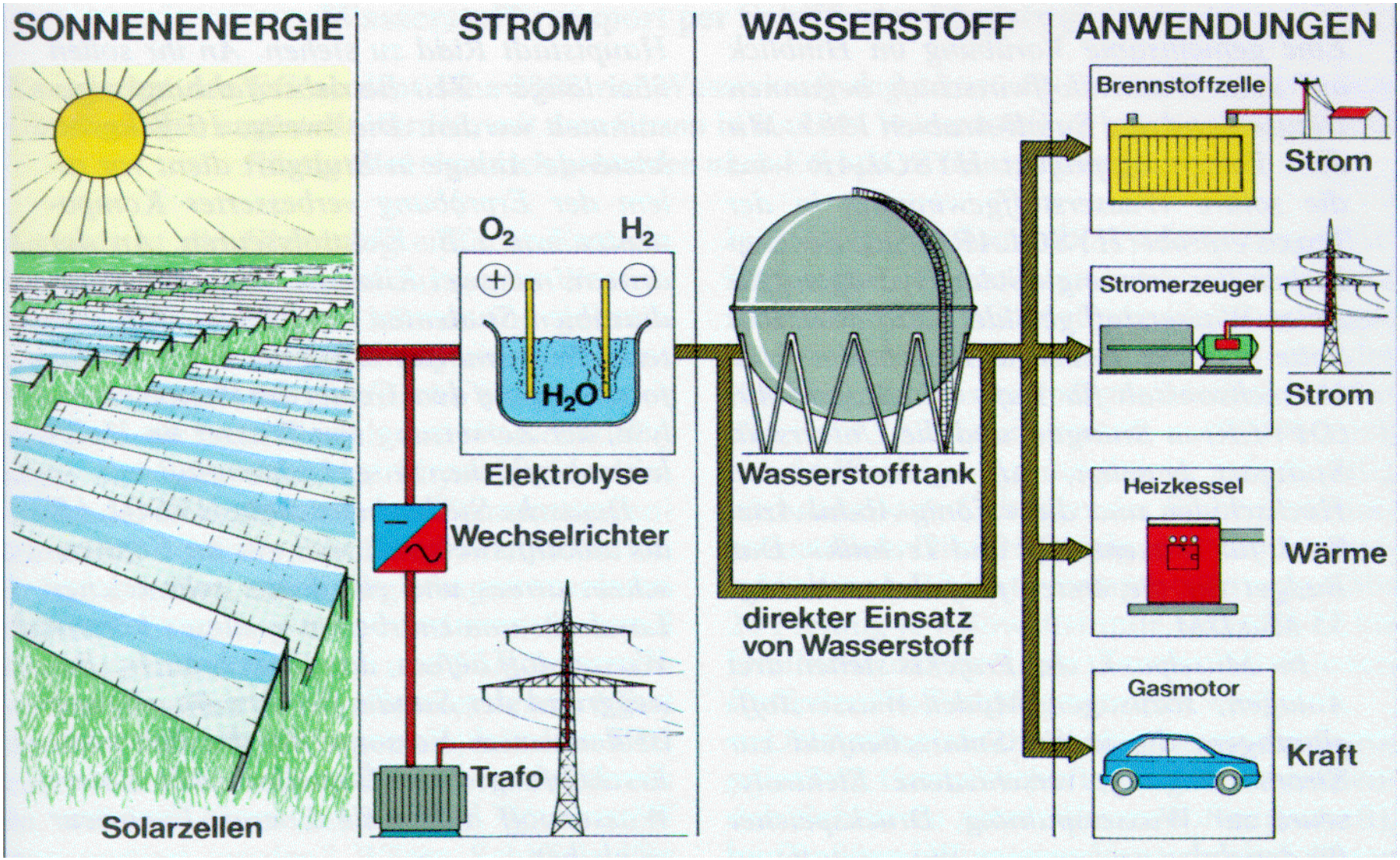
Wärme der Sonne

Konzentration des Sonnenlichtes

Chemische Energieträger
Benzin ?!

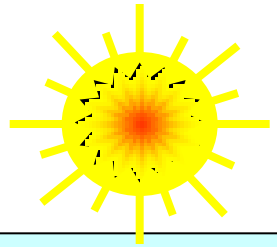
PAUL SCHERRER INSTITUT

Wasserstoff aus Sonnen-energie



PAUL SCHERRER INSTITUT

Sonnenenergie



Photochemie

Photosynthese der Pflanzen

Biomasse
Holz, Gras,…

Mehrere 100 Mio Jahre

Kohle, Erdöl, Erdgas, ...

Thermochemie

Wärme

Konzentration der Sonnenstrahlung

Ja → **Bis 3000°C** Spiegelkraftwerk

Nein → **Bis 200°C** Sonnenkollektoren

Hochtemperatur Solarchemie

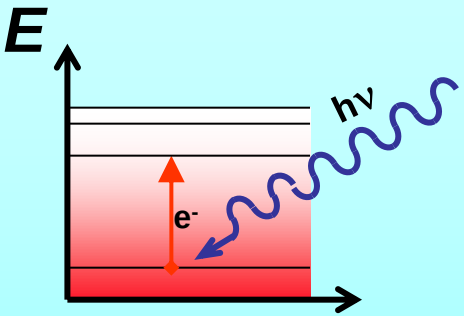
Chemische Energieträger
Wasserstoff, Zink, ...

Wärme – Kraft - Maschine

Gas-Turbinen

Elektrischer **Strom**

Photovoltaik

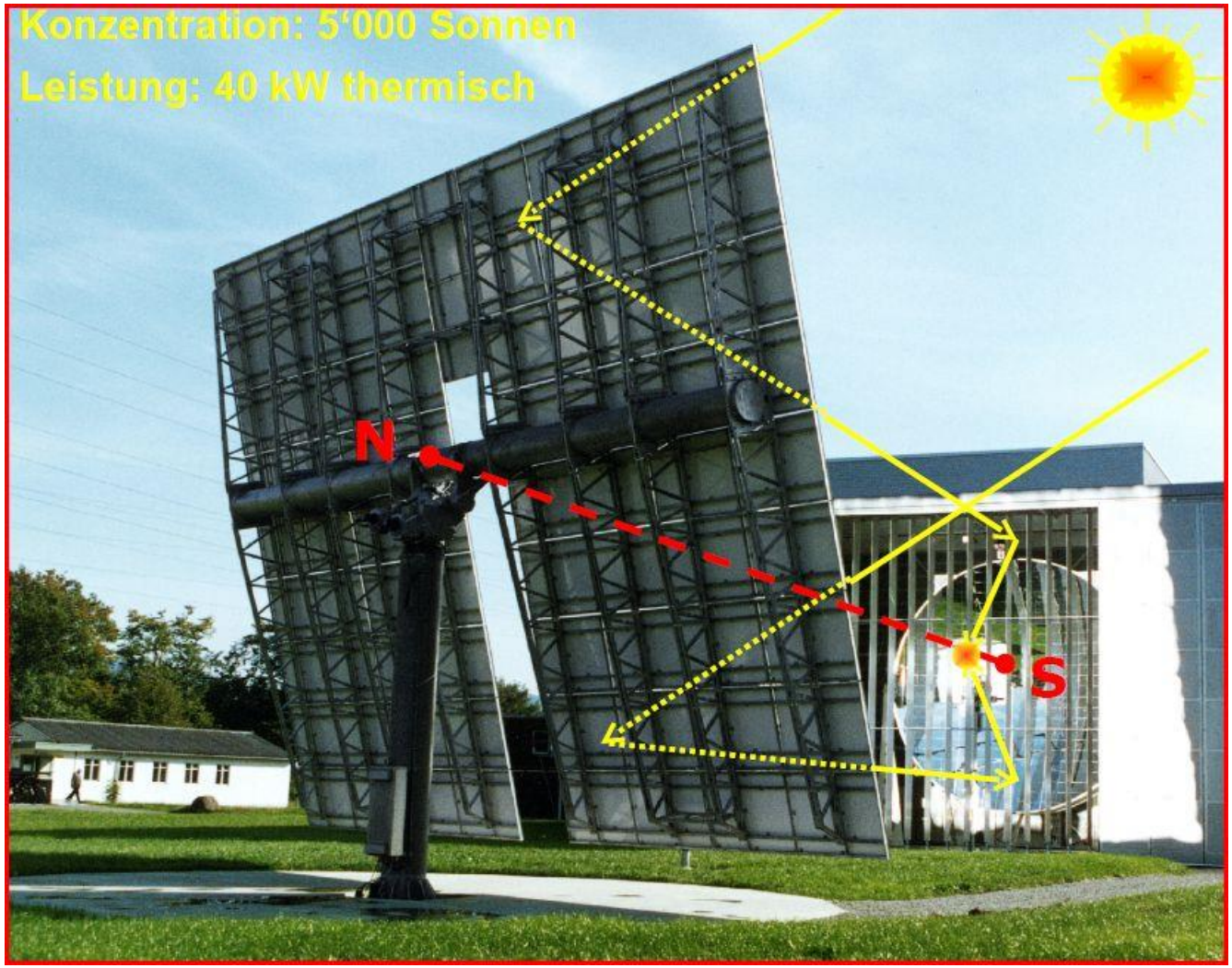


Photovoltaik

Elektrischer **Strom**

PAUL SCHERRER INSTITUT

Solarkonzentrator



Solarofen 2000 ^{0}

40 kW thermisch

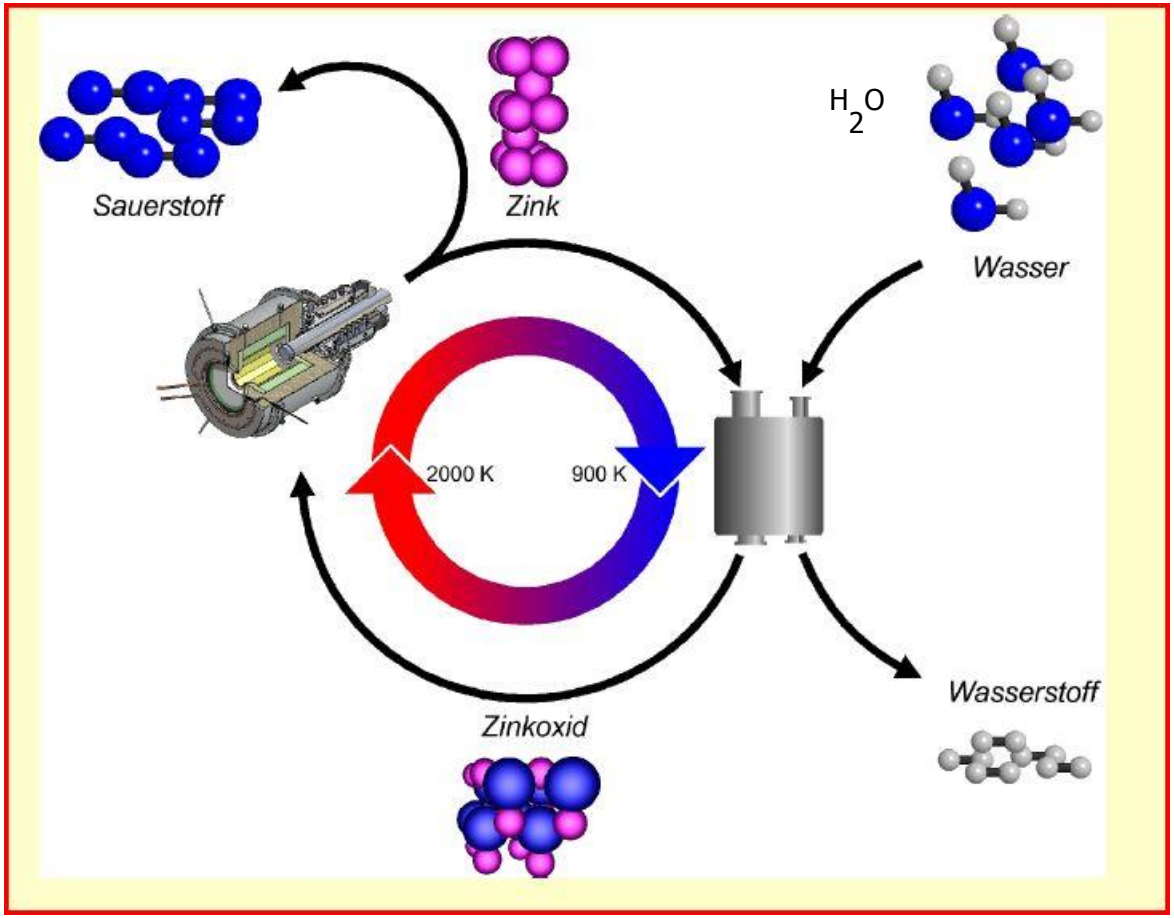
Gewinnung von Zink aus Zink-oxyd

Vorteil: Speicherung!!

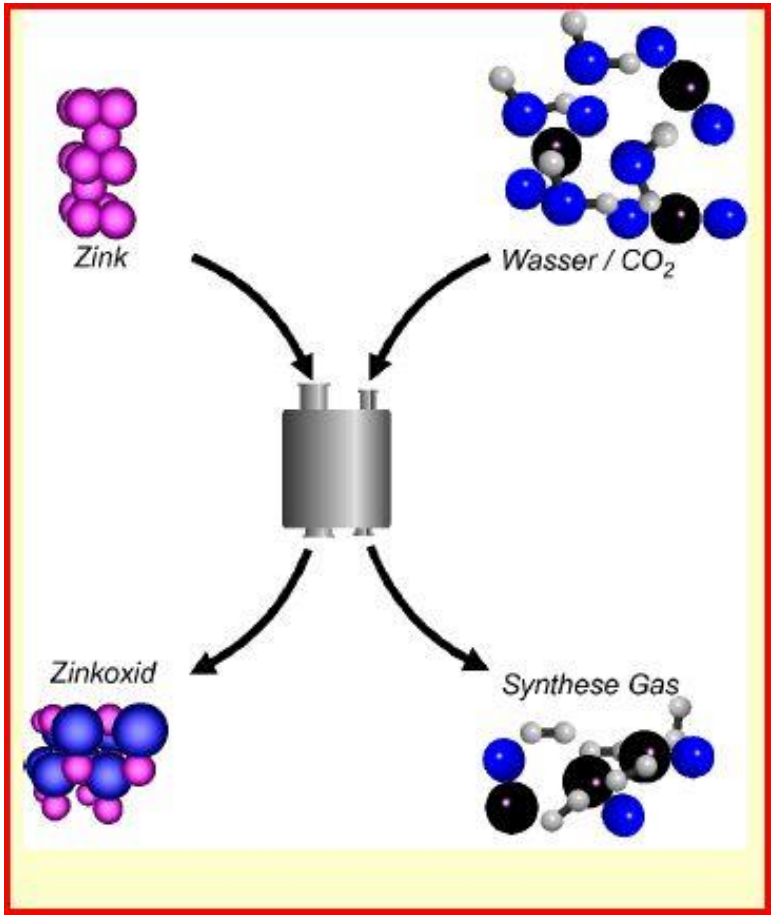
Zink => Wasserstoff
=> Zink-Luft Batterie
=> Brennstoffzellen
=> Treibstoff Syngas

PAUL SCHERRER INSTITUT

Solarofen



Produktion von Wasserstoff
(Zink als Katalysator)



Produktion von Syngas,
Vorstufe zu Benzin

PAUL SCHERRER INSTITUT

Solartürme in Sevilla

vorne: 20MW$_e$ Anlage (2009)

1'255 Heliostate à 120m2

165m Turm

mit Dampfgenerator

Dampfspeicher für 1 Stunde

48'000 MWh/Jahr

=> 5.5MW Jahresmittel

Kosten 100 MFr.

hinten: 10MW$_e$ Anlage (2005)

PAUL SCHERRER INSTITUT

Migros Neuendorf, 2013
grösste Photovoltaikanlage der Schweiz

32’000 m2 Solarpanels

5 MW_p Spitzenwert

500 kW Mittelwert

5 GWh/Jahr

=> 1’000 Haushalte

PAUL SCHERRER INSTITUT

Windanlagen

Jura: 23 Windräder

(je 2 MW Spitze , 350 kW mittel)

Schweiz 2011: ca. 0.1% der Stromproduktion

Projekt Obersaxen: 40 Windräder

15 MW mittel (45 mal weniger als Beznau)

Belgien

Wind bläst etwa doppelt so stark wie in der Schweiz

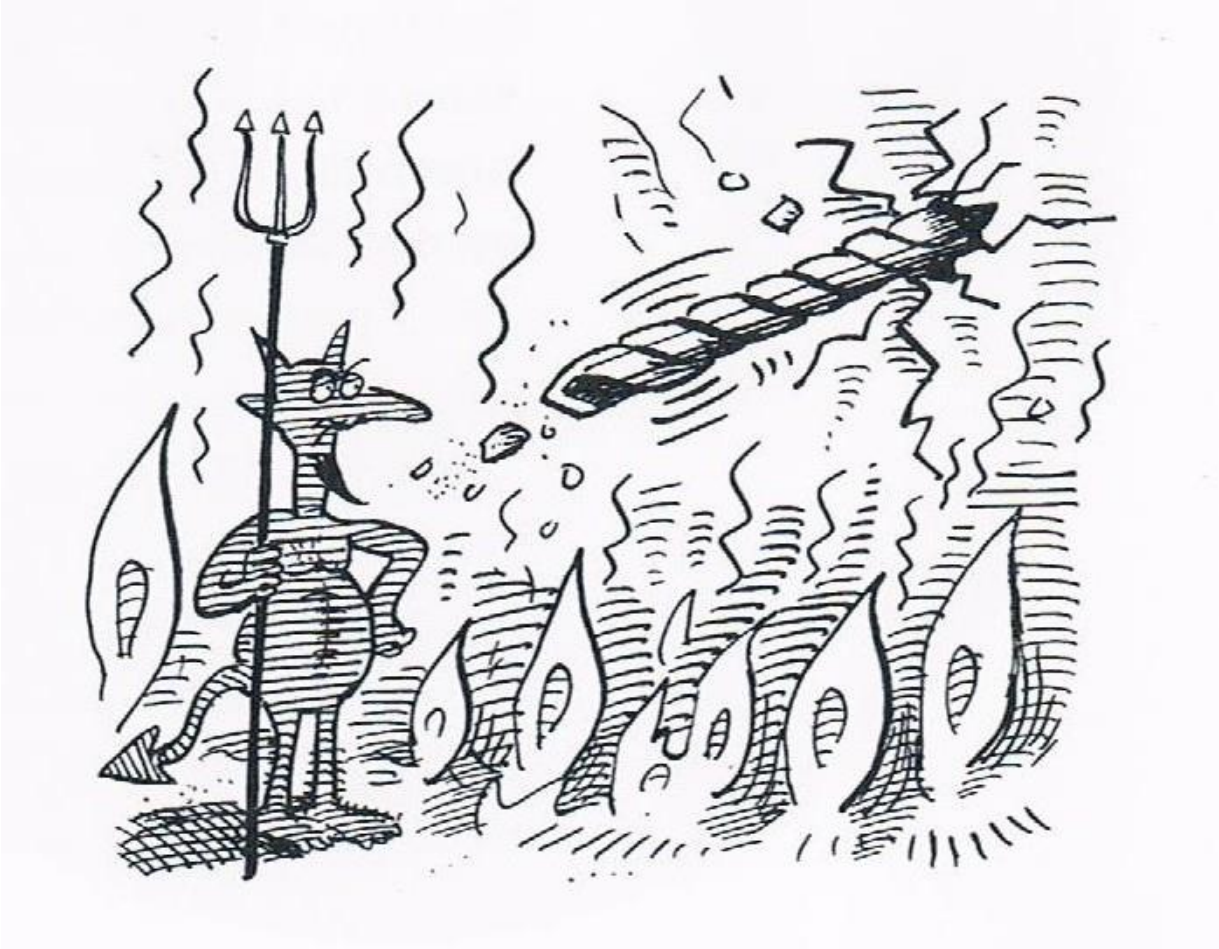
Geothermie

- 200^0 Wasser in 5'000m Tiefe
- kleiner Wirkungsgrad für Stromerzeugung (≈15%)
  => sehr gut für Fernwärme => viele lokale Anlagen
- liefert Bandenergie !
- Potential in der Schweiz für 2030:
  10-15 Anlagen à 40MW thermisch, 7MW elektrisch
  (ersetzt 7-10% von Leibstadt)

PAUL SCHERRER INSTITUT

Geothermie

…mit etwas Glück !?



From Bill Bryson:
A Short History of Nearly Everything

PAUL SCHERRER INSTITUT

zukünftiger Strombedarf

warum wir weniger Strom verbrauchen werden

- effizientere Elektrogeräte
- Verbot von Elektroheizungen
- Strom wird viel teurer
- Umweltbewusstsein, Sparwillen

warum wir mehr Strom verbrauchen werden

- Zunahme der Bevölkerung
- **Wärmepumpen** ersetzen Ölheizungen
- Zunahme des Eisenbahnverkehrs
- mehr „Komfort" (im Haushalt etc.)
- Umstieg auf **Elektrofahrzeuge**

PAUL SCHERRER INSTITUT

grosse Mikroskope

Wir wollen Details von Atomen sehen,
die man auch mit dem besten Licht-mikroskop
nicht sehen kann !

Je kleiner das Detail, desto grösser das Mikroskop!

=> **Teilchen Beschleuniger**

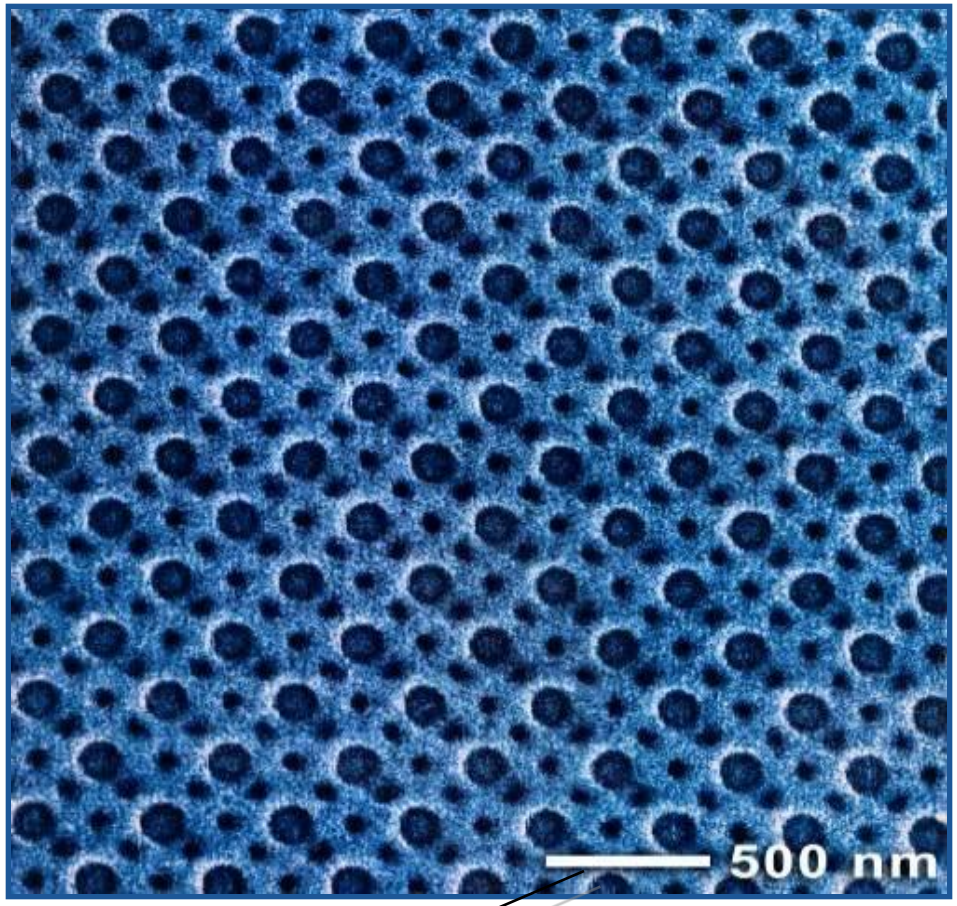
Elektronen => Röntgenstrahlen

Protonen => Neutronen und Muonen

PAUL SCHERRER INSTITUT

Nanotechnik

SLS
Synchrotron Lichtquelle Schweiz

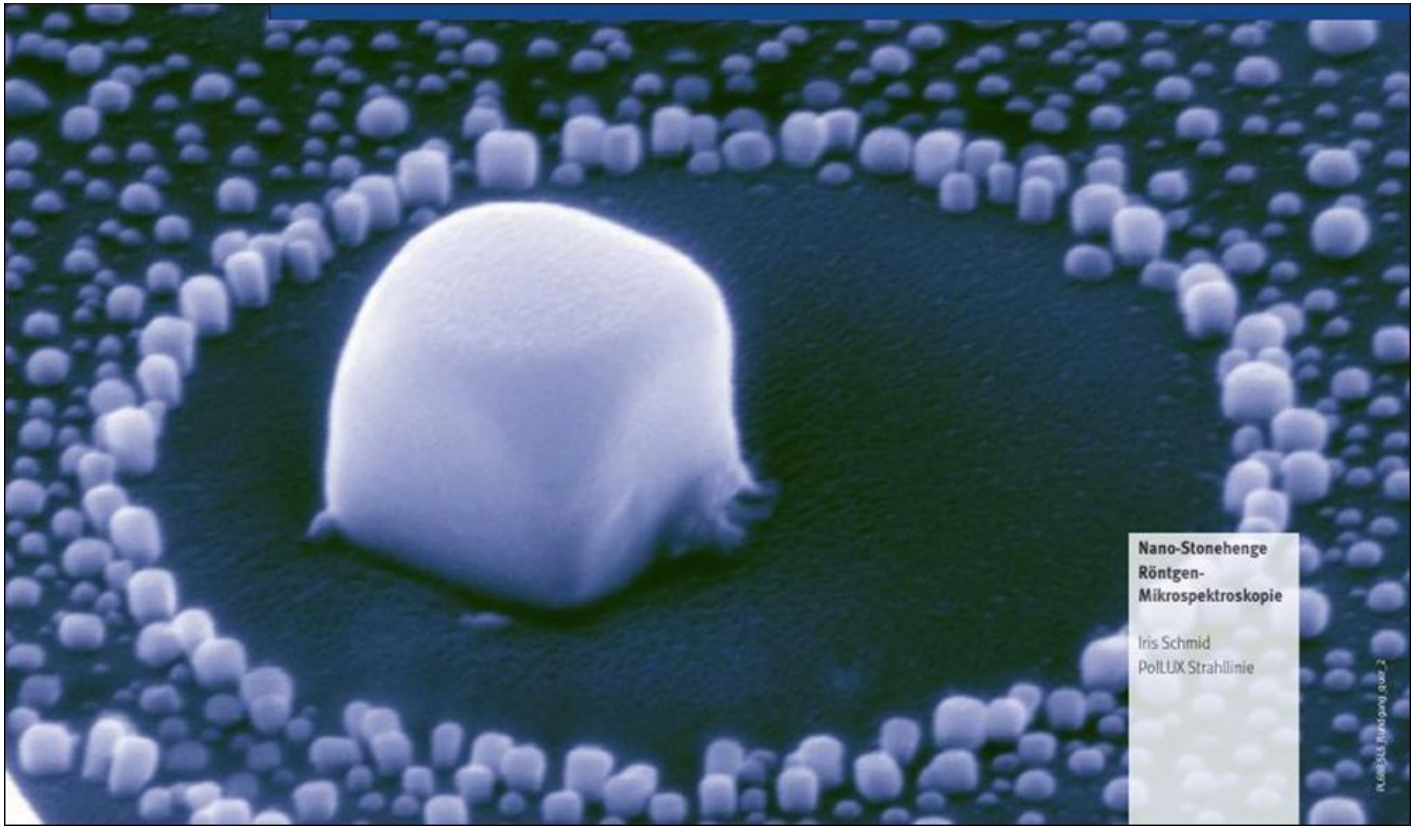


1% eines Haardurchmessers

- Nanomuster, geprägt mit Synchrotronlicht, eignet sich für:

- Anregung von Kristallbildung von Proteinen
- Steigerung der Speicher-kapazität von Festplatten
- Mikrofilter

Nanotechnik



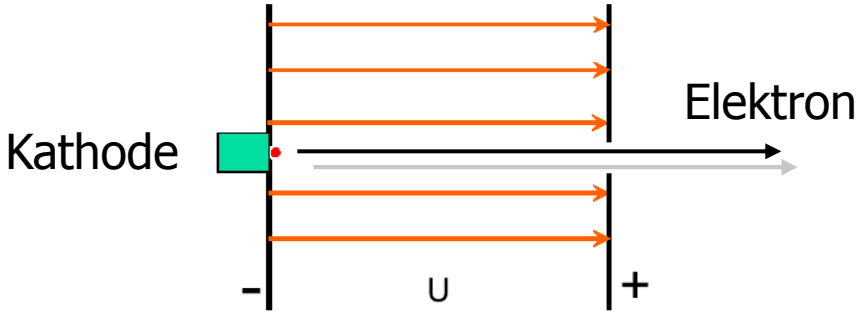
SLS
Synchrotron Lichtquelle Schweiz

- Nano-Stonehenge, geprägt mit Synchrotronlicht

Erzeugung von Elektronen und Protonen

Elektronen:

aus Metallplättchen/Draht



Protonen:

aus Gasentladung von Wasserstoff

- Beschleunigung mit elektrischen Feldern
- Kontrolle der „Rennbahn" mit Magnetfeldern

PAUL SCHERRER INSTITUT

Das PSI betreibt 3 Parade-Beschleuniger !

- **Ring-Zyklotron , 590 MeV Protonen**
- **Speicherring , 2.4 GeV Elektronen**
- **Kompakt-Zyklotron , 250 MeV Protonen**

PAUL SCHERRER INSTITUT

Ringzyklotron
590 MeV Protonen

1.3 MW mittlere Strahlleistung
(Weltrekord!)

intensivste
Müonen Strahlen
$5 \cdot 10^8\ \mu^+/s$, $10^8\ \mu^-/s$

Spallations-Neutronen-Quelle
10^{14} n/s

entspricht
Mittelflussreaktor
(aber ohne Uran!)

PAUL SCHERRER INSTITUT

Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS)
2.4 GeV Elektronen-Speicherring

- extrem stabile Röntgenstrahlen

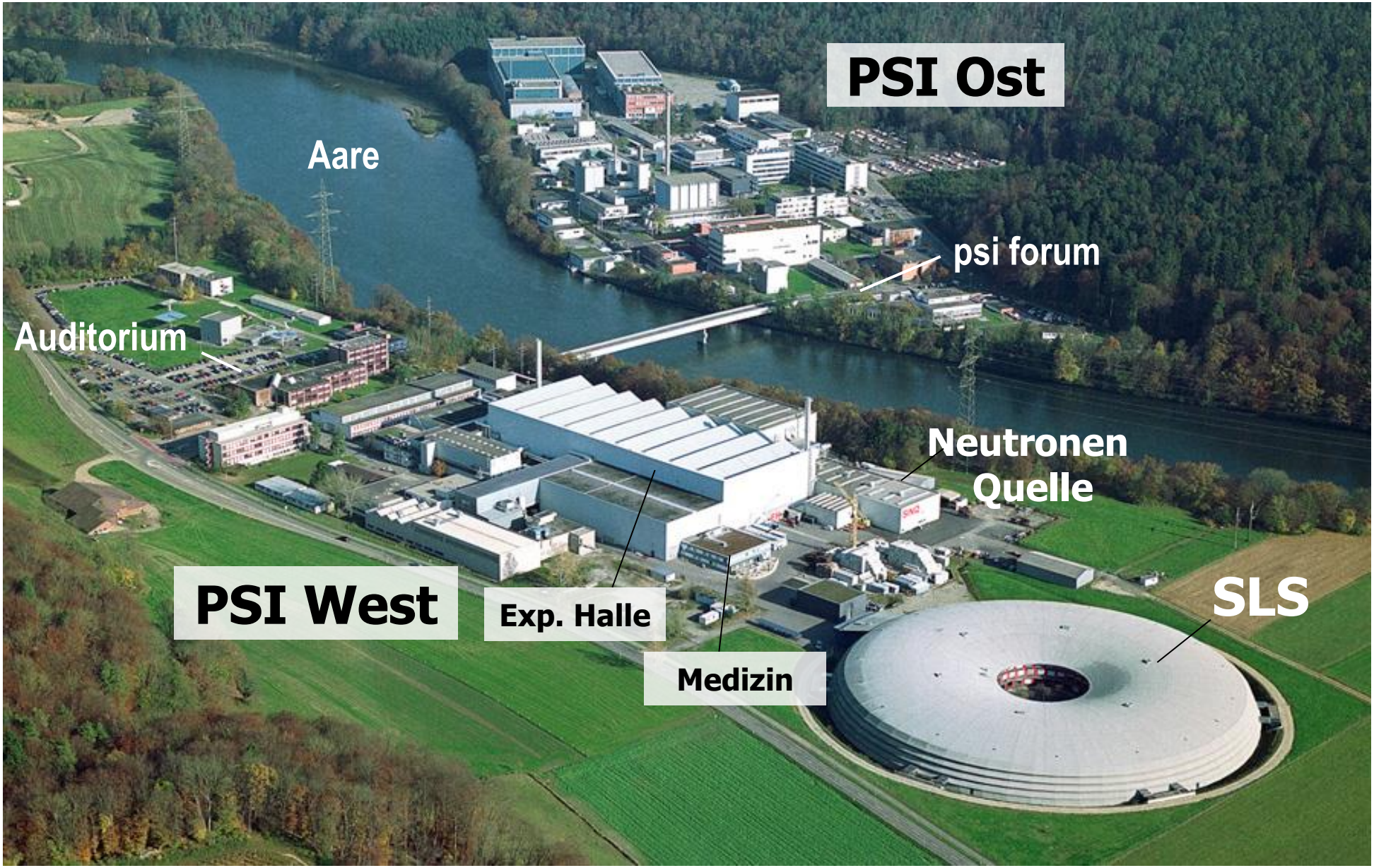
  dank „**fast orbit feedback**“ (< 0.5 µm)

- konstanter Strahlstrom (400-402 mA)

  dank **top-up** alle 2.5 Min.

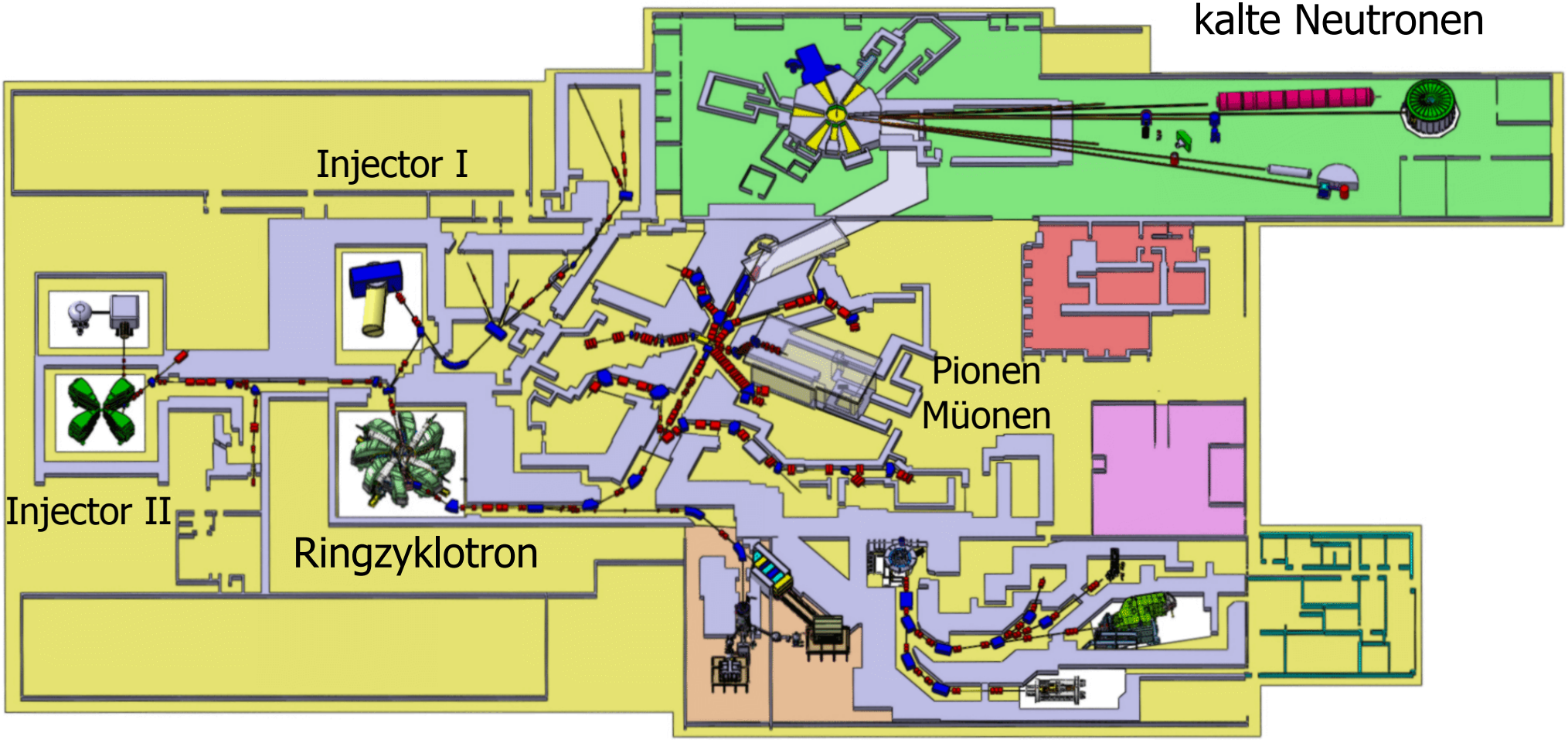
PAUL SCHERRER INSTITUT

Flugaufnahme



PAUL SCHERRER INSTITUT

Experimentierhalle



W.Joho 2013

PAUL SCHERRER INSTITUT

Cockkroft-Walton Vorbeschleuniger

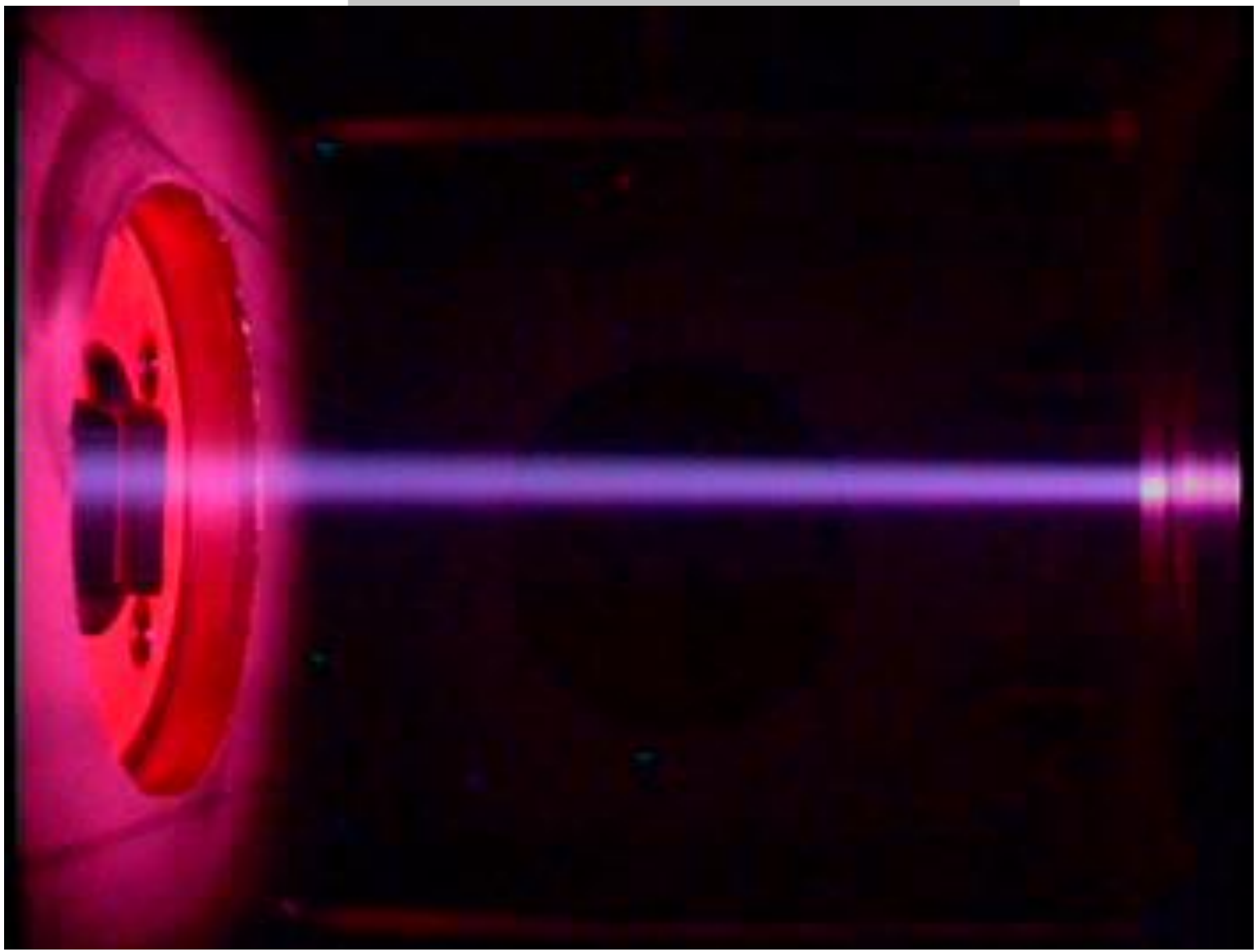
Spannung: 810 kV

→ Protonenstrahl
870 keV

Protonenquelle:
auf 60 kV innerhalb
des „Faraday Käfigs“

PAUL SCHERRER INSTITUT

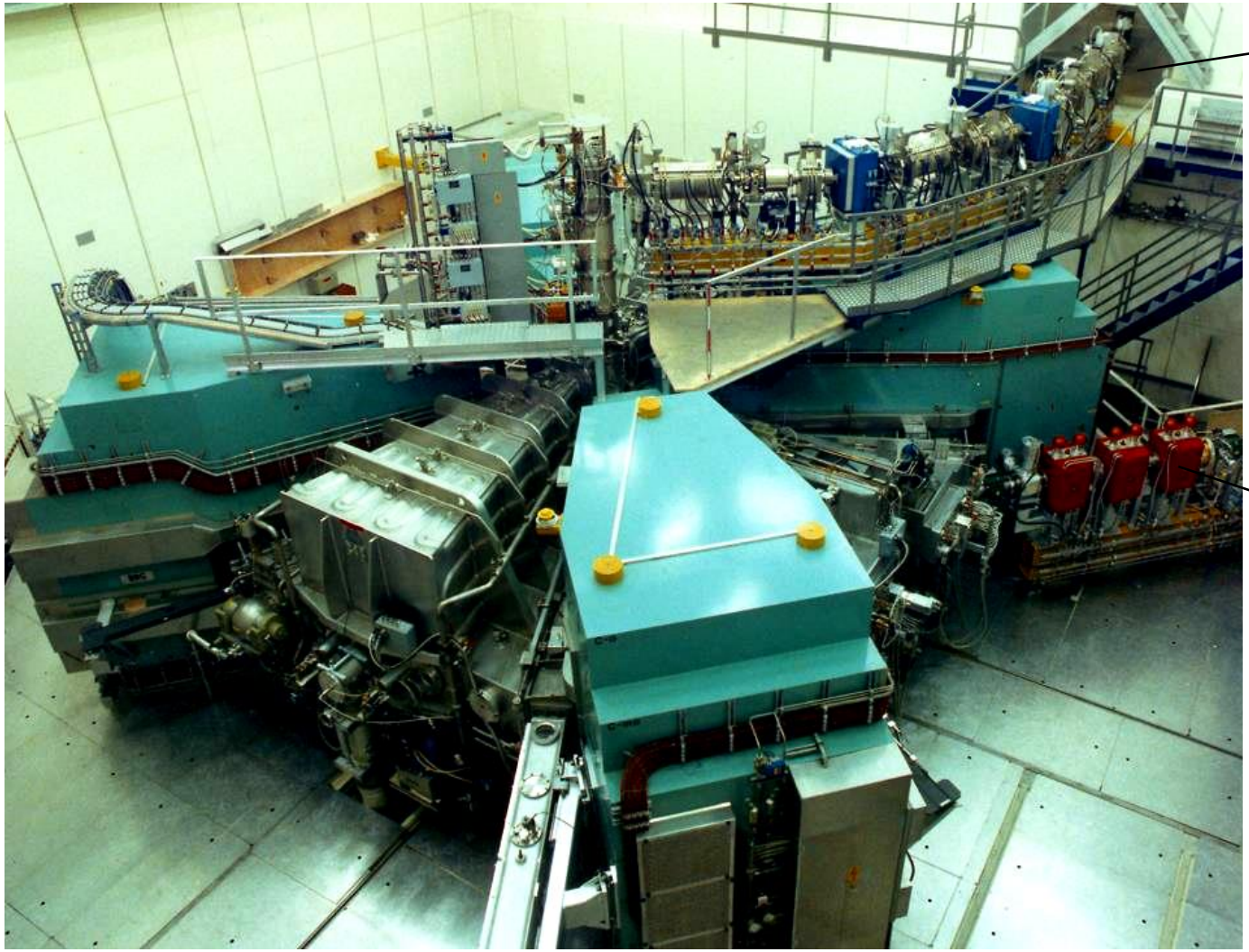
Protonenstrahl aus Quelle



W.Joho 2013

PAUL SCHERRER INSTITUT

Injektor II



Injektionslinie

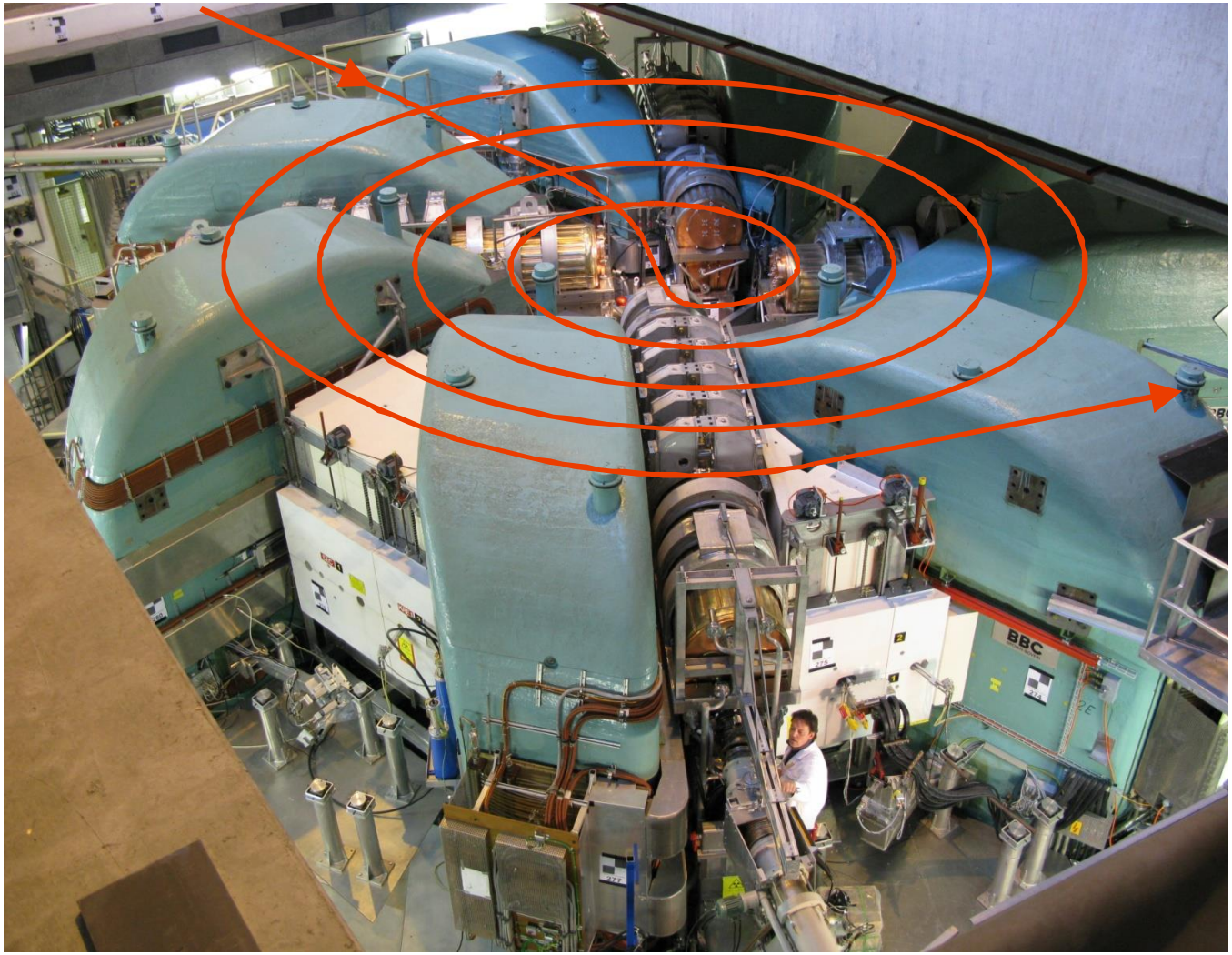
870 keV

Extraktionslinie

72 MeV Protonen

PAUL SCHERRER INSTITUT

Ringzyklotron
4 neue Kavitäten 2008



590 MeV Protonen

1.4 MW Strahlleistung

(Weltrekord!)

8 Magnete à 250 t

4 Kavitäten à 900 kV

Extraktion 99.99%

PAUL SCHERRER INSTITUT

Ring Cyclotron September 1973

1 Hans Willax

2 Miguel Olivo

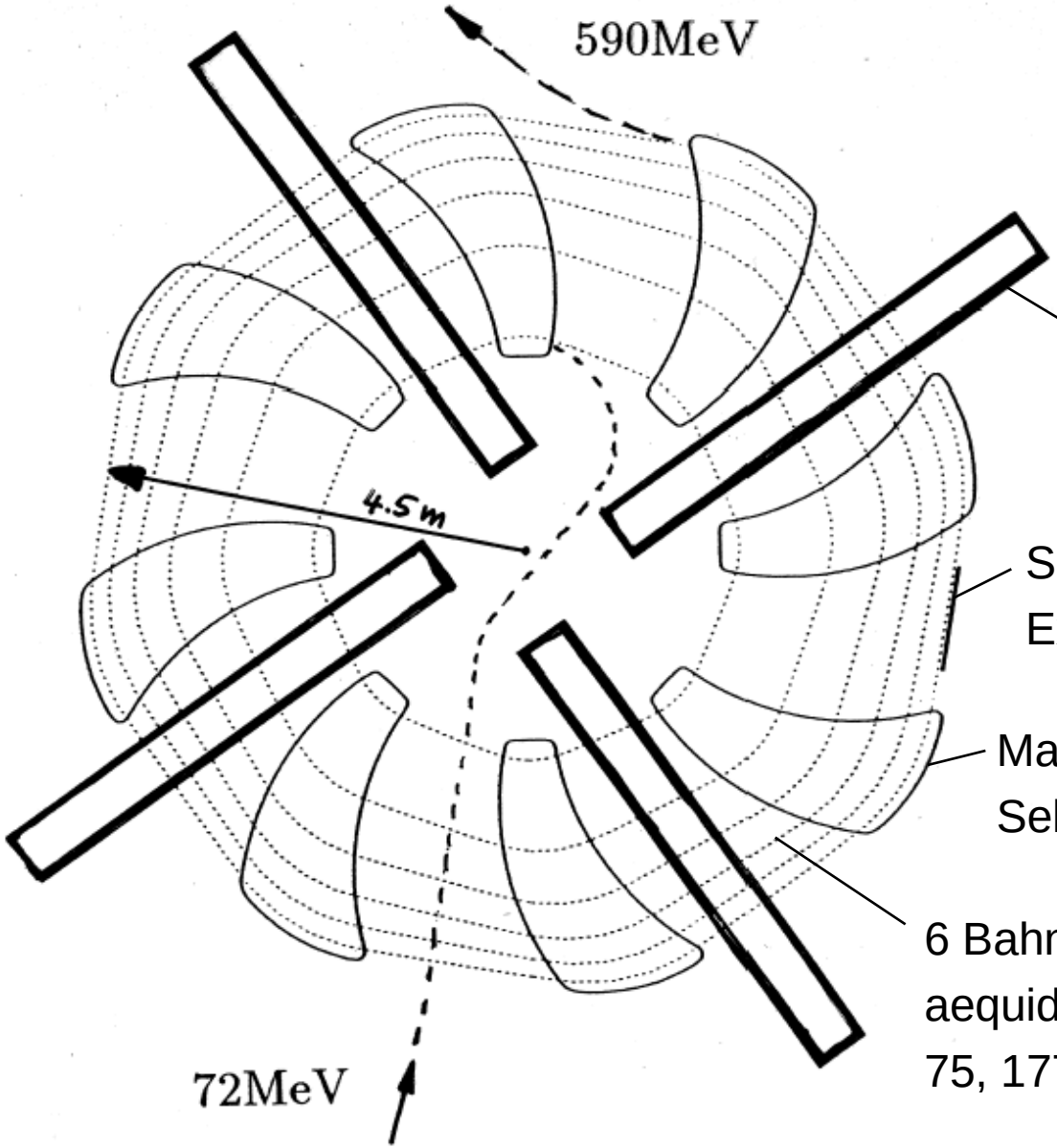
3 Thomas Stammbach

4 Werner Joho

5 Christa Markovits

PAUL SCHERRER INSTITUT

Bahnen im Ring Zyklotron



HF Kavität

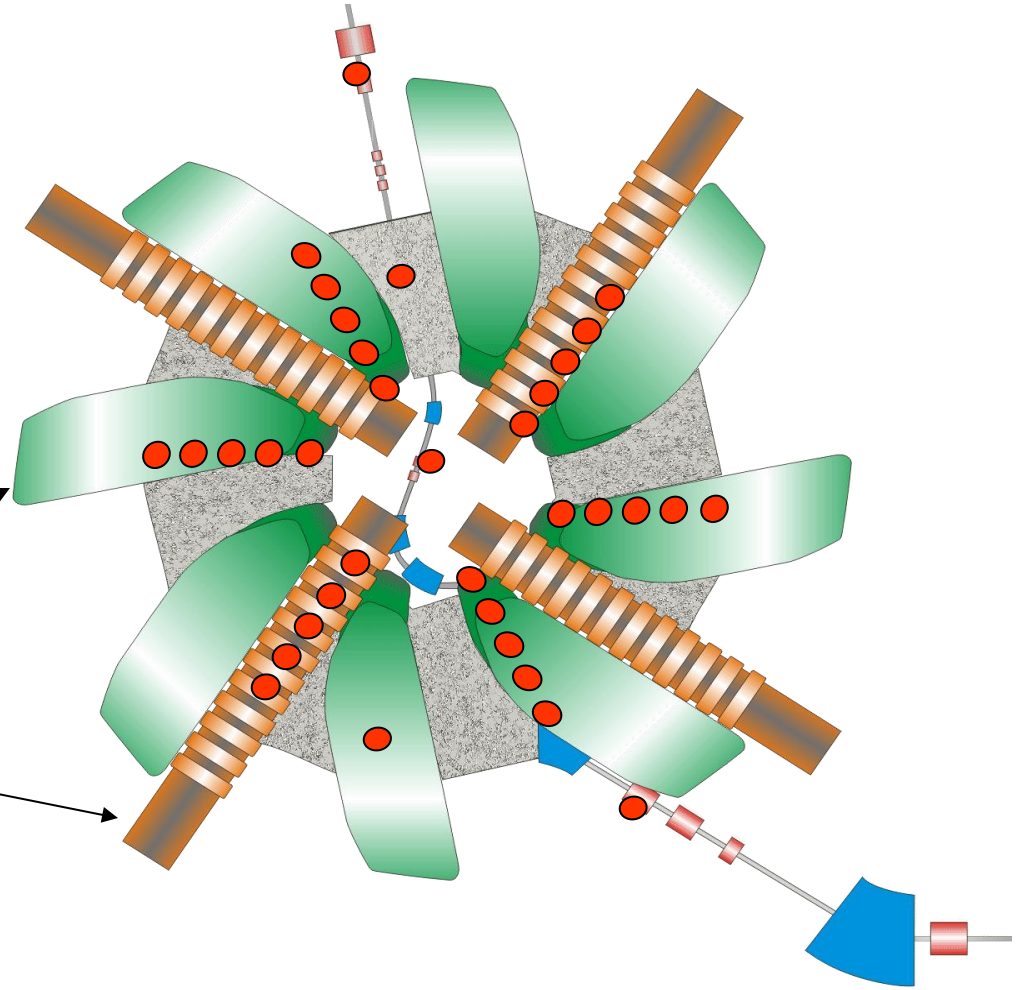
Septum Extraktion

Magnet Sektor

6 Bahnen bei aequidistanten Energien:
75, 177, 279, 381, 483, 585 MeV

PAUL SCHERRER INSTITUT

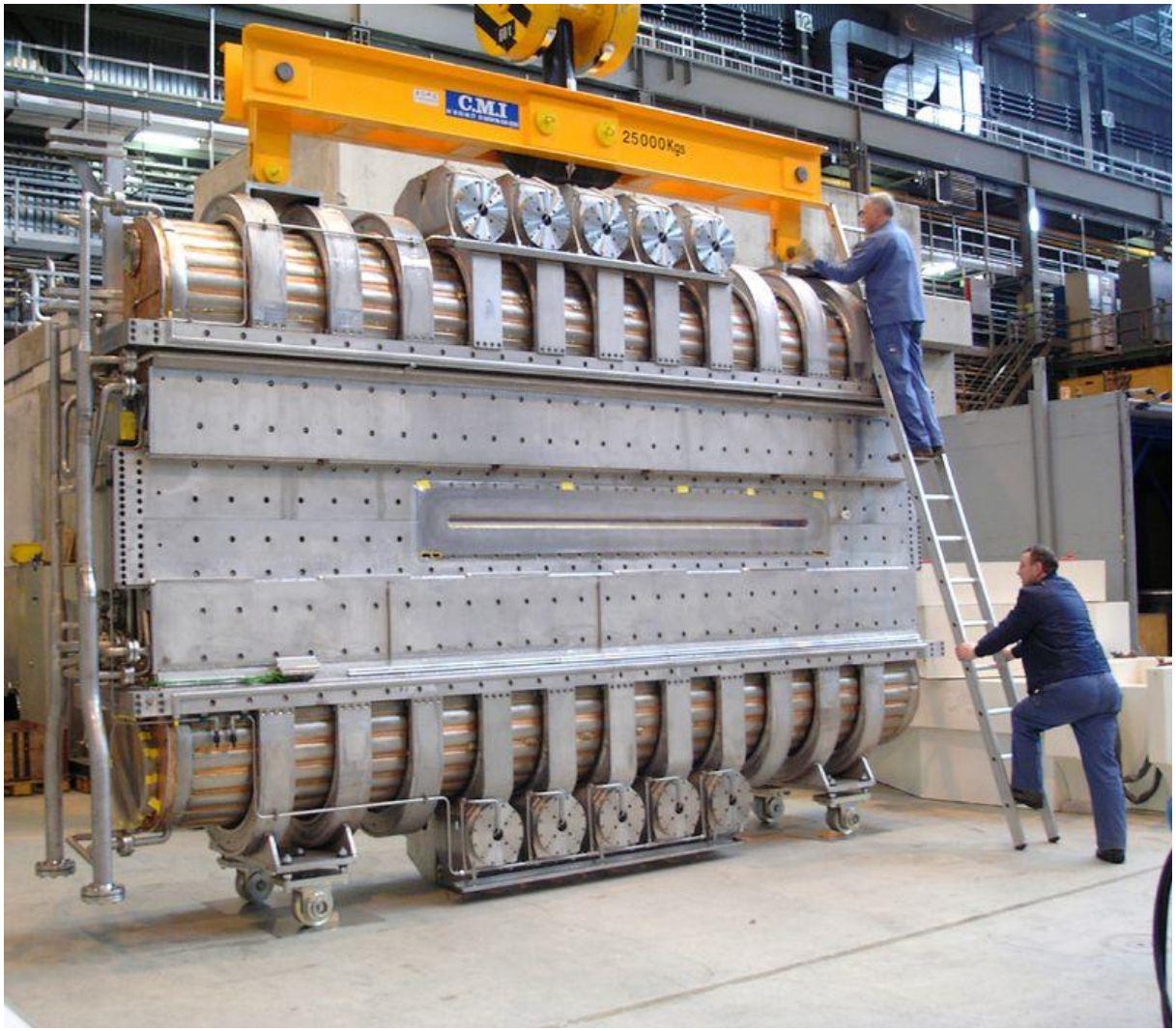
Das PSI Ring-Zyklotron



8 Sektormagnete

4 Beschleunigungsstrecken

PAUL SCHERRER INSTITUT



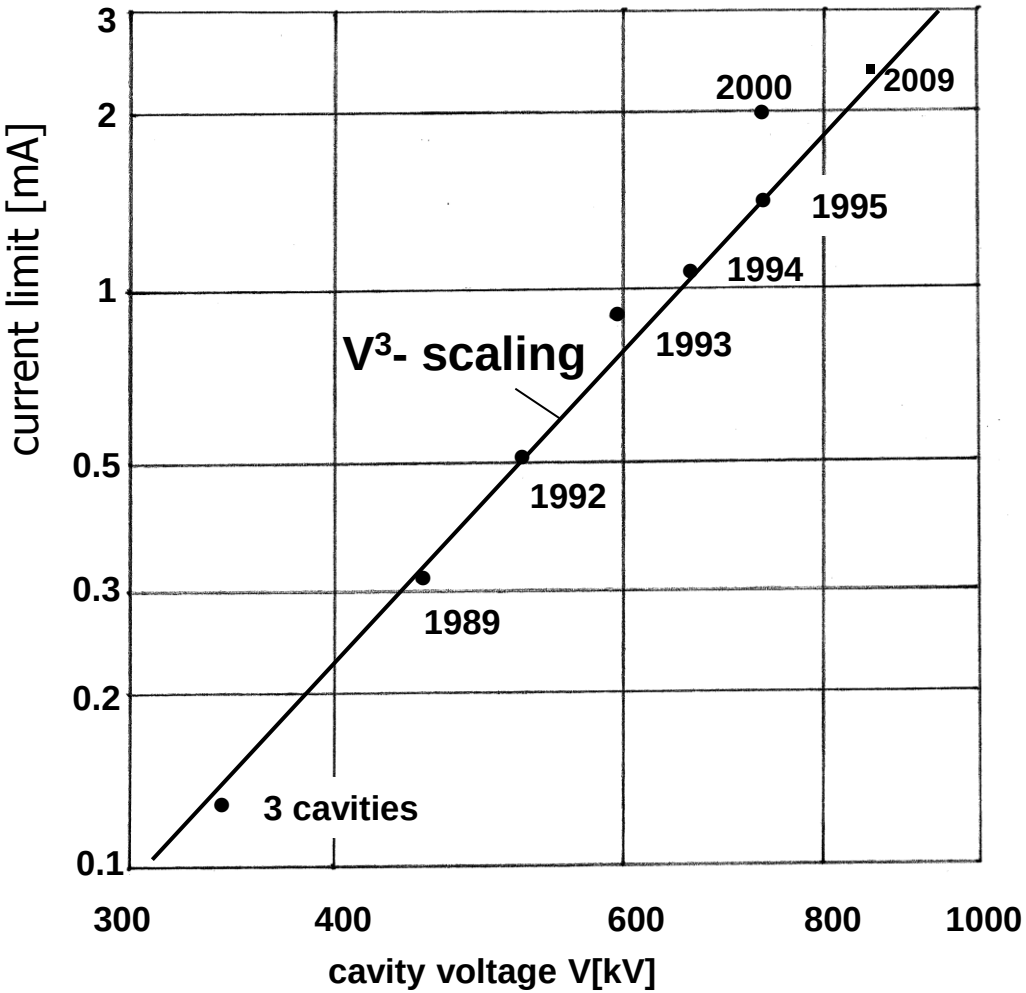
Kupferkavität im Ringzyklotron

50 MHz Hochfrequenz

1 MV Spitzenspannung

PAUL SCHERRER INSTITUT

Intensitätslimite im 590 MeV Ring Cyclotron



Longitudinal space charge forces

increase the energy spread

=> higher extraction losses

=> limit on beam current

Remedy:

higher voltage V on the RF cavities

=> lower turn number n (V·n = const.)

Stromlimite ~ V^3 !

There are 3 effects, each giving a factor V(~1/n):

1) beam charge density ~ n
2) total path length in the cyclotron ~ n
3) turn separation ~ V

W.Joho, 9th Int. Cyclotron conference CAEN (1981)

PAUL SCHERRER INSTITUT

why is the PSI Ring Cyclotron such an efficient accelerator ?

general property of cyclotrons

isochronous magnetic field

continuos beam (CW)

=> high average current

multiple beam traversal of RF-cavity

efficient use of RF power

specialty of Ring Cyclotron

magnetic and RF-System are **decoupled**

=> economic magnets

=> economic RF-cavities

high RF voltage + Flattop cavity

=> good turn separation

=> **very low losses**

high Beam Power

PAUL SCHERRER INSTITUT

Graphit Target Rad

1.2 MW
Protonenstrahl

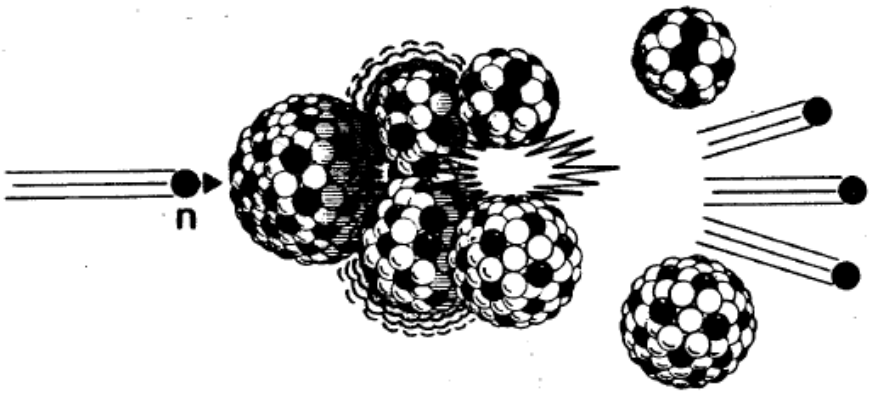
Erzeugt Pionen
und Muonen

PAUL SCHERRER INSTITUT

„langsame" Neutronen für Materialforschung

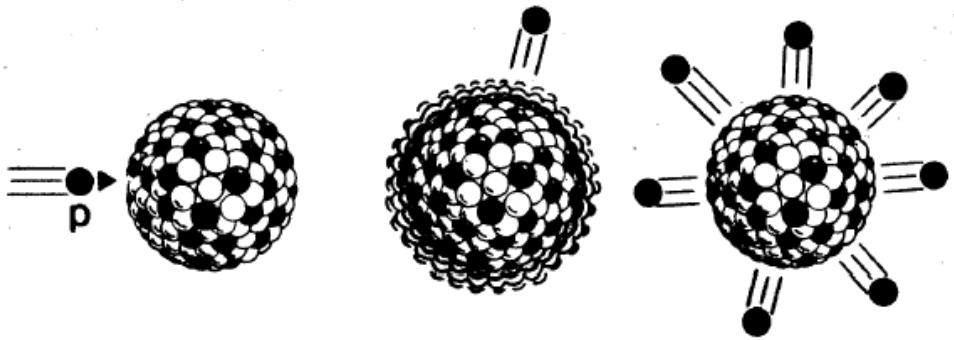
- Erzeugung von schnellen Neutronen
- Abbremsung in Moderator

1. Kernspaltung von Uran (U^{235}) in einem Reaktor



2. Spallation von schweren Kernen (z.B. Blei) durch Beschuss mit Protonen aus Beschleuniger

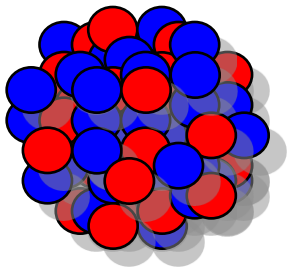
=> schnelle Abschaltung möglich !



PAUL SCHERRER INSTITUT

Erzeugung von Neutronen

Proton



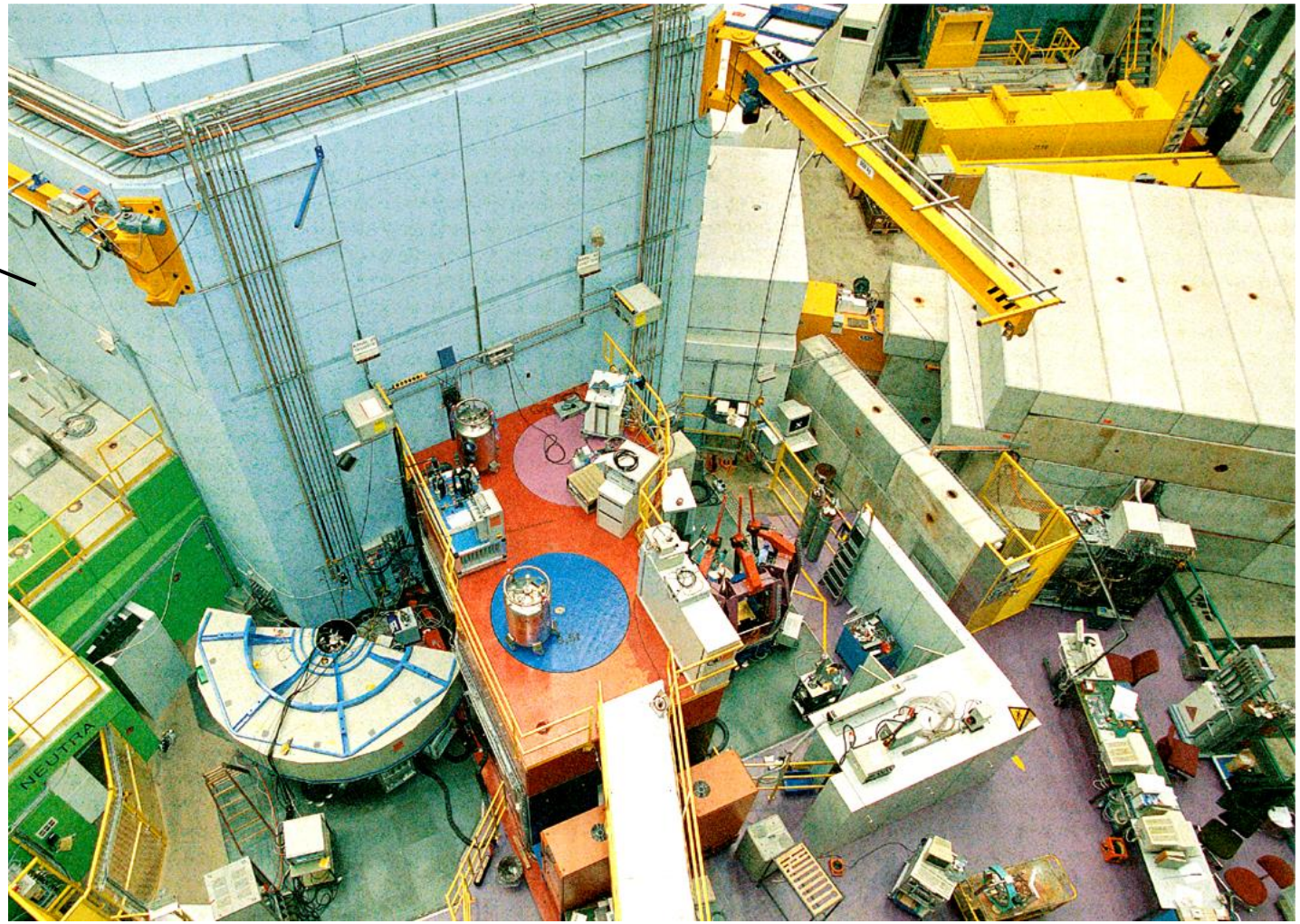
Bleikern

Falls Blei 3 Protonen verliert => Gold !

PAUL SCHERRER INSTITUT

SINQ
Neutronen-Spallationsquelle

Abschirmung
7 m Beton



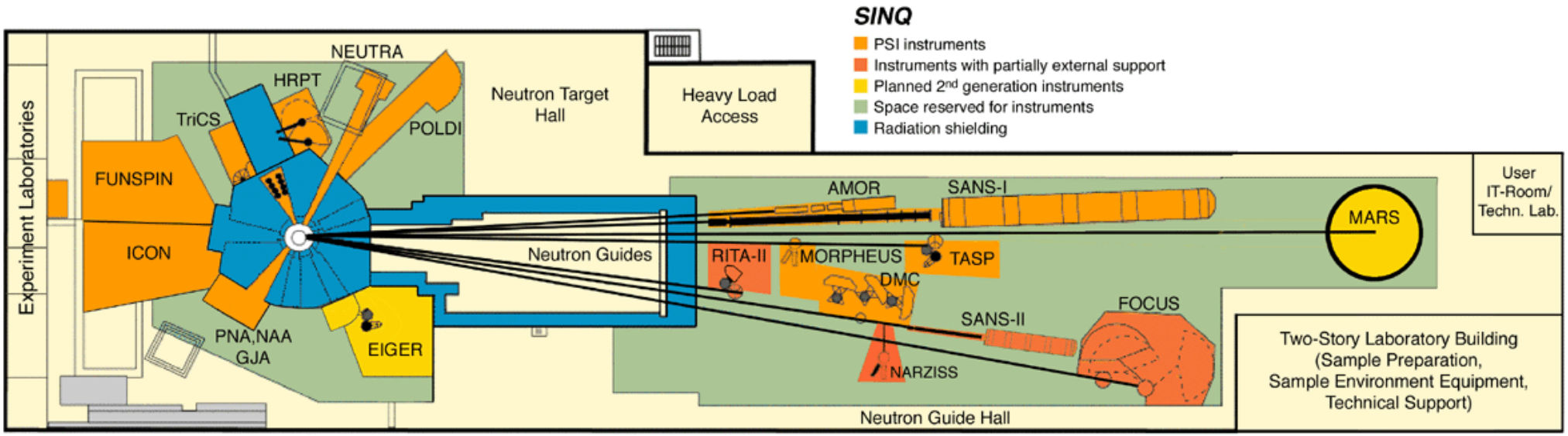
Leiter für
kalte Neutronen

PAUL SCHERRER INSTITUT

Neutronen-Spallationsquelle

Proton (590 MeV) => Bleikern => ca. 10 Neutronen

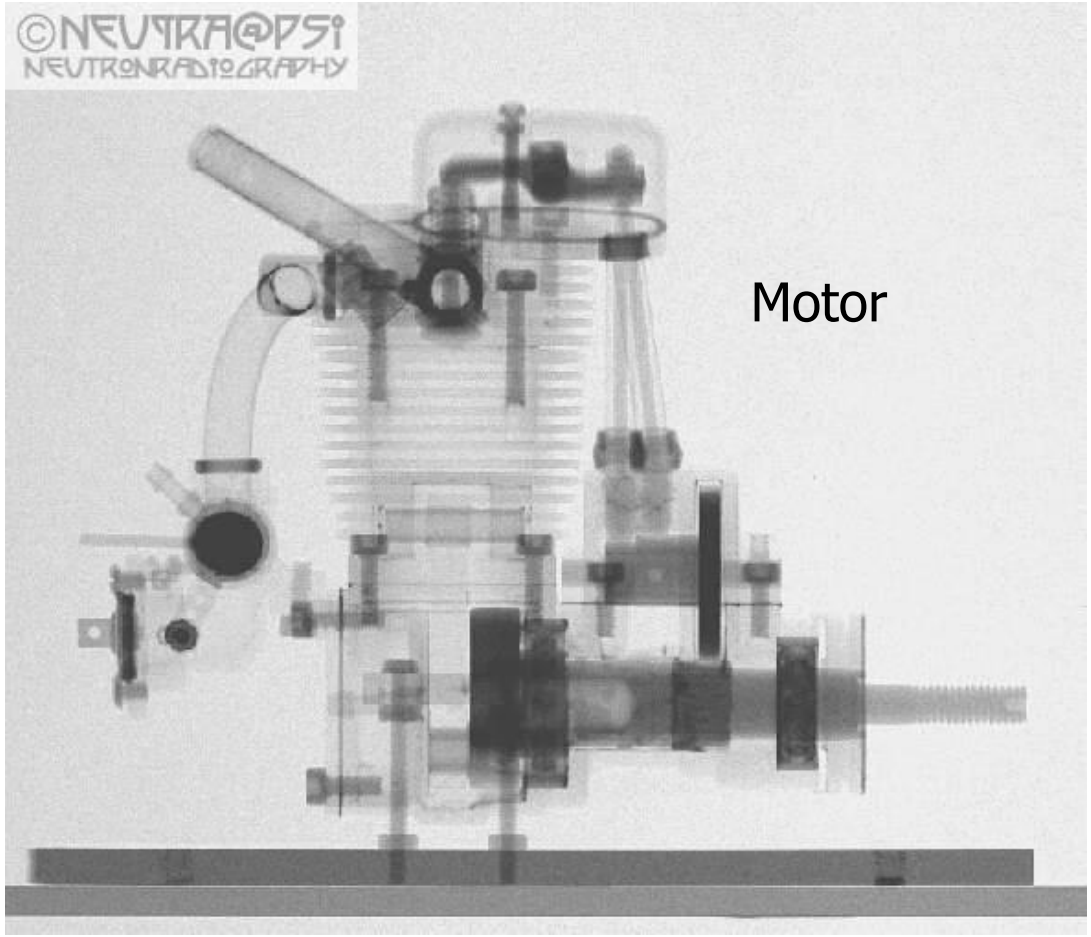
=> abbremsen auf < 0.025 eV => Streuung an Materialproben

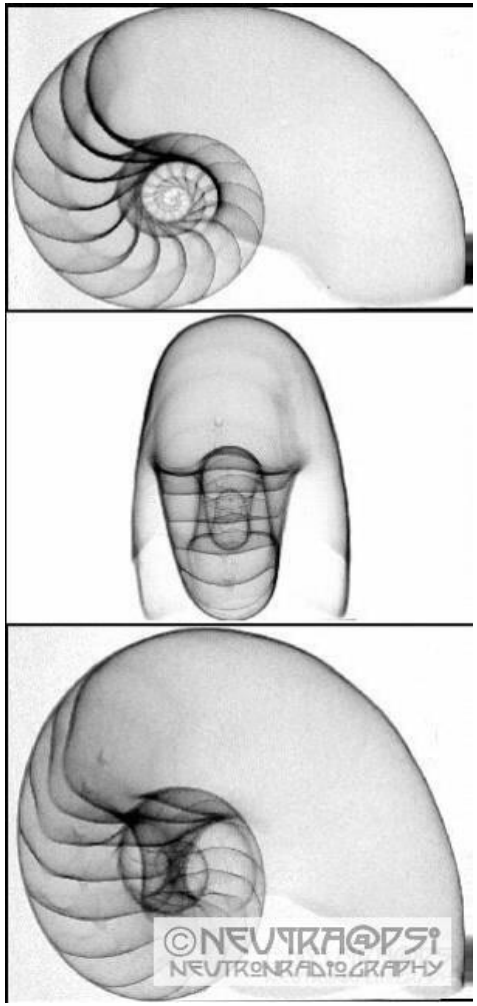


PAUL SCHERRER INSTITUT

Materialprüfung mit Neutronen

=> das Innere von grossen Materialproben wird sichtbar





PAUL SCHERRER INSTITUT

Entschärfung von radioaktivem Abfall !

chem. Separierung der langlebigen Aktinide

↓

hoch intensiver Protonen Strahl
≈ 40 MW (30*PSI) , ab ca. 2050 ?

↓

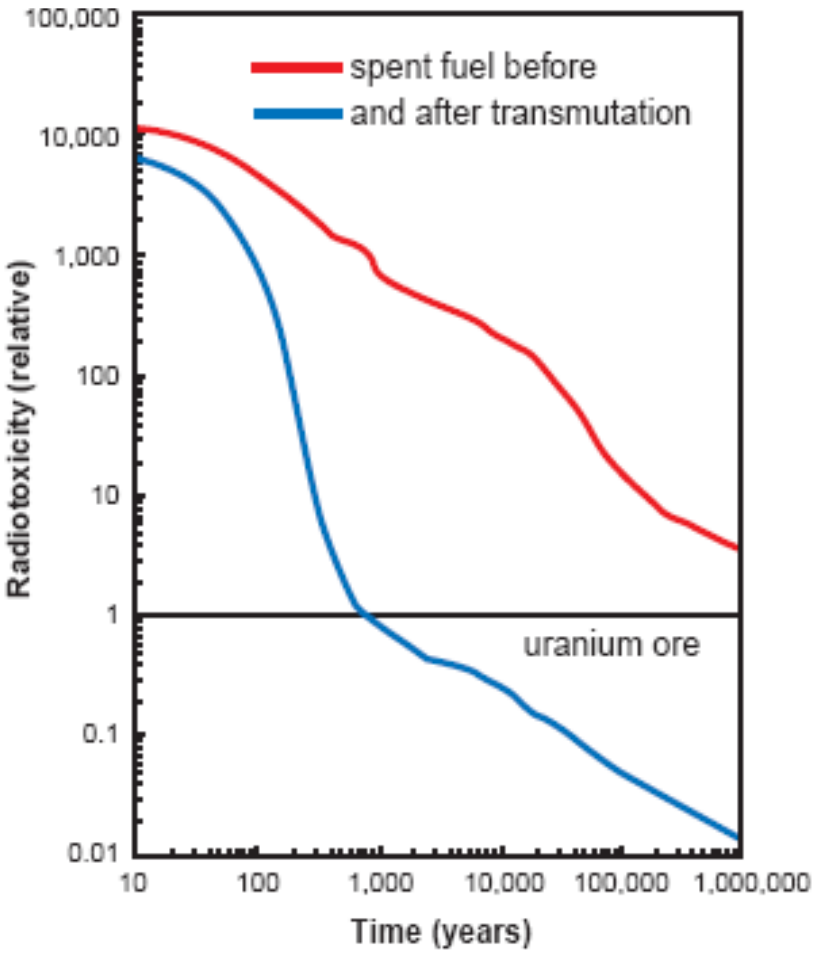
Erzeugung von Neutronen

↓

Umwandlung der Aktiniden

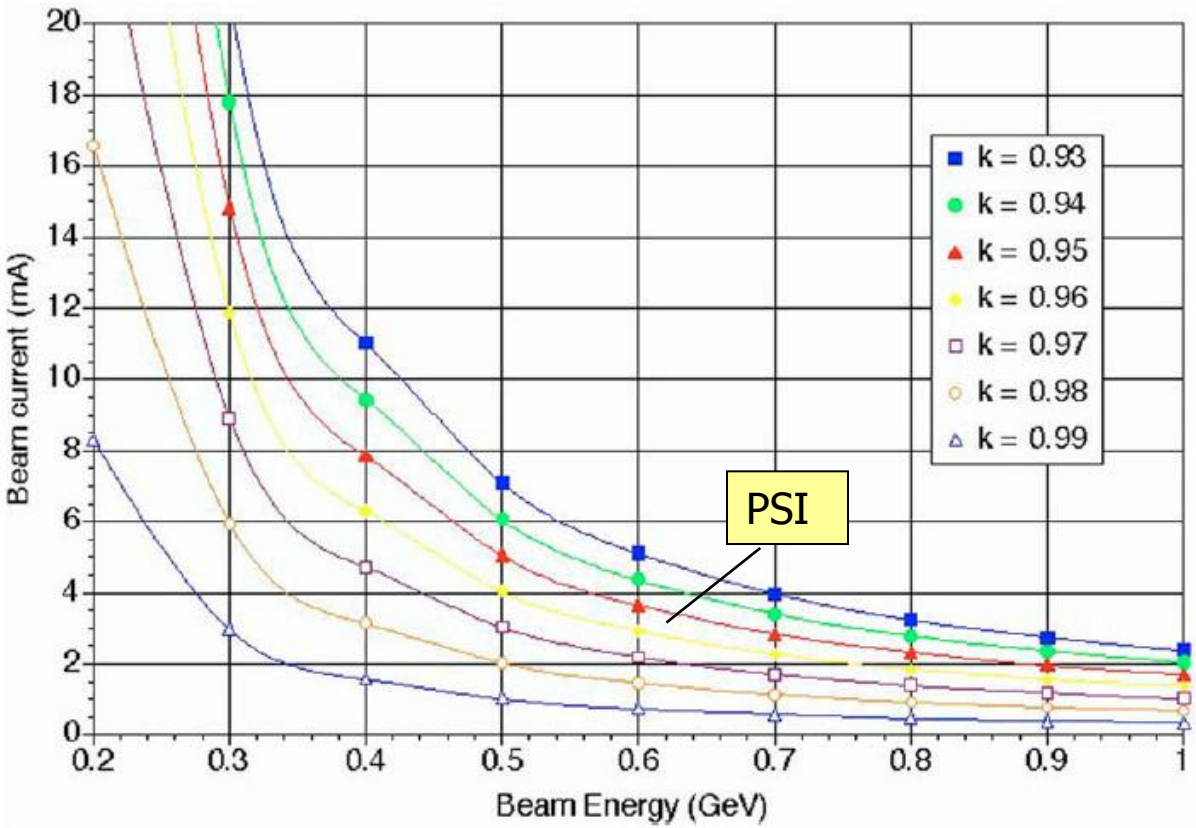
↓

Reduktion von 1 Mill. Jahre auf 400 Jahre



European Roadmap for Accelerator Driven Systems … ENEA Italien 2001

Energy Amplifier Concept (C.Rubbia)



Beam current needed to produce 80 MW_{th} with protons for different criticality factors k (ref. Ansaldo 2001)

Beschleuniger erzeugt Neutronen in subkritischem Reaktor (k=0.96)

z.B. 600 MeV PSI Cyclotron,

3 mA => **1.8 MW** Strahlleistung

=> 80 MW_{th} = **30 MW_{el}**

=> Kraftwerk mit 1 GW_{el} braucht

40mA Protonen bei 1 GeV => s.c. Linac

- **inherente Sicherheit**
- **Thorium** (grosse Reserven)
- kein langlebiger Abfall
- kein Material für Kernwaffen

PAUL SCHERRER INSTITUT

3 Sonden für Materialforschung

einzigartige Spezialität des PSI

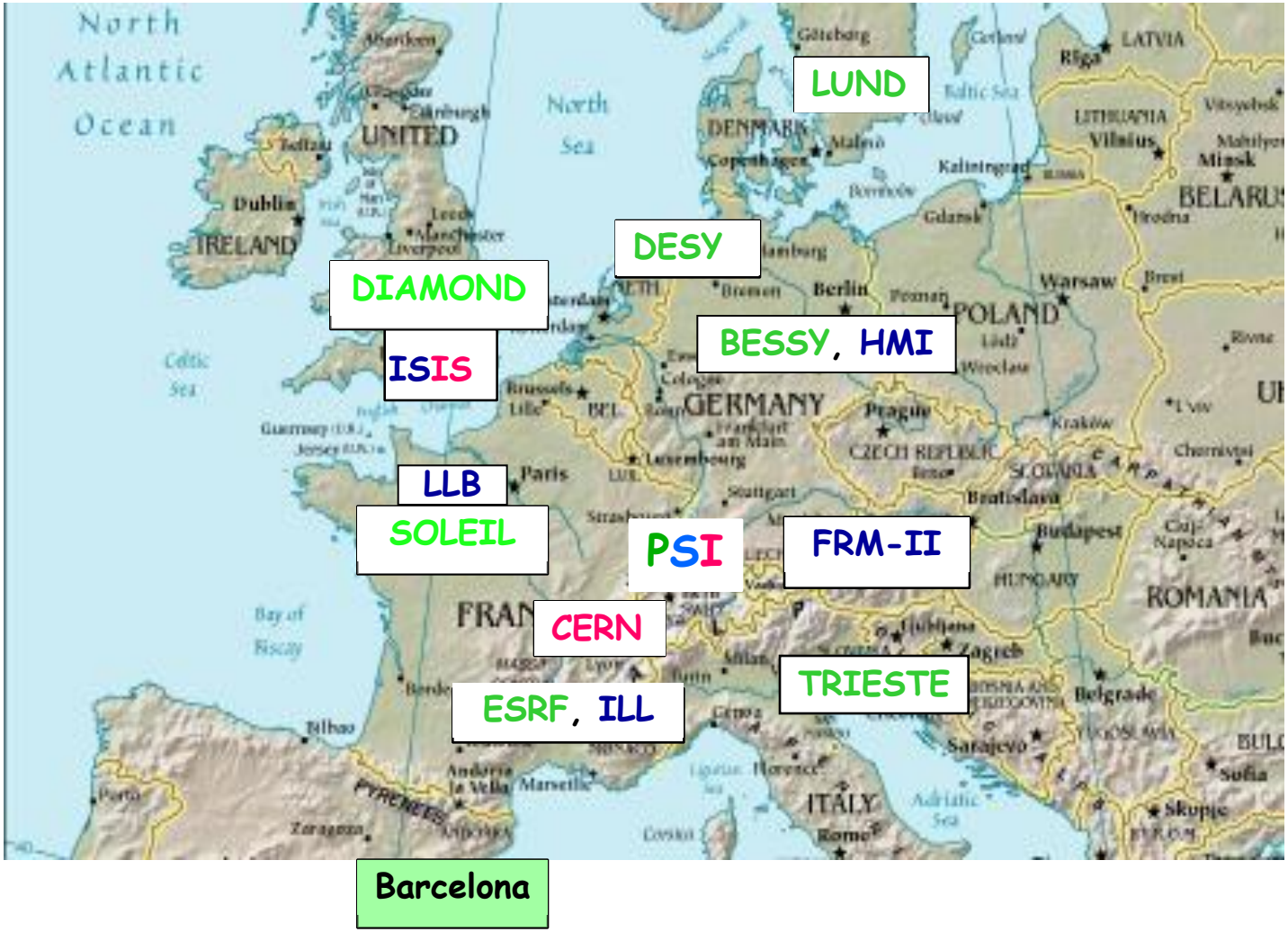
Photonen (SLS) → Elektronenhülle

Neutronen (SINQ) → Atomkerne

Müonen (μSR) → interne Magnetfelder in Kristallen

PAUL SCHERRER INSTITUT

Anlagen in Europa für Materialforschung



Röntgen-strahlen

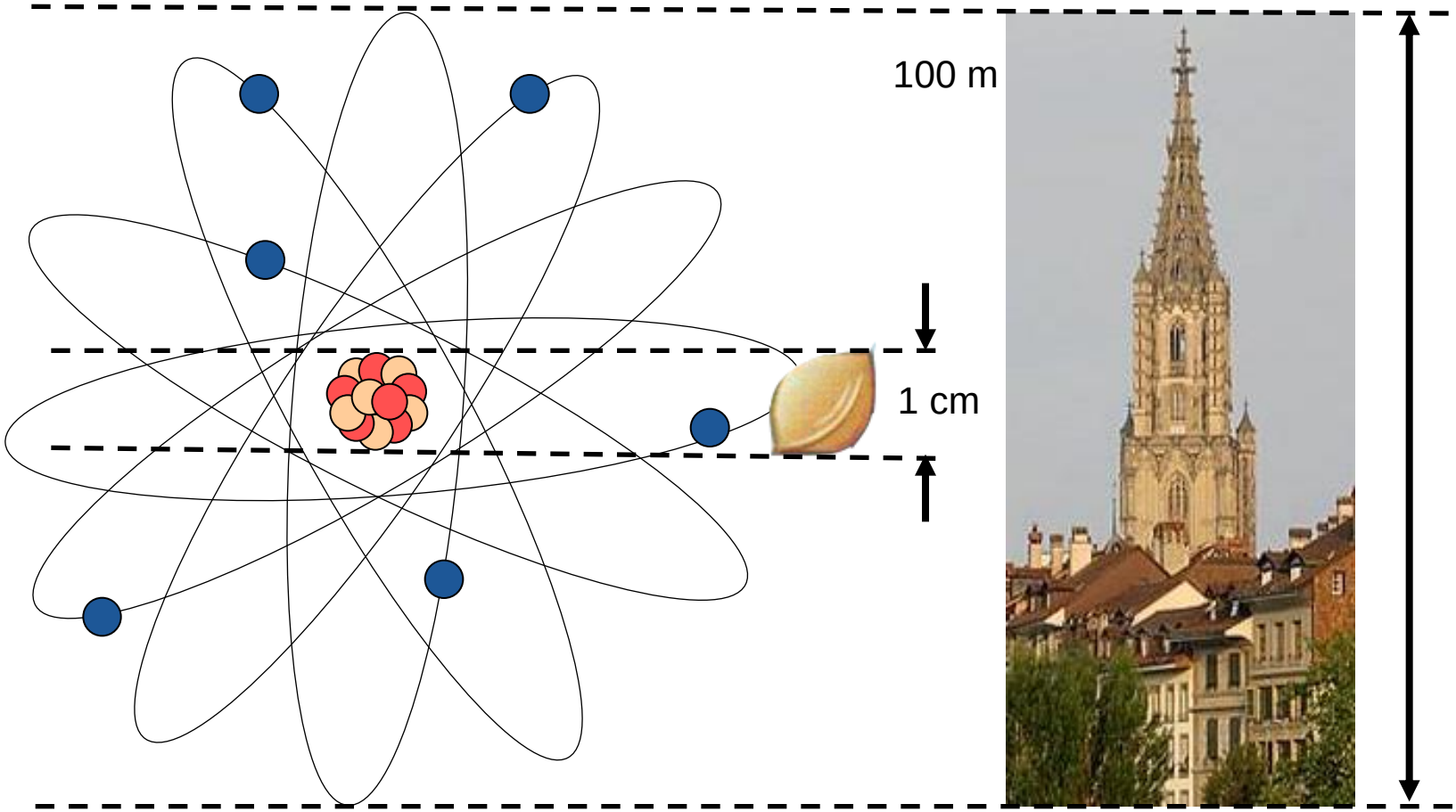
Neutronen

Müonen

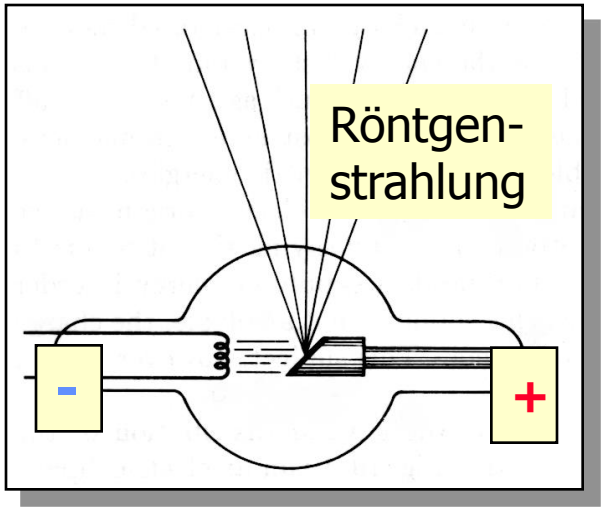
in Konstruktion

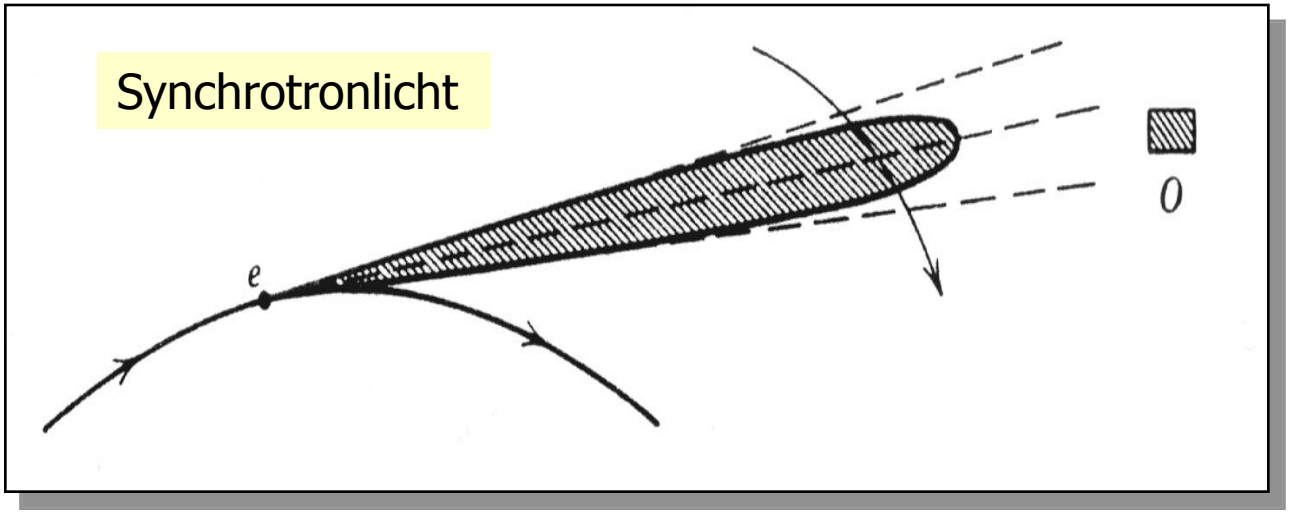
PAUL SCHERRER INSTITUT

Grössenvergleich Kern => Atom



Erzeugung von Röntgenstrahlen





Produktion von Röntgenstrahlen mit Röntgenröhre (60-90kV)

breit gefächerter Strahl

=> grosse Objekte

Produktion von Röntgenstrahlen mit schnellen Elektronen in Magnetfeld

intensiver, laser-artiger Strahl

=> Mikrostrukturen

Synchrotron Strahlung

- laser-artige Strahlen (polarisiert),

  erzeugt durch **Elektronen** hoher Energie
- sehr hohe Intensität (Brillanz)
- frei wählbare Wellenlänge von

  infrarotem Licht bis harter Röntgenstrahlung

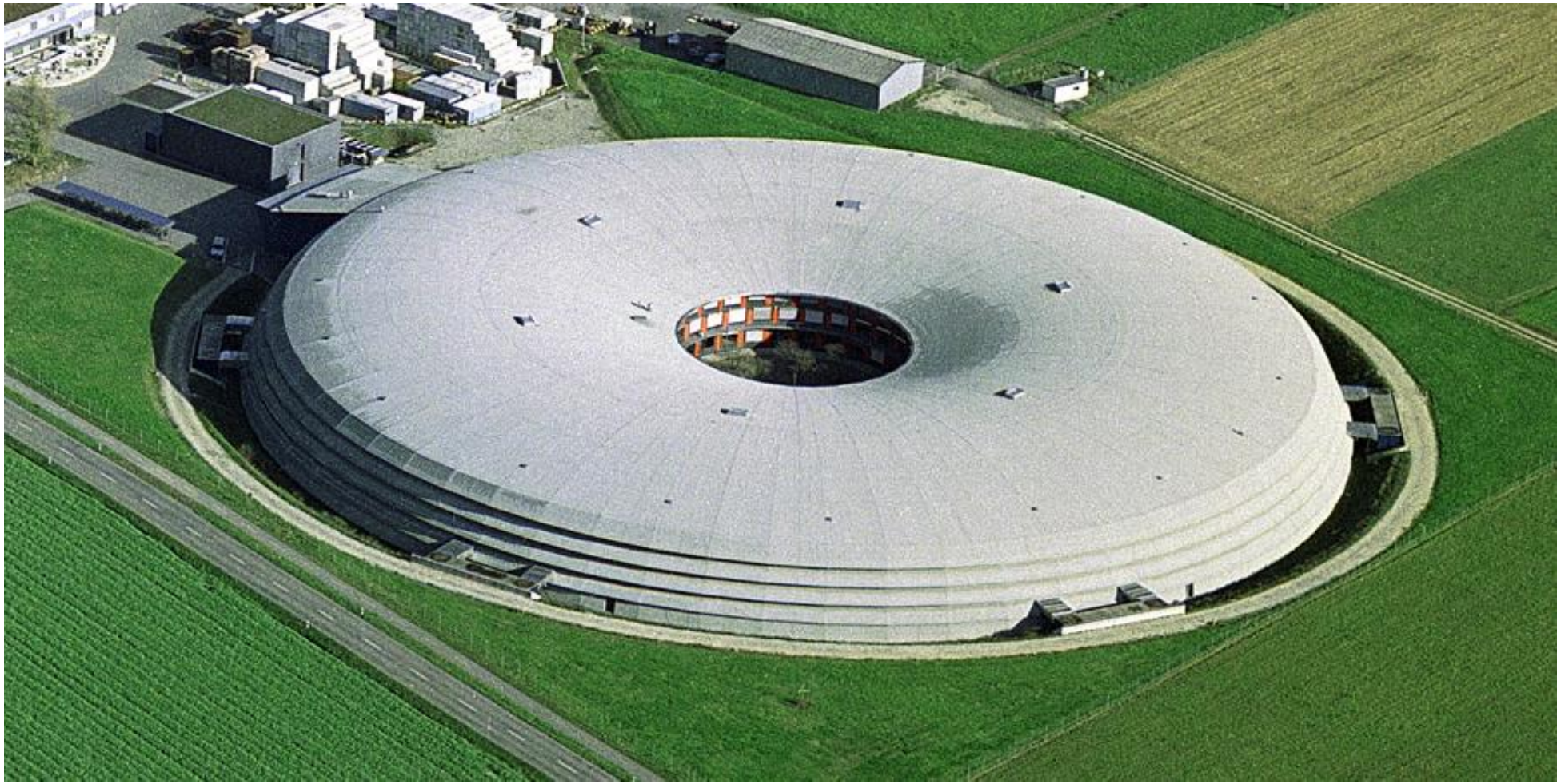
was braucht es dazu?

⇒ einen **Speicherring** (mit vielen Magneten), in dem

die Elektronen stundenlang zirkulieren können

PAUL SCHERRER INSTITUT

SLS Photo



PAUL SCHERRER INSTITUT

SLS-Komponenten

Beschleuniger

- Elektronenquelle 90 keV
- LINAC 100 MeV
- Booster, 3 Hz 0.1-2.4 GeV
- Speicherring, 288m 2.4 GeV

Strahl-linien

- Protein Kristallographie
- Materialwissenschaften
- Oberflächen-Mikroskopie
- Oberflächen-Spektroskopie
- Umweltforschung

hohe Brillanz

- Messungen an Mikroproben (Kristalle < 20 µm)

- kleine Strahldivergenz

  => kompakte Spiegel, kleine Aberrationen

- kurze Messzeit

- hohe Kohärenz => Bilder mit Phasenkontrast

PAUL SCHERRER INSTITUT

Forschung mit Synchrotron-strahlung

Röntgen-Analyse

- Struktur von Biomolekülen (Proteine)
  => neue Arzneimittel
- neue Materialien, Nanostrukturen
- Mikro-Tomographie
  (3-dim. Rekonstruktion
  z.B. von biologischen Proben)
- Hochtemperatur Supraleiter

Röntgen-Mikroskopie

- kompakte magnetische Strukturen
  => Datenspeicher
- Solarzellen mit hohem Wirkungsgrad
- spez. Oberflächen
  (Katalysatoren, Kunststoffe,
  minimale Reibung etc.)
- Nachweis von Spurenelementen auf
  Oberflächen => Schadstoff Analyse

PAUL SCHERRER INSTITUT

Mikrotomographie

Blutgefässe im Gehirn einer Maus (erkrankt an Alzheimer)

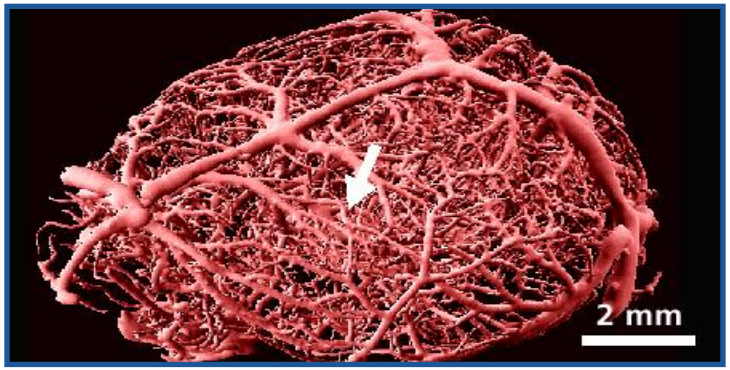
uni | eth | zürich

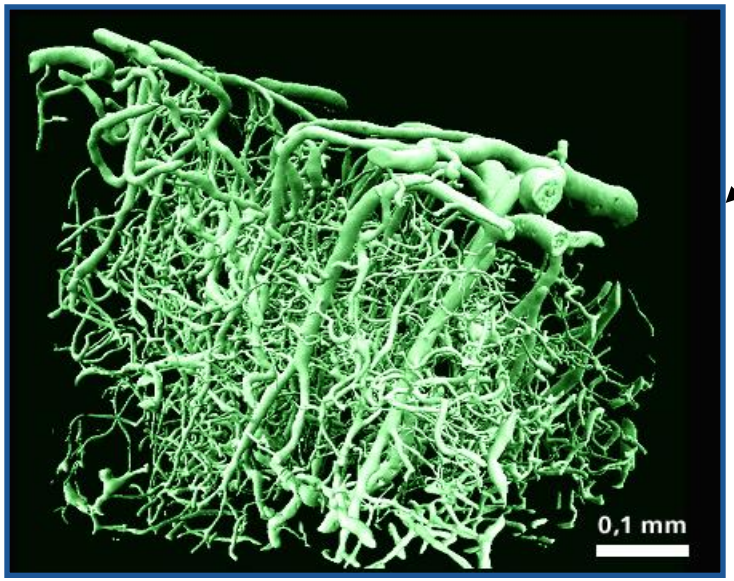
University of Zürich

The Scripps Research Institute

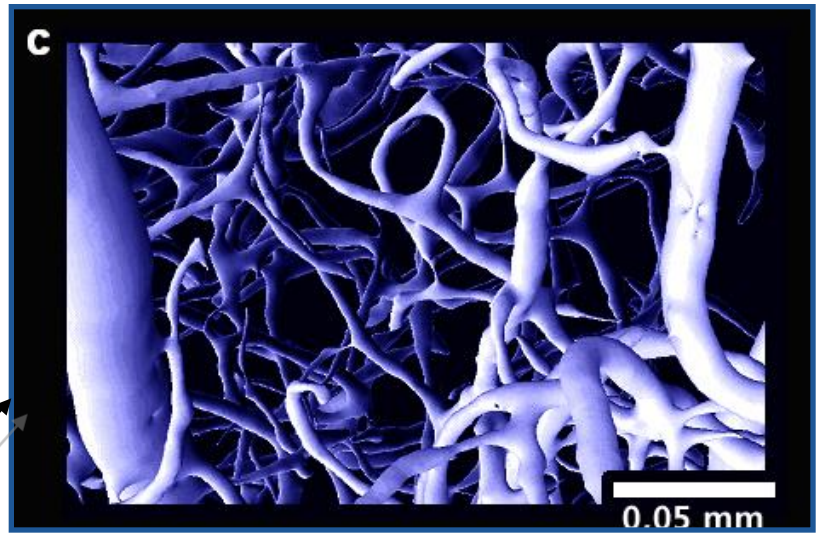
Novartis

volle Grösse





Details



ungenügende Blut-zufuhr

⇒ Sauerstoff-mangel

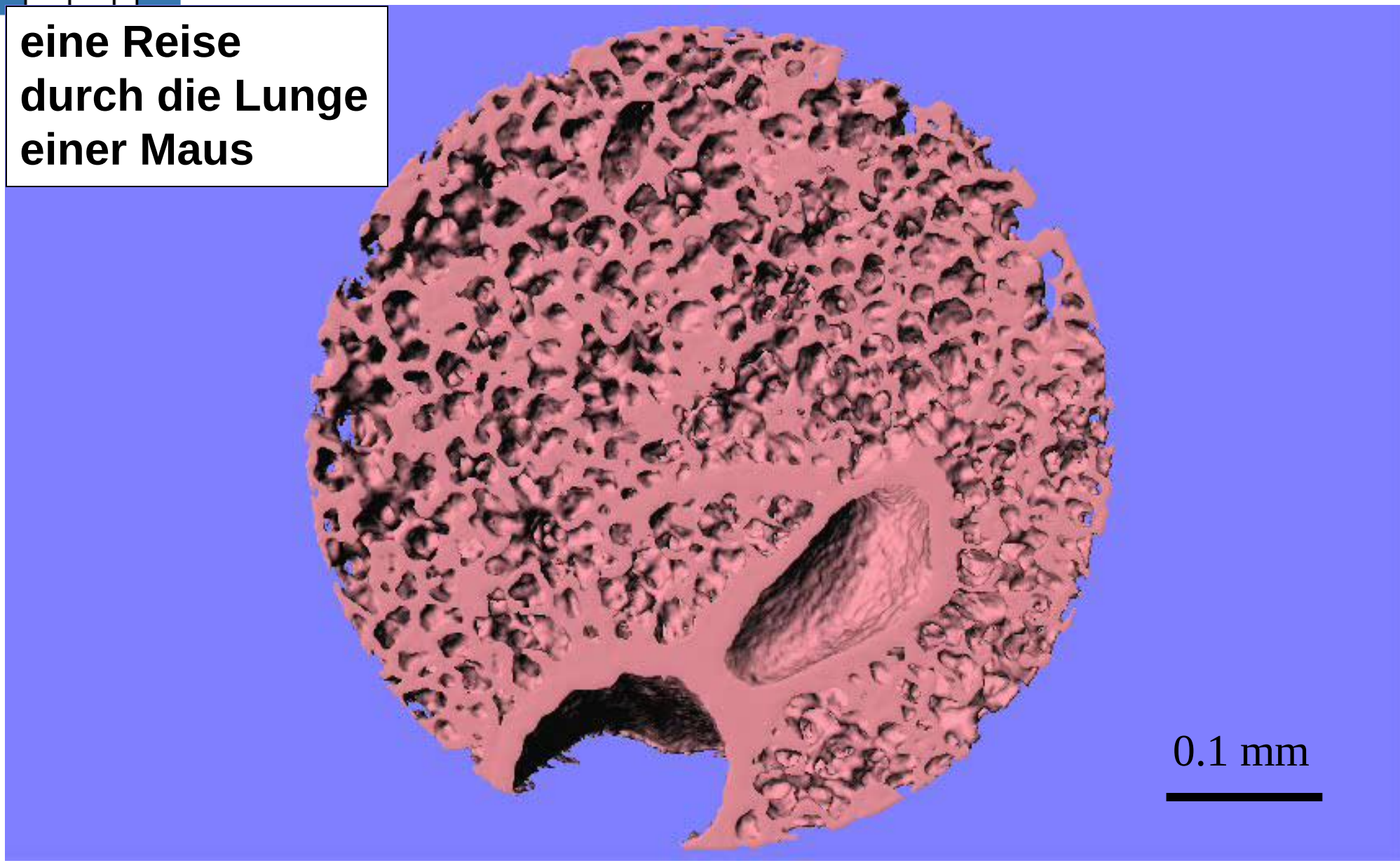
⇒ Protein Ablagerungen

⇒ Alzheimer

W.Joho 2013

PAUL SCHERRER INSTITUT

eine Reise durch die Lunge einer Maus



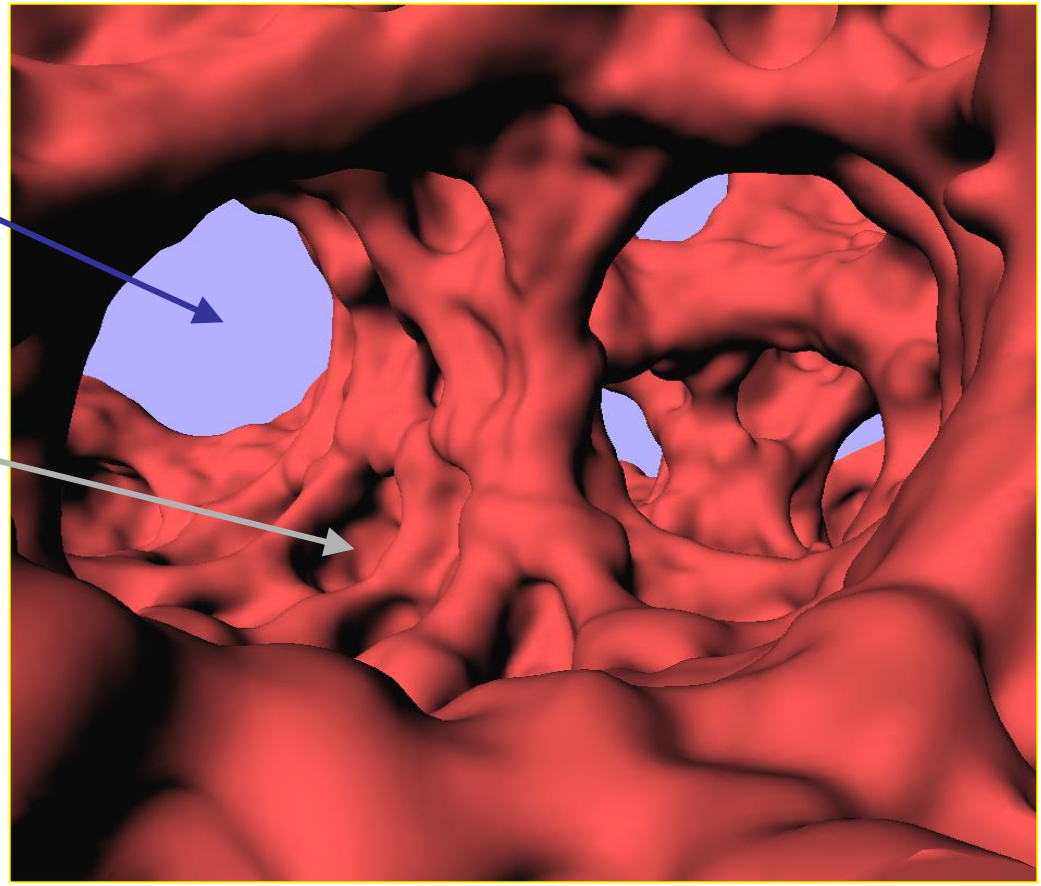
PAUL SCHERRER INSTITUT

Röntgentomographie

Luftaustausch in einer Rattenlunge

60 μm Seitenkanal

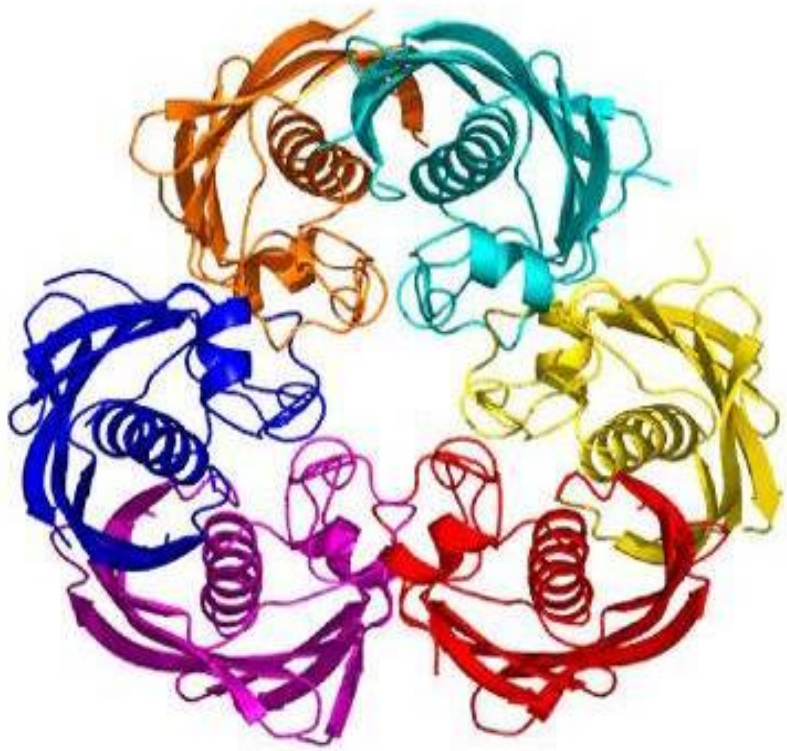
25 μm Nischen:
Alveoli der Lunge

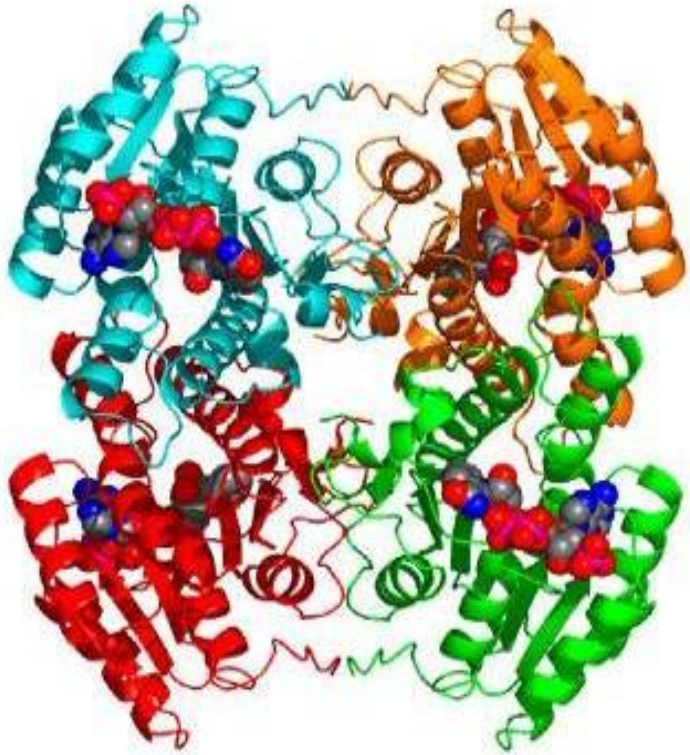


Prof. Schnittny (Univ. Bern) et al
Tomogramm von der SLS Strahllinie XO4SA-MS, M. Stampanoni et al.

PAUL SCHERRER INSTITUT

Protein Kristallographie



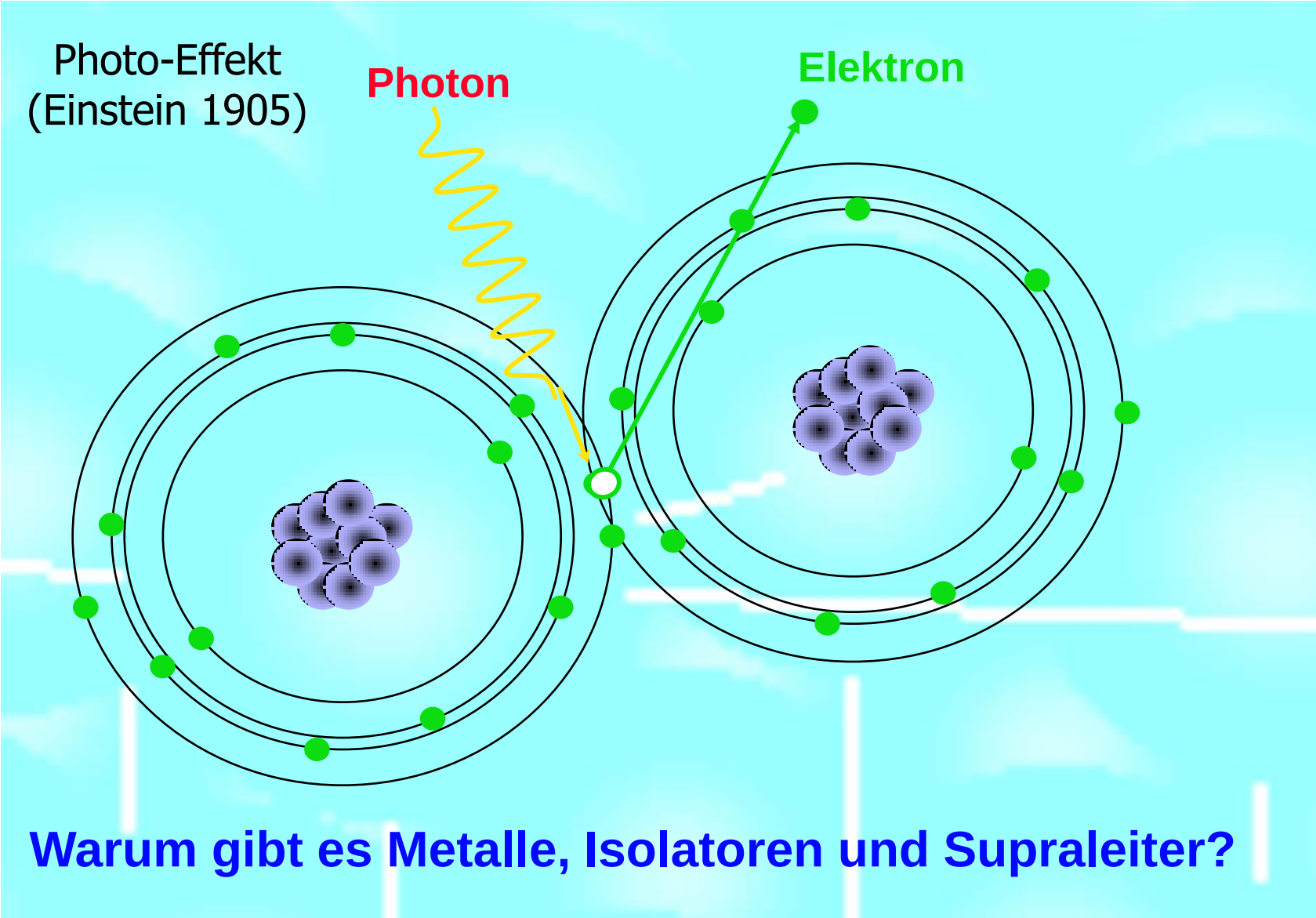


Strukturen zweier wichtiger Enzyme des Malaria-Erregers

Züchtung von Bio-molekülen zu Kristallen (Grösse 5-50 μm)

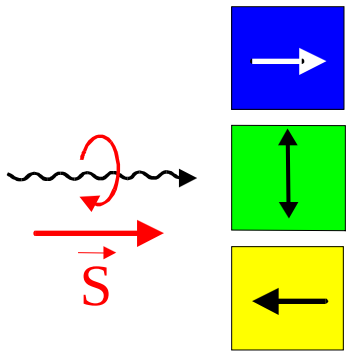
=> Rekonstruktion mit Röntgenstrahlen

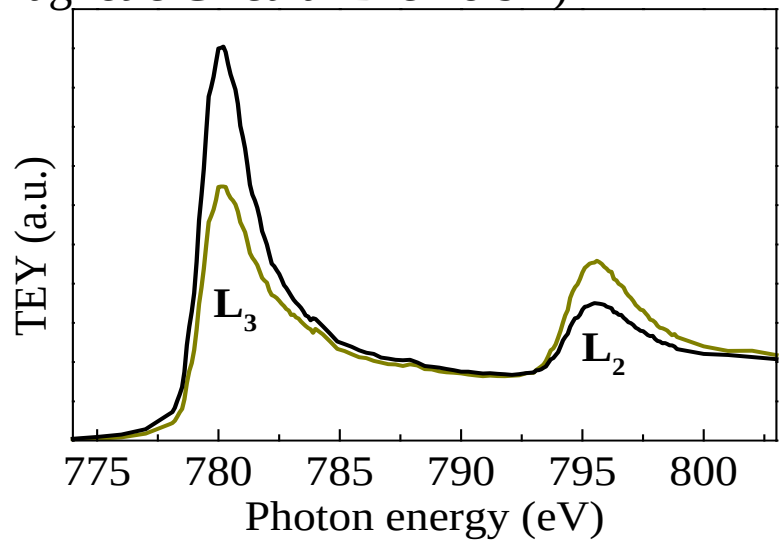
chemische Bindung



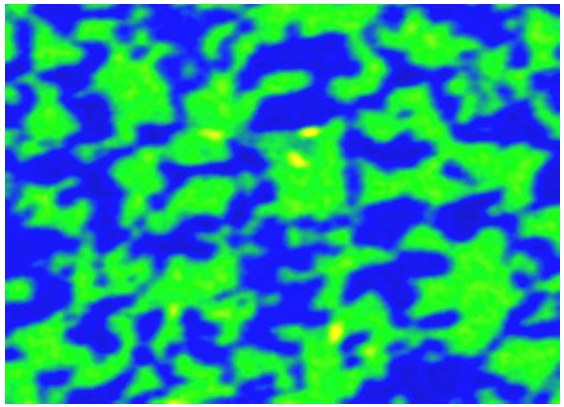
magnetic Microscopy

XMCD (X-ray Magnetic Circular Dichroism)

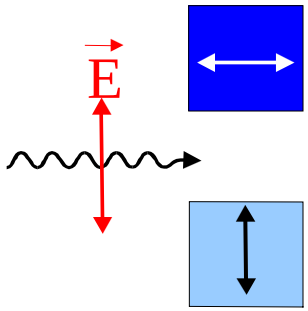


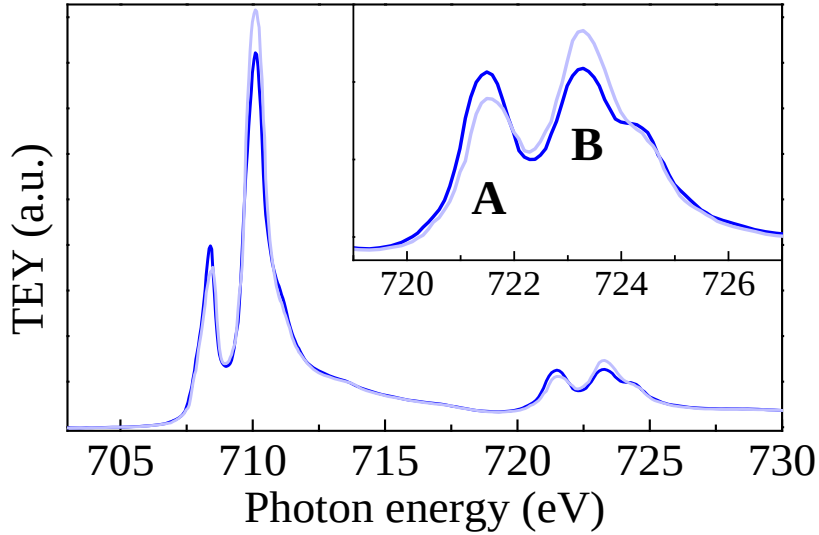


Co

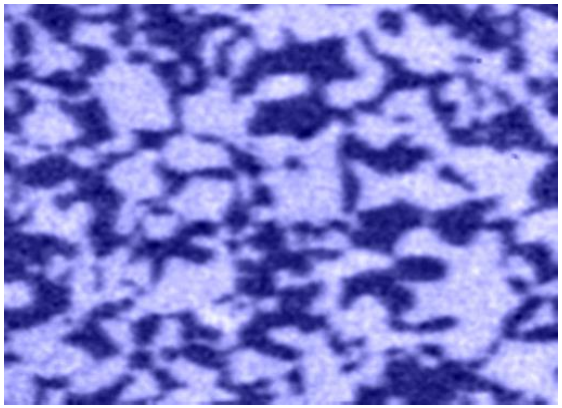


XMLD (X-ray Magnetic Linear Dichroism)





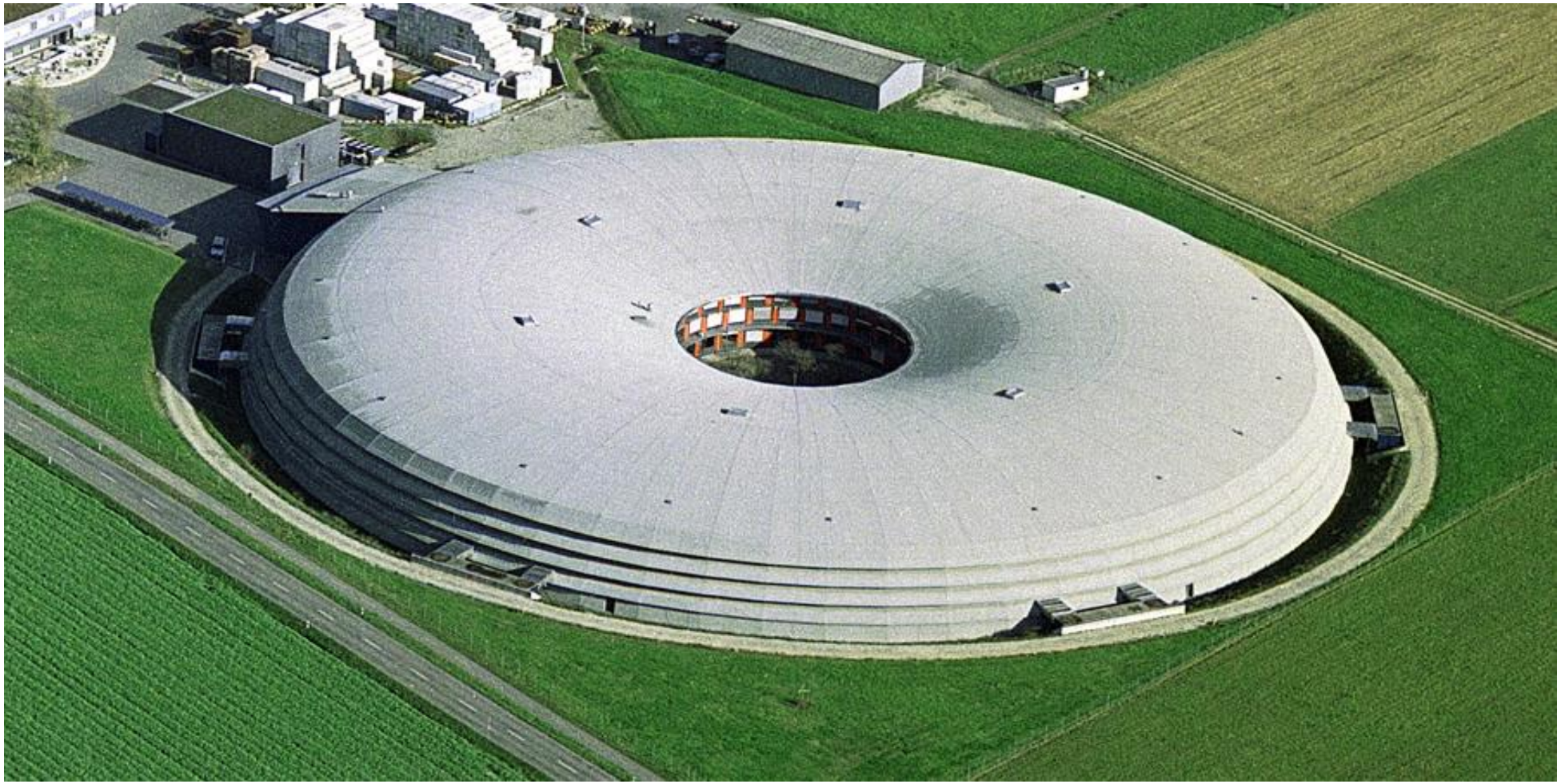
$LaFeO_3$



Frithjof Nolting
PSI/Berkeley

PAUL SCHERRER INSTITUT

SLS Photo



PAUL SCHERRER INSTITUT

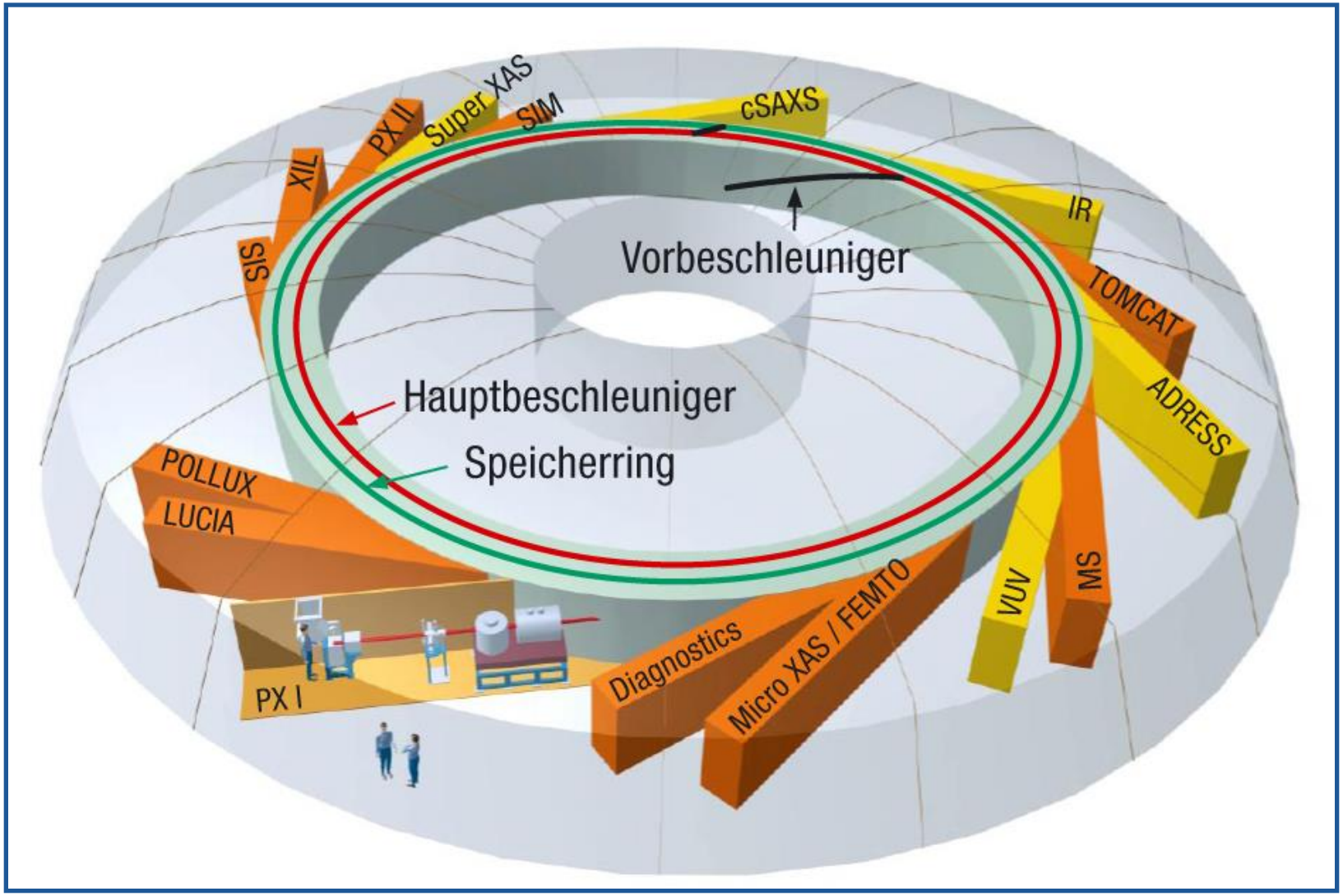
SLS Gebäude

architektonisch ein Kunstwerk !

Architektenteam aus Bern
(Marchand, Jöhri, Gartenmann)

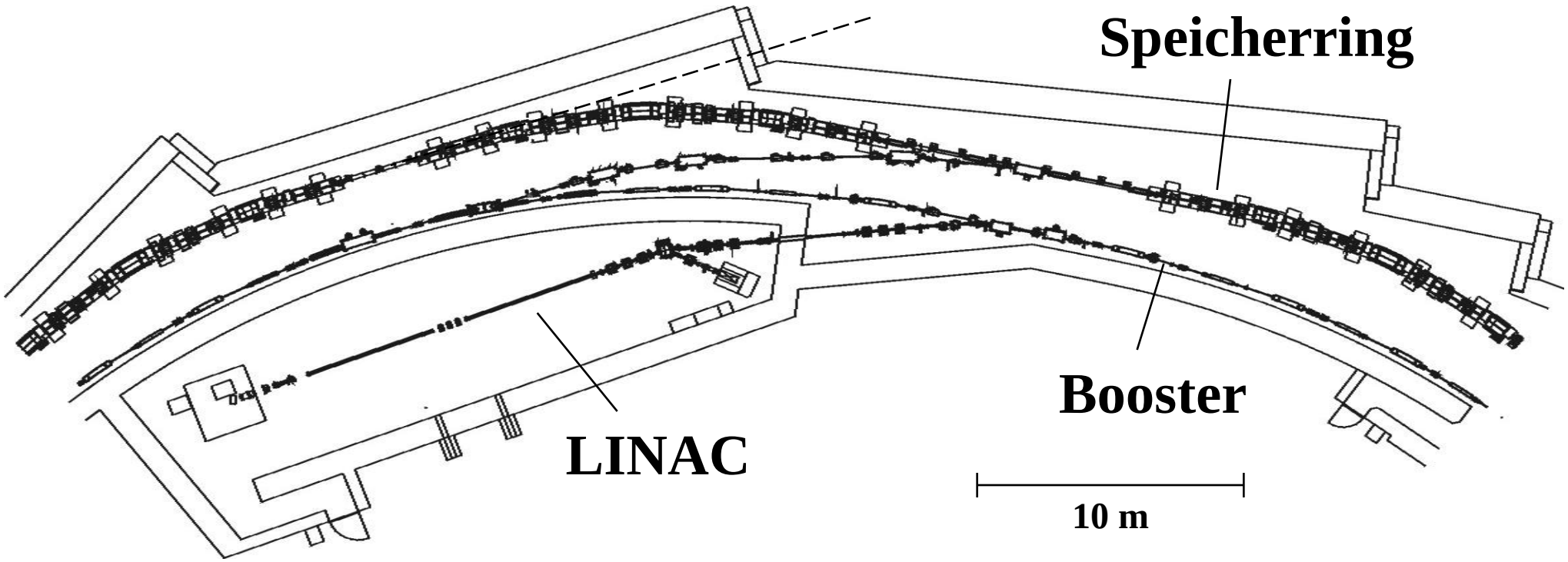
PAUL SCHERRER INSTITUT

SLS Anlagen



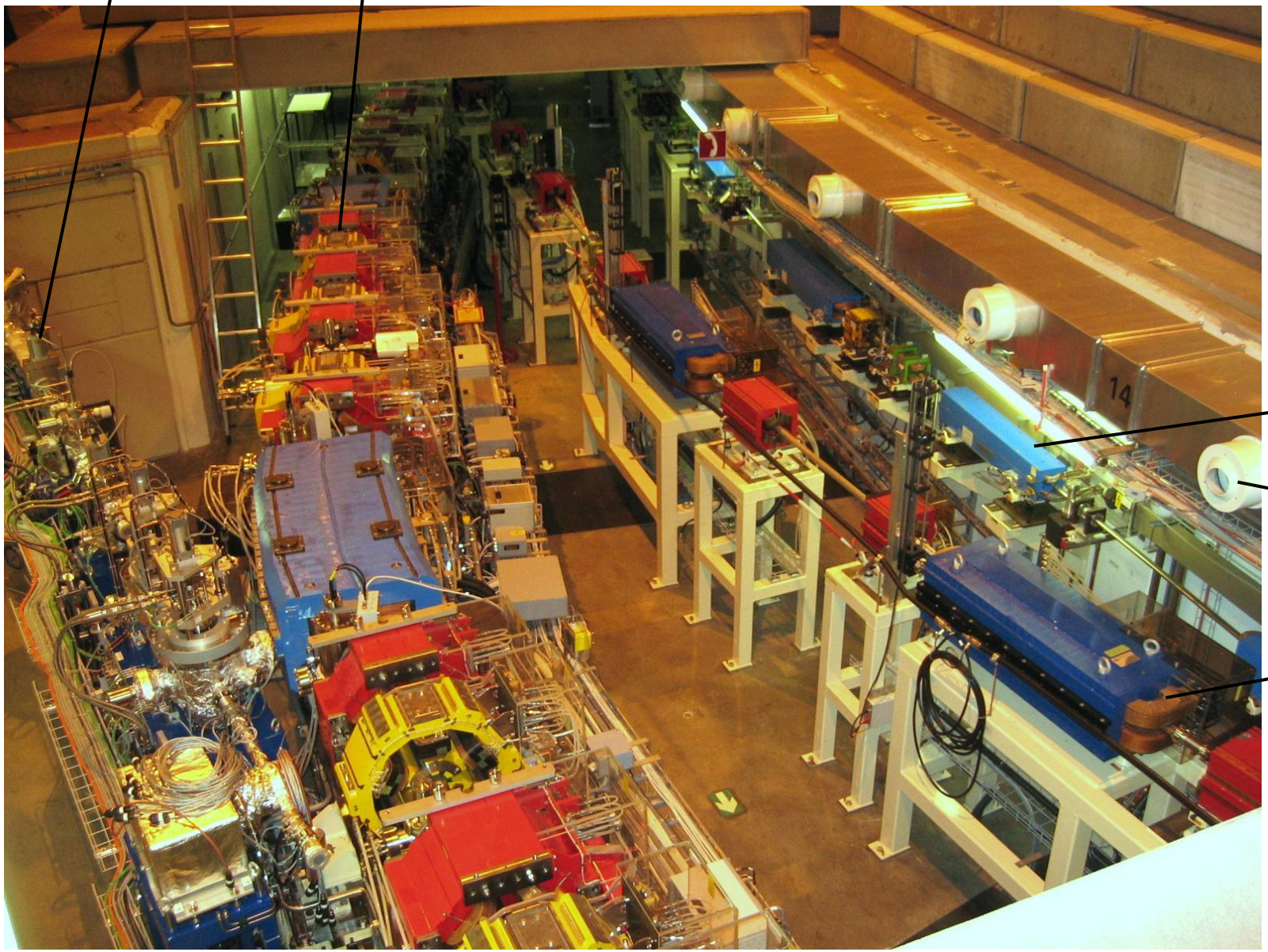
PAUL SCHERRER INSTITUT

Injektions Region



PAUL SCHERRER INSTITUT

SLS Tunnel



W.Joho 2013

PAUL SCHERRER INSTITUT

Strahlungsbilanz

natürlicher Untergrund

- Villigen : $\approx$ 0.8 mSv/Jahr

  (Davos , Locarno : $\approx$ 1.5 mSv/Jahr)
- Körper intern (K^{40} etc.) $\approx$ 0.2 mSv/Jahr
- medizin. Anwendungen: $\approx$ 1 mSv/Jahr
- 8 Stunden Flug: $\approx$ 0.2 mSv

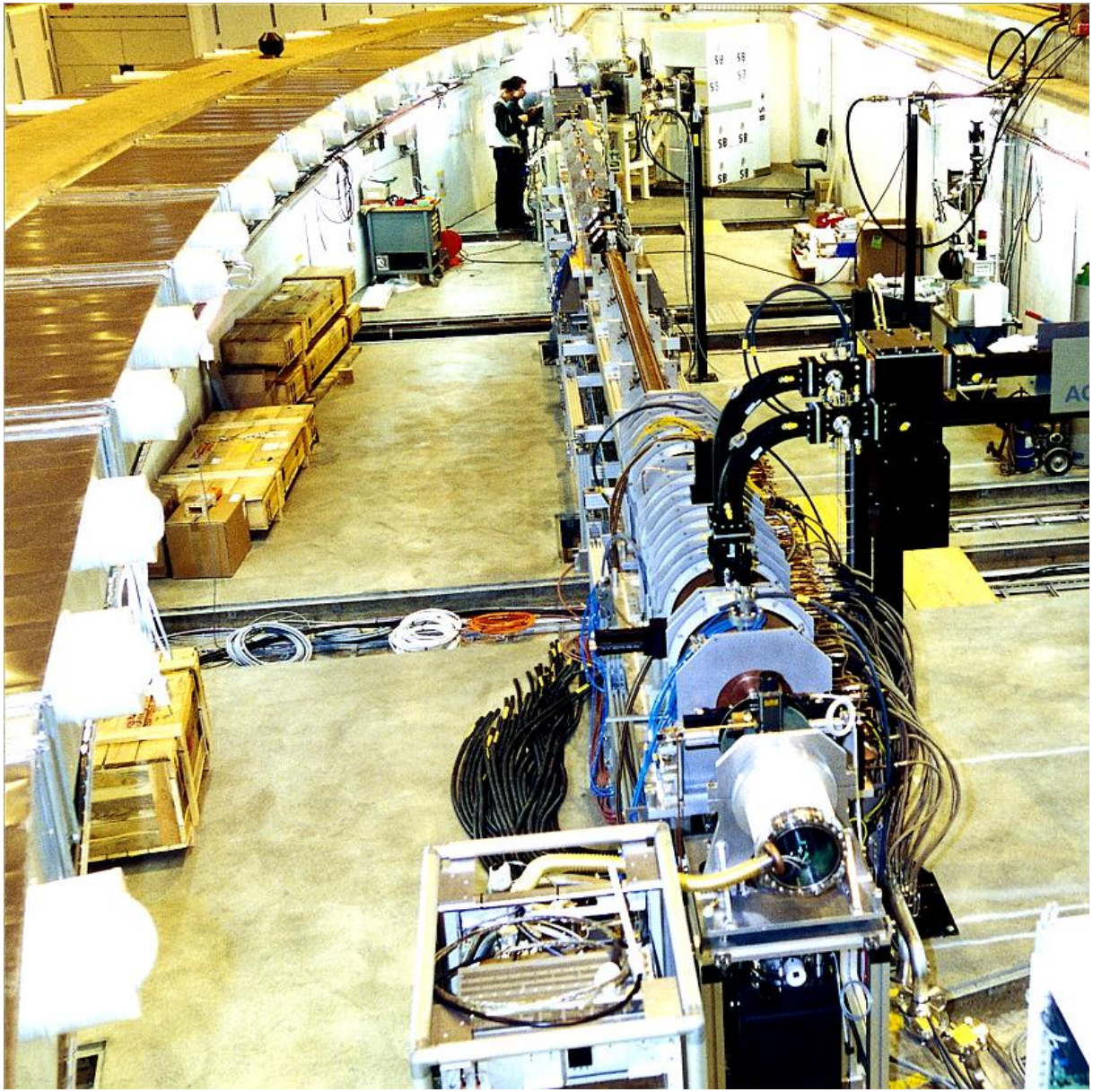
Toleranz für die SLS

- ausserhalb PSI : $<$ 0.05 mSv/Jahr
- im SLS Gebäude: $<$ 1 mSv/Jahr

Abschirmung der Beschleuniger

- Tunnelwände : 1.0 - 1.3 m
- Tunneldach : 2 Betonbalken à je 0.4 m

PAUL SCHERRER INSTITUT



Linac

Elektronenquelle 90 keV

Linac 100 MeV

2 Sektionen à 5m

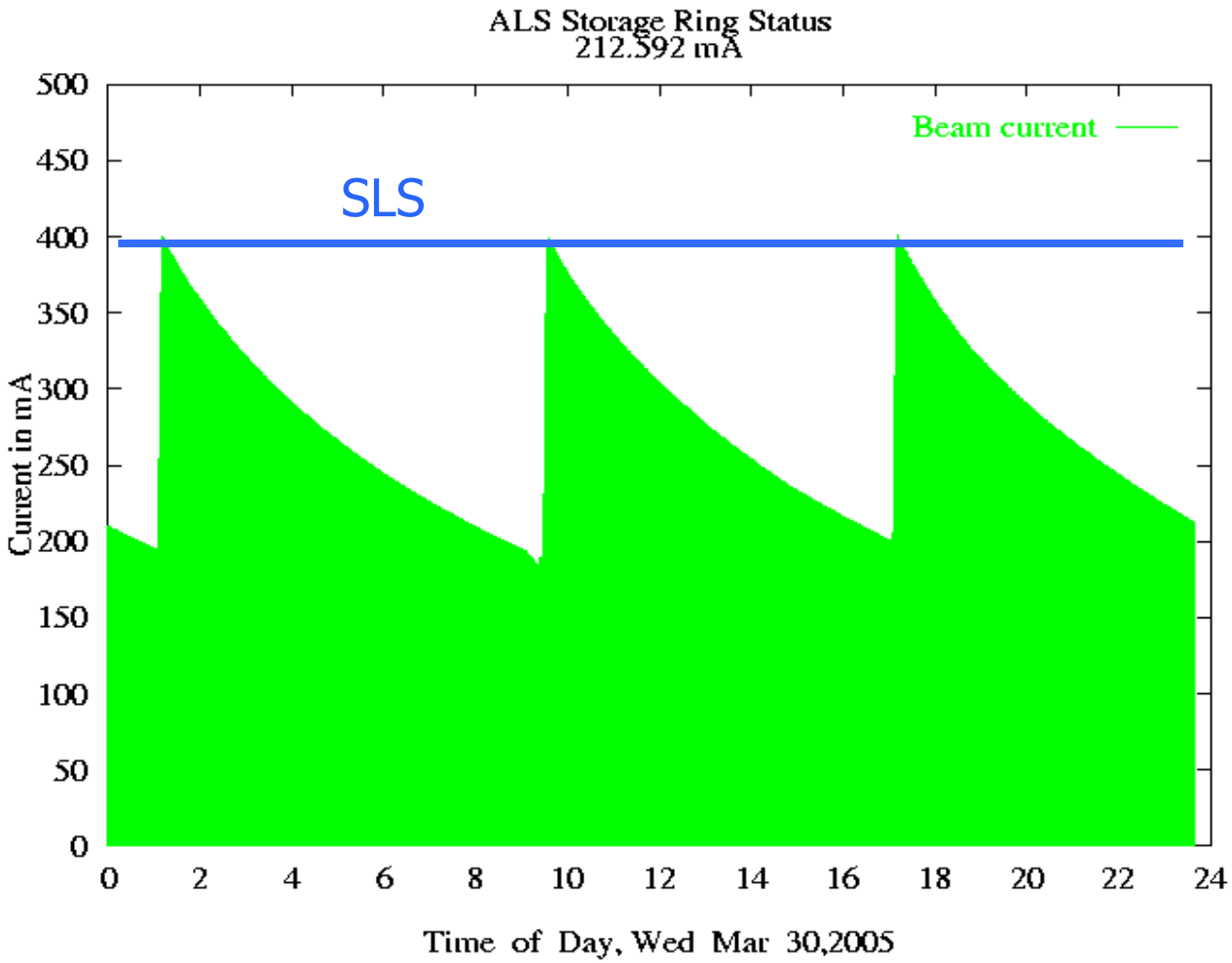
PAUL SCHERRER INSTITUT

Beschleuniger Komponenten

- 600 Magnete
- 300 Vakuumpumpen
- 150 Strahlmonitore
- 5 Hochfrequenz Kavitäten
- 600 m Vakuumrohre
- 50 km Leistungskabel
- 500 km Signalkabel
- 3 MW Leistungsbedarf

PAUL SCHERRER INSTITUT

Lebensdauer vs. Top-up Injektion



ALS (Berkeley , Kalifornien):

Lebensdauer ~ 10 h ,

Auffüllen alle 8 h

Strahlstrom: 400 => 200 mA

SLS (2011):

Lebensdauer ~7 h ,

nicht relevant !

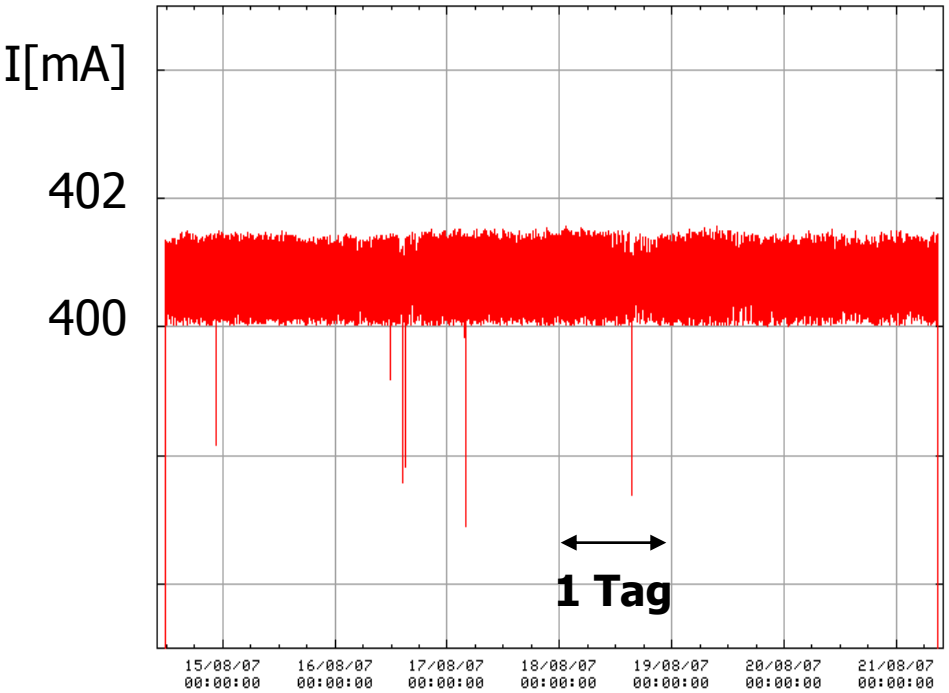
top-up alle 2½ min.

Strahlstrom: 402 => 400 mA

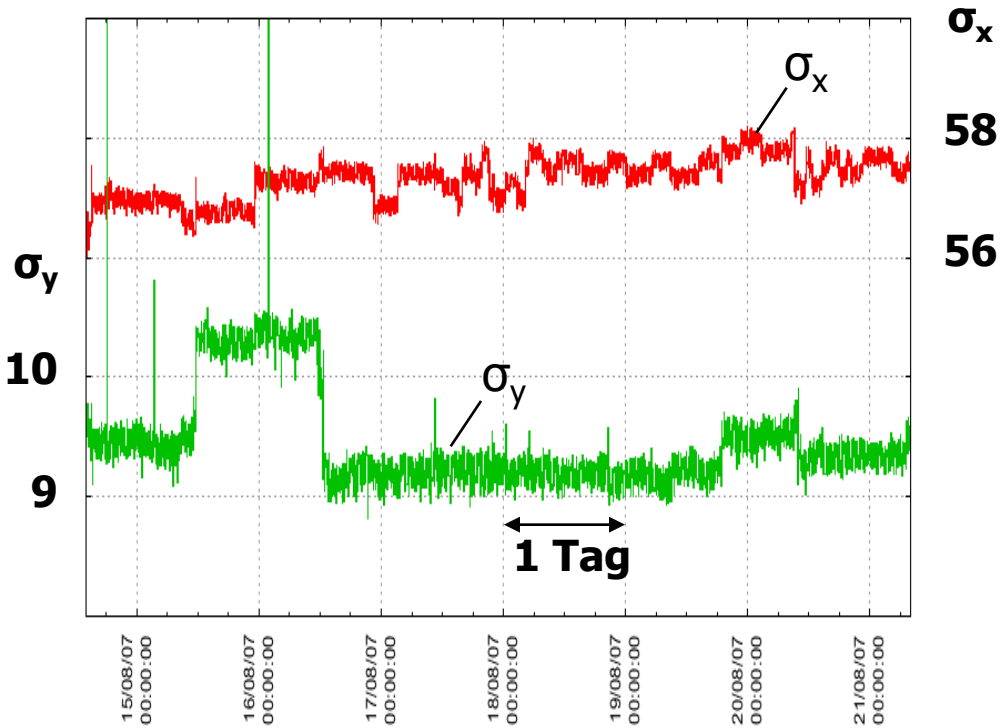
stabile Strahlen mit top-up

7 Tage im August 2007

Strahlstrom mit top-up, alle 2.5 min.
400-401.5 mA



Strahlgrössen σ_x σ_y [µm]

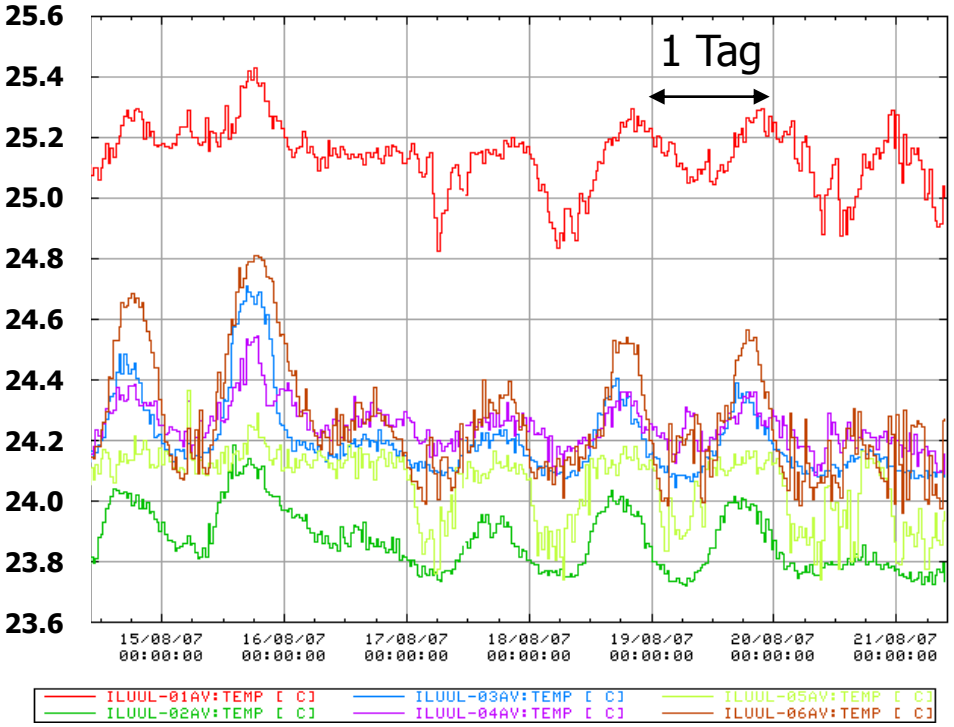


PAUL SCHERRER INSTITUT

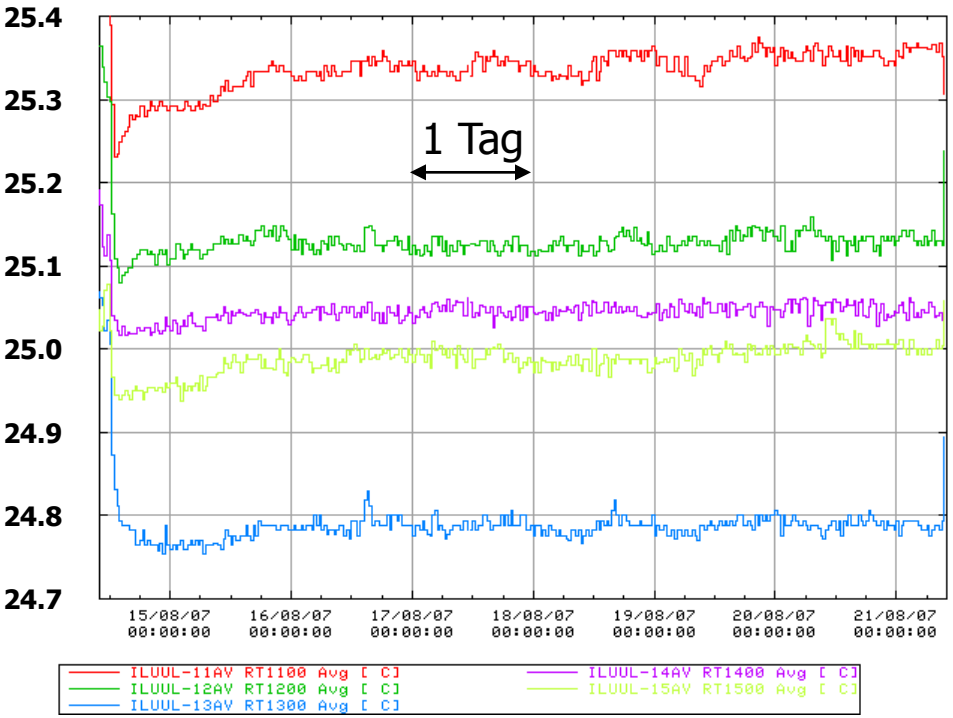
Stabilität der Temperatur

7 Tage im August 2007

Hallen Temperatur [^{0}C] von 6 Sektoren



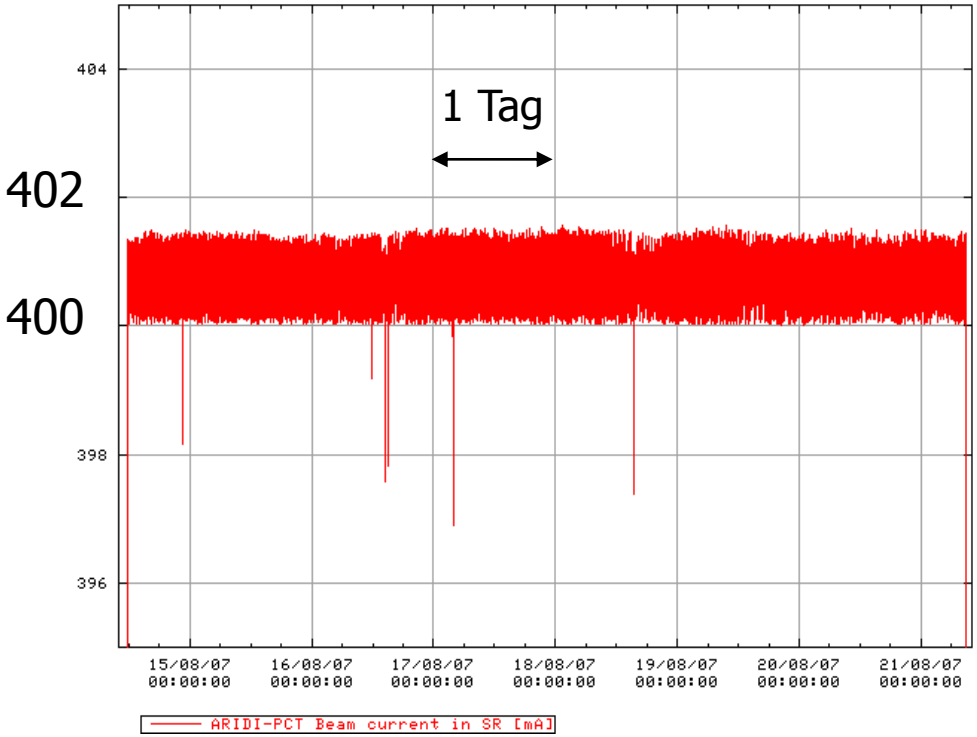
Tunnel Temperatur [^{0}C] von 5 Sektoren



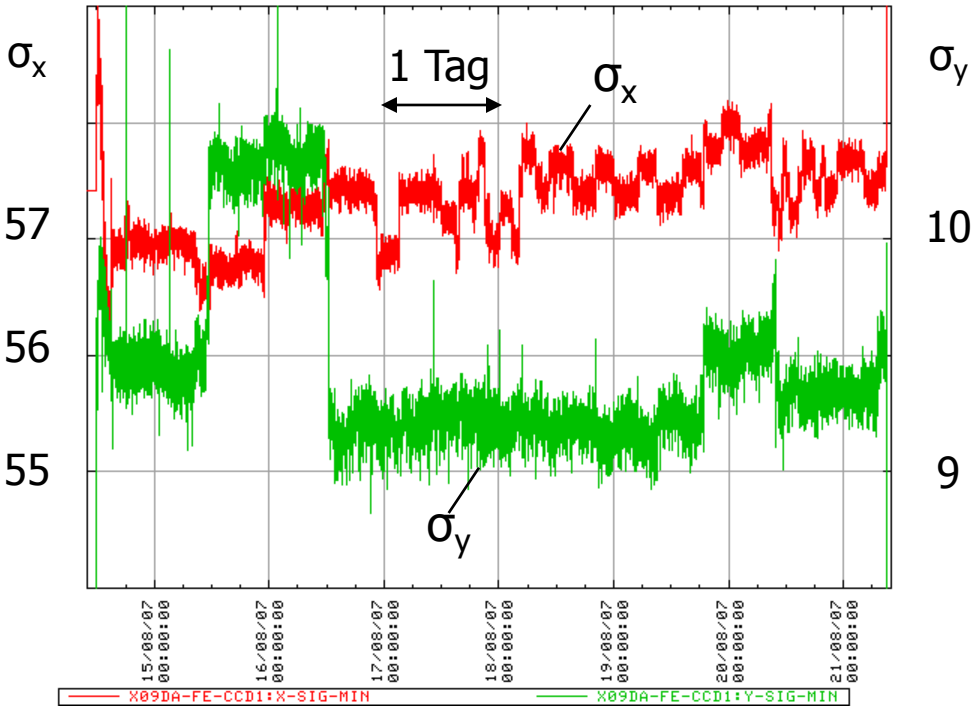
Stability of Beam (top-up)

7 Tage im August 2007

Strahlstrom, top-up 400-401.5 mA

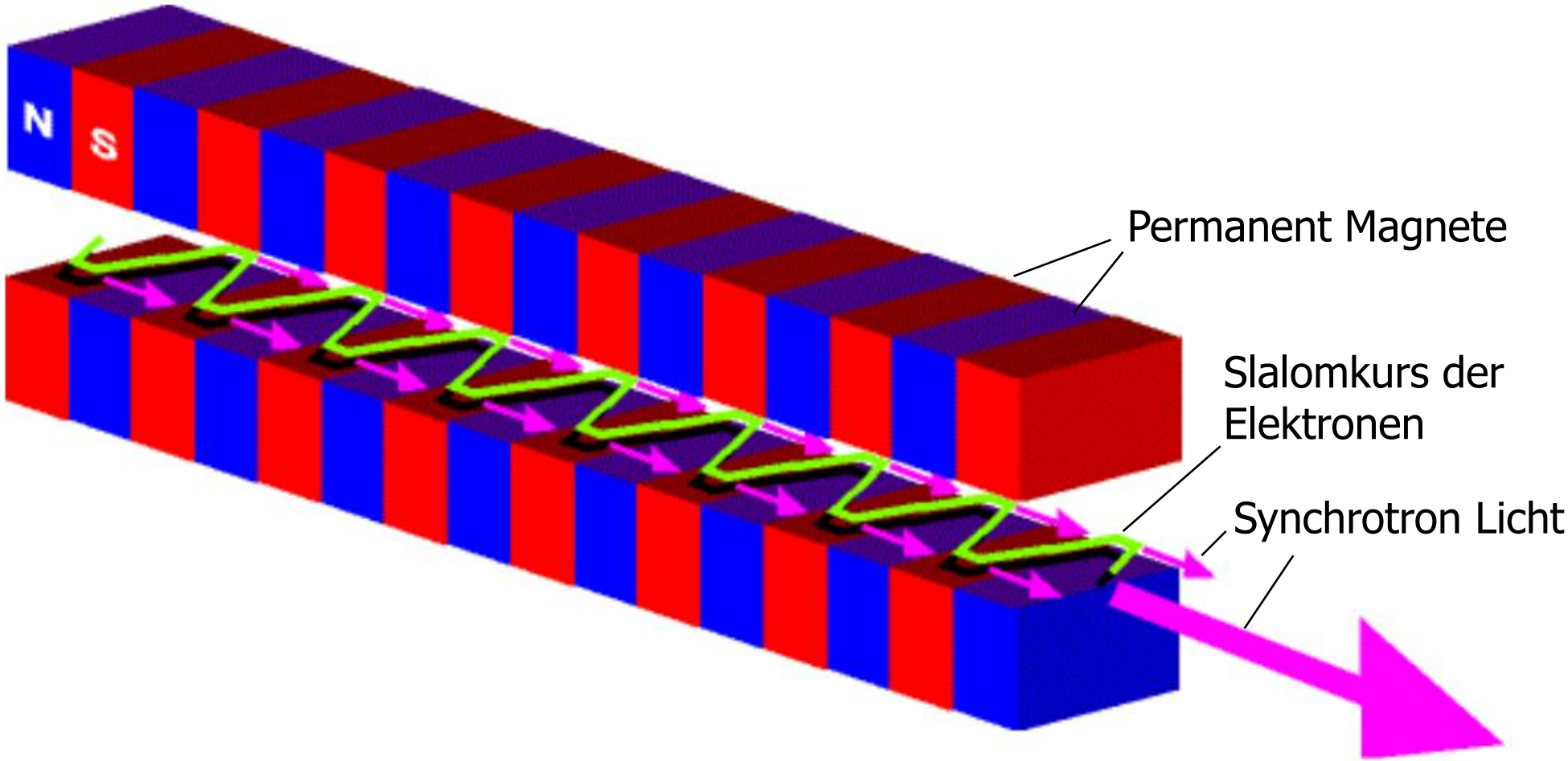


Strahlgrösse σ_x σ_y [µm]



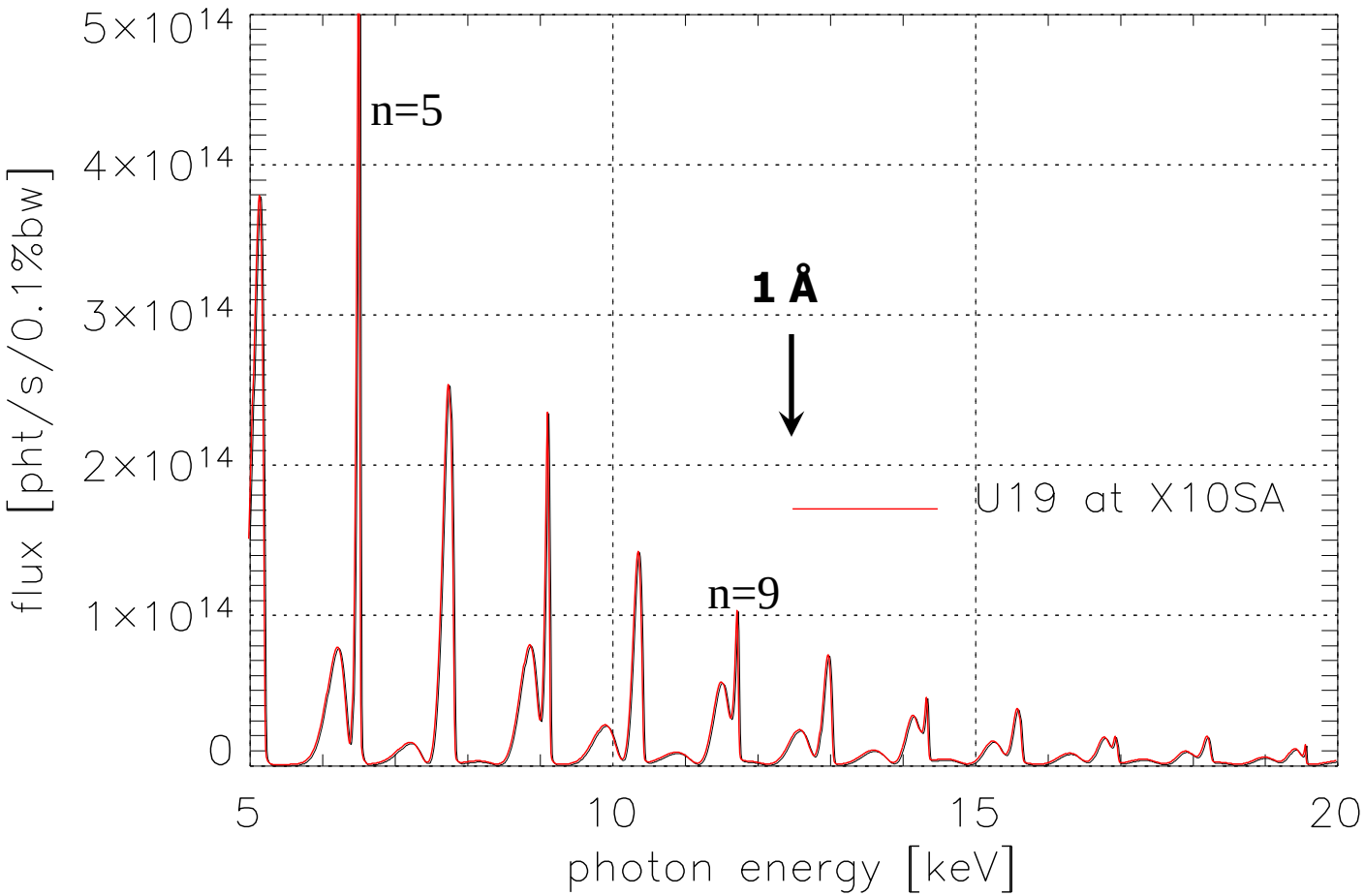
PAUL SCHERRER INSTITUT

Slalomkurs in Undulator



PAUL SCHERRER INSTITUT

Spektrum des Undulators U19



in-Vacuum Undulator

Protein Krystallographie

(Clemens Schulze)

PAUL SCHERRER INSTITUT

schnelle Elektronen in Magnetfeld erzeugen Synchrotronlicht

Lichtquelle bewegt sich

⇓

Dopplereffekt

Verschiebung zu höheren Frequenzen

=> kleine Wellenlängen λ

enger Ausbreitungskegel

=> scharfe Bündelung (Laser-artig)

Slalomkurs in Undulator

⇓

positive Interferenz

Periodenlänge λ_u gibt scharfe Spektrallinien bei harmonischen n

=> hohe Brillanz

$$\lambda \sim \lambda_u (c - v_e) \sim n\, \lambda_u / E_e^2$$

=> kleine Wellenlänge λ braucht hohe Elektronen-Energie E_e

=> grosser Speicherring

PAUL SCHERRER INSTITUT

Undulator UE56

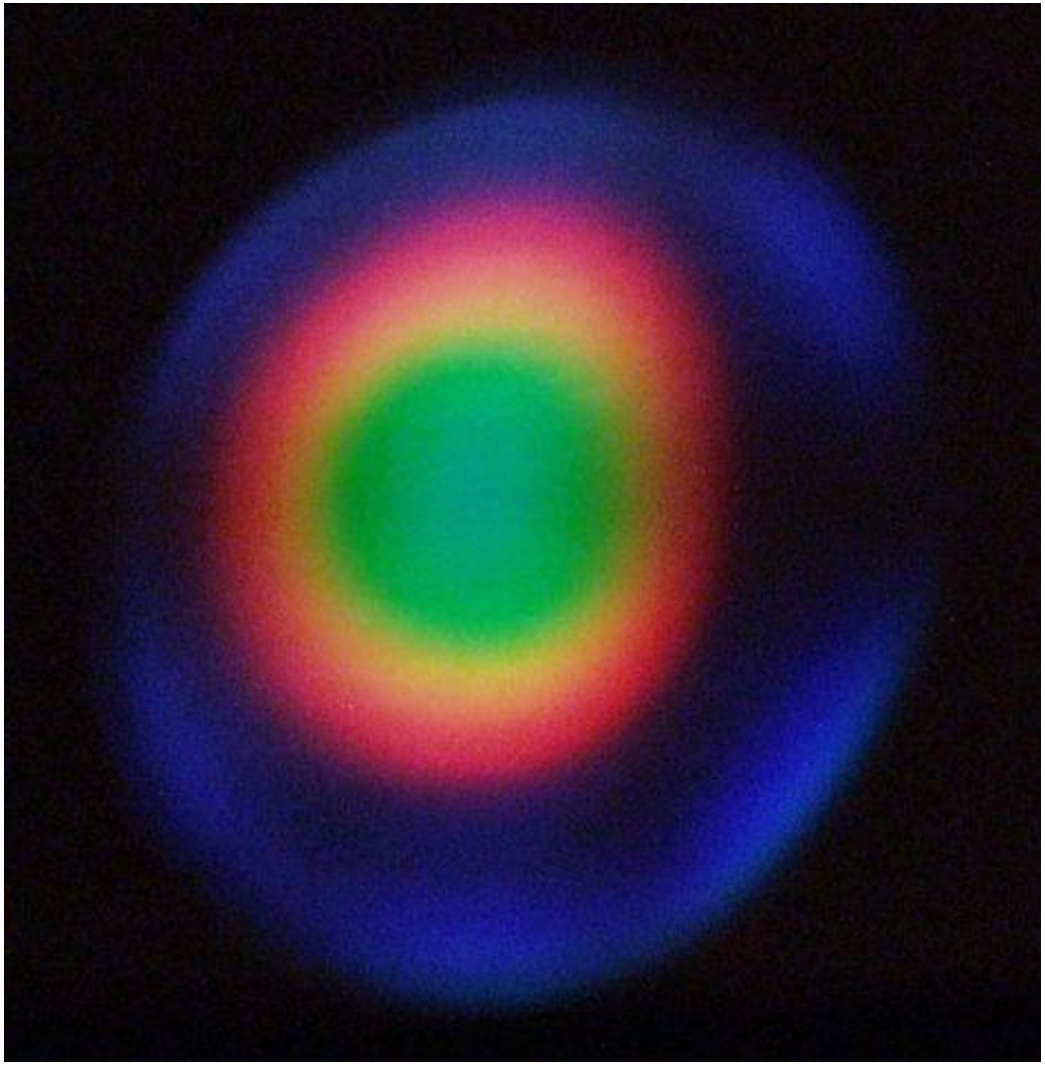
Permanent Magnete

62 Perioden à 56mm

helikale Felder geben zirkulare und lineare Polarisation

PAUL SCHERRER INSTITUT

Lichtkegel



Lichtkegel von Wiggler W138

1. harmonische, K=18 (B=1.4 T)

PAUL SCHERRER INSTITUT

Temperatur-Stabilität

=> sehr wichtig für stabile Strahlen !

Tunnel

$25^0 \pm 0.03^0$

- Luftumwälzung: 5 Einheiten à 6'000m^3/h
- 150 Düsen für stabile Luftdurchmischung
- 40kW Kühlleistung, 90kW Heizleistung

Halle

$25^0 \pm 0.2^0$ (Sommer und Winter)

- Luftumwälzung: 6 Einheiten à 50'000m^3/h
- 800kW Kühlleistung
- Quell-lüftung auf 55% des Gebäude-umfangs

PAUL SCHERRER INSTITUT

SLS Benutzer

Institute

- ETH Zürich, ETH Lausanne
- Universitäten
  (CH und Ausland)
- PSI
- Forschungslabors
  (IBM Rüschlikon, Max Planck
  Institut München)

Industrie

- Novartis
- Hoffmann-LaRoche

PAUL SCHERRER INSTITUT

Meilensteine

Erste Ideen	1991
„Giessbach-Meeting“ (Benutzer unterstützen SLS)	Okt. 1994
ETH-Rat bewilligt SLS	Sept. 1995
Parlament bewilligt SLS	18.Juni 1997
Start Gebäude	2.Juni 1998
Gebäude fertig:	1.Juli 1999
Strahl im Linac:	23.März 2000
Strahl im Booster:	8.Aug. 2000
Strahl im Speicherring	13.Dec. 2000
400 mA Stromziel erreicht	5.Juni 2001
=> Beginn Experimente:	2.Aug. 2001

PAUL SCHERRER INSTITUT

SwissFel Projekt

Kombination der Vorteile von

Laser

- extrem kurze Pulse
- extrem hohe Intensität
- einfarbiges Licht
- Kohärenz

Röntgenstrahl

- sehr kurze Wellenlänge
  => Auflösung kleinster Strukturen
- Durchleuchten von Materie
- Abstimmung der Wellenlänge auf spezifische chemische Elemente

PAUL SCHERRER INSTITUT

Free Elektron Laser

extrem gute Strahlqualität der Elektronenquelle

⇒ starke Bündelung der Elektronen im Undulator

⇒ extrem kurze, sehr intensive Röntgenblitze

⇒ „Moleküle können beim Tanzen gefilmt werden"

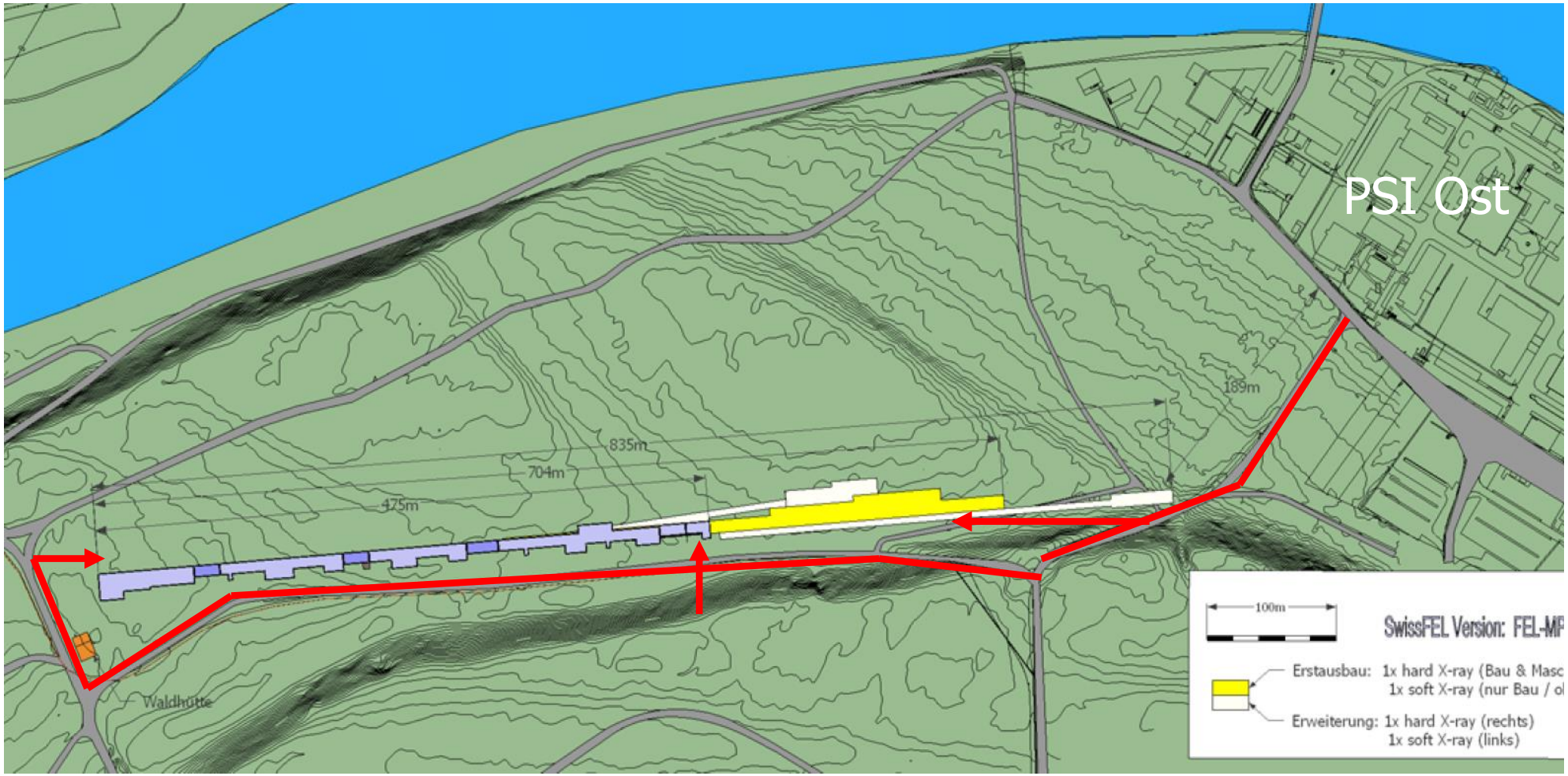
=> neue Forschungsgebiete in

Physik, Chemie, Biologie, Materialforschung

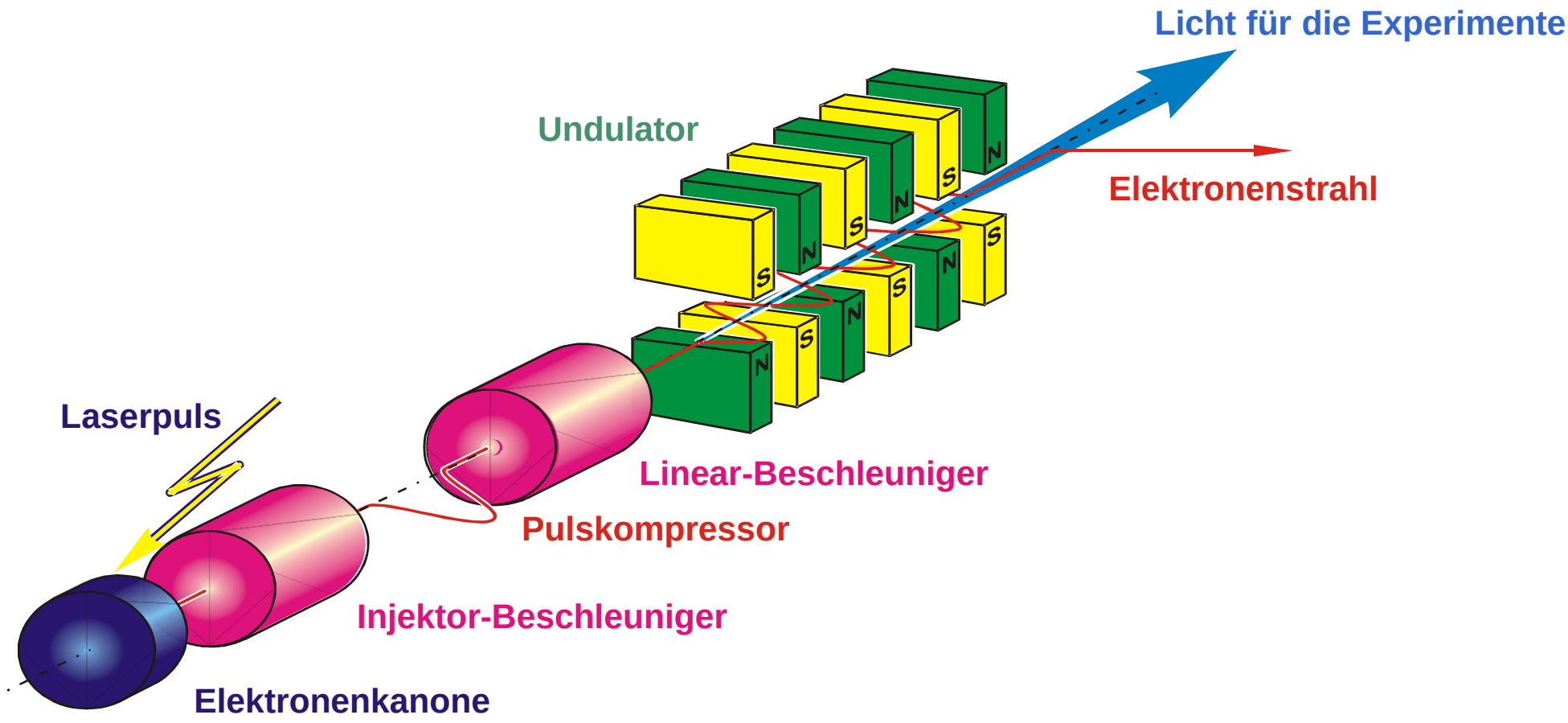
=> PSI bleibt international an der Spitze

PAUL SCHERRER INSTITUT

SwissFEL Würenlingen



Der Aufbau (Prinzipskizze)



PAUL SCHERRER INSTITUT

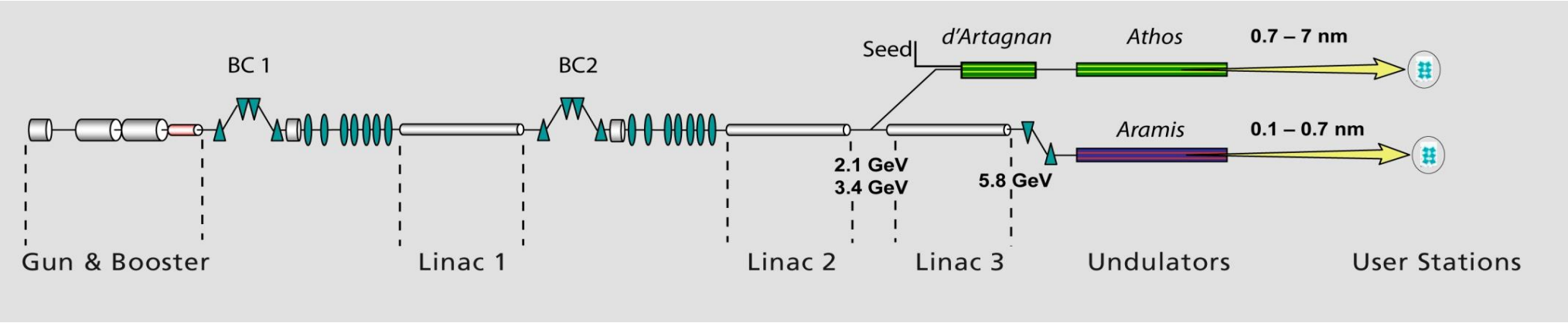
Layout

Elektronen Injektor

Linear-Beschleuniger

Freie Elektronen Laser

Experimente



700 m

PAUL SCHERRER INSTITUT

Einweihung SwissFEL (erste Stufe) 24.8.2010

Bundesrat Didier Burkhalter

Regierungsrat Alex Hürzeler

Johann Schneider-Amman

(„ bald Bundesrat“)

Prof. Ursula Keller ETH

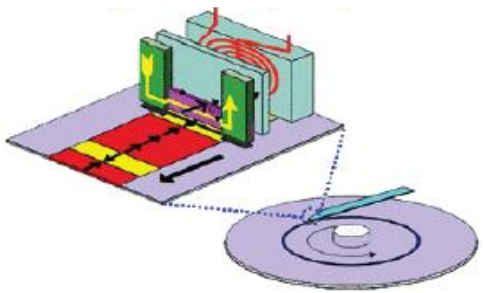
Prof. Jörg Rossbach Hamburg

Direktor Joel Mesot

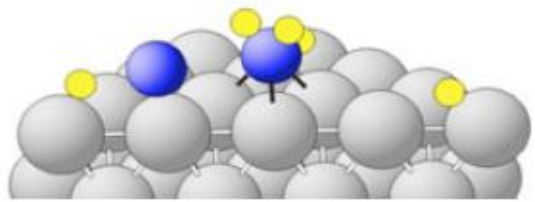
PAUL SCHERRER INSTITUT

SwissFel Science

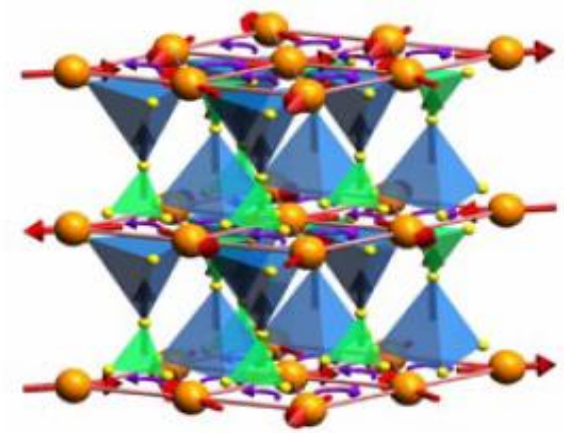
Magnetism:
materials and processes for tomorrow‘s information technology



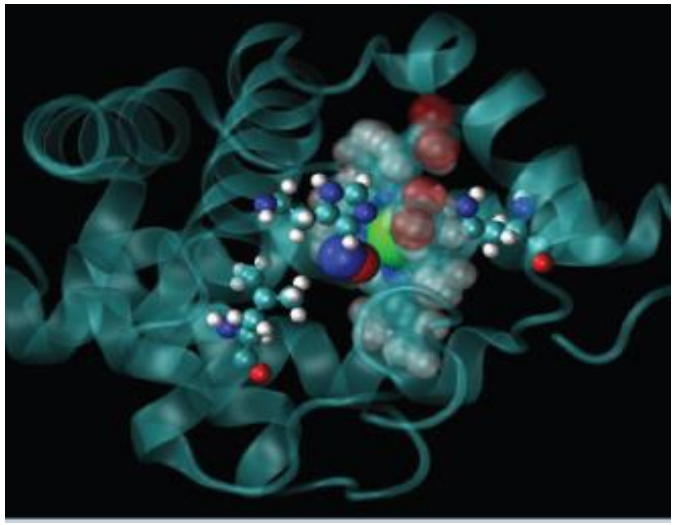
Catalysis and solution chemistry:
for a clean environment and a sustainable energy supply



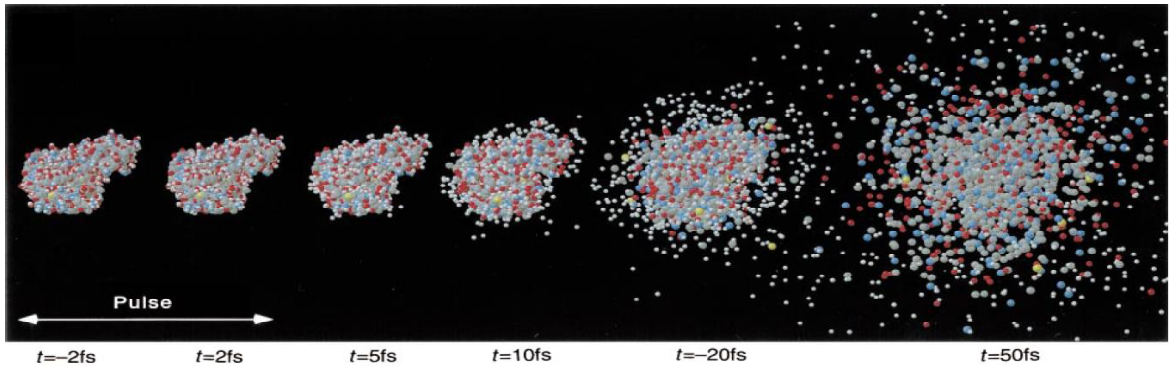
Correlated electrons:
the fascination of new materials



Biochemistry:
shedding light on the processes of life



Coherent diffraction:
flash photography of matter



W.Joho 2013

PAUL SCHERRER INSTITUT

„Sonden“ für Materialforschung

- Neutronen
- Müonen
- Synchrotronlicht
- Röntgenblitze

=> diese Kombination von Top-anlagen

ist einzigartig auf der Welt !

PAUL SCHERRER INSTITUT

Forschung am PSI

- Protonentherapie gegen Krebs
- Röntgendiagnostik mit Phasenkontrast (=> Brustkrebs)
- Struktur von Proteinen mit Röntgenstrahlen

  => neue Medikamente
- Nanostrukturen
- magnetische Oberfächen

  (=> kompakte Datenspeicher ?)

PAUL SCHERRER INSTITUT

Forschung am PSI

- Elektro-Auto

  => Brennstoffzellen

  => effiziente Batterien (Lithium-Ionen)
- Holzvergasung
- Supraleitung
- Detektoren für Teilchenphysik

  (Hadronkollider am CERN)
- iLab für Schulklassen

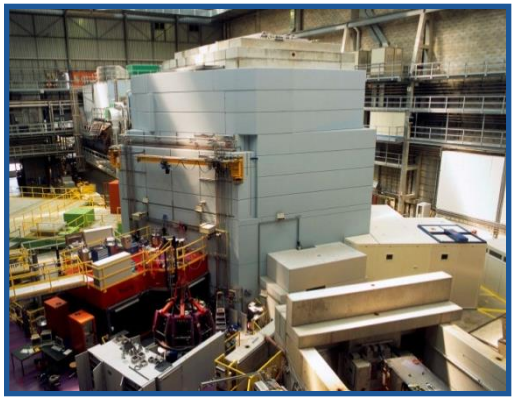
Varia

PAUL SCHERRER INSTITUT

Grossforschungsanlagen

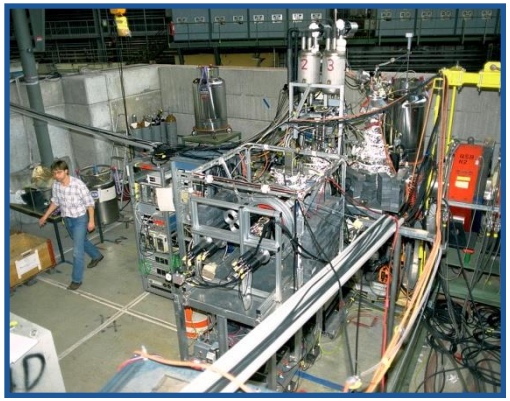
Protonen-beschleuniger

Spallations-Neutronenquelle (SINQ)



Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS)

Schweizer Myonenquelle (SµS)



PAUL SCHERRER INSTITUT

Exp.Halle SINQ

SLS

PAUL SCHERRER INSTITUT

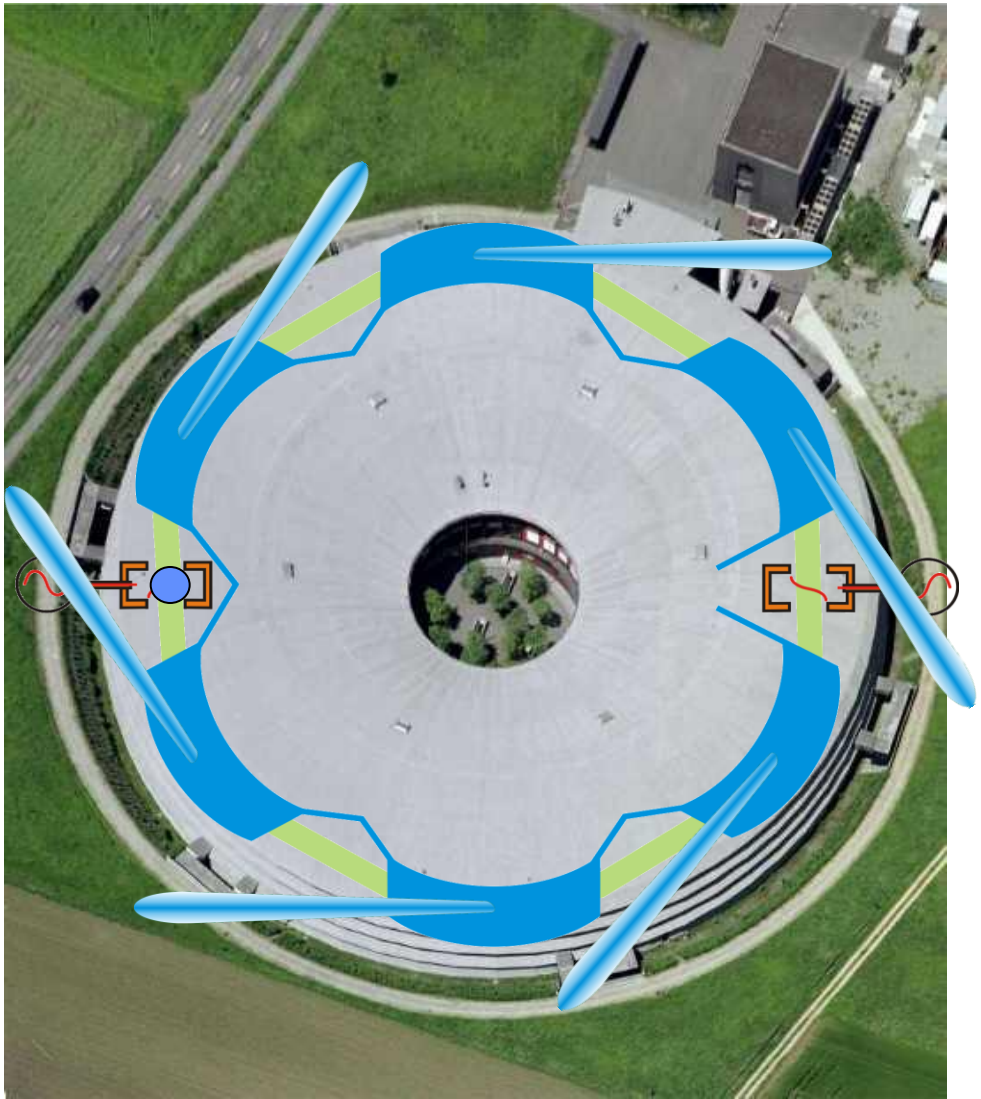
Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS)

schnelle Elektronen zirkulieren

stundenlang auf 300m Rennbahn

und senden Lichtblitze aus

(Röntgenstrahlen)



PAUL SCHERRER INSTITUT

Strahllinien

2007:

11 Strahllinien im Betrieb:

1D Infrarot Spektroskopie

2D Tomographie

3M Spektroskopie

4S Material Wissenschaften

5L Umwelt/Materialien

6S Protein Krystallographie I

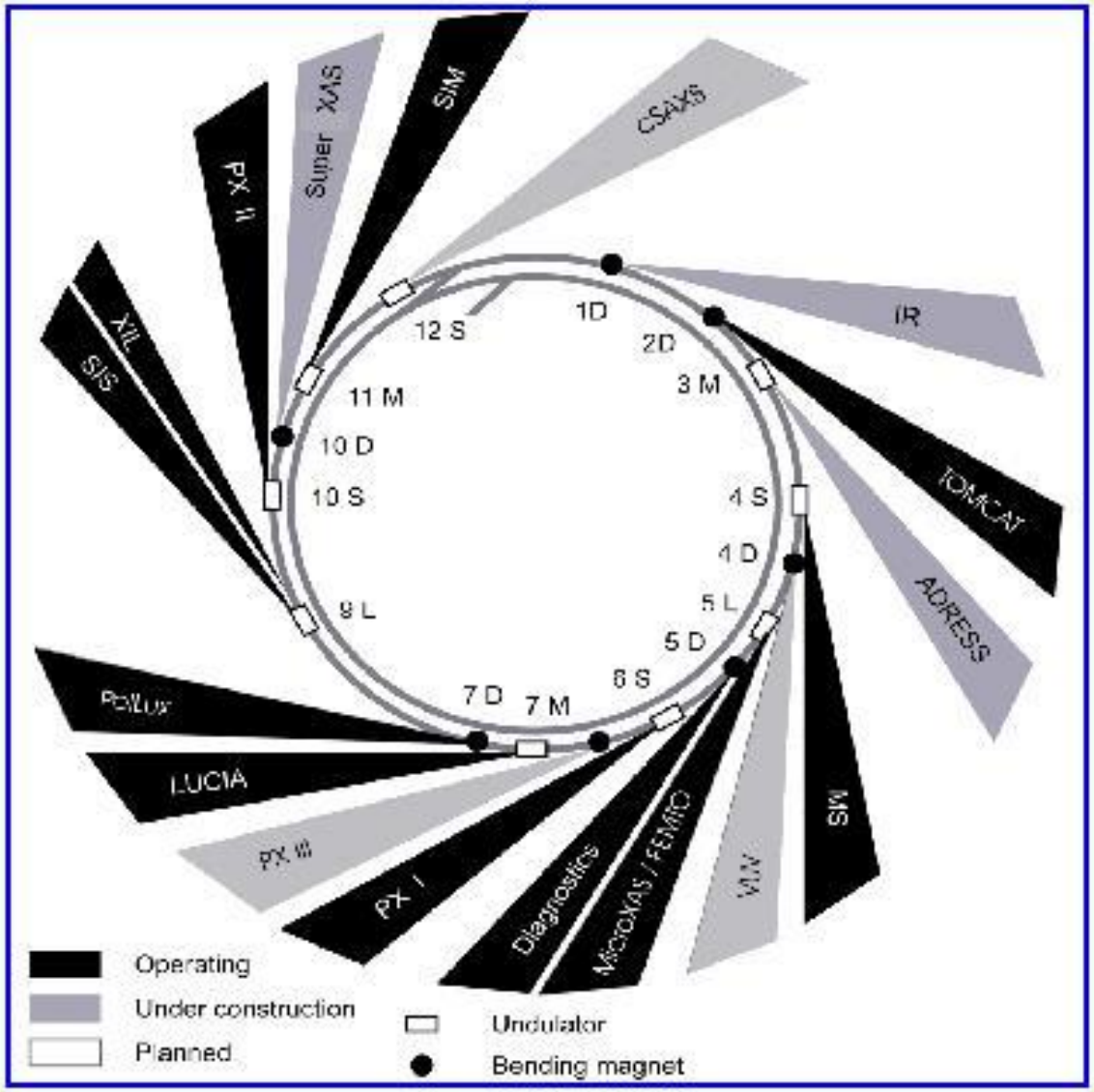
7M Umwelt/Materialien

7D Mikrospektroskopie

9L Oberflächen, Spektroskopie

10S Protein Krystallographie II

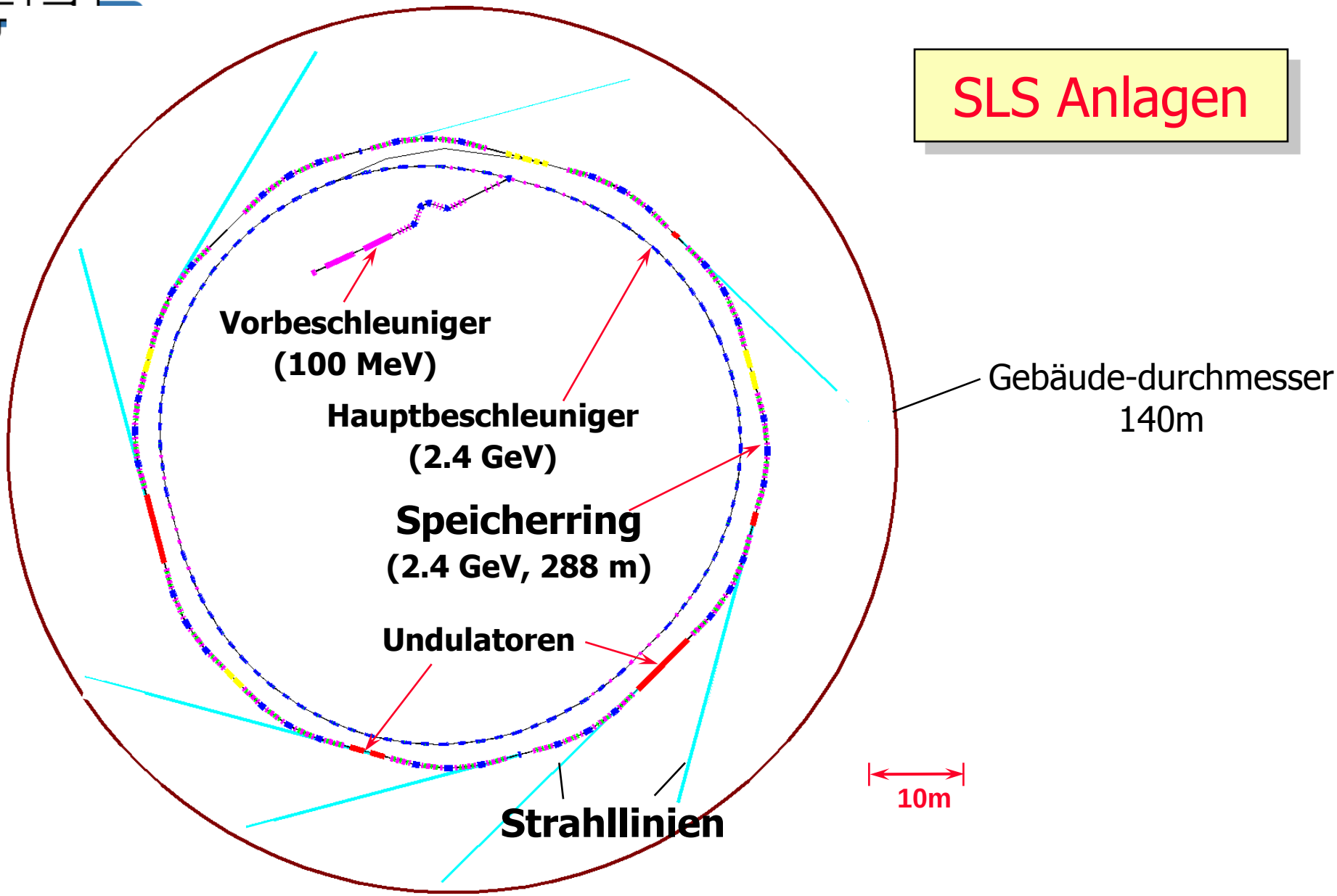
11M Oberflächen, Mikroskopie



W.Joho 2013

PAUL SCHERRER INSTITUT

SLS Anlagen



W.Joho 2013

PAUL SCHERRER INSTITUT

SLS Strategie

Qualität

- hohe Brillanz , kleine Emittanz,
  ➡ grosser Speicherring mit vielen Magneten

Flexibilität

- grosser Wellenlängenbereich
- Geraden von 4 m, 7 m und 11 m für optimale Anpassung der Undulatoren

Stabilität

- Trennung der Gebäudehülle vom Boden
- stabile Temperatur im Tunnel und in der Halle
- Positionierung der Magnete auf stabilen Stahlträgern
- Regelung der Strahlposition ,
  schnell (bis 100Hz) und genau (< 0.5 µm)
- konstanter Strahlstrom durch **top-up Injektion** (alle 2 min)
  (konstante Wärmelast auf optischen Komponenten)

PAUL SCHERRER INSTITUT

Elektromagnetische Strahlung

1) Elektronen werden in Antenne durch HF-Felder hin und her geschüttelt

=> **Radio TV Radar-wellen Mobiltelephon**

2) Elektronen werden in Röntgenröhre auf ca. 70 keV beschleunigt

und dann in Elektrode brüsk abgebremst

=> **Röntgenstrahlen**

3) Elektronen werden im Magnetfeld B durch Lorentzkraft $e(v \times B)$ abgelenkt

=> **Synchrotronstrahlung**

nimmt mit der Energie $E = \gamma mc^2$ drastisch zu

PAUL SCHERRER INSTITUT

elektromagnetisches Spektrum

Röntgenstrahlen	Wellenlänge λ	Energie ε
UKW-Radio (100 MHz)	3 m	
Radar, Mobiltelephon (3 GHz)	0.1 m	
infrarotes Licht	1-1000 μm	1-1000 meV
rotes Licht	700 nm	1.8 eV
violettes Licht	400 nm	3 eV
Vakuum ultra violett	4-200 nm	6-300 eV
weiche Röntgenstrahlen	0.4 nm	3 keV
harte Röntgenstrahlen	0.04 nm	30 keV
Gamma Strahlen		1-10 MeV

$\lambda \cdot \varepsilon = 1.24$ nm·keV

Synchrotron Stahlung: freie Wahl der Wellenlänge λ

PAUL SCHERRER INSTITUT

Gebäudedaten

Durchmesser aussen	138 m
Höhe	14.3 m
überdachte Fläche	14’000 m^2
Säulen, Dachträger	60 Stück
Spannweite Dachträger	43 m
Kran	16 t
Umfang Speicherring	288 m
Tunnel, lichte Höhe	2.4 m
“Rennstrecke” für Gabelstapler	400 m!

Bürogebäude Innenring:

3 Stockwerke mit Büros für 80Personen, Kontrollraum, Labors

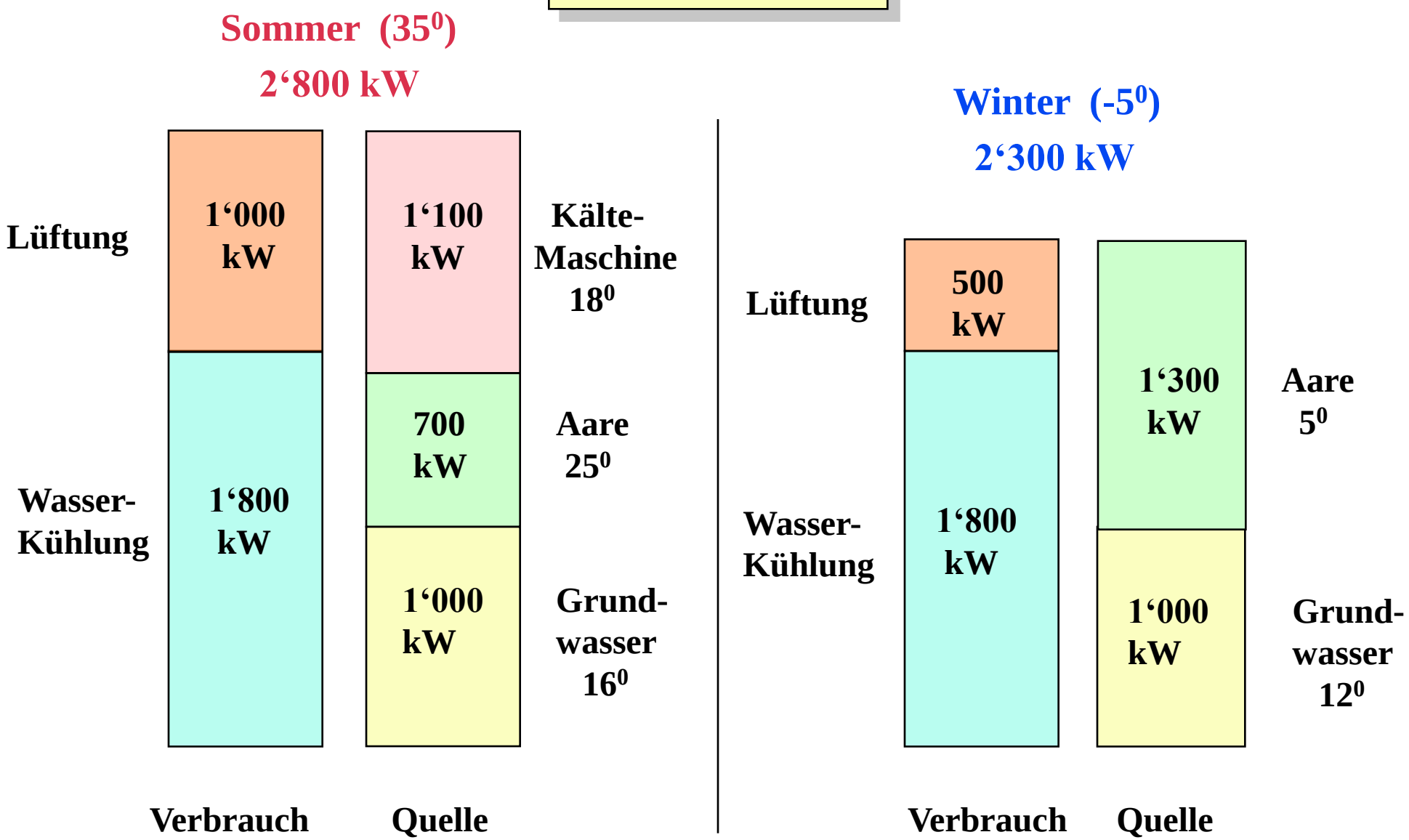
PAUL SCHERRER INSTITUT

Budget SLS (1997)

Gebäude + Land	38 MFr.
Infrastruktur, Labors, Ringtunnel	25 MFr.
Speicherring, Booster, Linac	68 MFr.
4 Strahllinien (2007: 8+3)	28 MFr.
---	---
Total SLS Kosten	**159 MFr.**

PAUL SCHERRER INSTITUT

SLS Kühlung

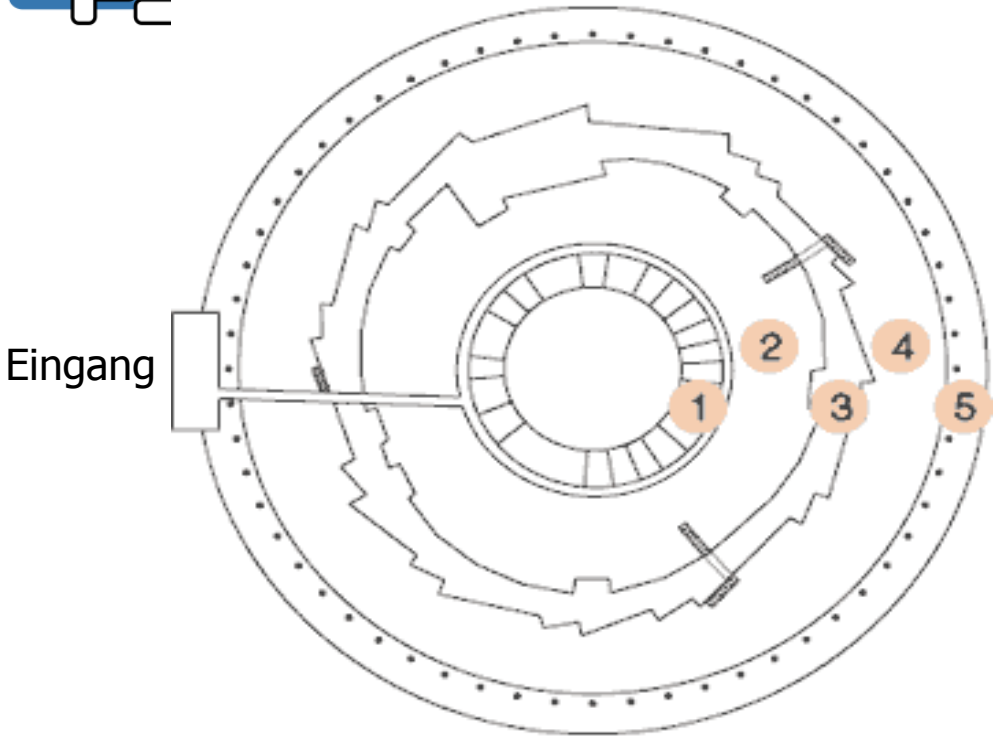


W.Joho 2013

Holzdach SLS

PAUL SCHERRER INSTITUT

Gebäude Konzept



- Trennung: Gebäudehülle / Hallenboden
- separates Ringfundament (40 cm) für Tunnel und Strahllinien (Zonen 3, 4)
- sehr stabile Temperaturen in Tunnel und Halle

=> stabile Bedingungen für Elektronenstrahl und Strahllinien

Zonen:

1. Bürogebäude (3 Geschosse)
2. Technische Galerie
3. Tunnel (Speicherring, Linac und Booster)
4. Areal für Strahllinien
5. Aussenring (60 Säulen und Lüftungssystem)

PAUL SCHERRER INSTITUT

stabile Strahlem mit kleiner Emittanz

grosser Speicherring mit vielen Magneten

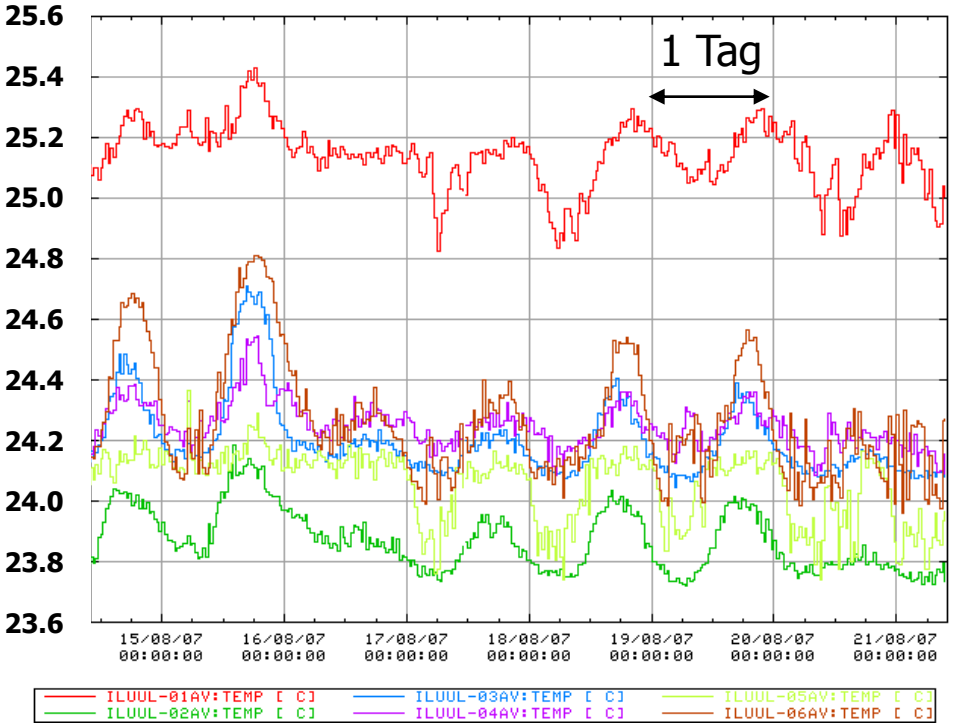
- mechanische Stabilität
  - Halle
  - Magnet Girder
- Temperatur Stabilität
  - Halle $\pm 0.2^0$
  - Tunnel $\pm 0.03^0$
  - Optik-Komp.
    - Top-up
- Bahn Stabilität
  - „Fast Orbit Feed-Back“

PAUL SCHERRER INSTITUT

Stabilität der Temperatur

7 Tage im August 2007

Hallen-temperatur [^{0}C] von 6 Sektoren



Tunnel Temperatur [^{0}C] von 5 Sektoren

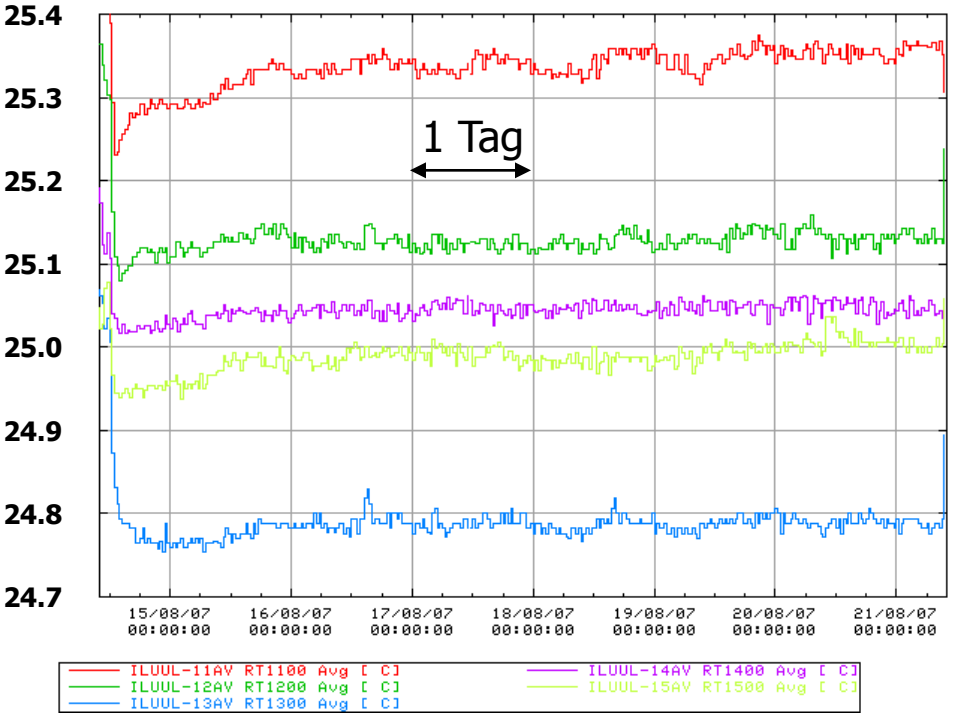
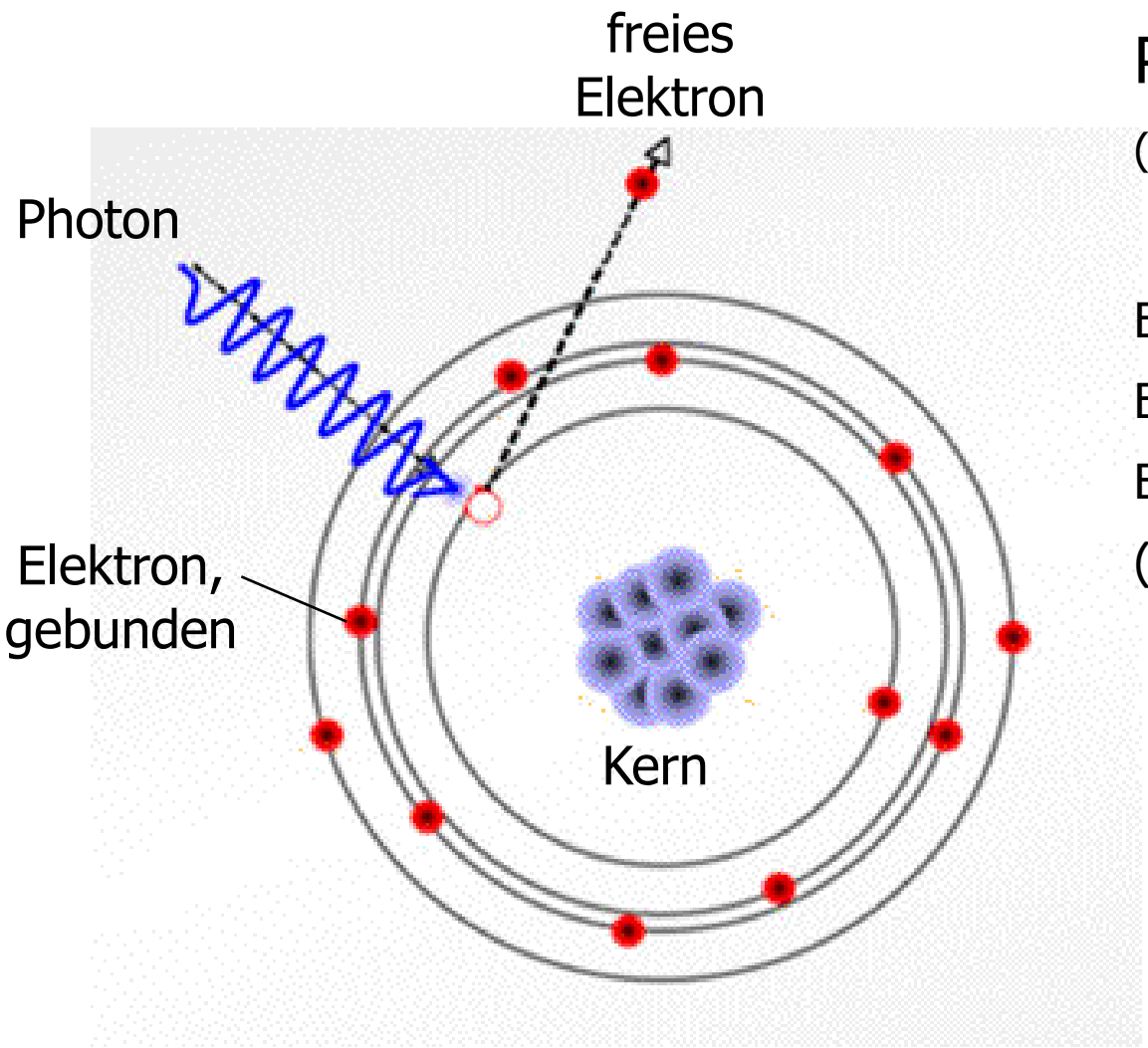


Photo-Effekt



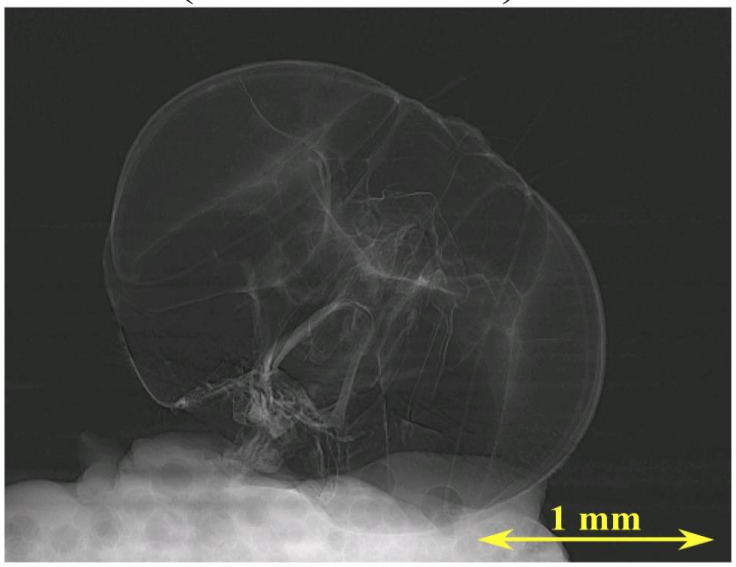
Photon rein – Elektron raus

(Einstein 1905, Nobelpreis 1921)

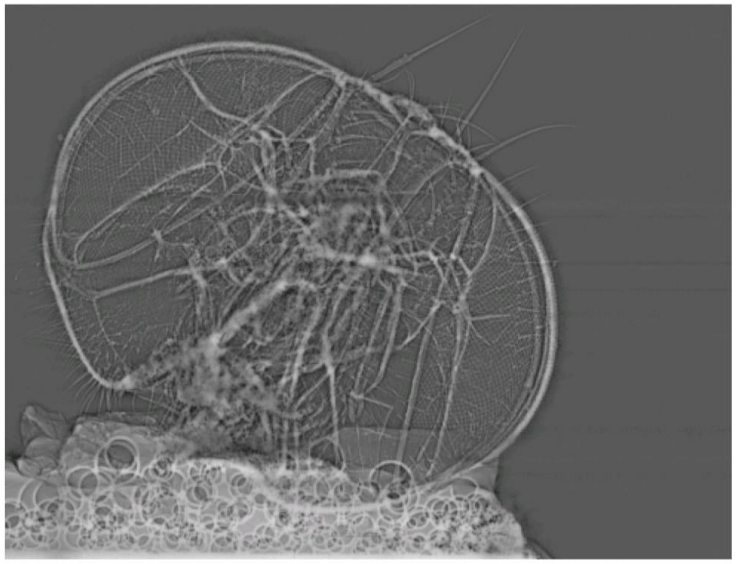
Energiedifferenz zwischen Elektron und Photon gibt Bindungs-energie (abhängig von Atom)

Phasenkontrast – Materialwissenschaften

Absorptionskontrast
(wie beim Artzt)

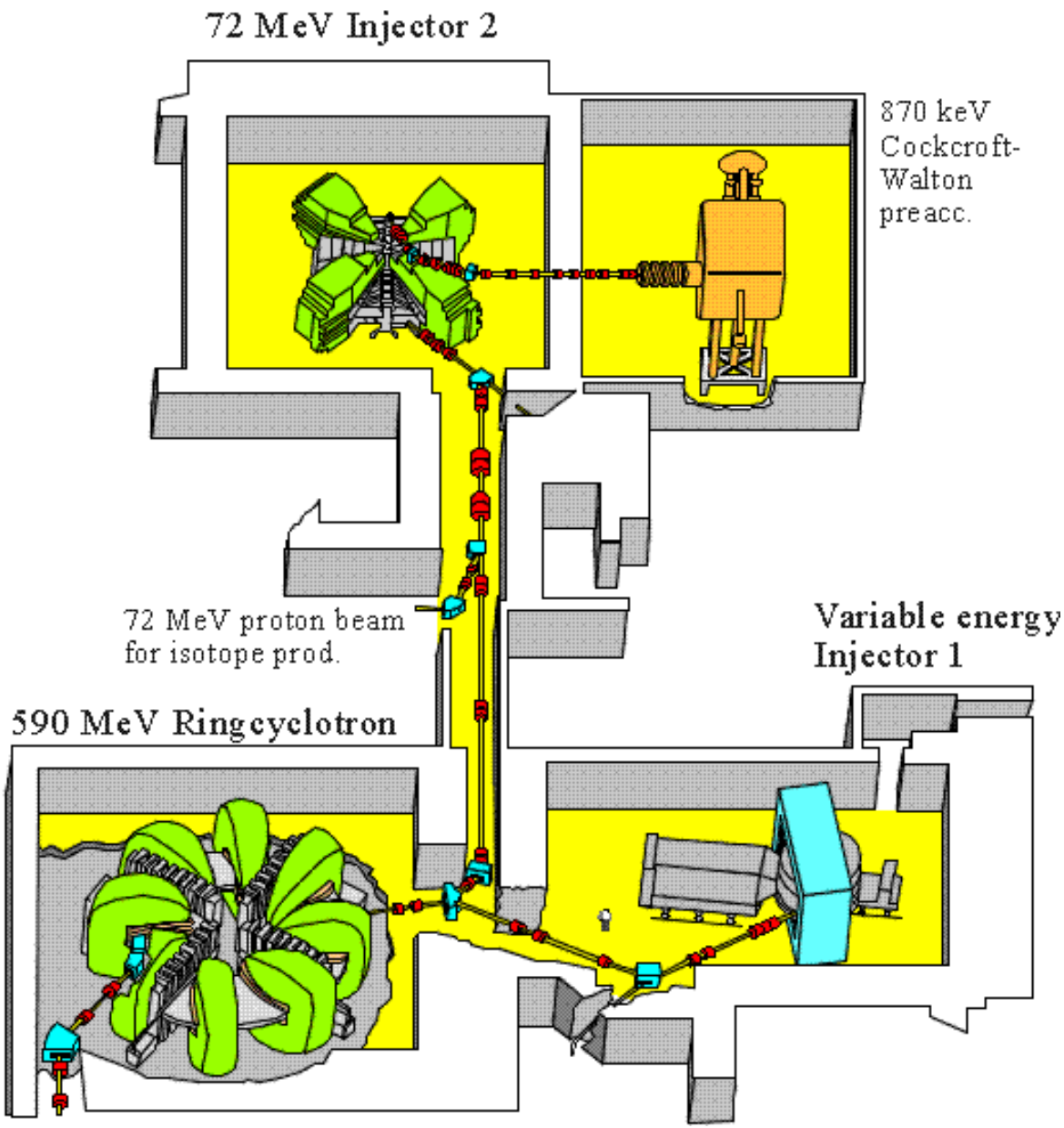


Phasenkontrast
nur bei der SLS



5/13/04
. Stampanoni, B. Patterson et al. : *Material Science Strahllinie SLS*

PAUL SCHERRER INSTITUT



Beschleuniger Anlage mit 4 Zyklotrons

Injektor 1:

Kernphysik + Augentumore

Injektor 2:

Injektion + Isotopen für Spitäler

Ringzyklotron:

Müonen, Pionen, Neutronen,

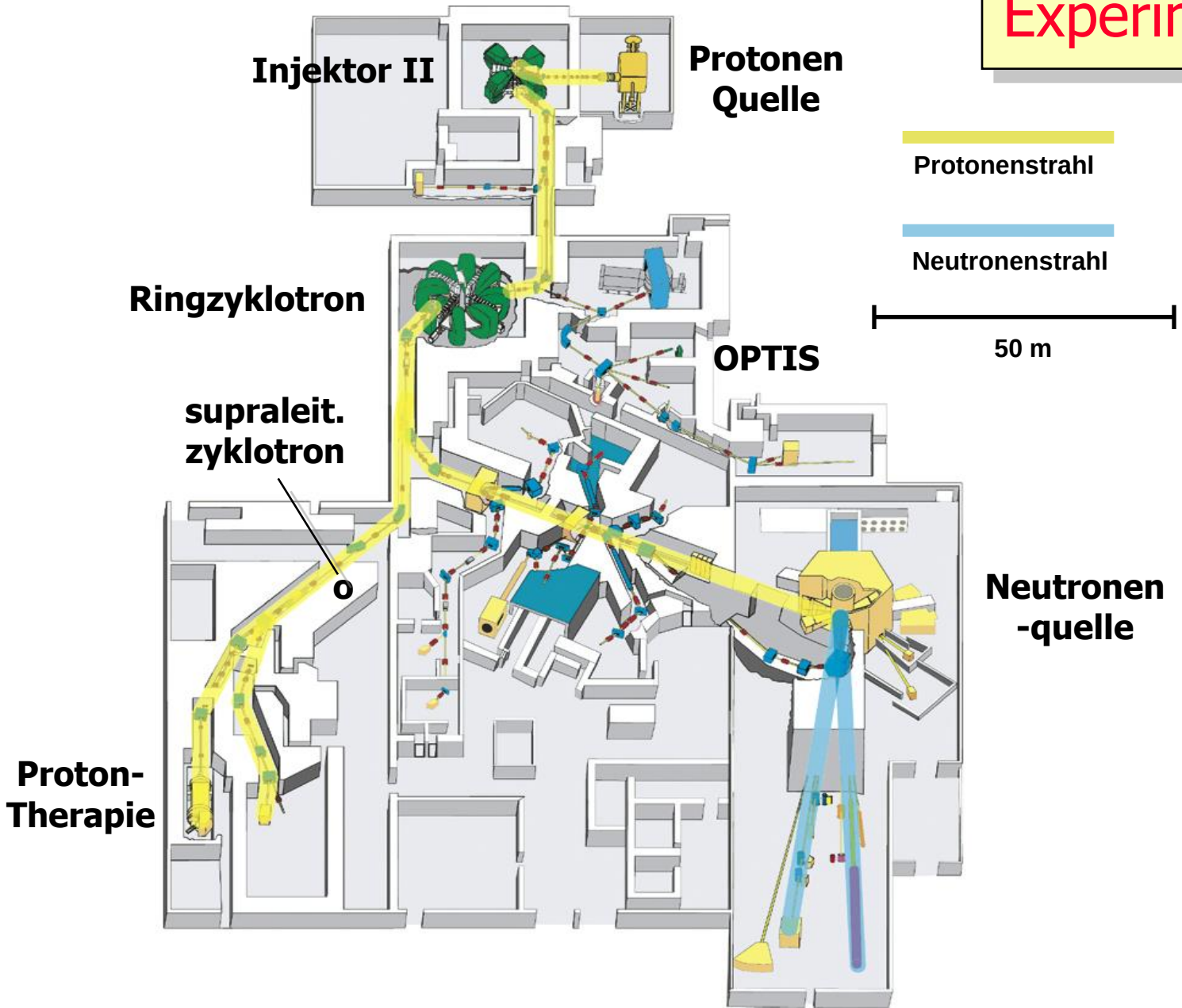
Protonentherapie

Supraleitendes

Zyklotron: Protonentherapie

PAUL SCHERRER INSTITUT

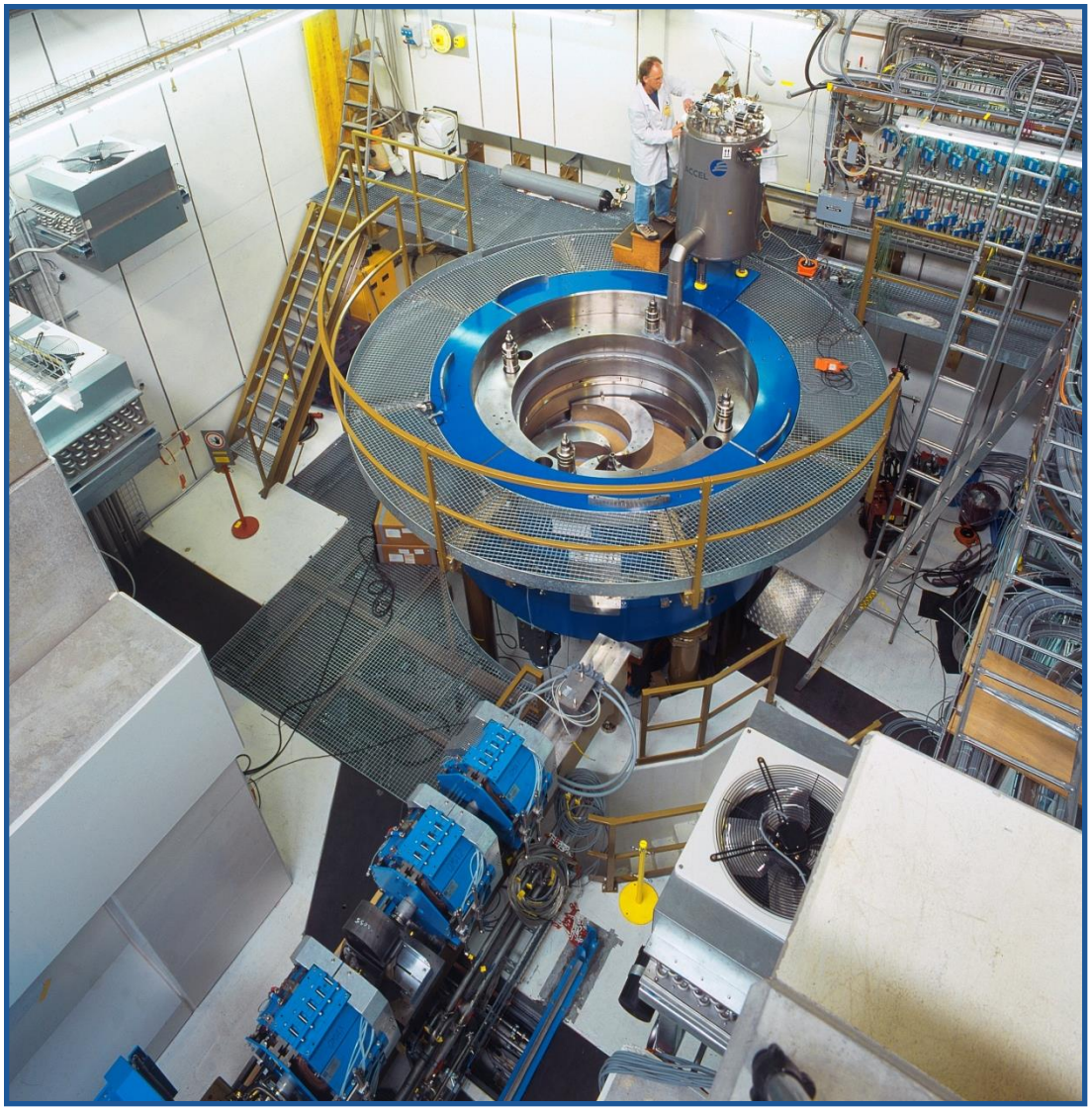
Experimentierhalle



W.Joho 2013

PAUL SCHERRER INSTITUT

Comet Zyklotron



Strahlentherapie mit

250 MeV Protonen

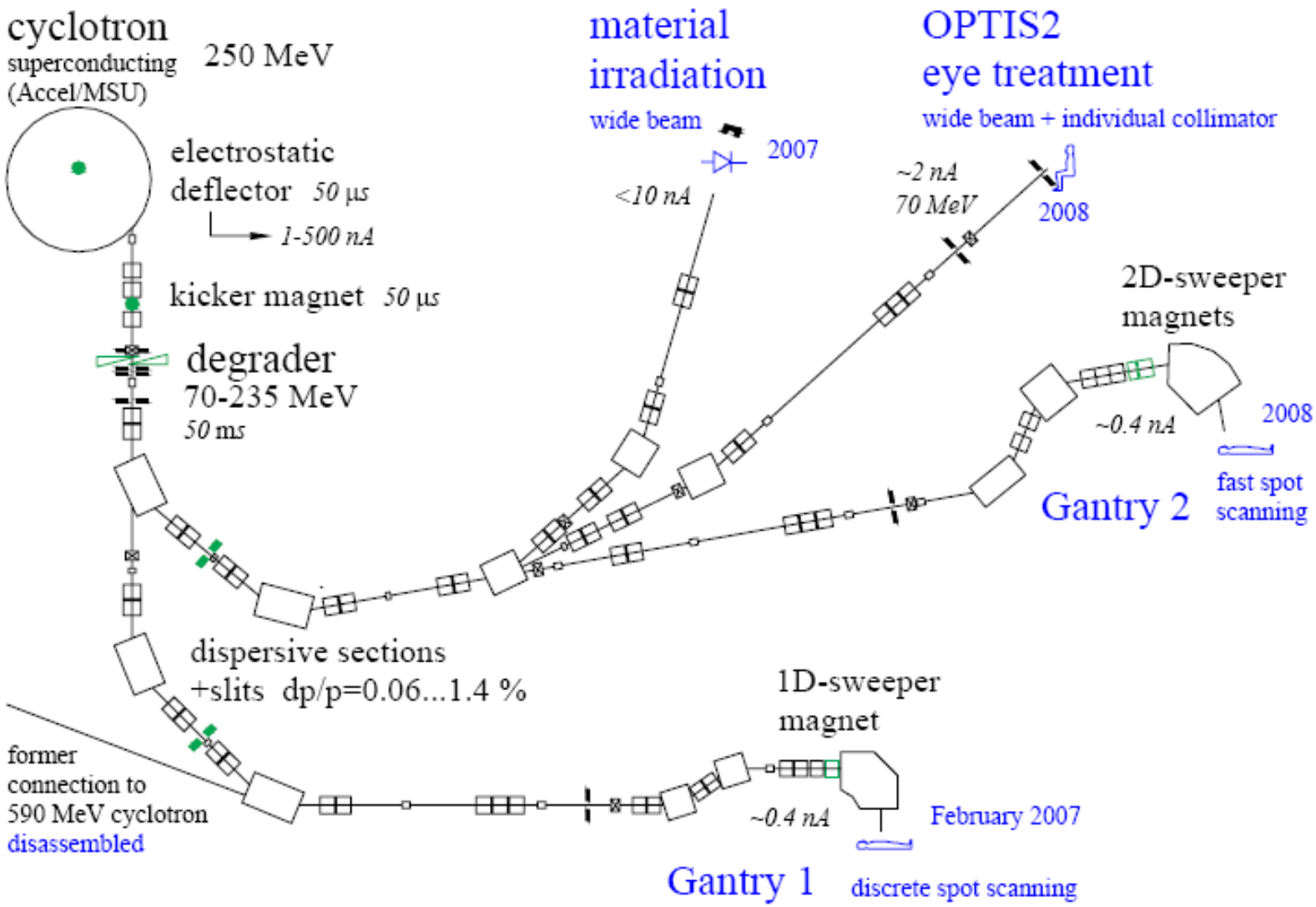
Zyklotron:

supraleitender Magnet, 3m Ø

Kollaboration Firma ACCEL & PSI

PAUL SCHERRER INSTITUT

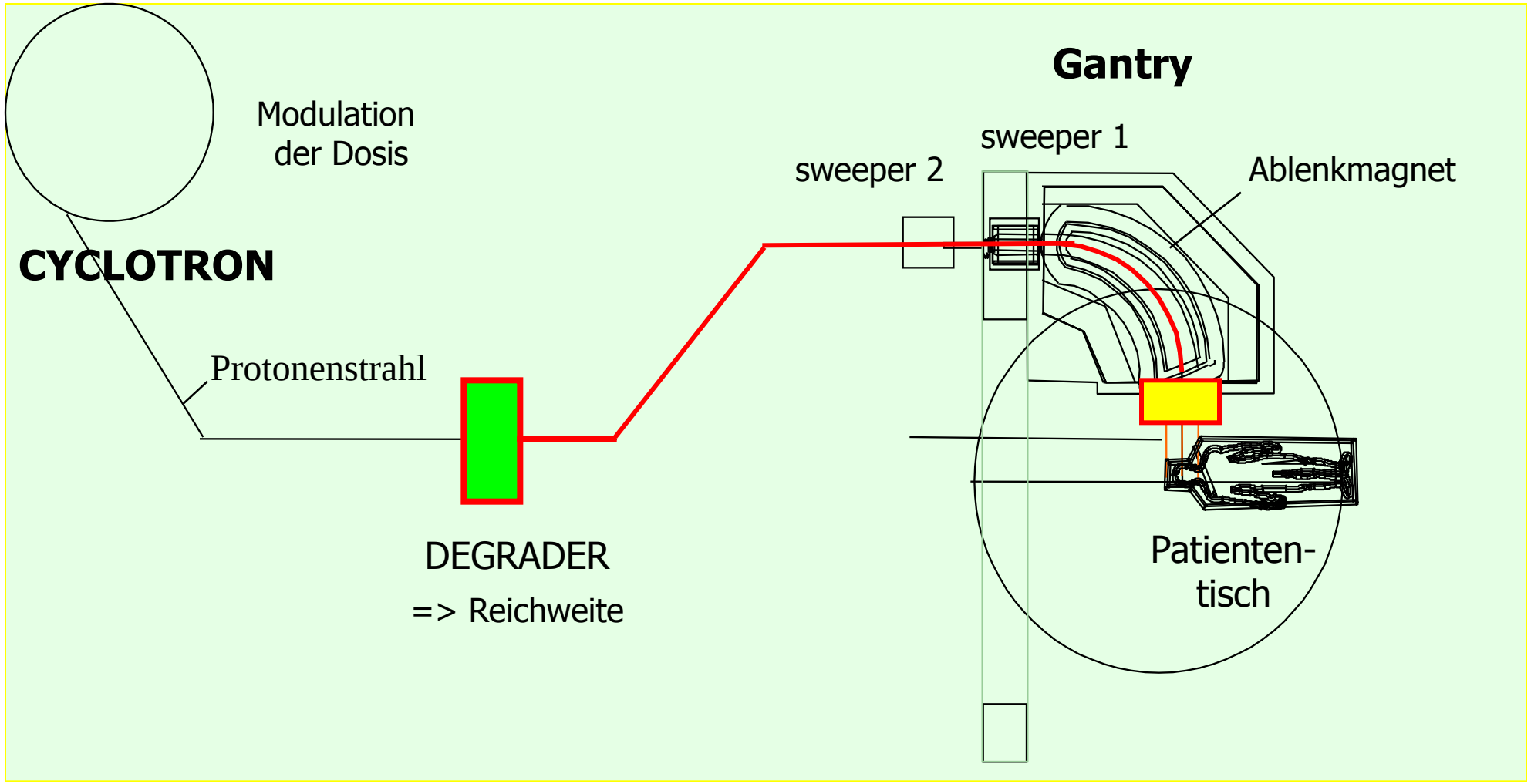
The PROSCAN Facility



W.Joho 2013

PAUL SCHERRER INSTITUT

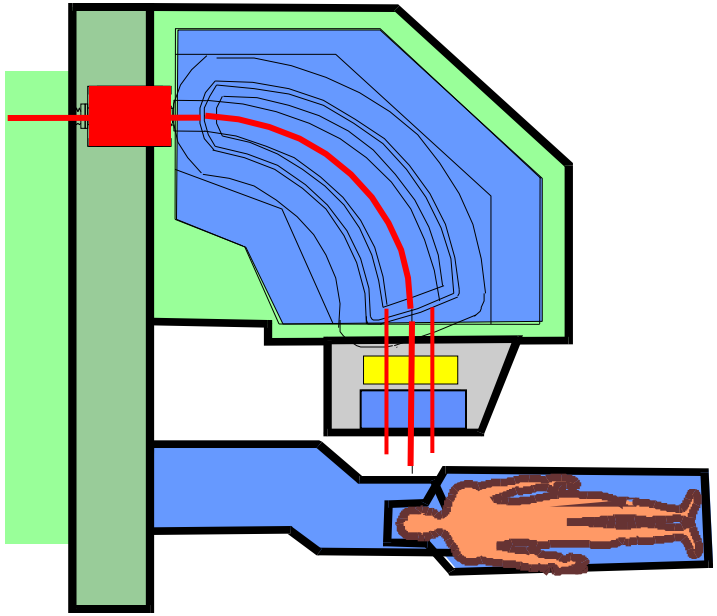
Proton Therapie mit PROSCAN



PAUL SCHERRER INSTITUT

Spotscanning (E.Pedroni)

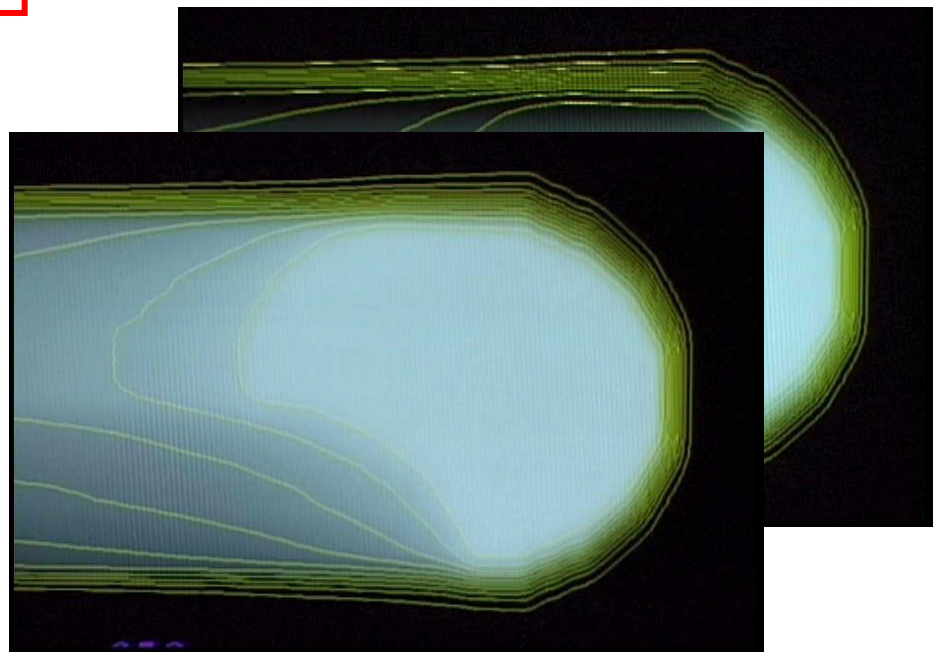
- Bleistiftstrahl: 7 mm in Luft
- Volumenabtastung auf ein 5 mm Gitter: 10’000 Punktapplikationen pro Liter



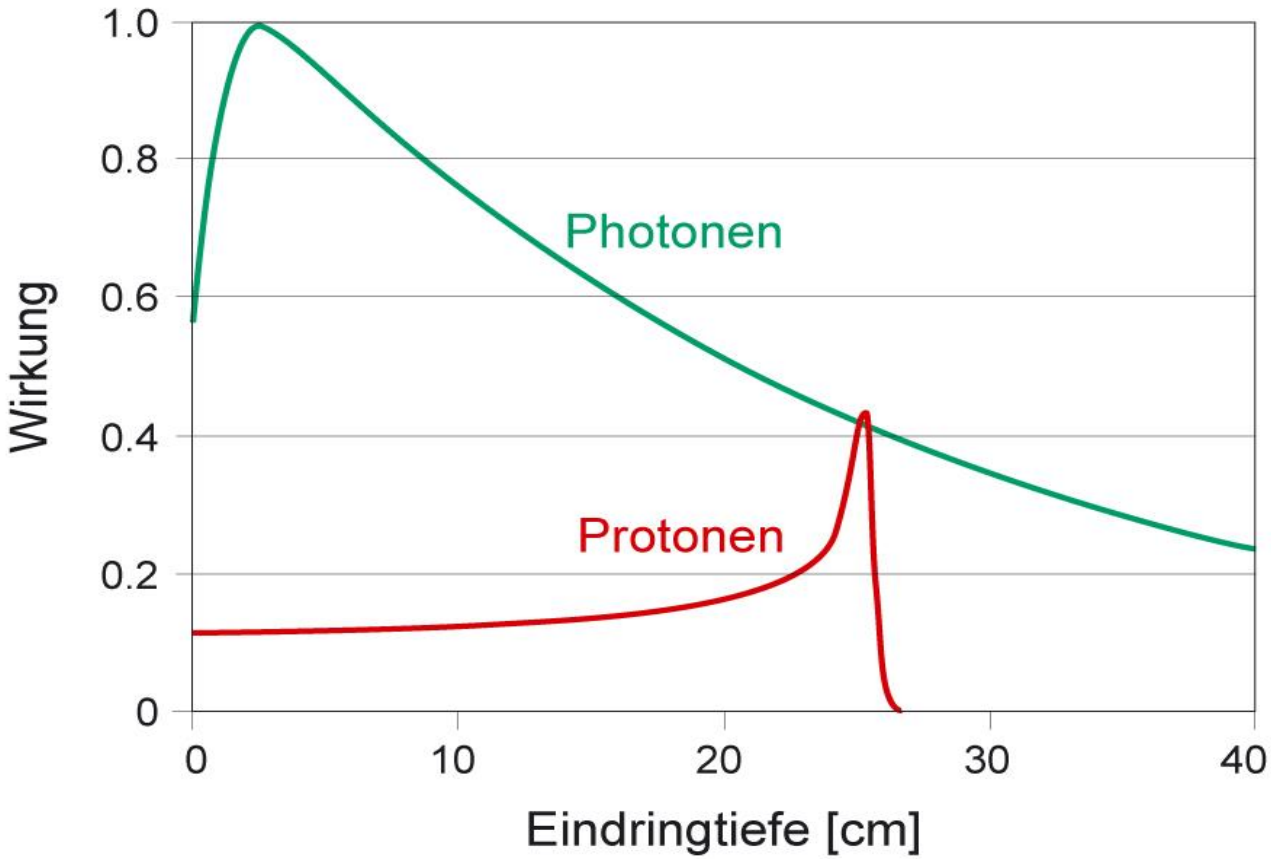
Nach wie vor die einzige Gantry mit Protonen Scanning in der Welt

Scanning Elemente :

Zeit	Spot-Dosis Monitor + Kicker	
	100 us	
X	Sweepermagnet	(schnell)
	5 ms / Schritt	
Y	Range-shifter	(mittelschnell)
	30 ms	
Z	Patiententisch	(langsam)
	1 cm/s	

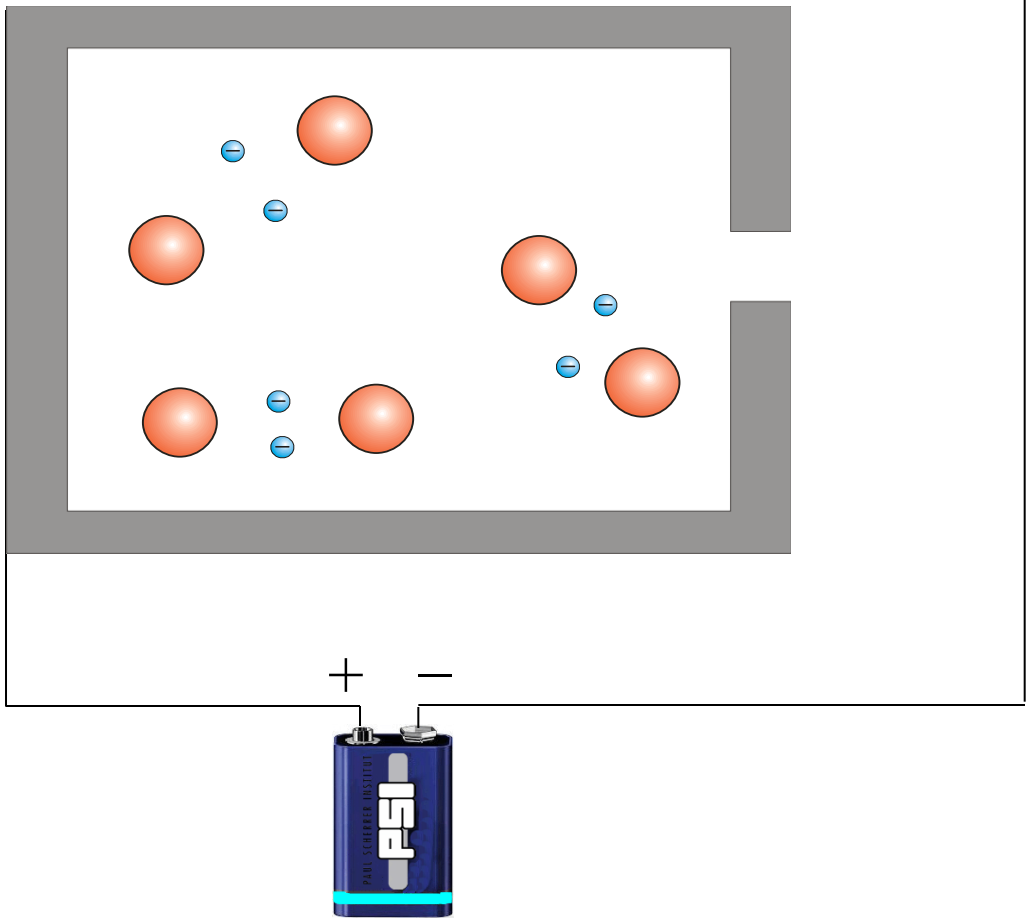


Dosisabgabe an Zellen



woher kommen die Protonen ?

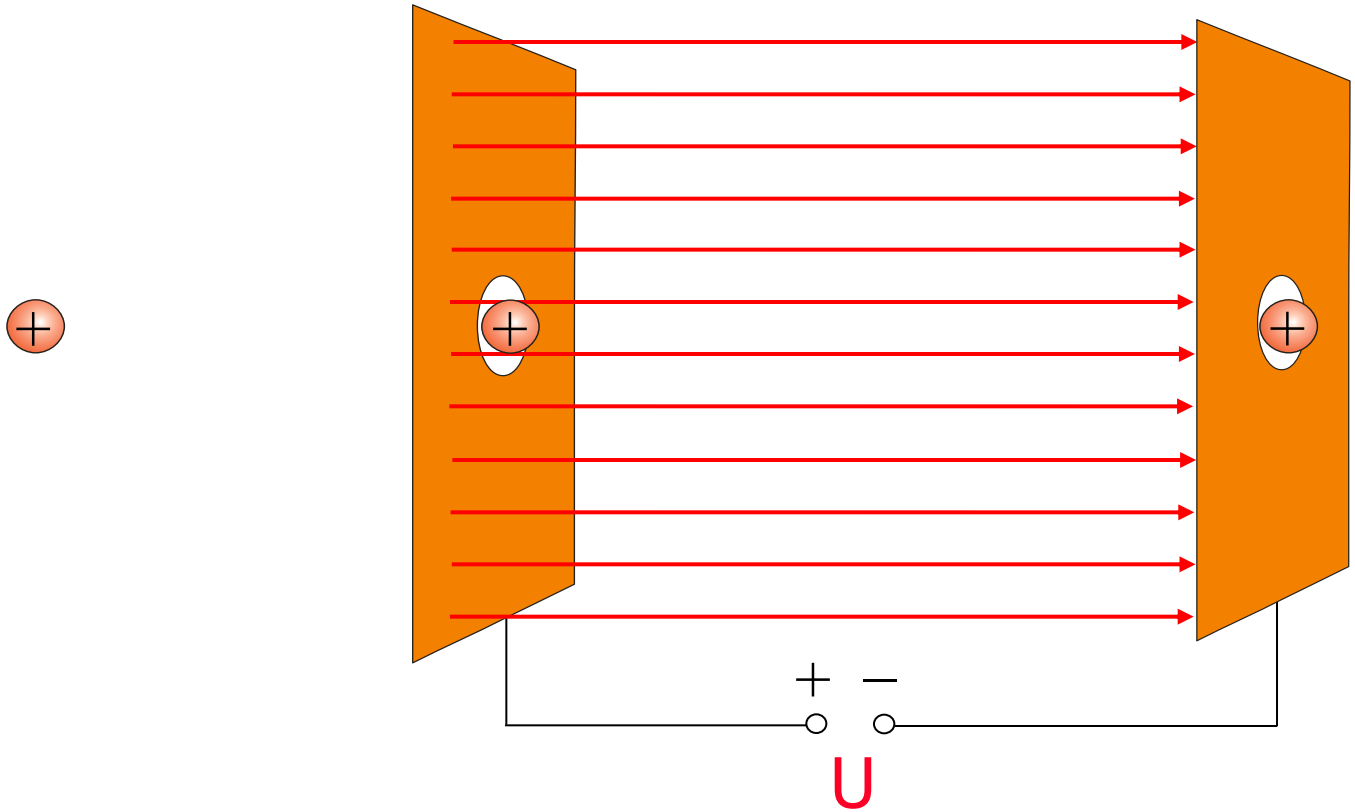
Gasentladung



Wasserstoff-flasche

PAUL SCHERRER INSTITUT

Beschleunigung von geladenen Teilchen

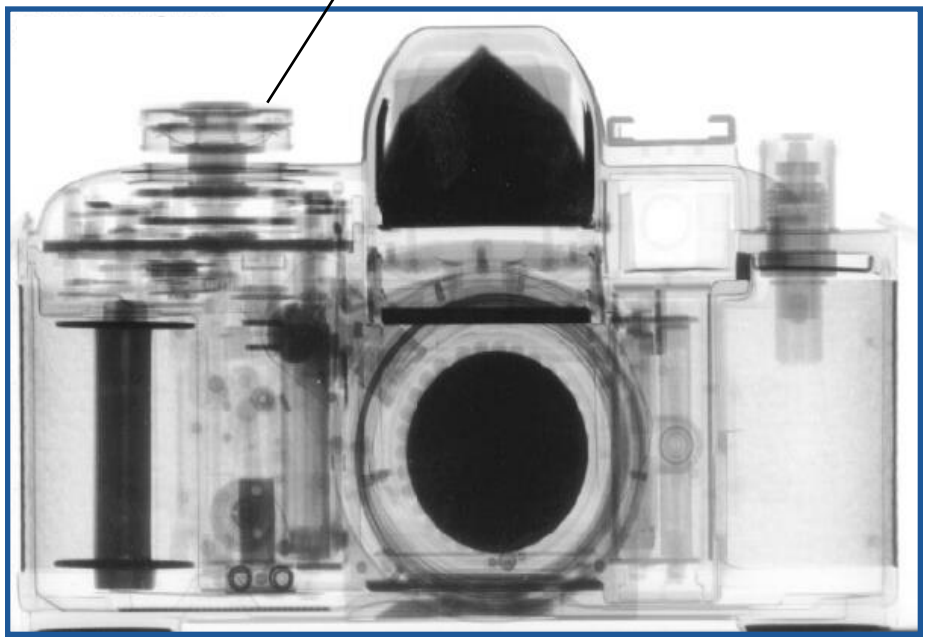


Spannung U => elektrisches Feld

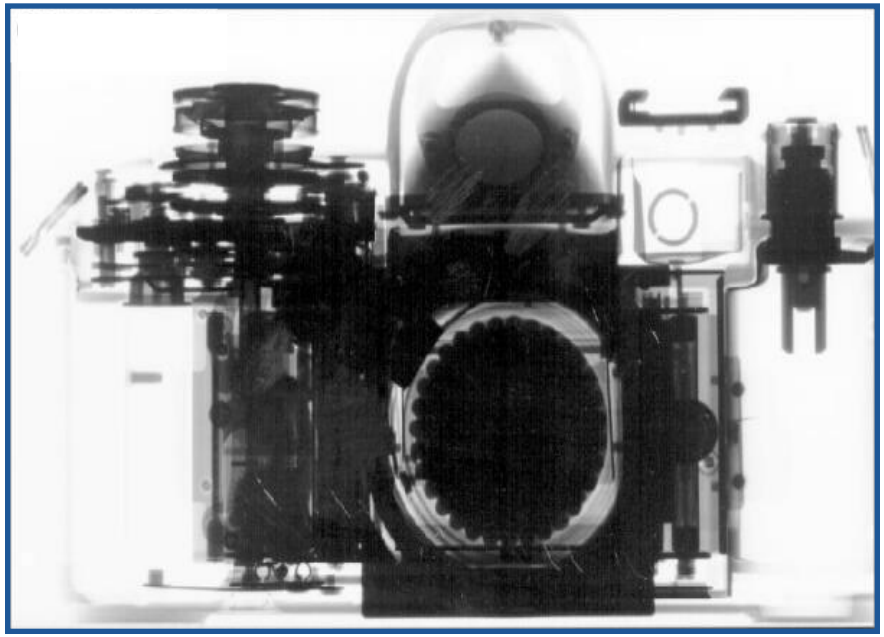
PAUL SCHERRER INSTITUT

Materialprüfung mit Neutronen

Grosse Materialproben werden zerstörungsfrei durchleuchtet => das Innere wird sichtbar



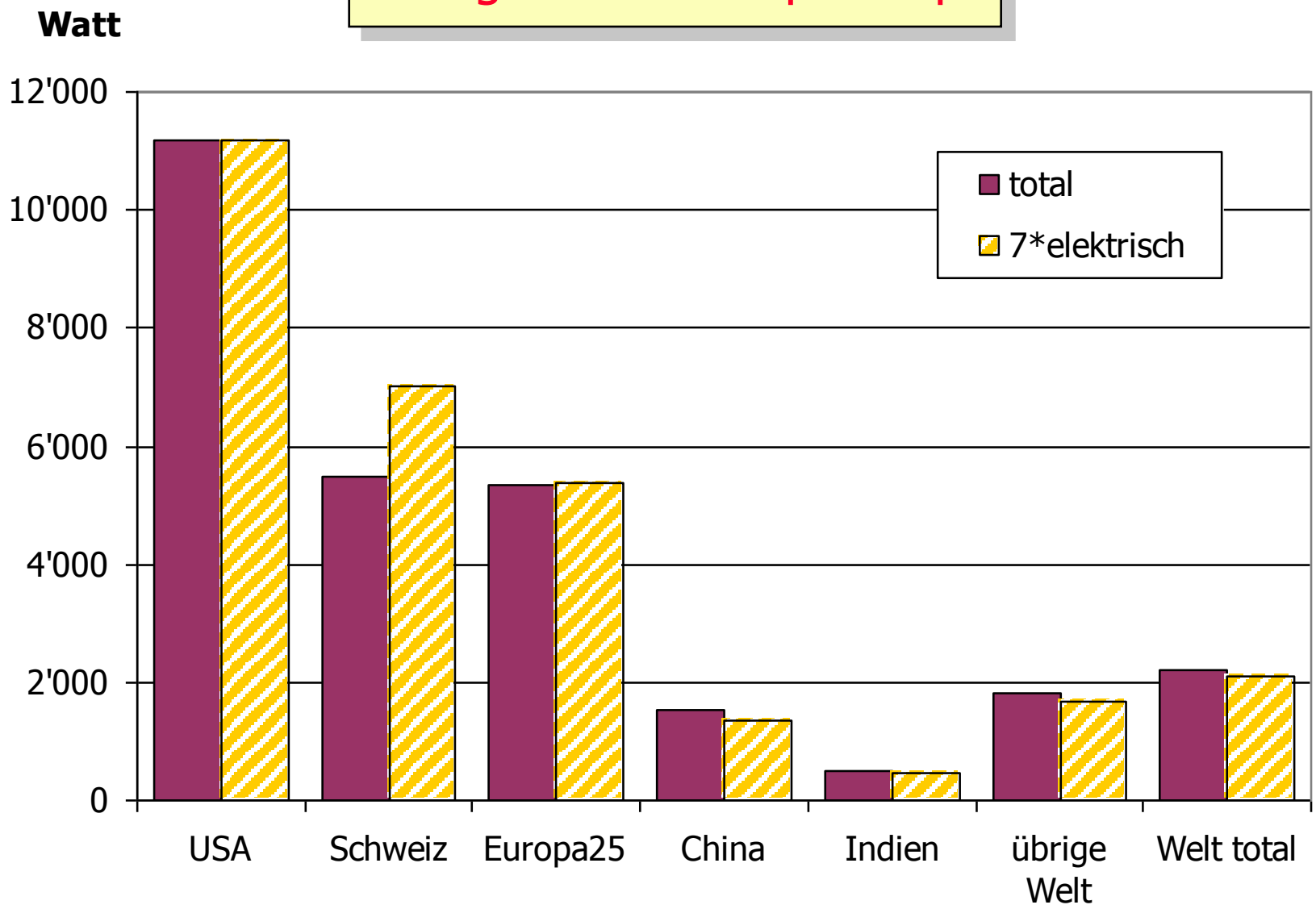
Neutronenradiografie



Röntgenstrahlung

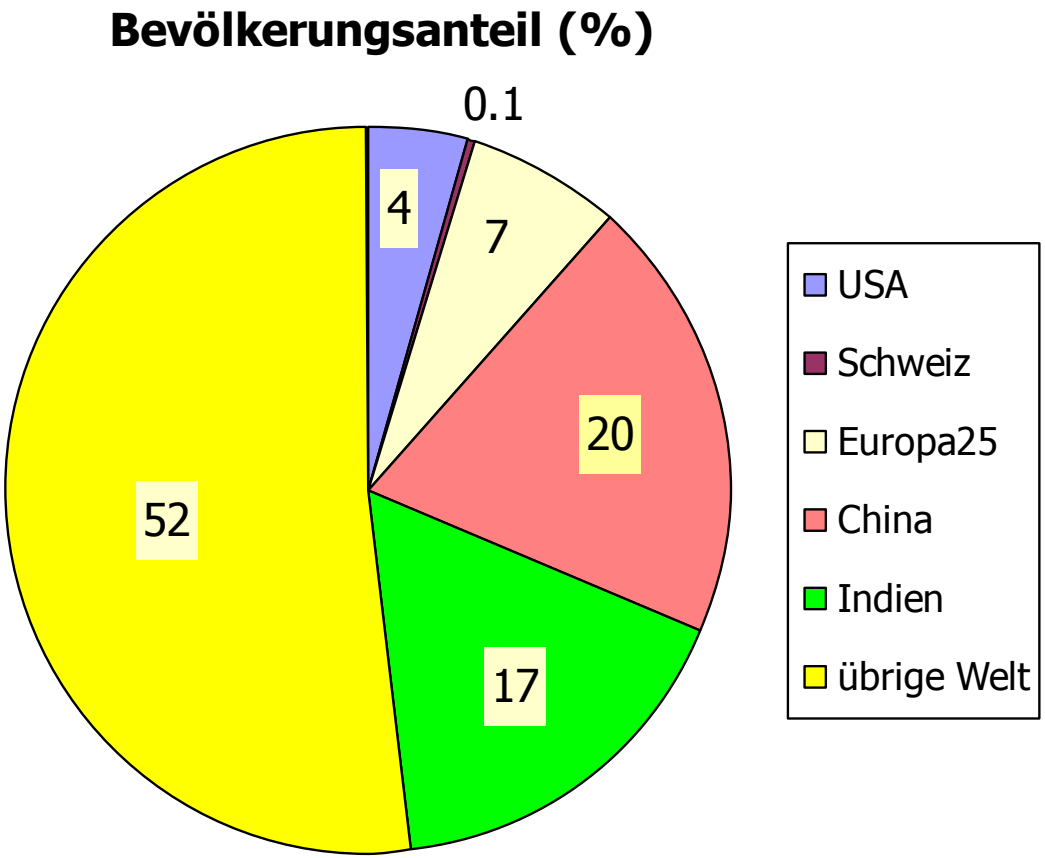
PAUL SCHERRER INSTITUT

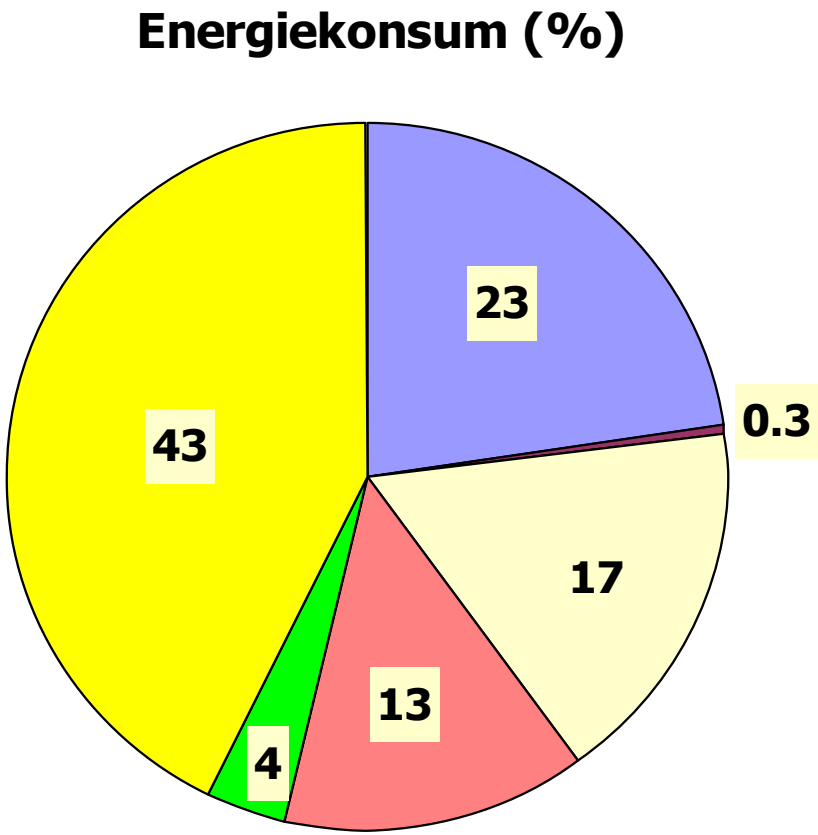
Energieverbrauch pro Kopf



PAUL SCHERRER INSTITUT

Energieverbrauch pro Kopf





PAUL SCHERRER INSTITUT

Wasserstoff/Sauerstoff

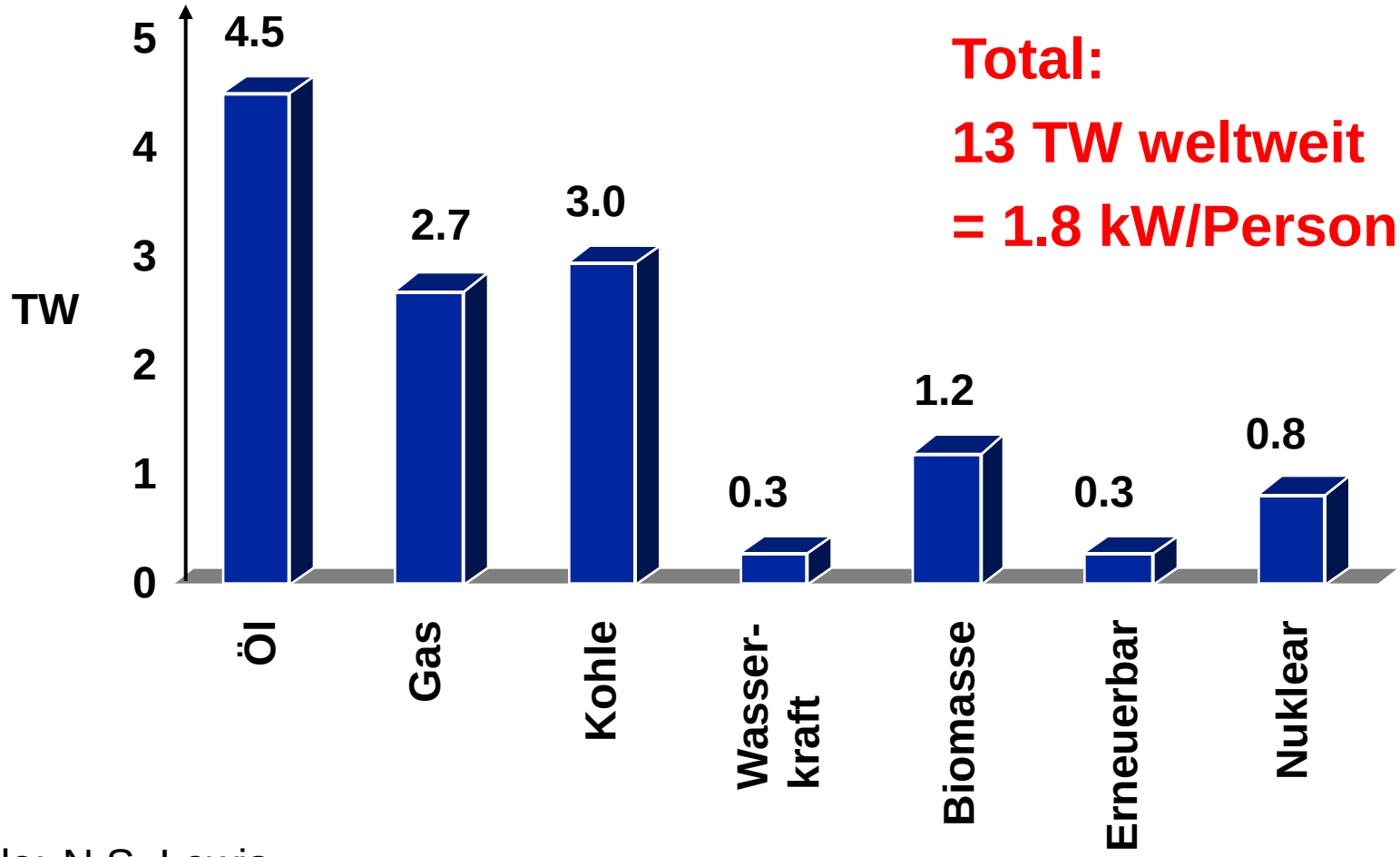
„Ich glaube, daß eines Tages Wasserstoff und Sauerstoff, aus denen sich Wasser zusammensetzt, allein oder zusammen verwendet eine unerschöpfliche Quelle von Wärme und Licht bilden werden."

Jules Verne, Die geheimnisvolle Insel, 1874

Jules Verne1874

PAUL SCHERRER INSTITUT

Energie-Quellen



Total:

13 TW weltweit

= 1.8 kW/Person

Quelle: N.S. Lewis, Caltech

PAUL SCHERRER INSTITUT

Benzinverbrauch

23t Pflanzenmaterial
…. viele Millionen von Jahren
Druck und Temperatur

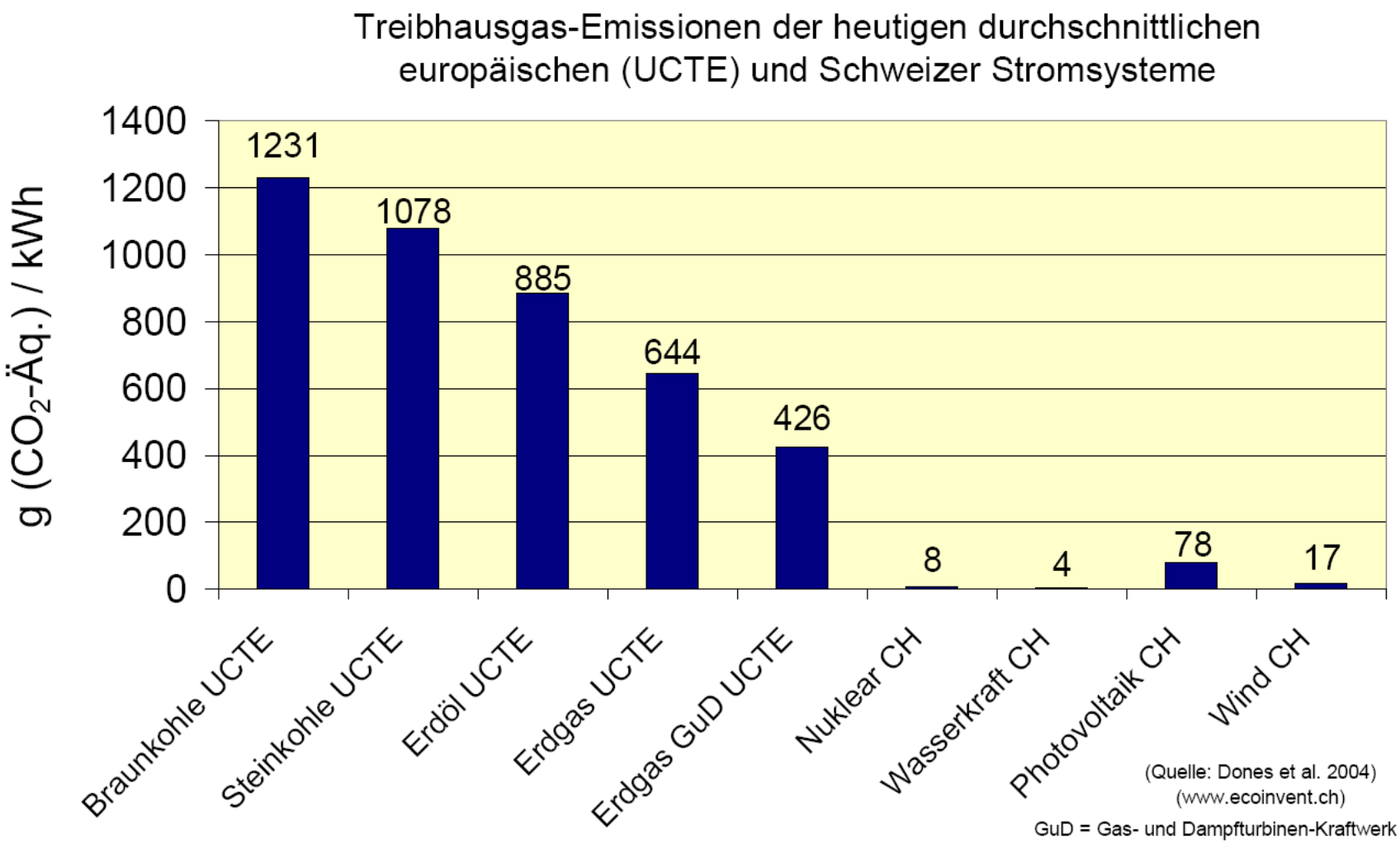
ergeben 1 Liter Benzin!!!!

6 l/100km

Fahrleistung:
16.7 km
10 min
Bei 100km/h

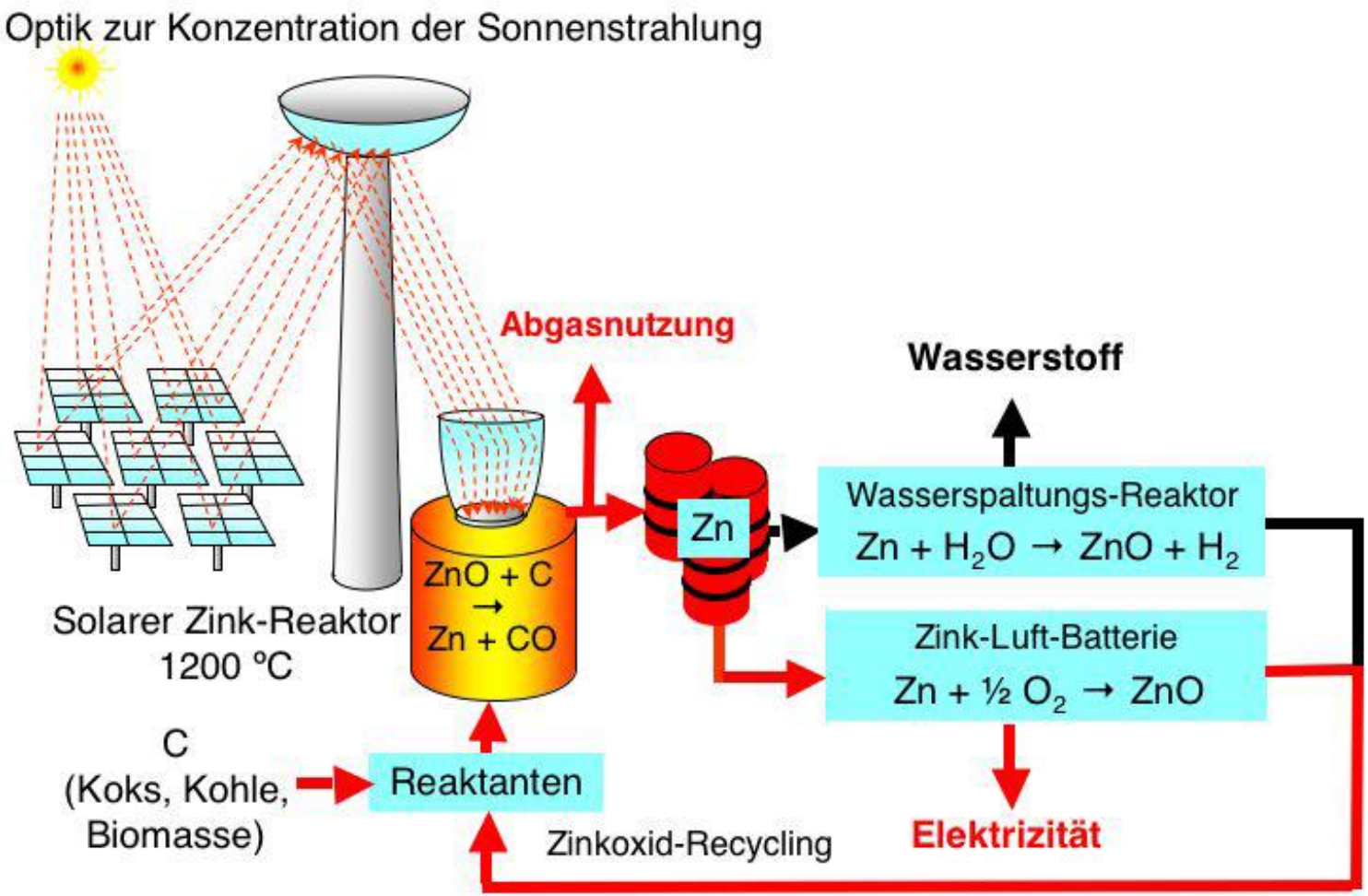
PAUL SCHERRER INSTITUT

Treibhausgase



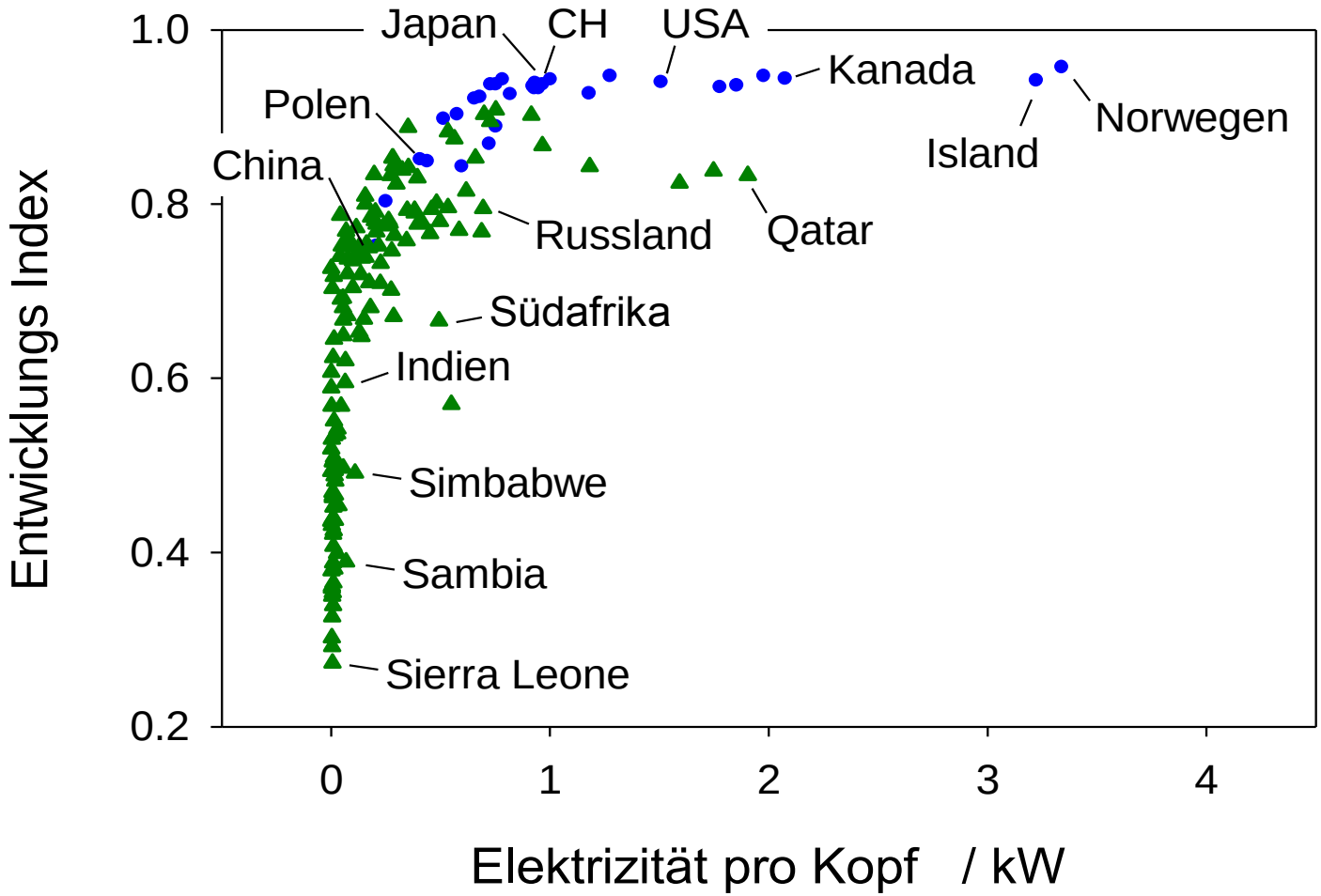
PAUL SCHERRER INSTITUT

Solarer Zink Reaktor



PAUL SCHERRER INSTITUT

globaler Energieverbrauch



W.Joho 2013

warum ist Nutzung der Kernkraft attraktiv?

- Einstein: $E = mc^2$ gibt ungeheure Energiedichte
- 1kg entspricht 10^{17} J = 25 TWh ,
  dies ist der Energieverbrauch in der Schweiz in 3 Wochen !
- Spaltung von U_{235} –Kern mit Neutronen
  => frei werdende Neutronen ermöglichen Kettenreaktion
- **1 kg** Natur-Uran enthält **7 g** spaltbares Isotop U_{235} , davon werden durch die Spaltung **7 mg** in Energie umgesetzt
- dies ist äquivalent zu **20'000 lt Öl**
  (oder 30 t Lastwagen in Satellitenbahn !)
- => billige **Band-energie**

PAUL SCHERRER INSTITUT

warum schafft Kernkraft Unbehagen?

- Radioaktivität ist nicht wahrnehmbar und fassbar
- grosses Gefahrenpotential
- Angst vor Strahlenschäden
- Unfälle in Tchernobyl und Fukushima
- Langzeitlagerung der Abfälle

einzige Chance für Akzeptanz:

bei allfälligem Reaktorunfall => **keine Evakuation !**

=> keine radioaktiven Stoffe dürfen entweichen

Tchernobyl 1986

warum kam es zum Reaktorunfall?

- kriminelle Verletzung der Betriebsvorschriften
- veralteter Reaktortyp (Graphitreaktor)

wieso entwickelte sich der Unfall zur Katastrophe?

- keine Betonhülle um den Reaktor !!
- Vertuschung durch Behörden verhinderte Evakuation

PAUL SCHERRER INSTITUT

Fukushima 12.3.2011

- KKW übersteht Jahrhundert Erdbeben (Stärke 9) => normale Abschaltung
- Tsunami erzeugt 30 Min. später eine 12m Flutwelle => Stromausfall
- Notkühlung mit Dieselmotoren, nach 1h Ausfall wegen Verschlammung
- Brennstäbe überhitzen sich und erzeugen grossen Druck im Reaktorgefäss
- Dampf abgelassen durch Operateure, Bildung von Wasserstoff im Gebäude
- wegen fehlenden Rekombinatoren: Explosion zerstört äussere Betonhülle

Fukushima Folgen

- radioaktive Gase entweichen durch zerstörte Gebäudehülle

  => Evakuierung bis 30 km Entfernung

  max. Dosis 2 mSv/Tag , nach 1 Monat 0.7 mSv/Tag

  (natürliche Jahresdosis ≈ 1 mSv/Jahr)

- Versuch Reaktor mit Meerwasser zu kühlen

- ca. 100 Arbeiter erhalten Dosis bis 250 mSv

  (Risiko an Krebs zu erkranken erhöht sich von 30% auf 31%)

PAUL SCHERRER INSTITUT

Haben neue Kernkraftwerke eine Chance?

100% Sicherheit wird es nie geben! Aber bei Reaktorunfall:

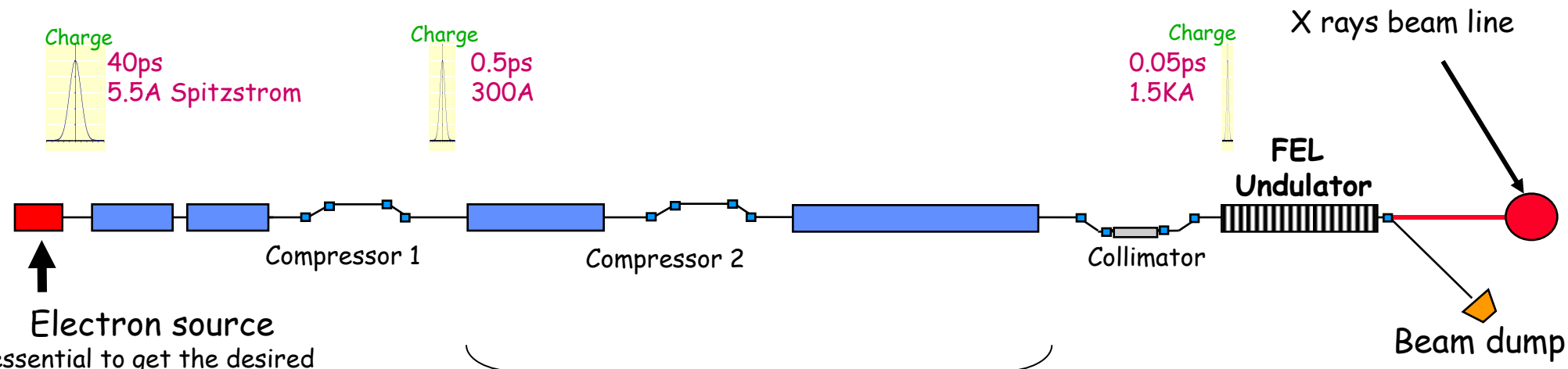
es darf keine Radioaktivität entweichen

=> keine Evakuation der Bevölkerung !!

- damit sind Kernkraftwerke versicherbar, selbst gegen Totalausfall
- Reaktorhülle muss geschmolzenen Kern zurückbehalten
- Rekombinatoren verhindern Explosion von Wasserstoff
- Abklingbecken ausserhalb des Reaktorgebäudes,
  mit grossem Wasserreservoir zum Fluten
- Schutz vor Hochwasser, flutsicherer Ersatzkommandoraum

PAUL SCHERRER INSTITUT

SWISSFEL Projekt



Electron source
essential to get the desired quality
PSI R&D program
Cathodes & high gradient acceleration

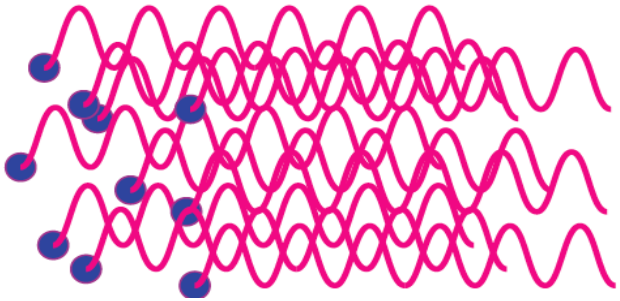
Main Linac
Driving the machine costs
Length depends on the beam quality

Injector
Critical concerning the beam parameters

The FEL is a very high brightness light source
Fully coherent with very short photon pulse ~50 fs

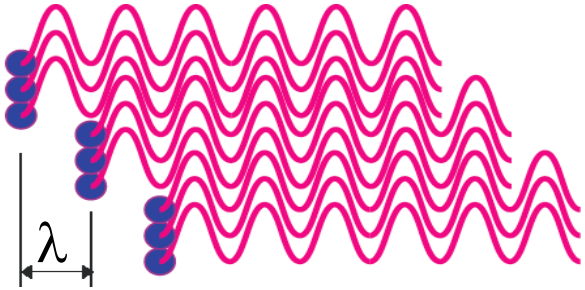
Sehr intensive Röntgenstrahlung

SLS



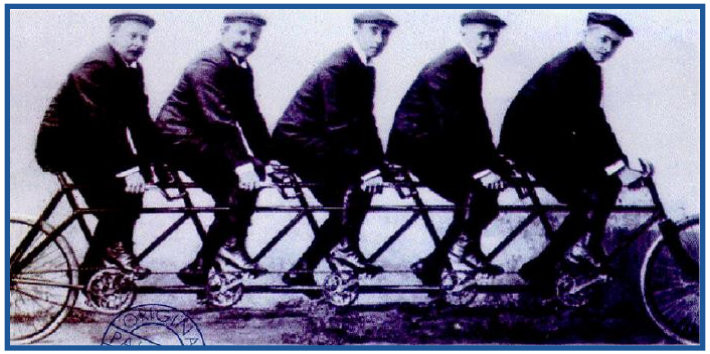
Inkohärente Röntgenstrahlung:
→ Aussendung aus einzelnen ungeordneten Elektronen

XFEL



Kohärente Röntgenstrahlung
→ Aussendung aus geordneten Elektronenpaketen

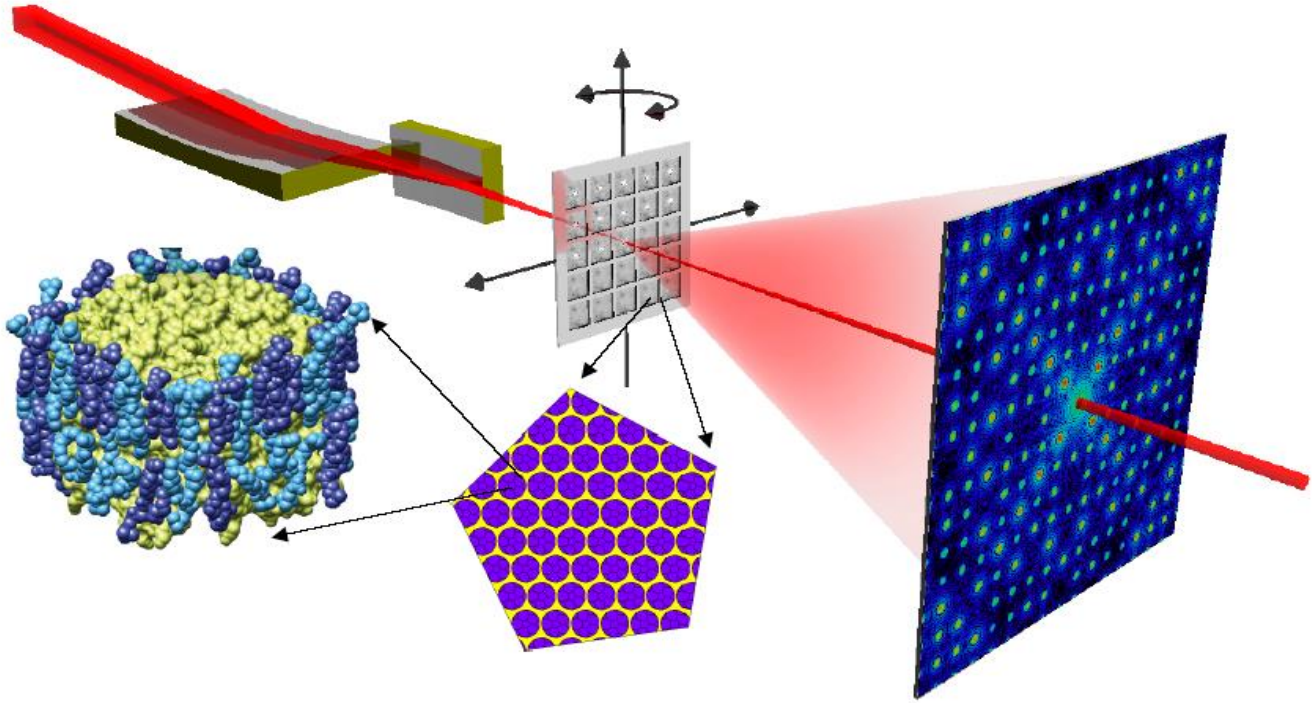
XFEL
Atomare-Auflösung + Zeit-Auflösung
um den „Tanz“ der Atome zu filmen



PAUL SCHERRER INSTITUT

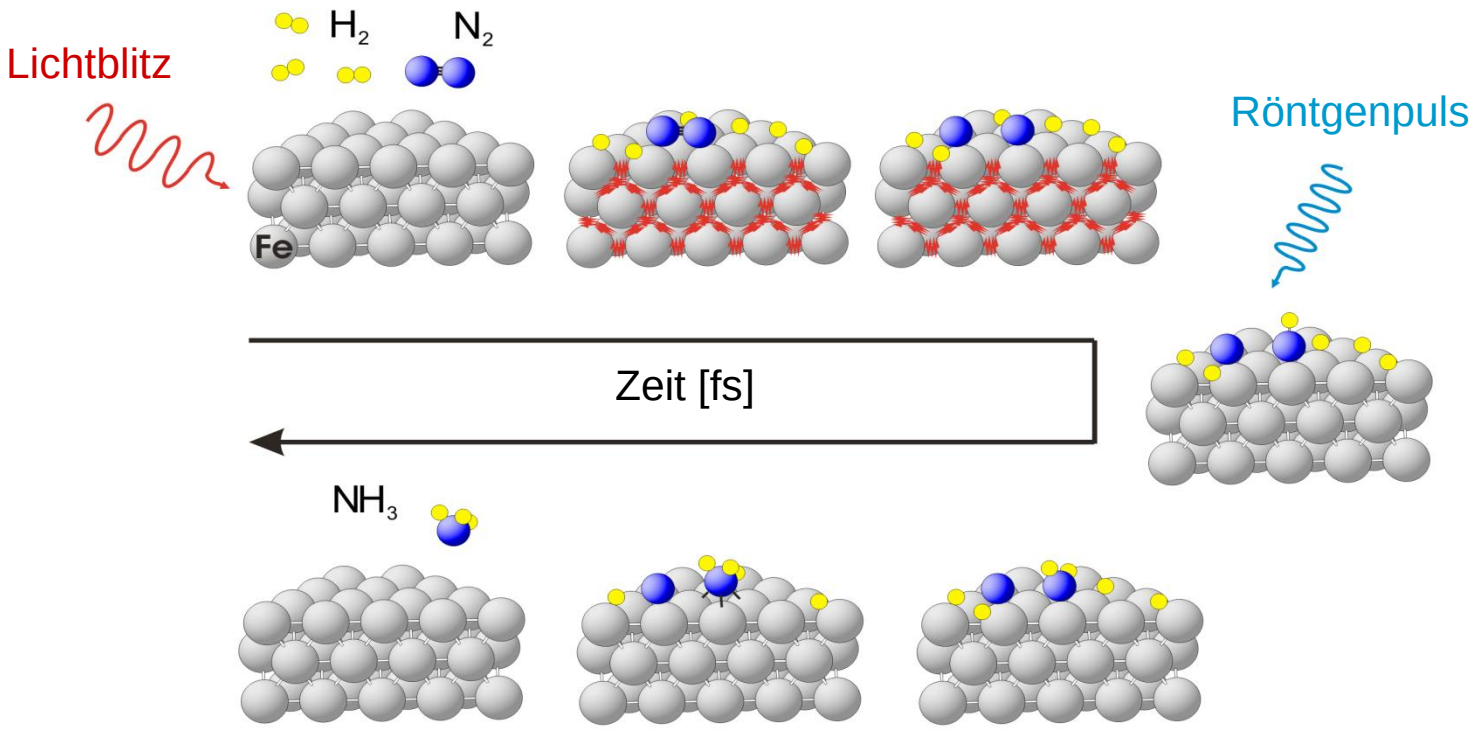
Grossprojekt PSI-XFEL

Neue Einblicke in die Nano-Welt



Strukturbestimmung einzelner Nano-Objekte

Chemische Prozesse besser verstehen



Haber-Bosch-Prozess