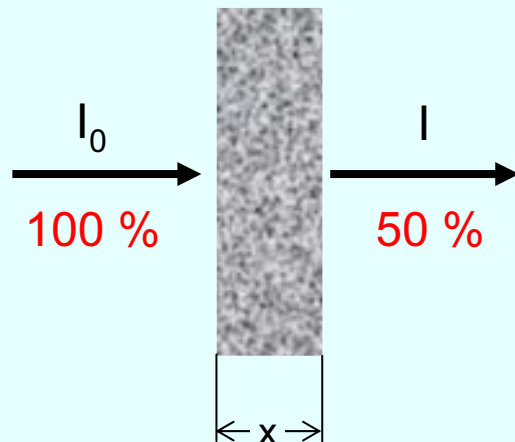


Radiographie and Tomographie mit kalten und schnellen Neutronen

T. Bücherl, B. Schillinger

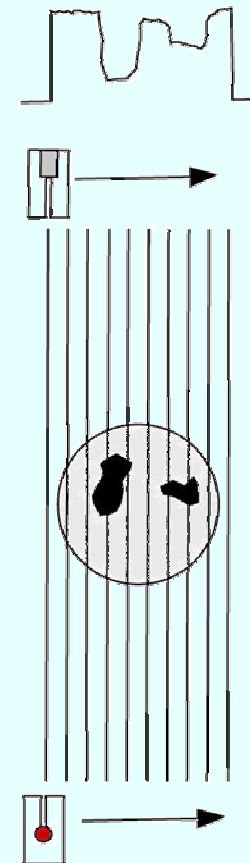
Was sind Radiographie und Tomographie?

Der Begriff „Transmission“



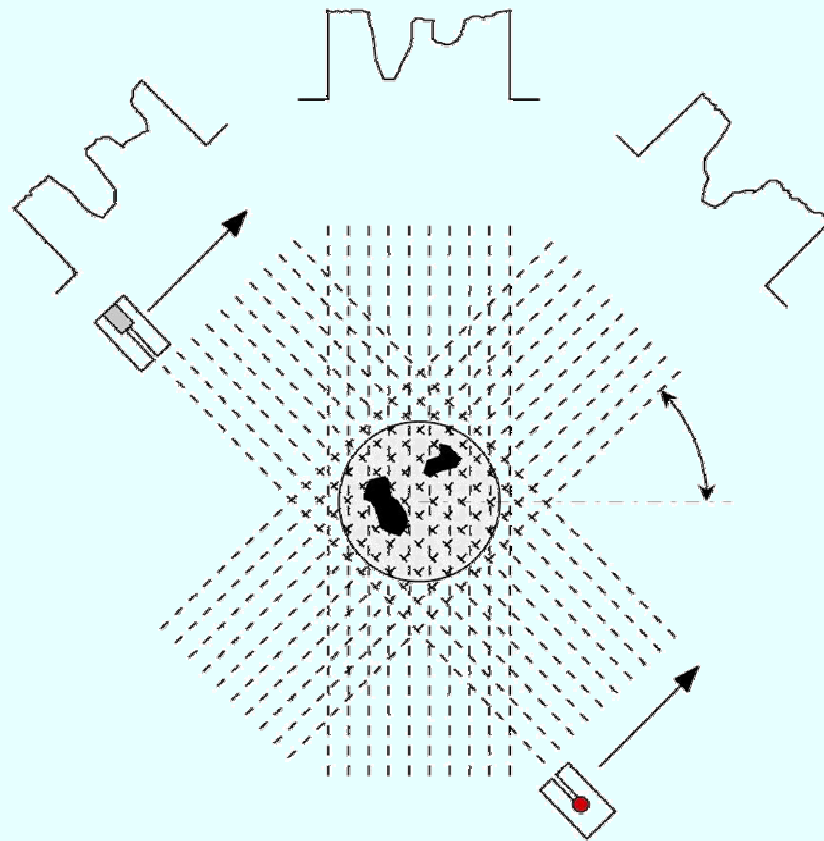
Information über die Schwächung
der Strahlung beim Durchgang
durch Materie

Radiographie



Was sind Radiographie und Tomographie?

Tomographie



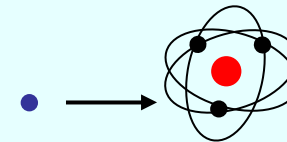
Information über die Verteilung der
Schwächungskoeffizienten im
Material

Unterschiede zwischen Röntgen-, Gamma und Neutronen-Radiographie und Tomographie

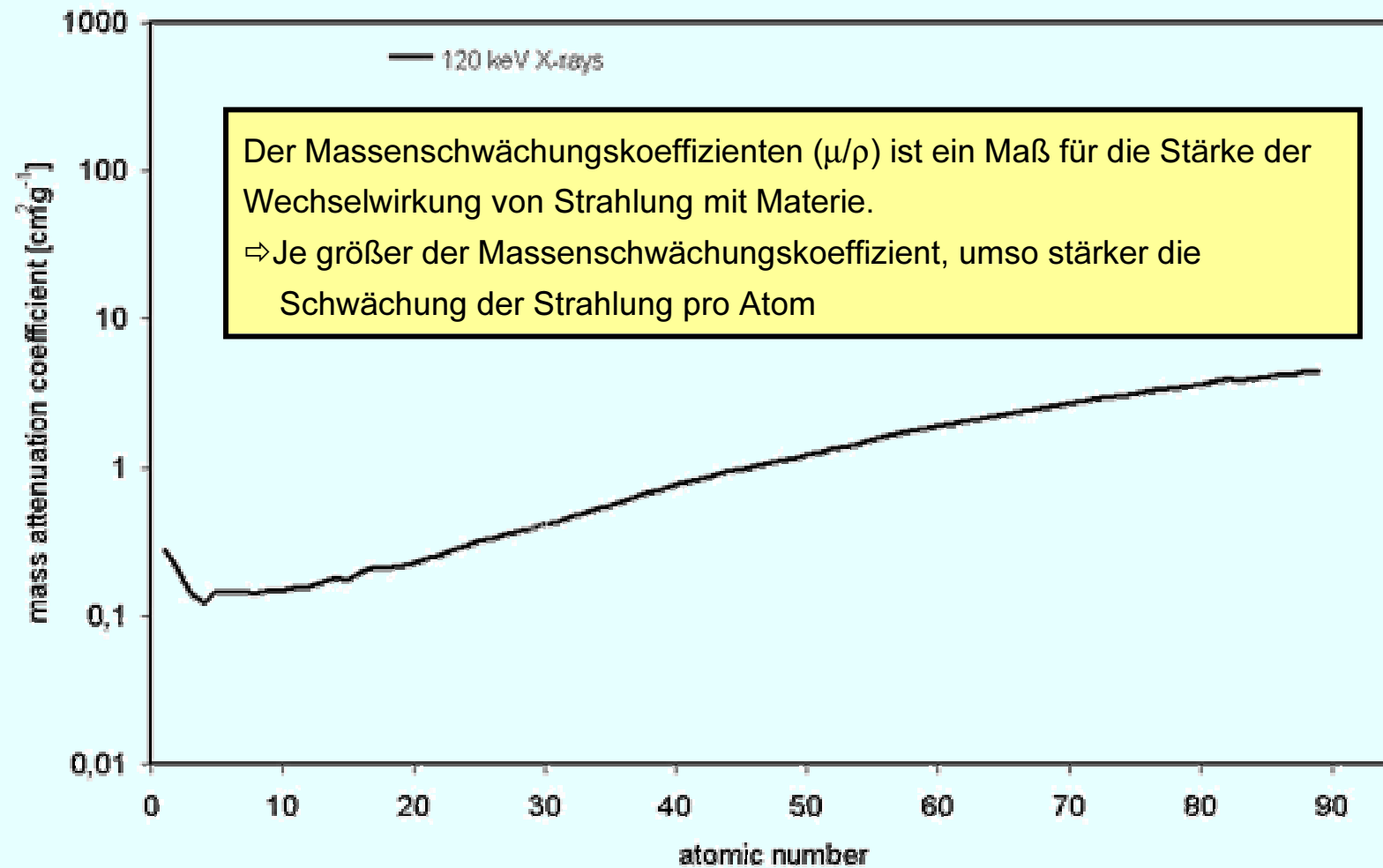
Röntgen- und Gamma-Strahlen

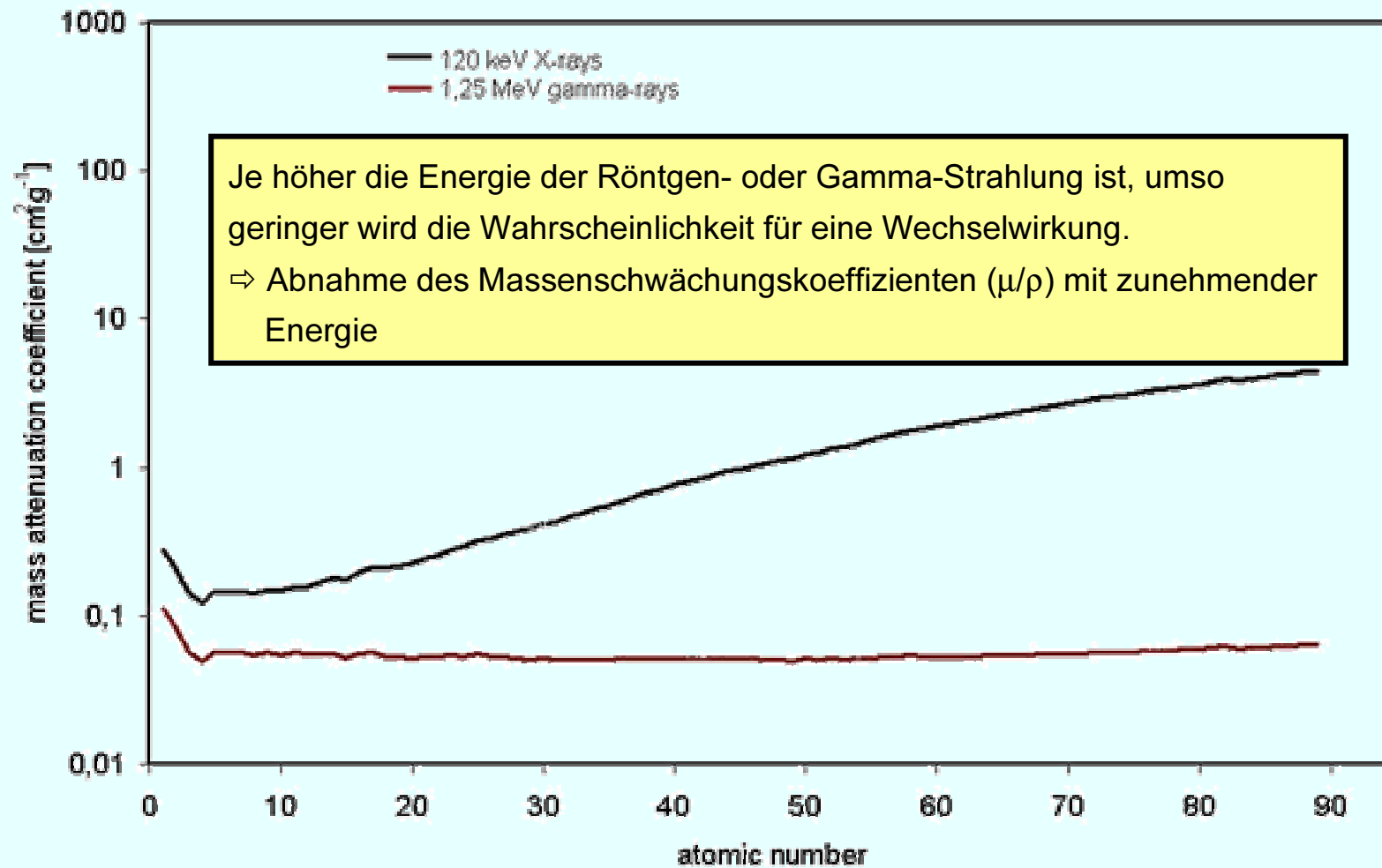
Etwas "Physik": Röntgen- und Gamma-Strahlen wechselwirken mit den Elektronen der Atomkerne hauptsächlich durch

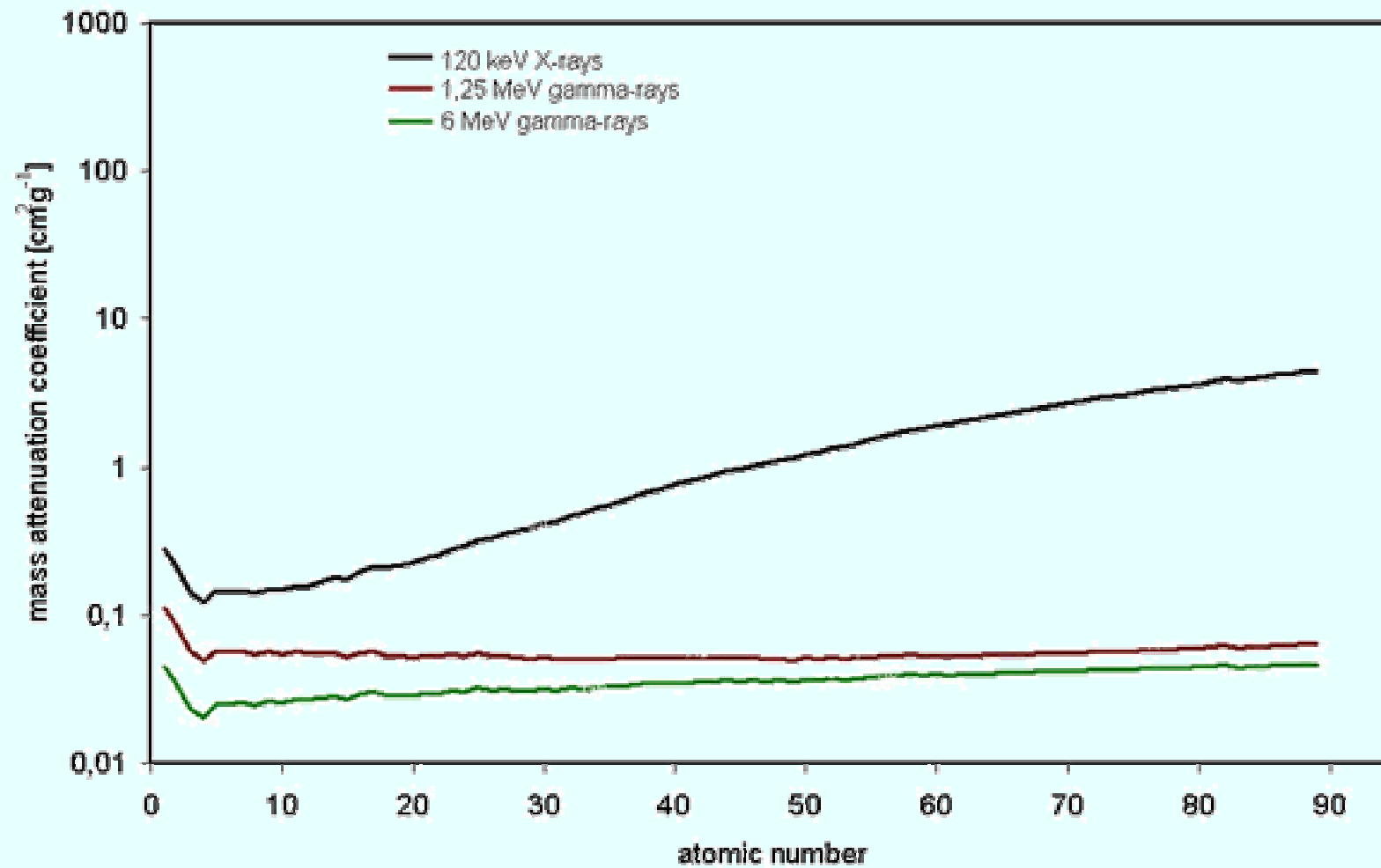
- Photoeffekt,
- Compton Effekt und
- Paarbildung



Je mehr Elektronen ein Atom hat (d. h. je größer Massenzahl des Atoms ist), umso größer ist die Wahrscheinlichkeit für eine Wechselwirkung
⇒ Zunahme des Massschwächungskoeffizienten (μ/ρ) mit zunehmender Massenzahl (atomic number)





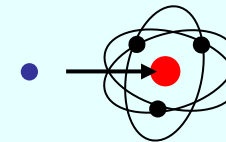


Unterschiede zwischen Röntgen-, Gamma und Neutronen-Radiographie und Tomographie

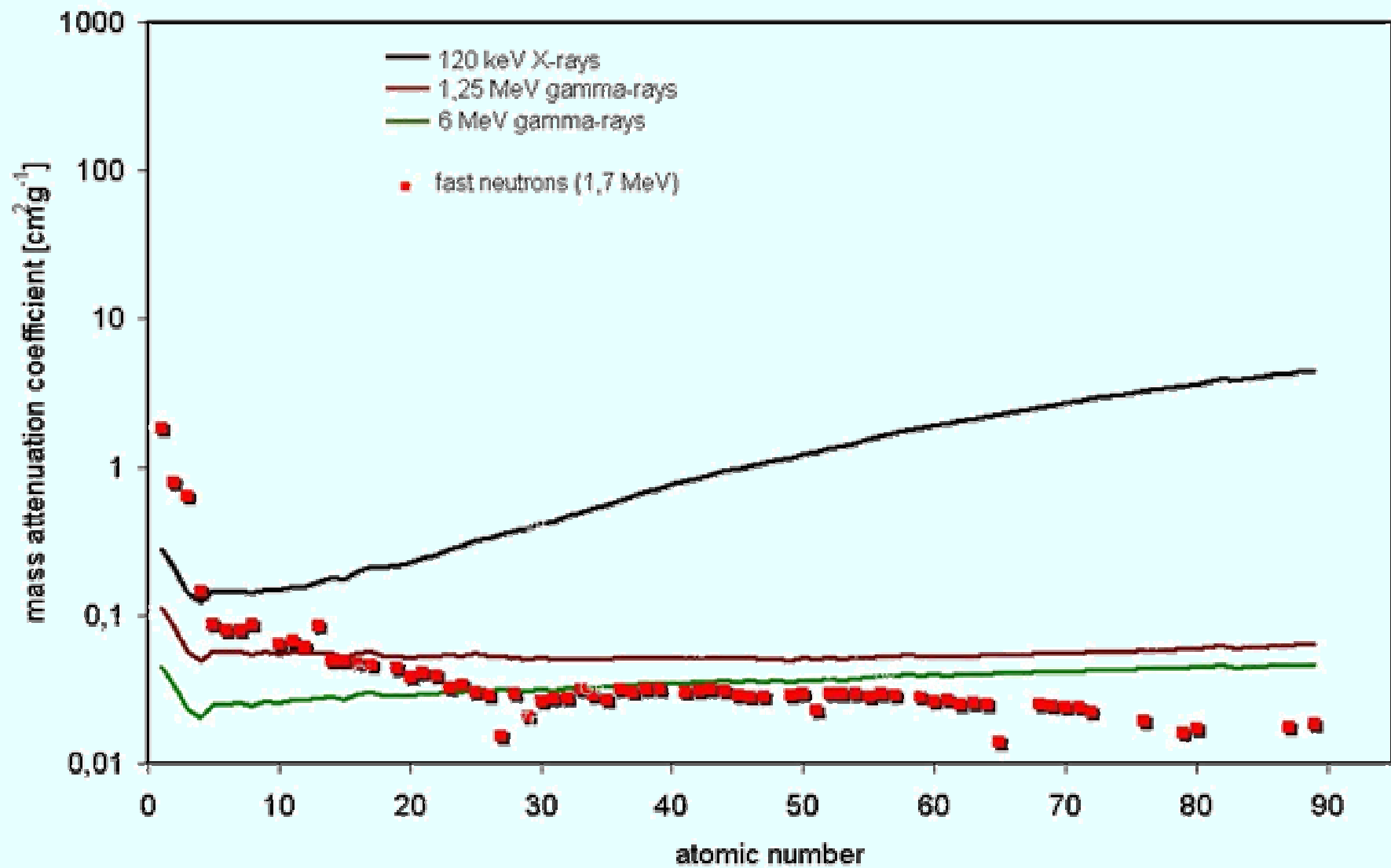
Neutronen

Etwas "Physik": Neutronen wechselwirken mit den Atomkernen hauptsächlich durch

- Kernreaktionen
- elastische Streuung und
- inelastische Streuung



Schnelle Neutronen wechselwirken hauptsächlich durch Streuung.
Die Wahrscheinlichkeit nimmt ab mit zunehmender Massenzahl der Atome.

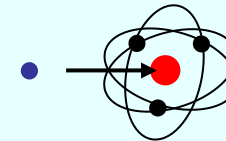


Unterschiede zwischen Röntgen-, Gamma und Neutronen-Radiographie und Tomographie

Neutronen

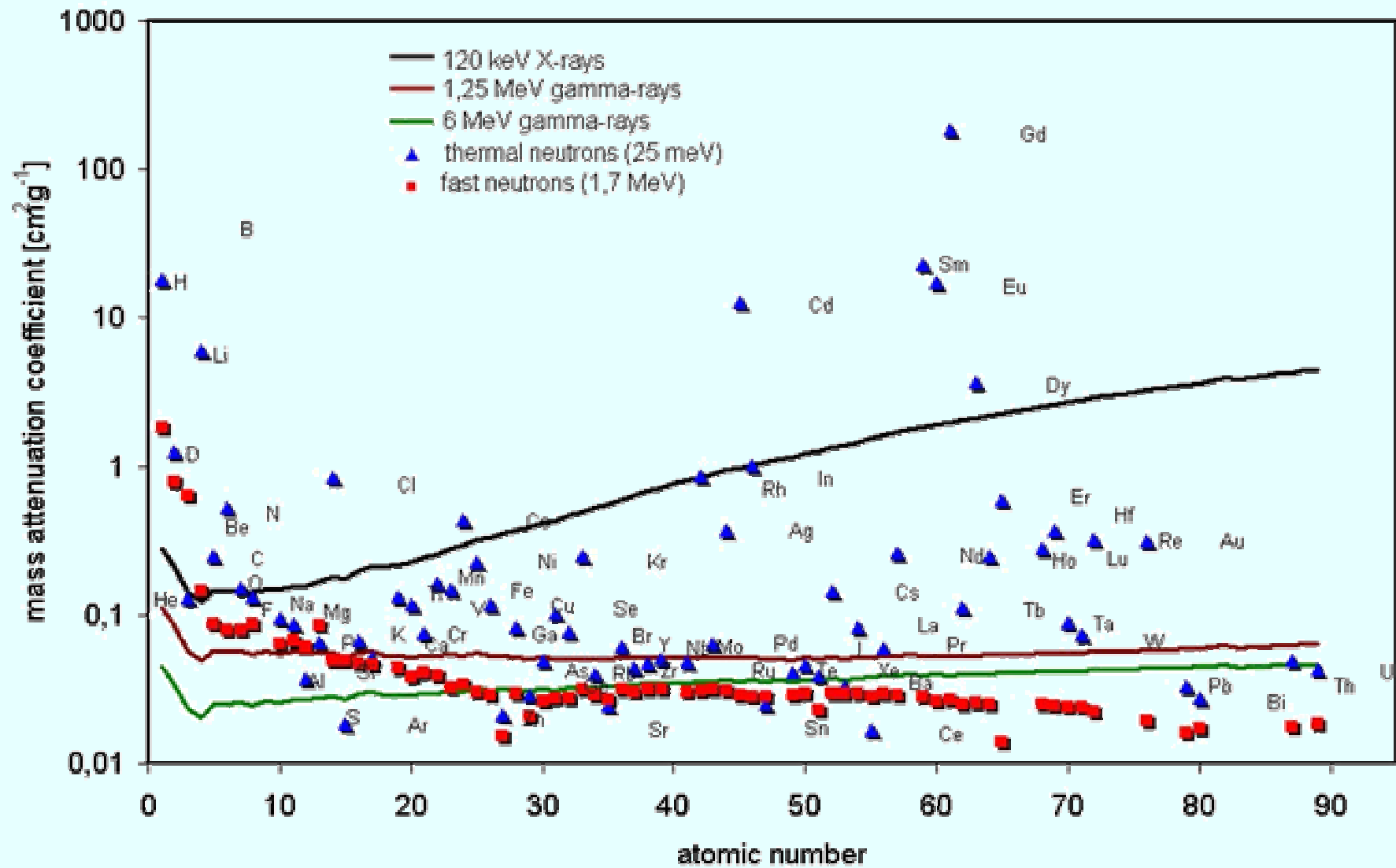
Etwas "Physik": Neutronen wechselwirken mit den Atomkernen hauptsächlich durch

- Kernreaktionen
- elastische Streuung und
- inelastische Streuung



Schnelle Neutronen wechselwirken hauptsächlich durch Streuung.
Die Wahrscheinlichkeit nimmt ab mit zunehmender Massenzahl der Atome.

Thermische Neutronen können auf alle drei Arten wechselwirken.
Die Wahrscheinlichkeiten hängen ab vom inneren Aufbau der Atomkerne und folgen keiner einfachen Regelmäßigkeit.



Thickness of materials: 1 cm

Neutrons

thermal neutrons ($E = 25 \text{ meV}$)

H ₂ O	D ₂ O	Mg	Al
Cr	Mn	Fe	Ni
Cu	Zn	Nb	Mo
Cd	W	Pb	Bi

fast (fission) neutrons ($E = 1.7 \text{ MeV}$)

H ₂ O	D ₂ O	Mg	Al
Cr	Mn	Fe	Ni
Cu	Zn	Nb	Mo
Cd	W	Pb	Bi

X-rays and gamma-rays

X-rays ($E = 120 \text{ keV}$)

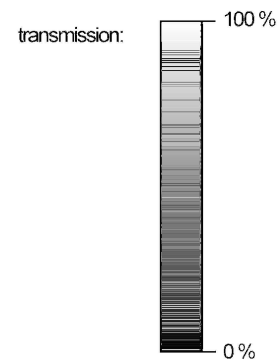
H ₂ O	D ₂ O	Mg	Al
Cr	Mn	Fe	Ni
Cu	Zn	Nb	Mo
Cd	W	Pb	Bi

gamma-rays ($E = 1.25 \text{ MeV}$)

H ₂ O	D ₂ O	Mg	Al
Cr	Mn	Fe	Ni
Cu	Zn	Nb	Mo
Cd	W	Pb	Bi

gamma-rays ($E = 6 \text{ MeV}$)

H ₂ O	D ₂ O	Mg	Al
Cr	Mn	Fe	Ni
Cu	Zn	Nb	Mo
Cd	W	Pb	Bi



Thickness of materials: 4 cm

Neutrons

thermal neutrons ($E = 25 \text{ meV}$)

H ₂ O	D ₂ O	Mg	Al
Cr	Mn	Fe	Ni
Cu	Zn	Nb	Mo
Cd	W	Pb	Bi

fast (fission) neutrons ($E = 1.7 \text{ MeV}$)

H ₂ O	D ₂ O	Mg	Al
Cr	Mn	Fe	Ni
Cu	Zn	Nb	Mo
Cd	W	Pb	Bi

X-rays and gamma-rays

X-rays ($E = 120 \text{ keV}$)

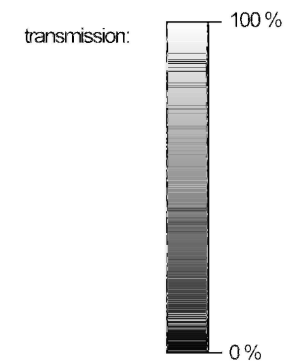
H ₂ O	D ₂ O	Mg	Al
Cr	Mn	Fe	Ni
Cu	Zn	Nb	Mo
Cd	W	Pb	Bi

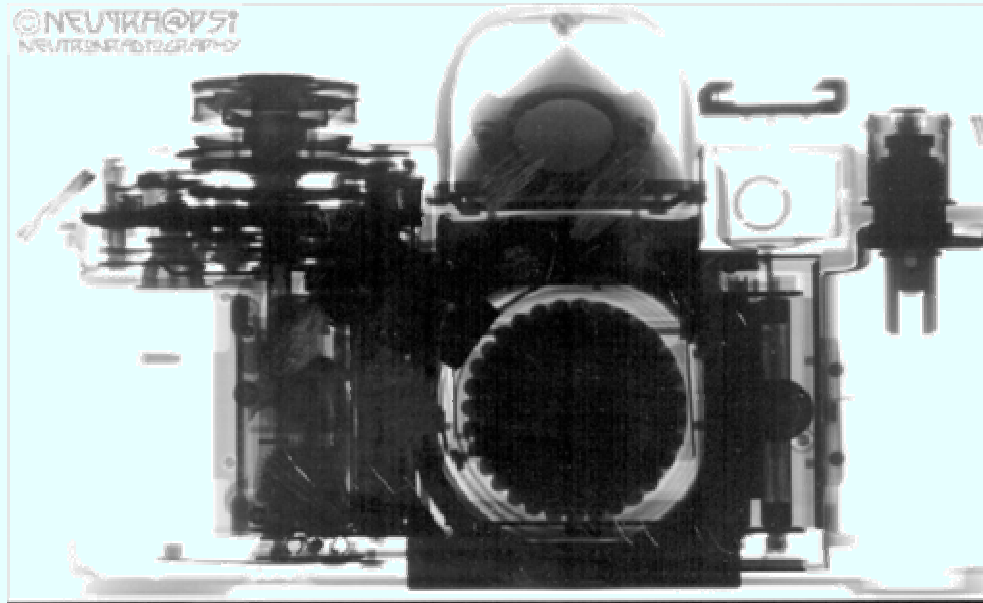
gamma-rays ($E = 1.25 \text{ MeV}$)

H ₂ O	D ₂ O	Mg	Al
Cr	Mn	Fe	Ni
Cu	Zn	Nb	Mo
Cd	W	Pb	Bi

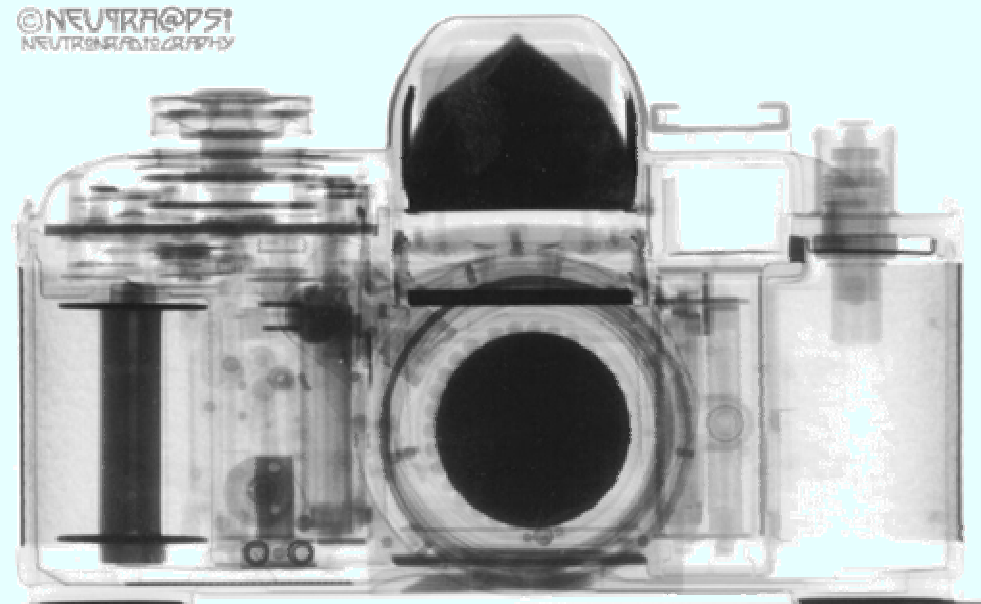
gamma-rays ($E = 6 \text{ MeV}$)

H ₂ O	D ₂ O	Mg	Al
Cr	Mn	Fe	Ni
Cu	Zn	Nb	Mo
Cd	W	Pb	Bi

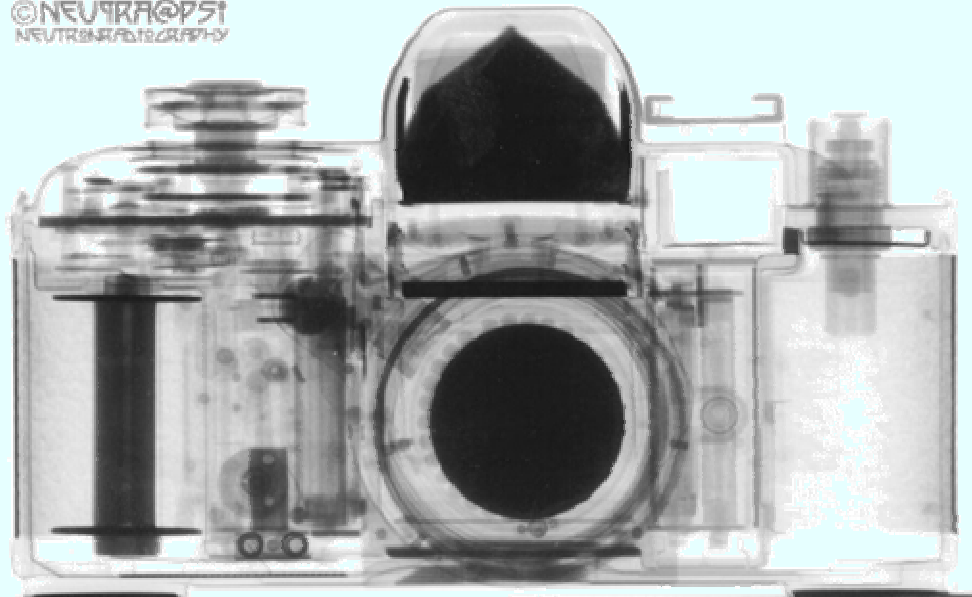




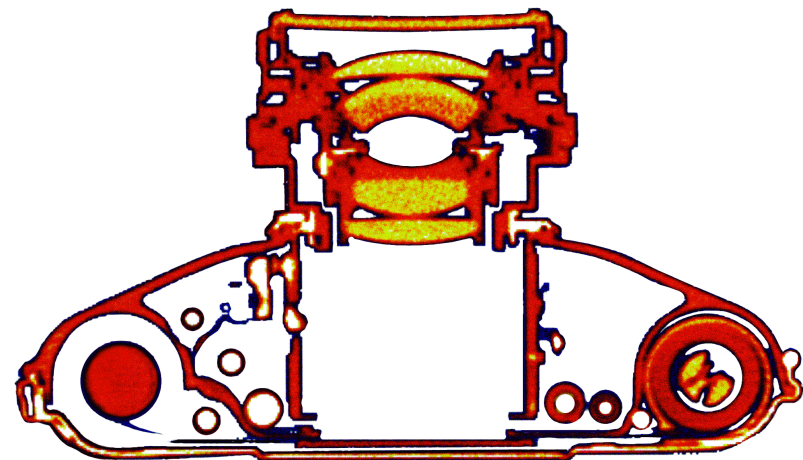
Röntgen-Strahlen (PSI)



Thermische Neutronen (PSI)



Thermische Neutronen (PSI)

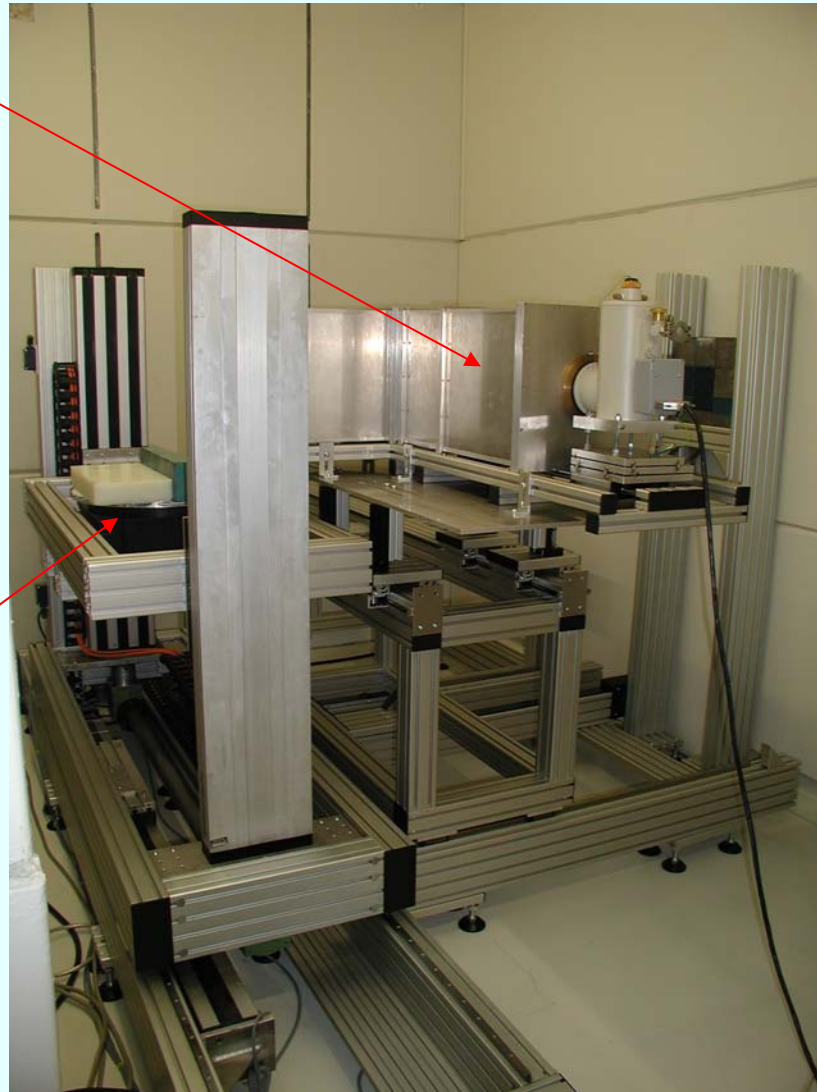


Schnelle Neutronen (FRM-I)

Radiographie und Tomographie mit Spalt-Neutronen

Detektorsystem

Proben-
Manipulator



NECTAR
(**NE**utron **C**omputerized
Tomography **A**nd **R**adiography)

Technische Daten:

Maximale Probedimension:

80 cm x 80 cm x 80 cm
400 kg

Neutronenstrahl:

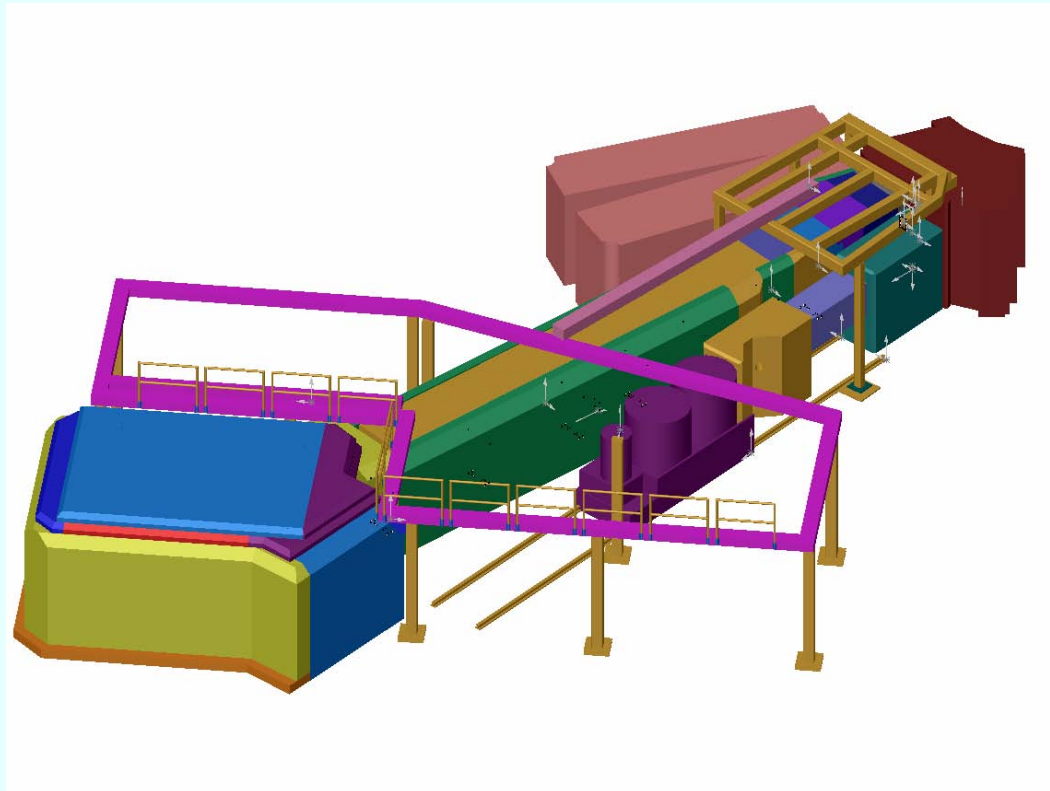
max. $6.4 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

Typische Messzeit für

Radiographie: wenige Minuten
Tomographie: mehrere Stunden

Auflösung: 0.5 mm - 1 mm

Radiographie und Tomographie mit thermischen/kalten Neutronen



ANTARES

(Advanced Neutron Tomography
And Radiography Experimental
System)

Technische Daten:

Maximale Probedimension:

100 cm x 100 cm x 100 cm
500 kg

Neutronenstrahl:

max. $1 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
auf $40 \times 40 \text{ cm}^2$

Typische Messzeit für

Radiographie: einige Sekunden

Tomographie: einige Stunden

Auflösung: 0.1 mm – 0.3 mm

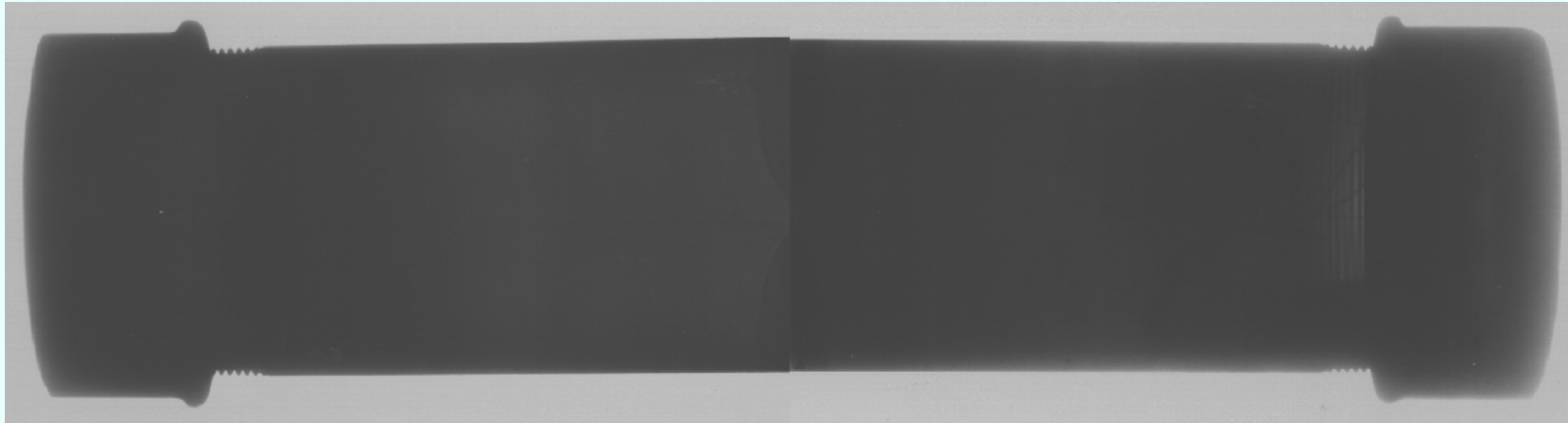
Einige technische Beispiele

Ein schon älteres Beispiel:

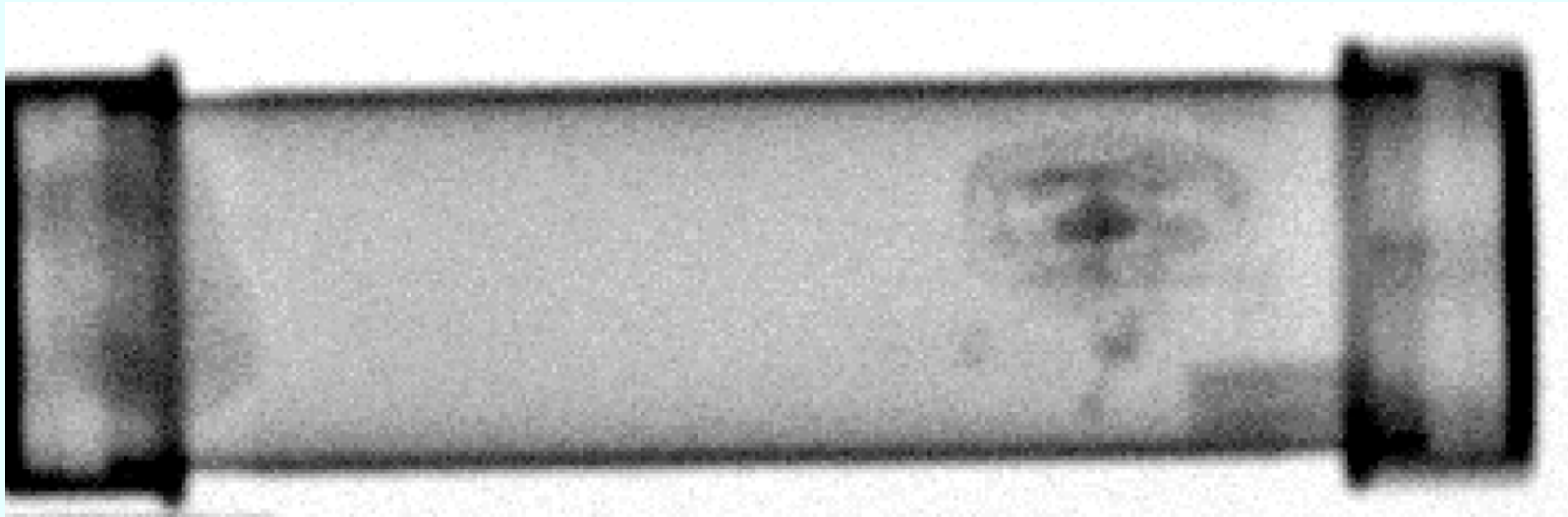


Diese Rohrbombe hat uns das Bundeskriminalamt zum Ausprobieren gebaut – ohne Sprengstoff.

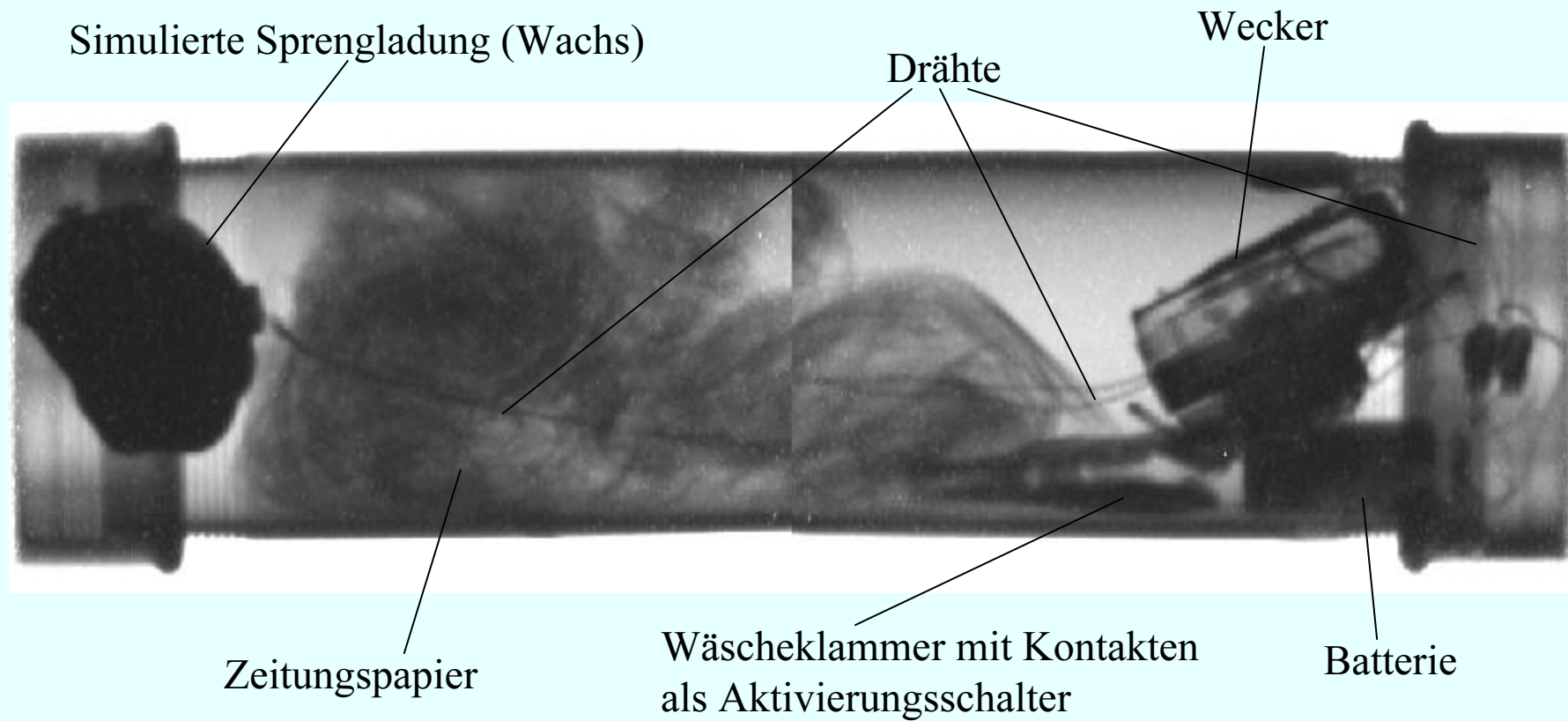
Das Stahlrohr ist 8 mm dick.



Mit 150 kV-Röntgenstrahlen ist die Wandung kaum zu durchdringen.

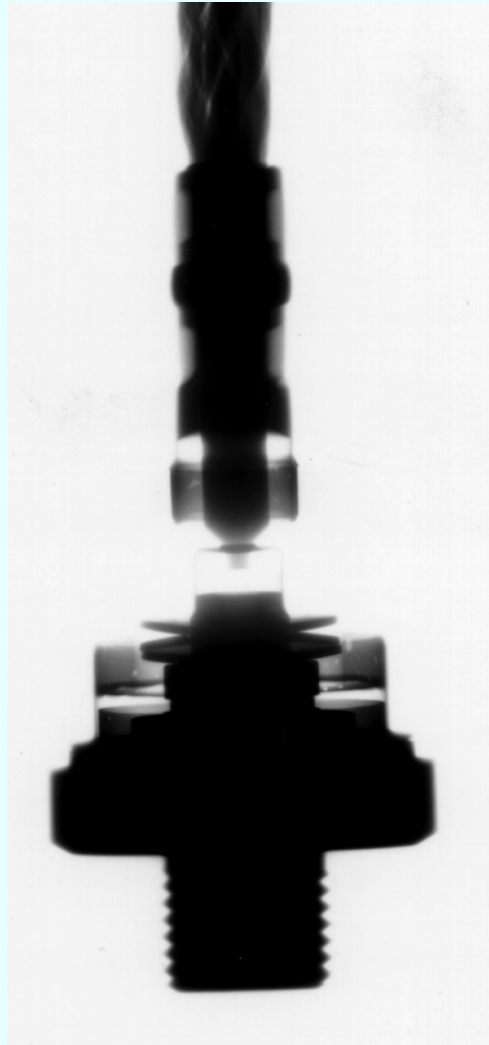


Für harte Gammastrahlung (Kobalt-60, 1,2 MeV)
wird zwar das Stahlrohr transparent, jedoch auch der Inhalt.



Mit thermischen Neutronen sieht man umso mehr!

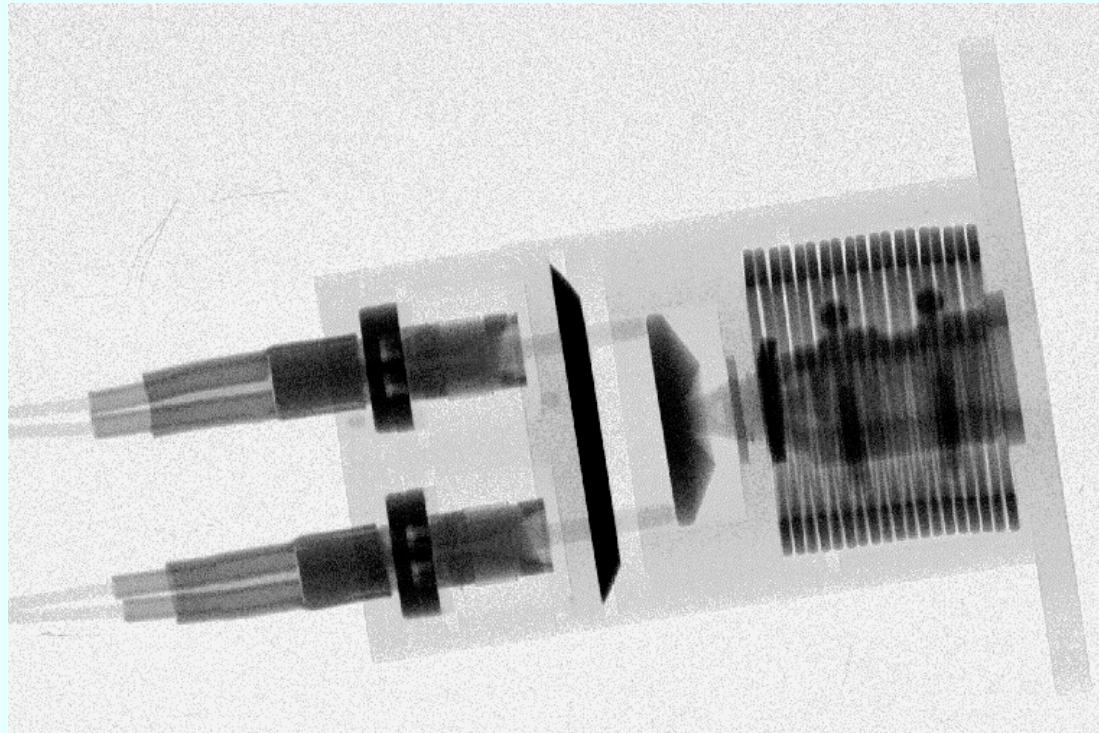
Vergleich von Röntgenstrahlen und Neutronen bei einer Hochstrom-Diode



Die Metallteile sind für Röntgenstrahlen undurchdringlich, während die keramischen Komponenten nahezu gar keinen Kontrast liefern.

Die Neutronen-Radiographie liefert ein klares Bild aller internen Details.

Zerstörungsfreie Untersuchung der Montage von Raumfahrt-Komponenten

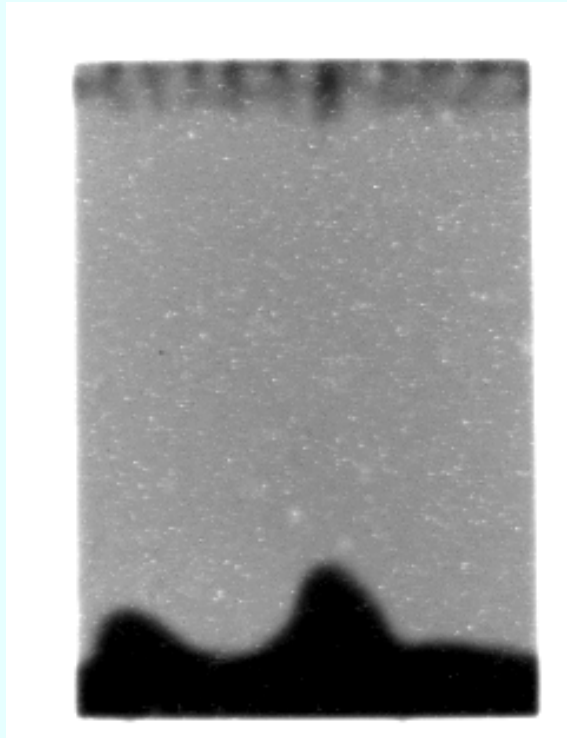


Ein sogenannter ‘Non-Explosive Pyro’:

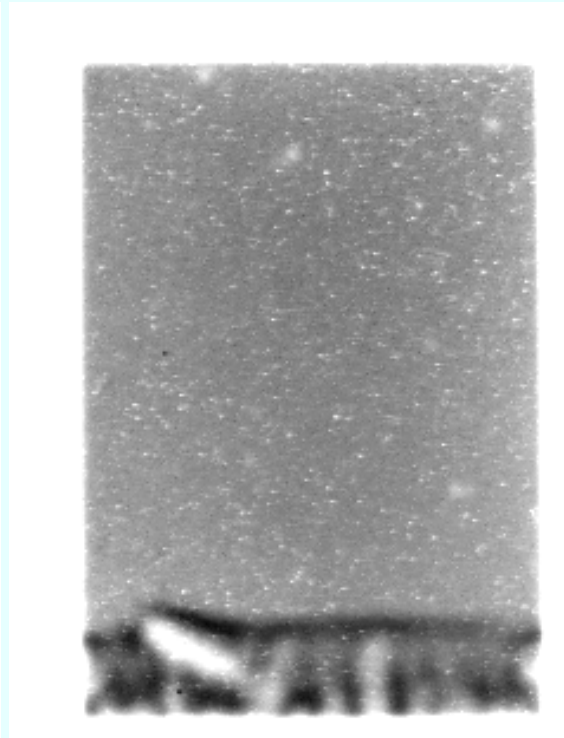
Der federgespannte Bolzen wird von einer Plastik-Wippe in der Mitte gehalten. Eines von zwei unabhängigen Heizelementen genügt, um einen der Stifte zu schmelzen, die die Wippe in Position halten.

Der korrekte Zusammenbau dieses Bauelements kann mit Röntgenstrahlen nicht untersucht werden.

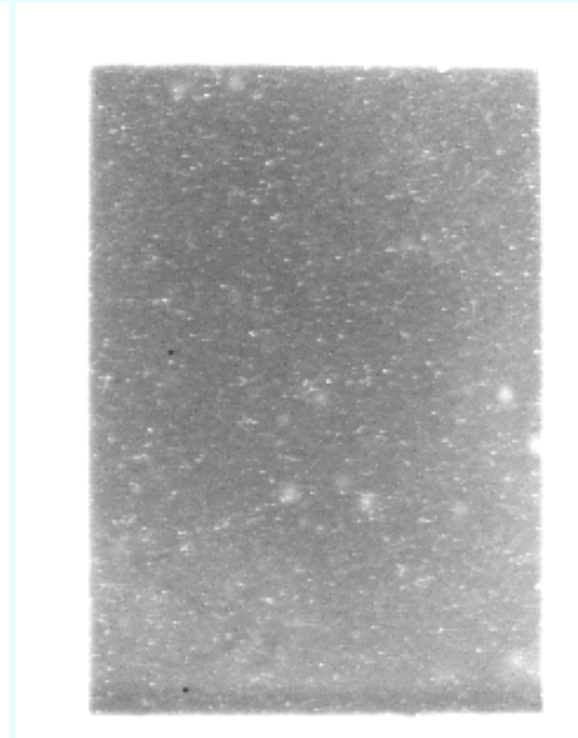
Untersuchung des Eindringens von Hydrophobierungsmitteln für Beton



Wasser

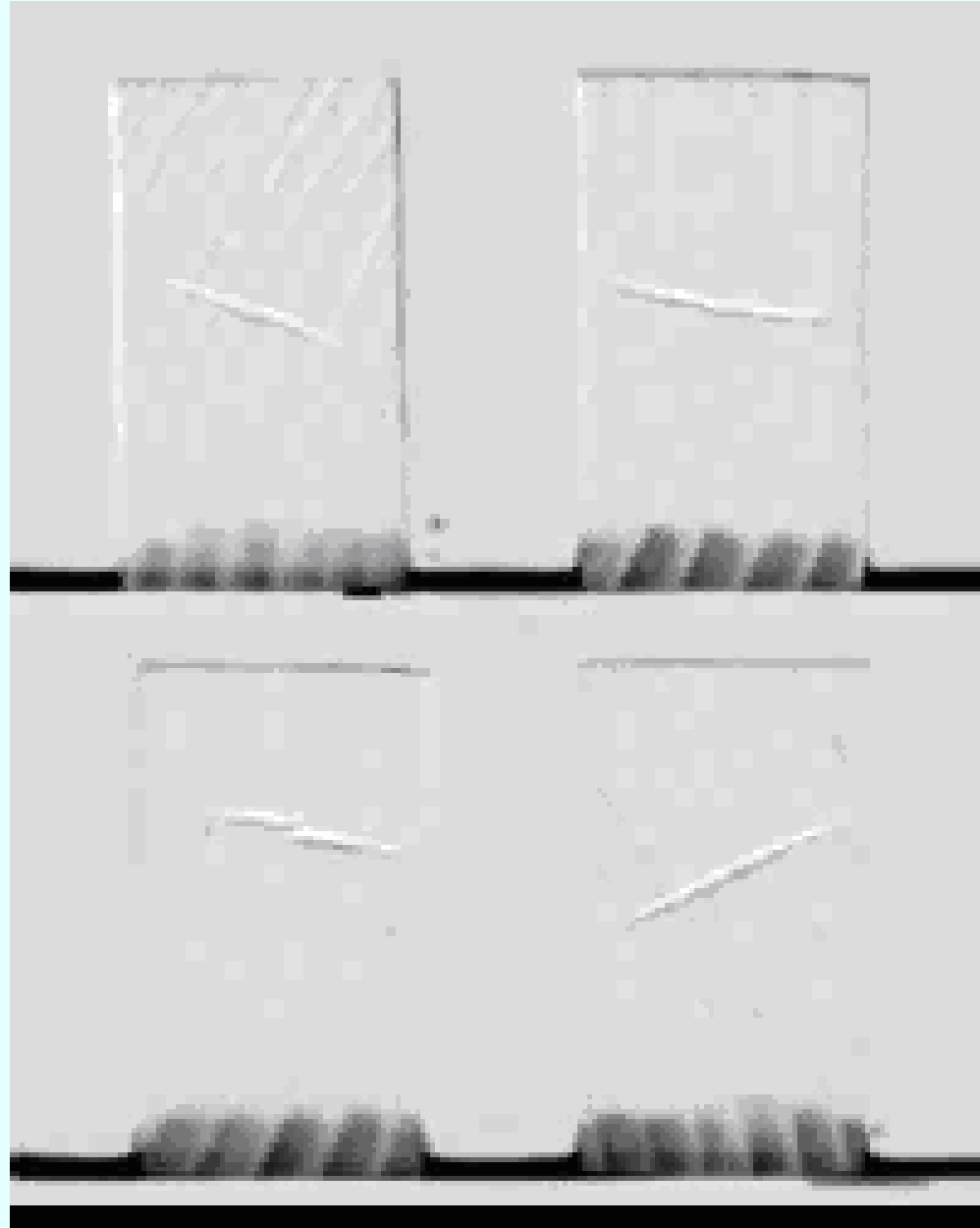


Mit Lösungsmittel

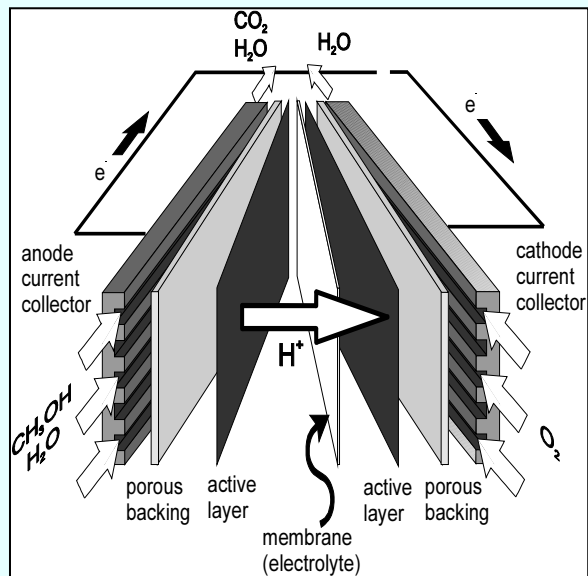


Als Wasser-
Emulsion

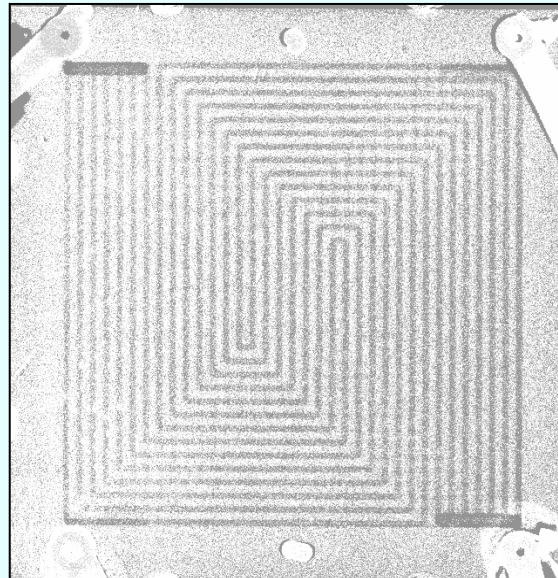
Aufsteigen
von Wasser
in Holzproben
(Differenzbilder)
(Messung PSI)



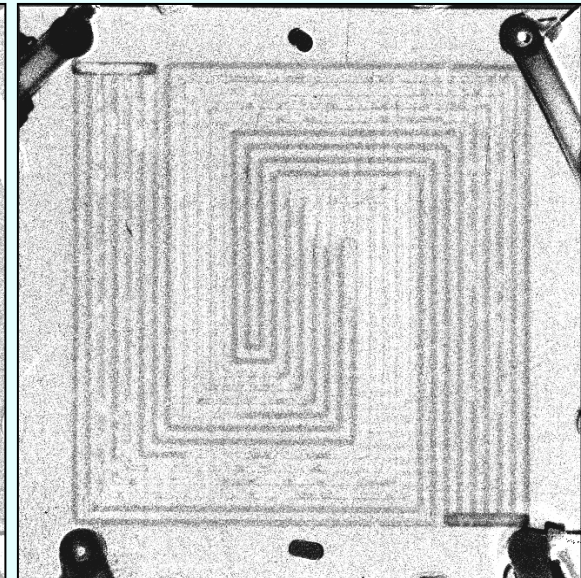
Untersuchung einer Direkt Methanol Brennstoffzelle [DMFC] (zur Stromerzeugung) während des Betriebes (Messung PSI)



Aufbau der Brennstoffzelle



Zelle mit Methanol gefüllt

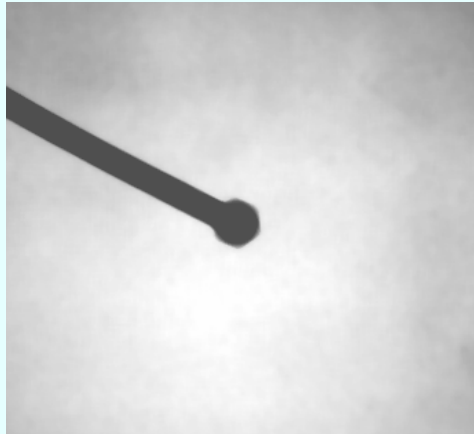


**Während des Betriebes:
CO₂ hat das Methanol
teilweise verdrängt**

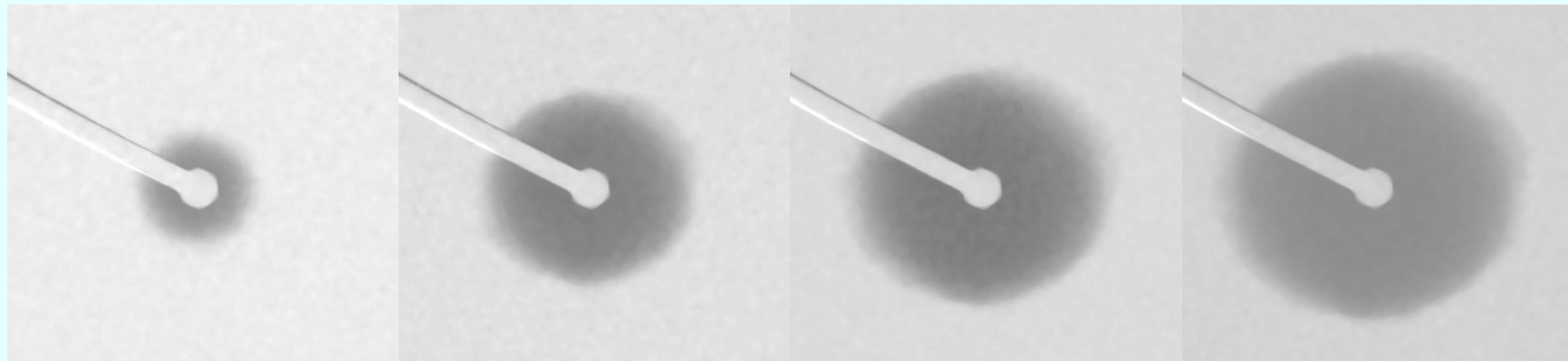
Der Neutronenstrahl wird senkrecht zur Bildebene während der Radiographiemessungen angelegt

Injektion von Harz in Kohlefaser-Verbundwerkstoff

(Messung PSI)

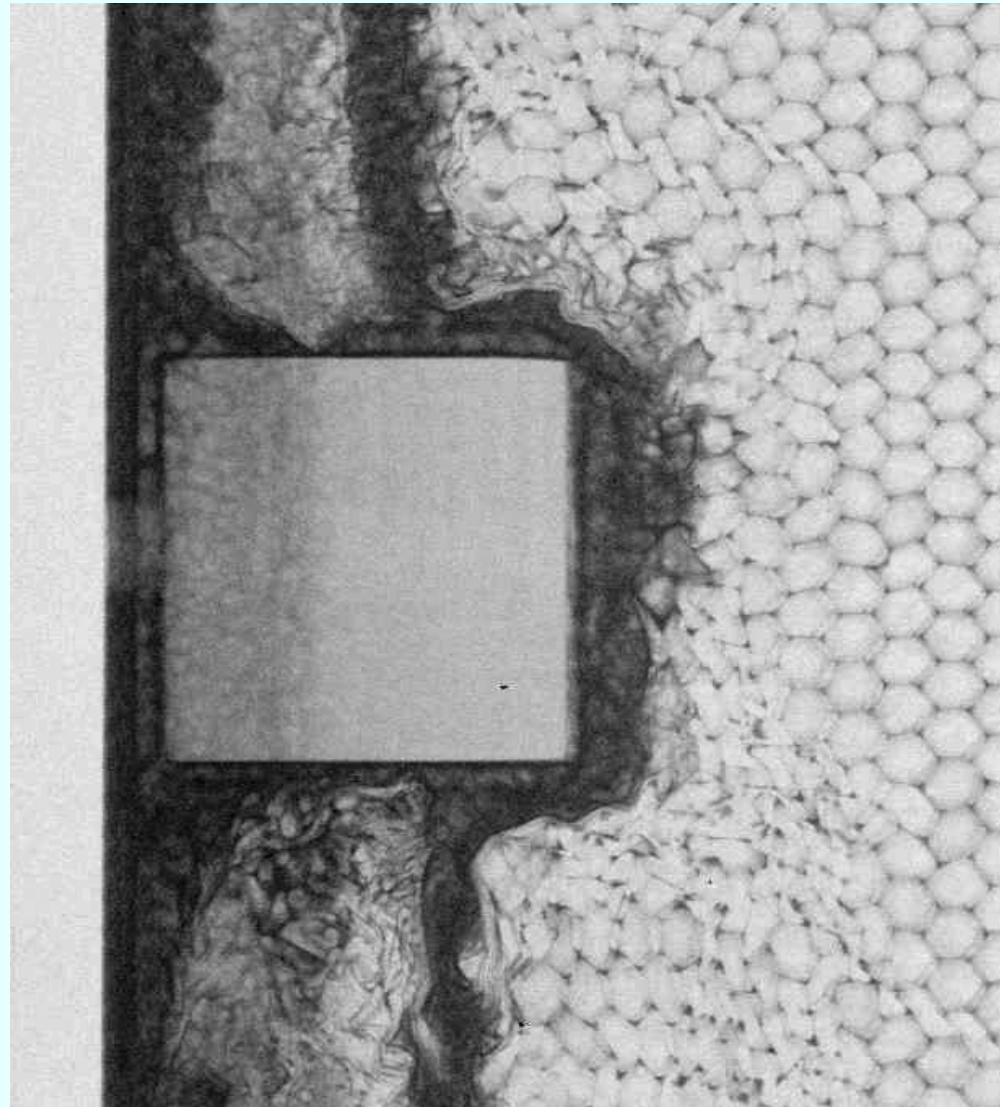


Anfangsbild des Injektors



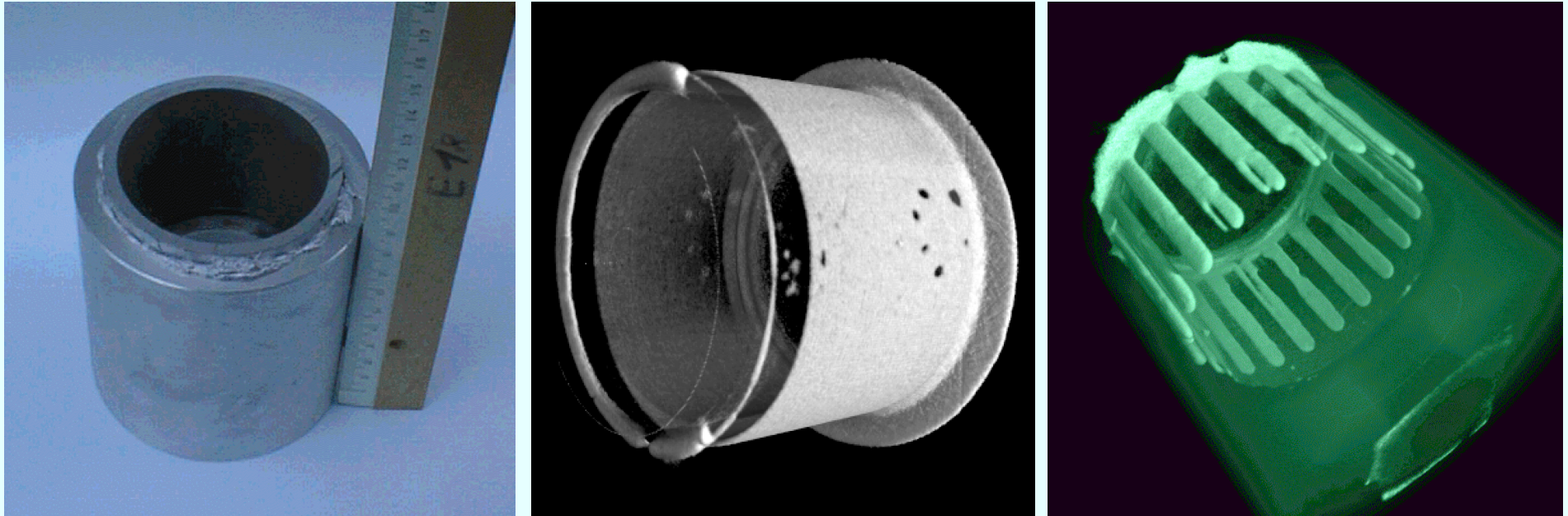
Differenzbilder

Die Aufnahmen erfolgten durch zentimeterdicke Metallwandungen der Preßform.



Hochauflösende Radiographie eines Verbundmaterials (Honeycomb) aus der Luftfahrt-Industrie

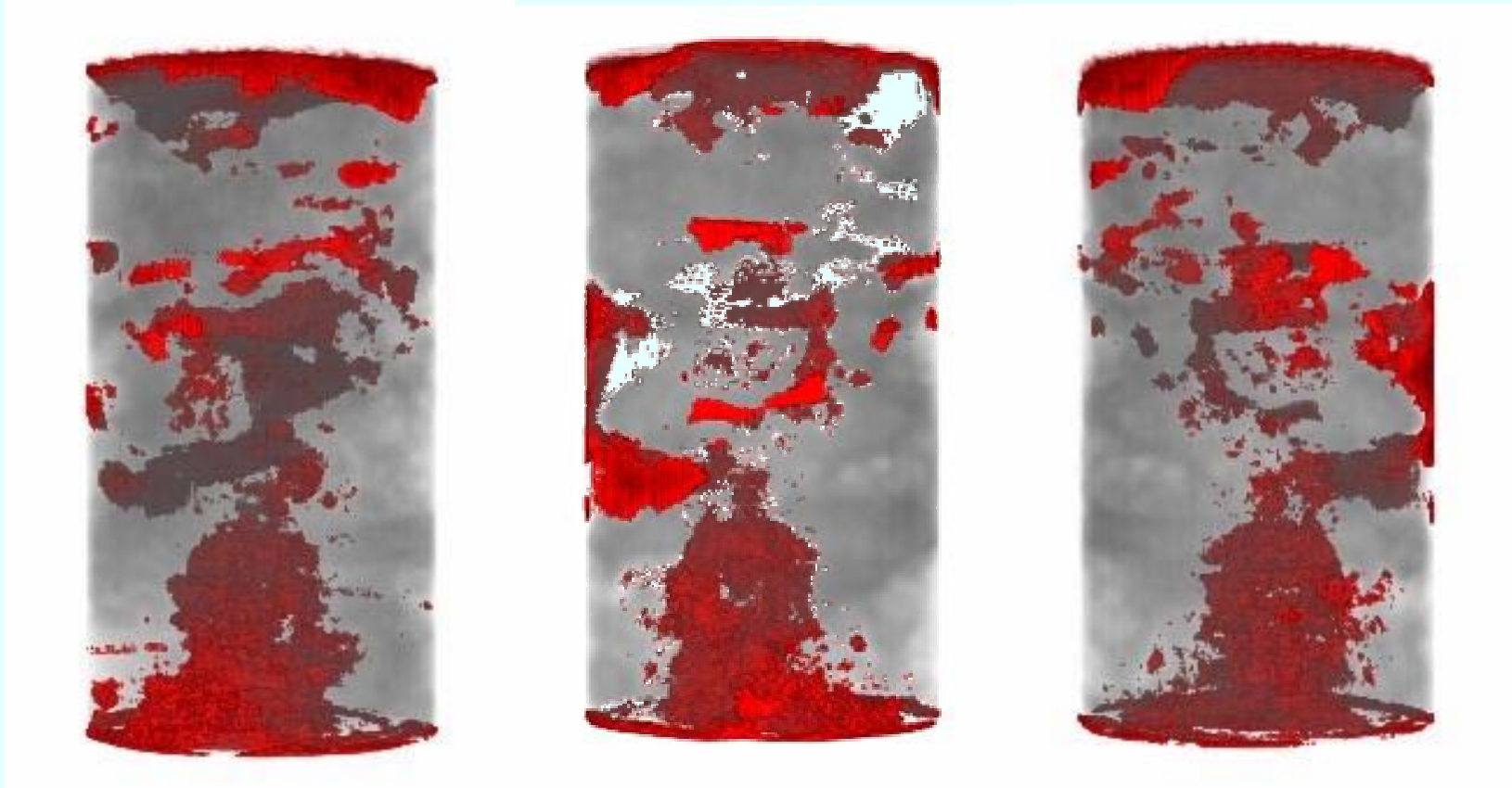
Neutronen-Tomographie



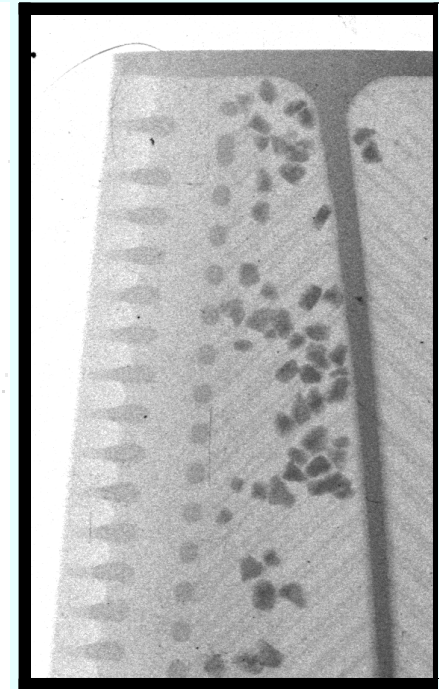
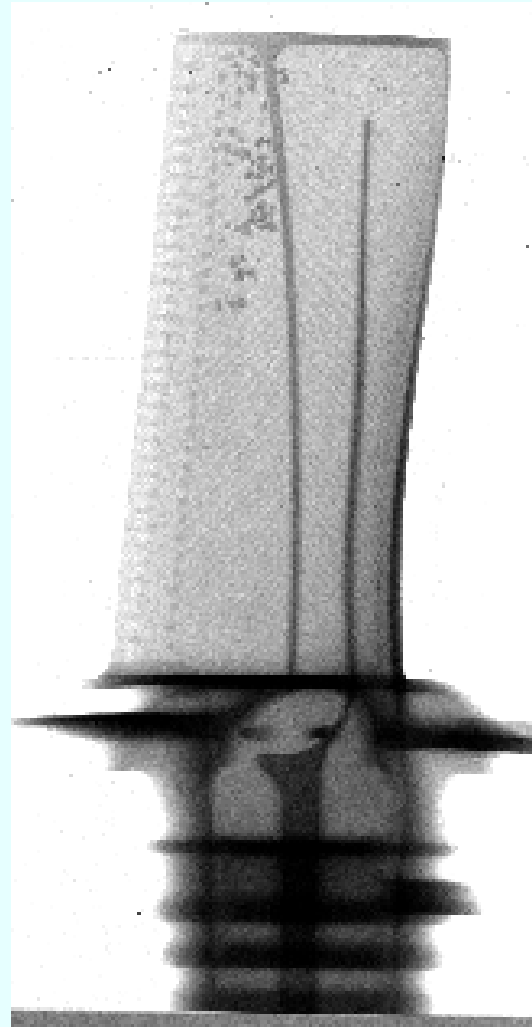
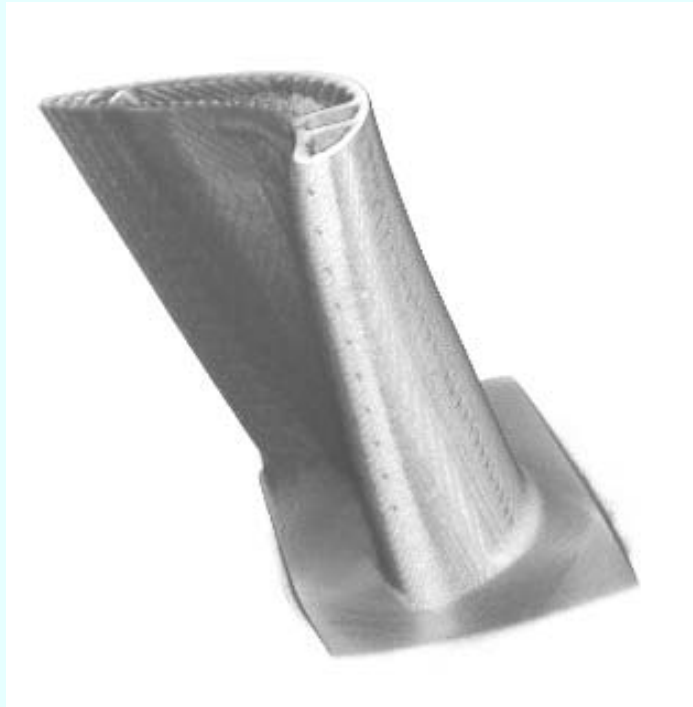
Untersuchung von Klebeverbindungen:

Zwei Aluminium-Zylinder ineinandergeklebt.
Das Aluminium wird durch Bildverarbeitung transparent gesetzt.

Untersuchung von Beton-Bohrkernen aus einem Wasserwehr

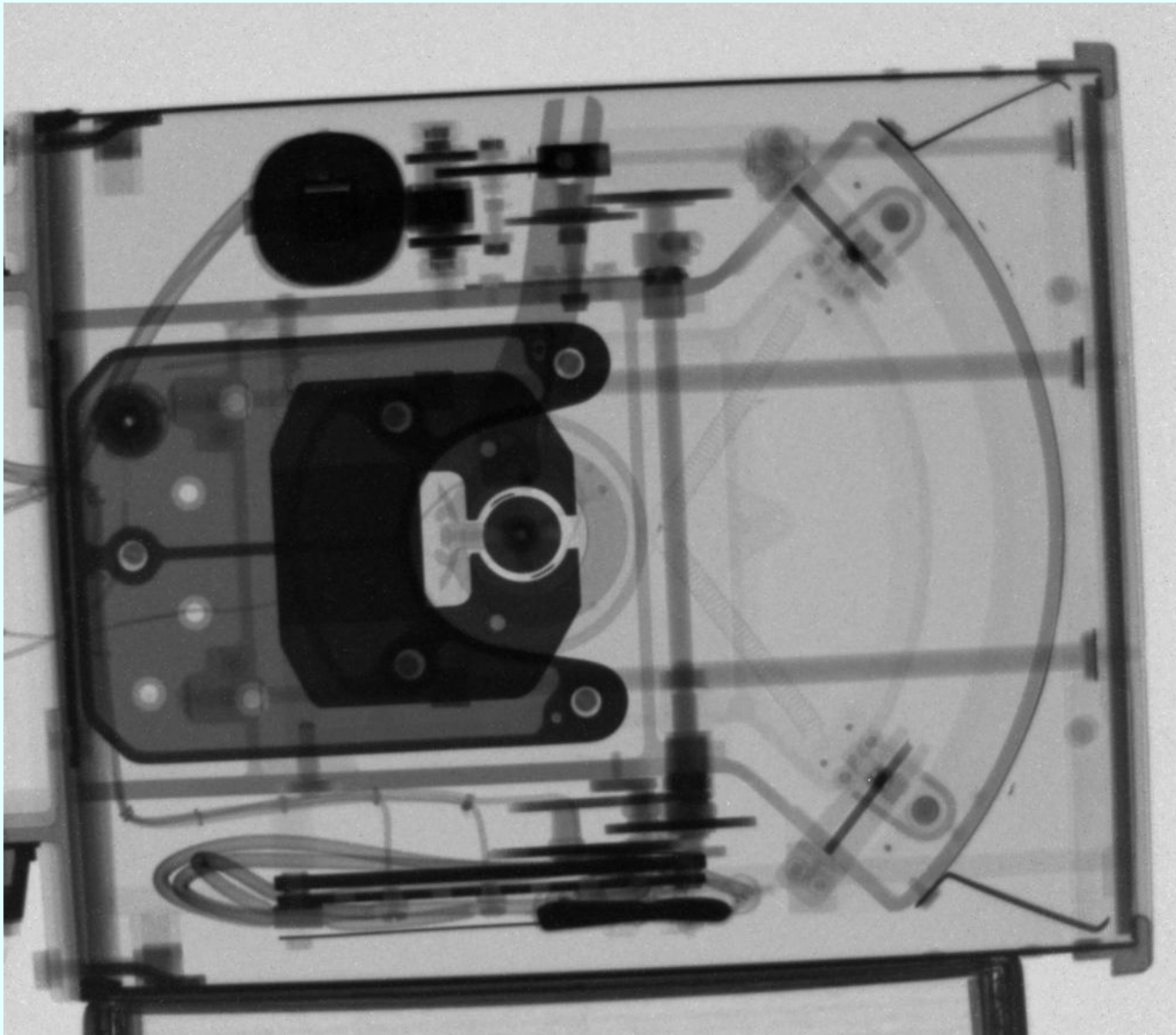


Durch Bildverarbeitung wurden die Lufteinschlüsse massiv dargestellt, der Beton transparent.



Turbinenschaufel: Tomographie und Radiographie

(Messung PSI)



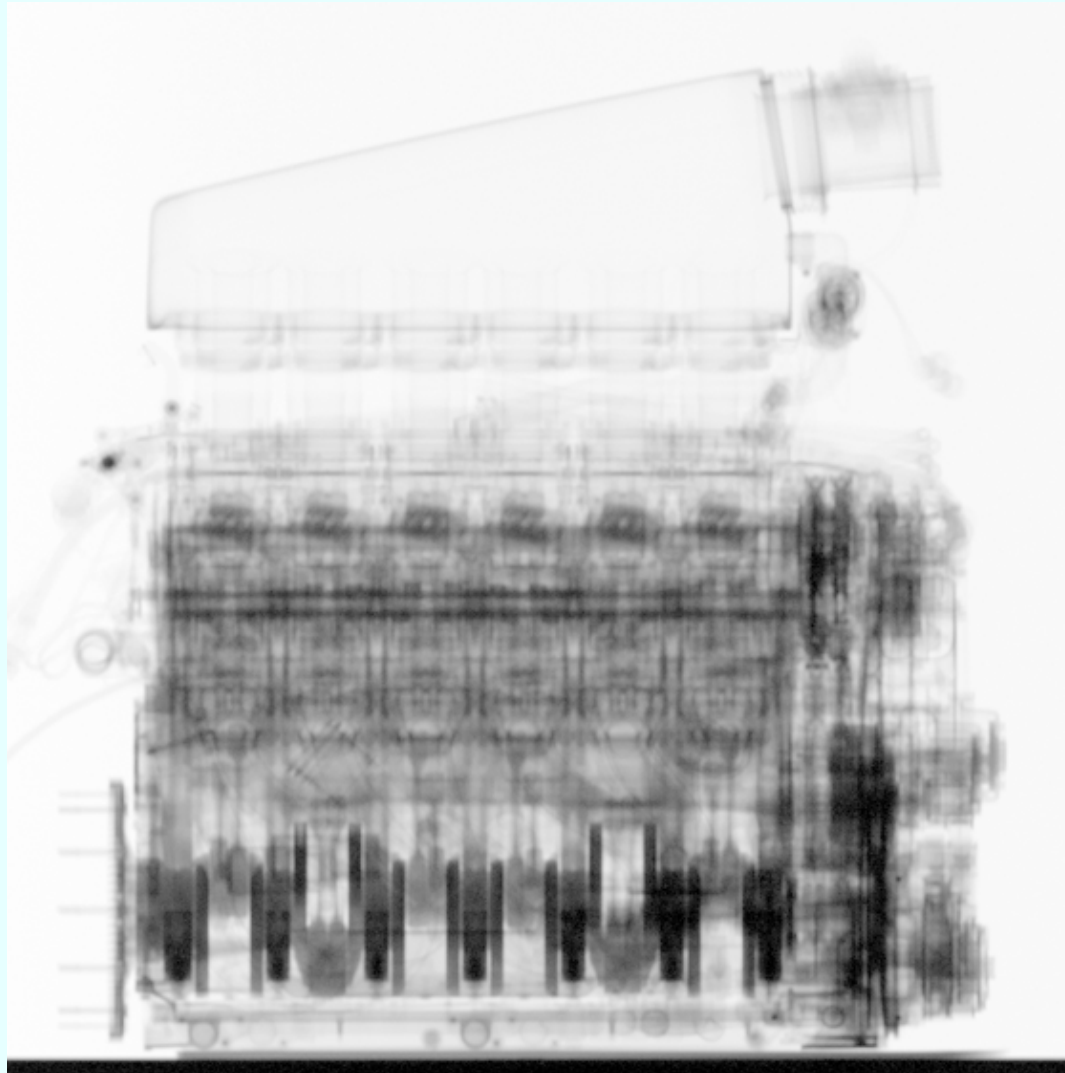
Eine der ersten Radiographien am FRM-II: Ein Fernthermometer.
Deutlich sichtbar: Kabelbinder, Isolierungen, Plastik-Zahnräder.

Messung bewegter Vorgänge:

Dynamische Radiographie –

oder besser „Radioskopie“

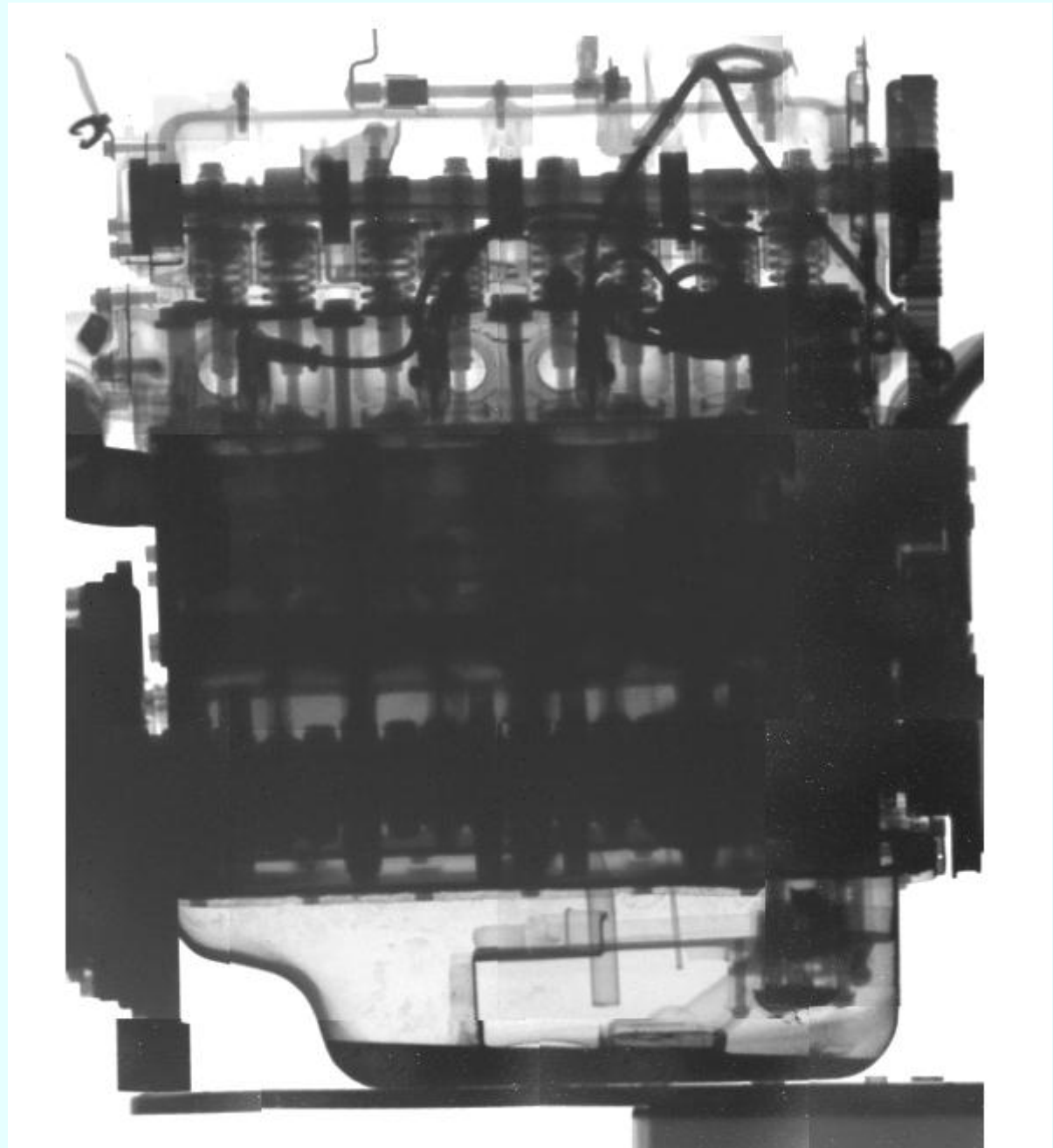
Wie ist es mit einem bewegten Motor?



Mit harten Gammastrahlen sieht man glatt hindurch.
Aber nicht wirklich hinein...

Mit Neutronen sieht
man Öl und
Dichtungen...

(Ja,
das ist nicht der selbe Motor!)



Problem:

Die Aufnahmezeit für solch eine Radiographie beträgt selbst am FRM-II etwa eine halbe Sekunde.

Wie macht man scharfe Bilder von einem bewegten Motor, der bei 1000 U/min also mehr als 15 Umdrehungen in einer Sekunde macht?

Lösung:

Mit Mehrfachbelichtung!

Wir verwenden eine hochempfindliche Kamera mit gate-barem Bildverstärker, der als superschneller elektronischer Verschuß dient.

Mit einem Sensor auf der Nockenwelle können wir den Verschuß immer bei der gleichen Kolbenstellung für eine tausendstel Sekunde öffnen.

Nach tausend Umdrehungen (Viertakter!) haben wir unsere halbe Sekunde Belichtungszeit und lesen das Bild aus.

Aus vielen Bildern zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten wird ein Film zusammengestellt.

Dieser BMW-Motor aus laufender Produktion wurde elektrisch fremd-angetrieben und mit unseren Kollegen am ILL Grenoble gemessen.

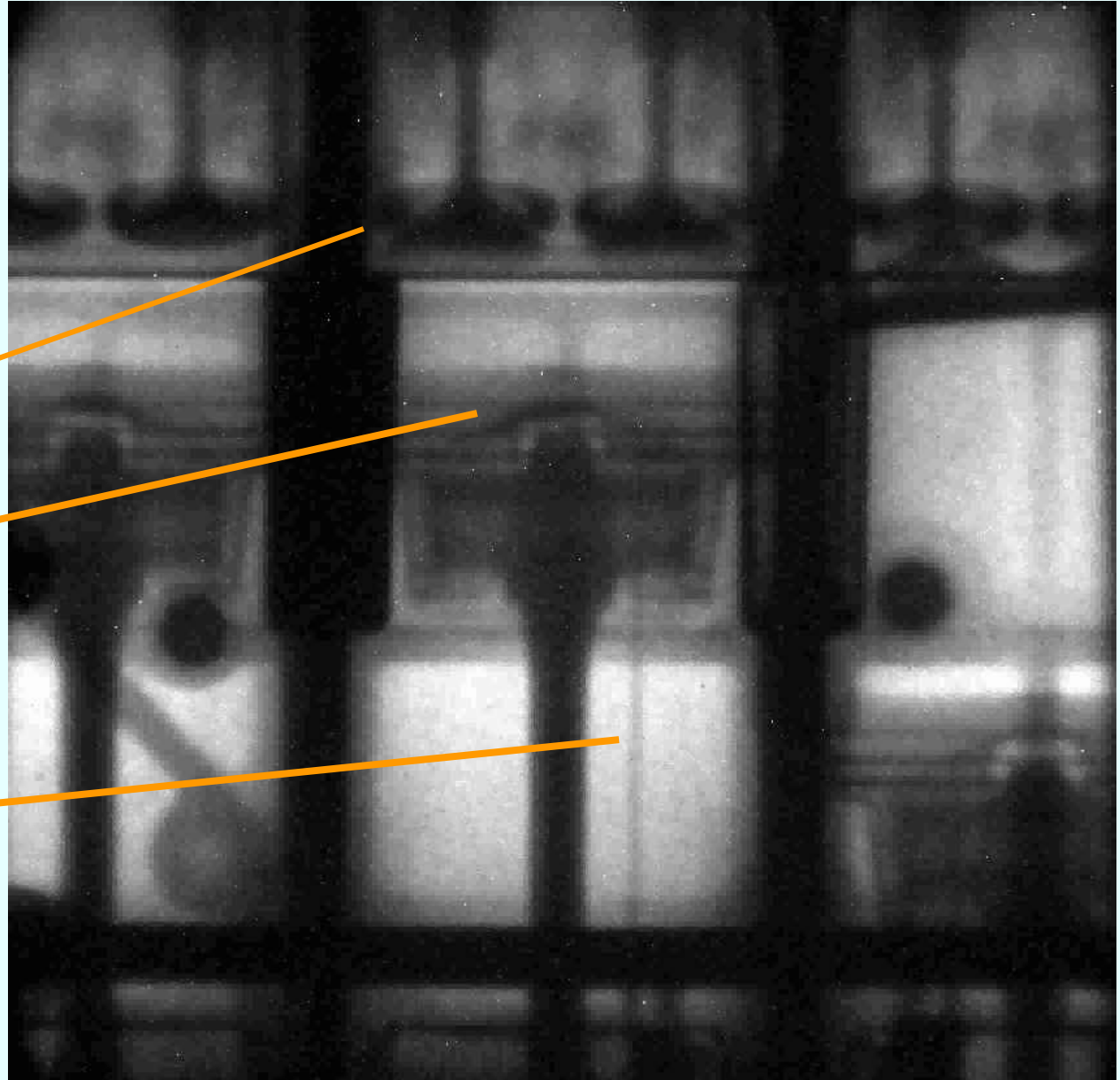


Im Film sieht man
erstmals die
Ölkühlung der
Kolben im Betrieb!

Ventile
(je zwei hintereinander)

Öl breitet sich am
Kolbenboden aus

Ölstrahl wird von unten
an den Kolbenboden
gespritzt

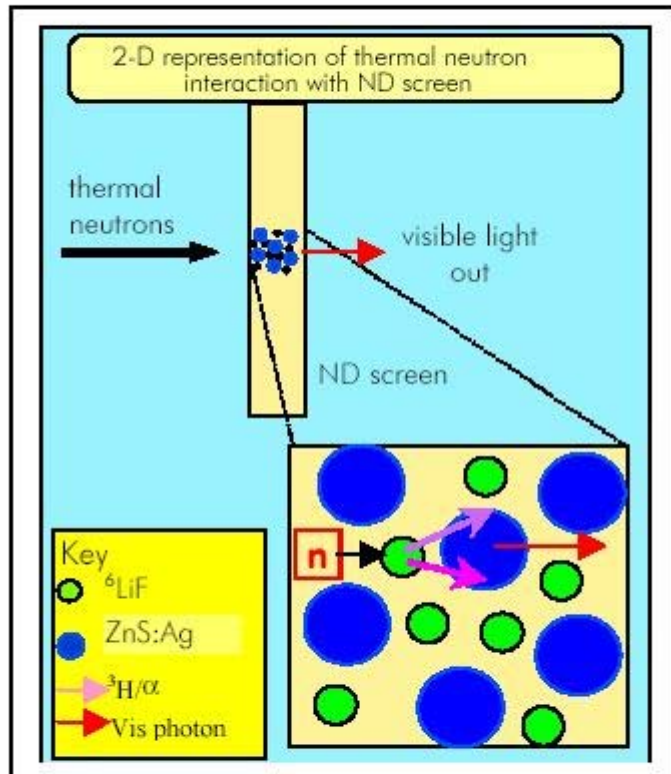




Physikalische Grenzen

- Verfügbarer Neutronen/Photonenfluß in einem Zeitfenster
- Abklingen des Szintillationslichtes
- Auslesegeschwindigkeit des Detektors
- Totzeiten des Detektors, sofern vorhanden

Daten des typischen ZnS+⁶LiF-Szintillators



Absorption Characteristics

■ X-ray	very low
■ UV	broad band
■ IR	n/a
■ neutron	high for thermal neutron
■ electron	n/a
■ alpha/beta	alpha detection mechanism

Emission Characteristics

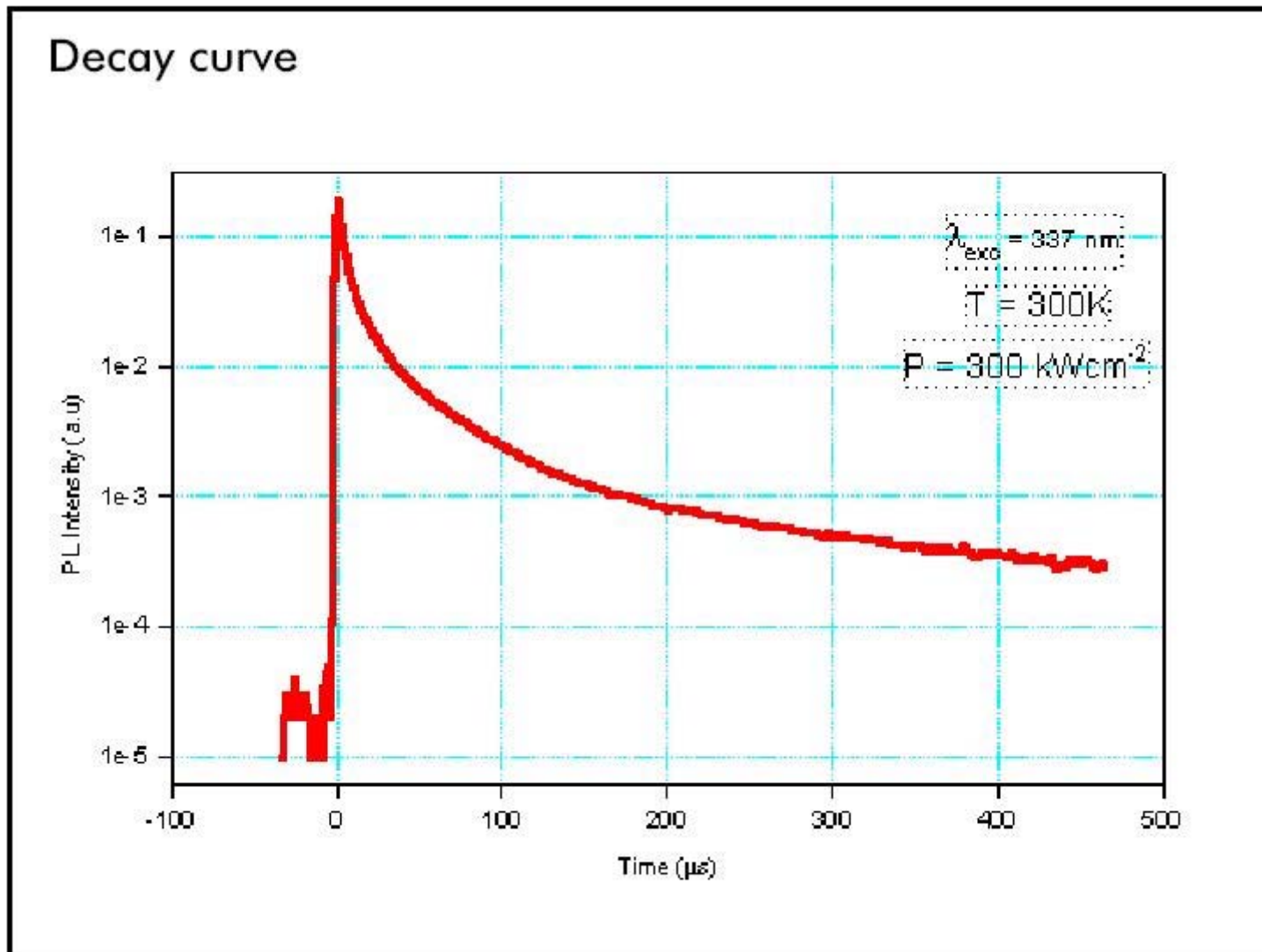
■ colour	blue
■ peak emission	450nm
■ spectrum type	broad band
■ decay to 10%	80us
■ afterglow	low level

Other Characteristics

■ intrinsic efficiency	phosphor 25% ⁶ Li cross section approx 40mb
■ phosphor type	⁶ Li ³ H n ⁰ interaction – band gap phosphor
■ robustness	moderate – photolysis in UV

www.appscintech.com

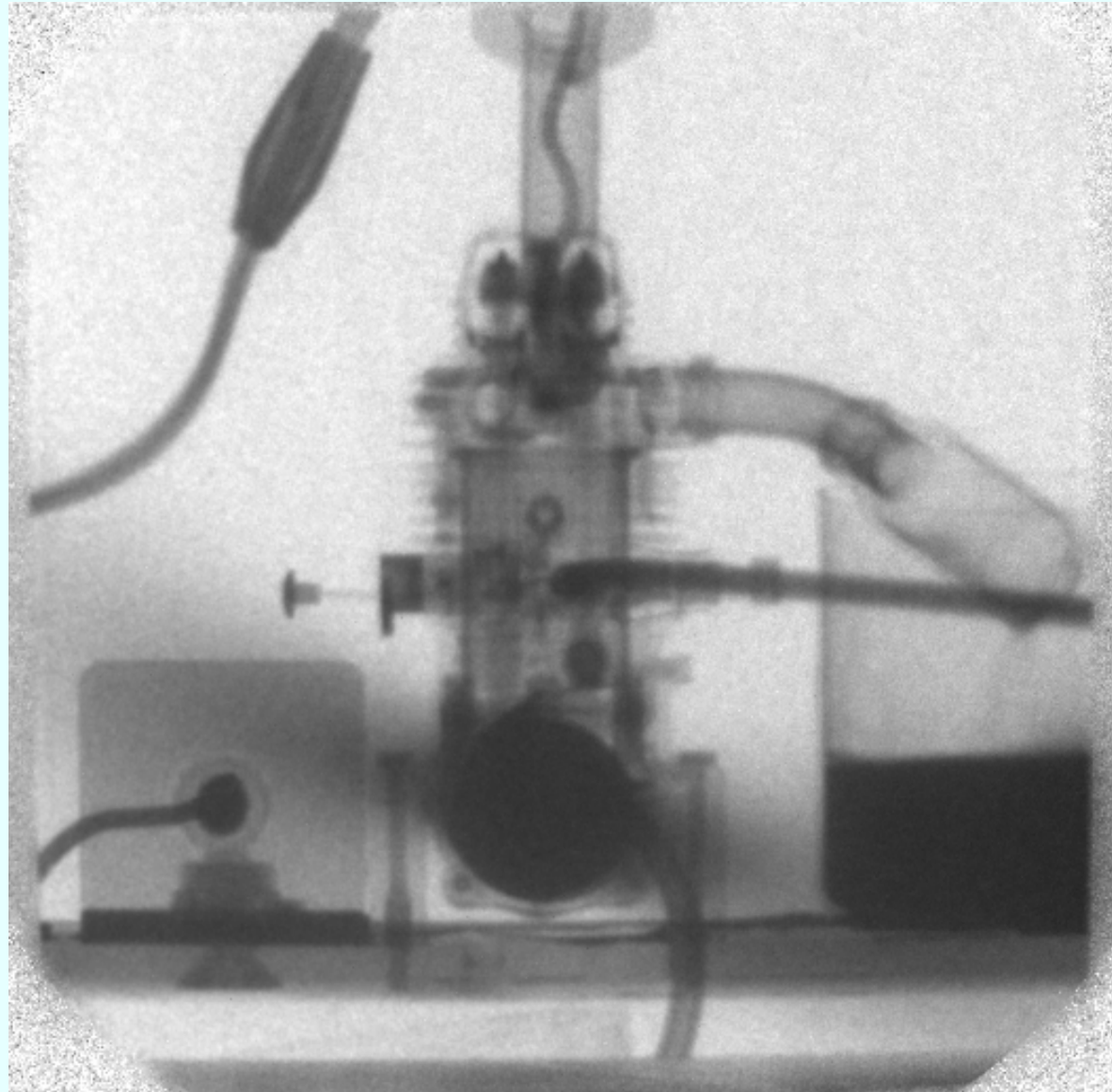
Abklingzeit des typischen ZnS+⁶LiF-Szintillators



Abfall auf 10% in 80 μs

-->Belichtungszeiten deutlich unter 100 μs sind wenig sinnvoll!

Dieser kleine Flugzeugmotor lief am Paul-Scherrer-Institut schon mit 5000 Umdrehungen pro Minute.

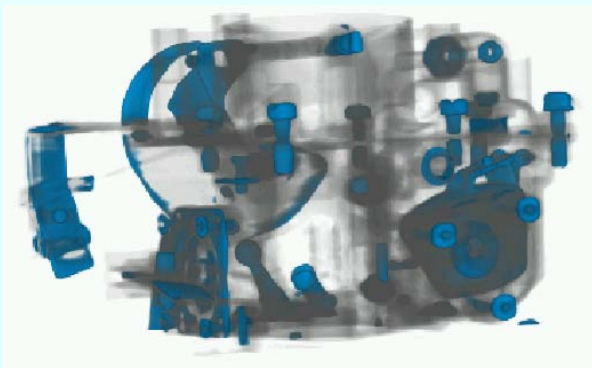
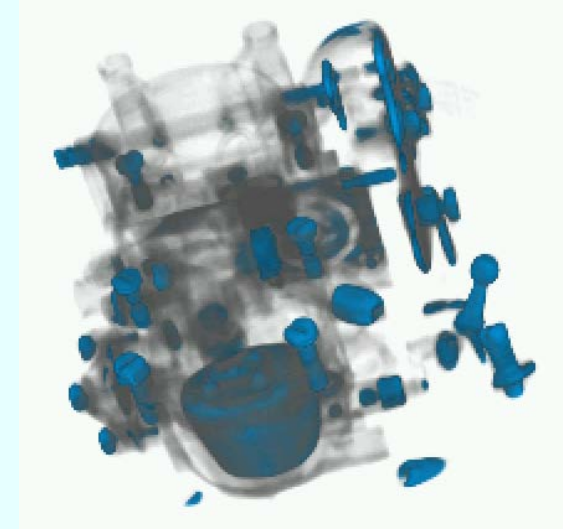
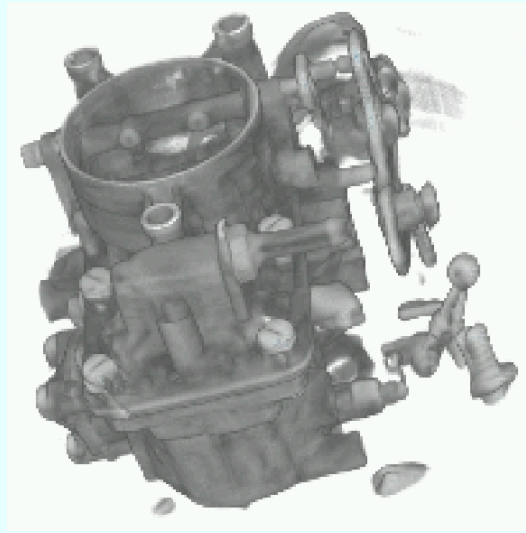


Dieses umgebaute Diesel-Aggregat steht schon am FRM-II bereit und wartet auf das Experiment.

Wir werden versuchen, den Einspritzvorgang und die Ölschmierung beim selbstlaufenden Motor sichtbar zu machen.



Auch die ersten Tomographien am FRM-II gibt es schon.



Die große Stärke der Neutronenradiographie ist die gleichzeitige Detektion von Metallen und wasserstoffhaltigen Materialien sowie die empfindliche Unterscheidung ähnlich schwerer Elemente.

Eine Vielzahl neuer Möglichkeiten eröffnet sich für die Grundlagenforschung sowie für die angewandte Forschung in Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt und viele andere Gebiete –

überall da, wo Probleme mit Röntgenstrahlen nicht zu lösen sind.