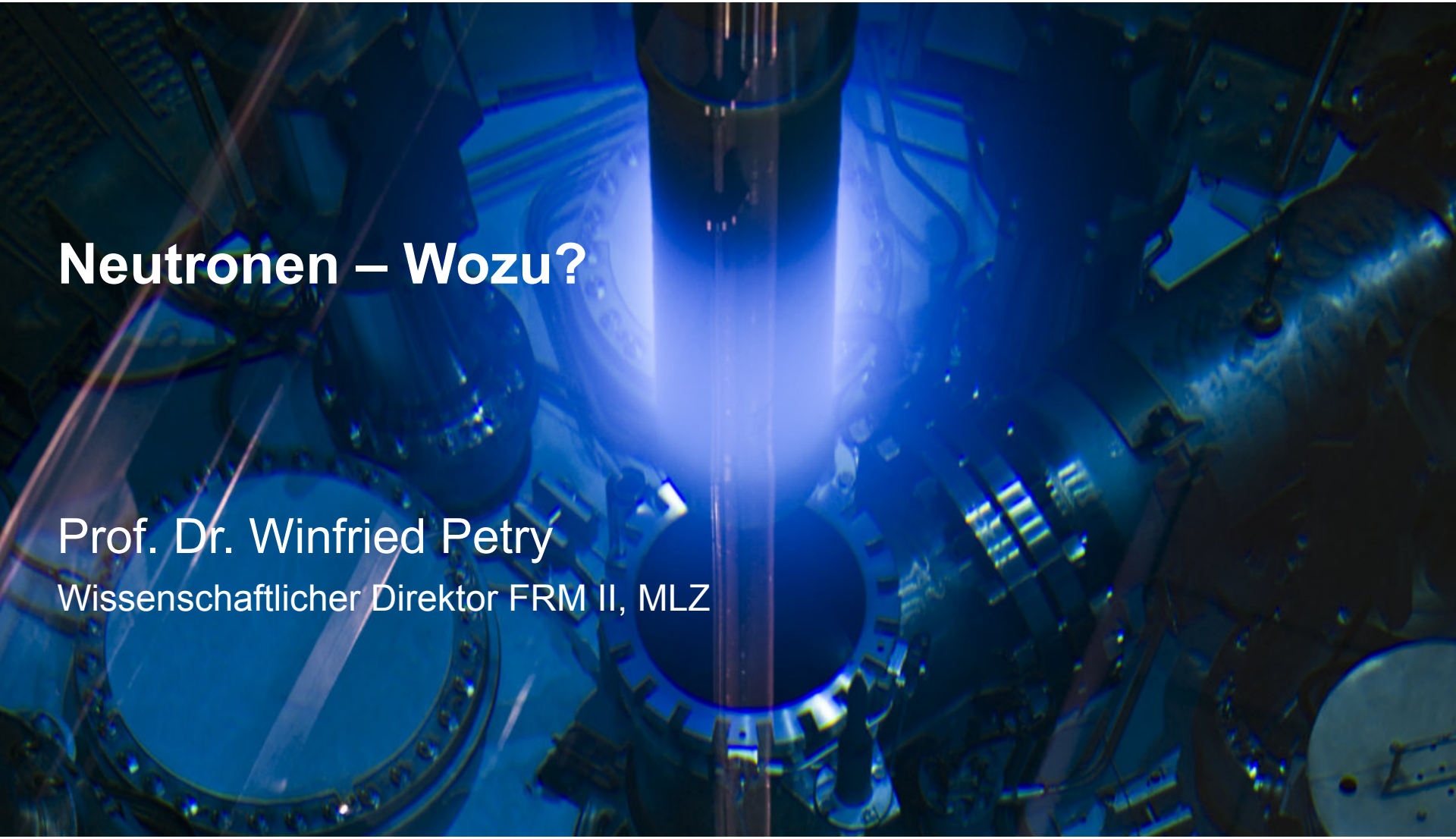
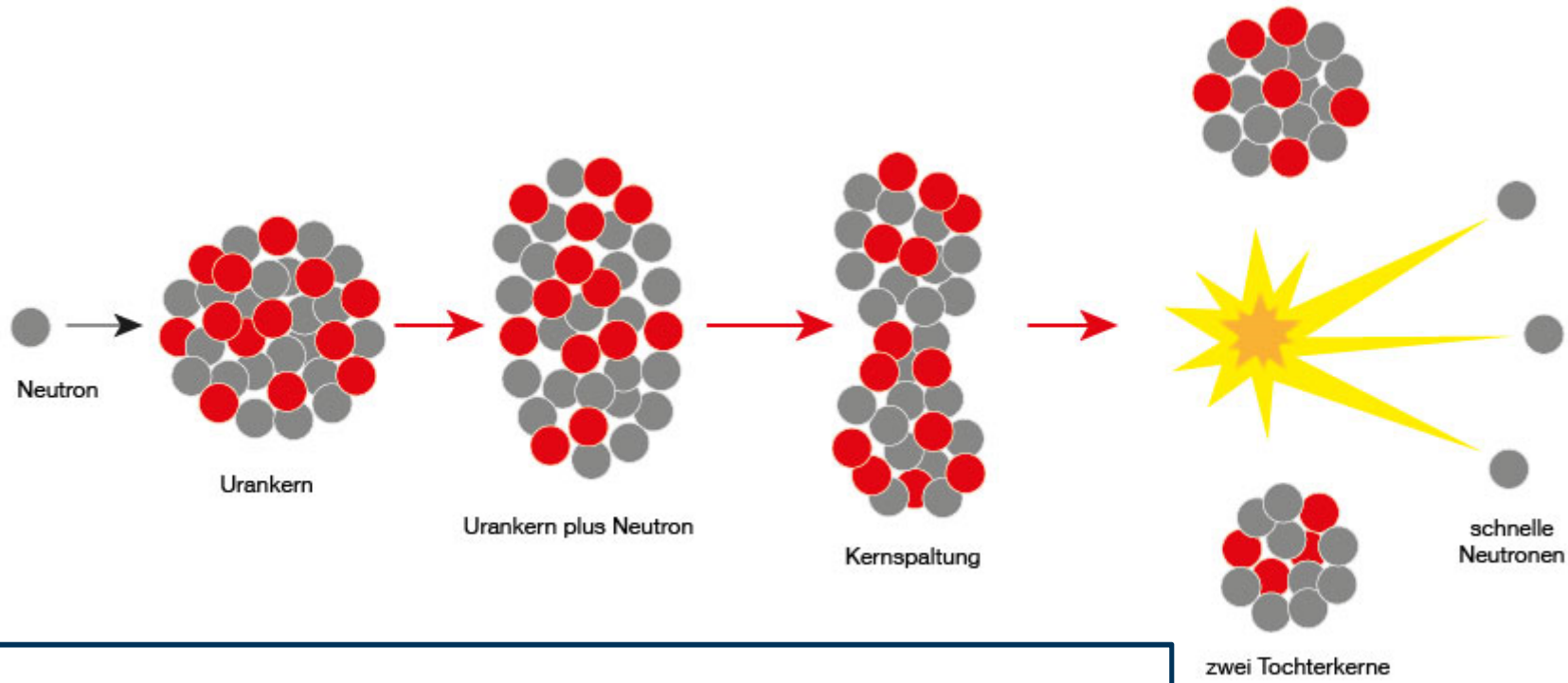
FRM II
Forschungs-Neutronenquelle
Heinz Maier-Leibnitz



Neutronen – Wozu?

Prof. Dr. Winfried Petry
Wissenschaftlicher Direktor FRM II, MLZ

Unterschied Kernkraftwerk - Forschungsneutronenquelle



$$n_{thermisch} \longrightarrow \text{Moderation}$$

$$^{235}U + n_{thermisch} \xRightarrow{Spaltung} 2\ Tochterkerne + 2{,}3\ n_{schnell} + 220\ MeV$$

- $2\ Tochterkerne$ → **Radioaktive Isotope**
- $2{,}3\ n_{schnell}$ → **Forschungs-neutronenquelle**
- $220\ MeV$ → **Kernkraft-werk**

1. Wozu Neutronen?

2. Warum hochangereichertes Uran?

3. Besorgung und Entsorgung von hochangereichertem Uran – Aspekte der Proliferation und Endlagerung

FRM II
Forschungs-Neutronenquelle
Heinz Maier-Leibnitz

Mit Neutronen zum Ursprung der Dinge

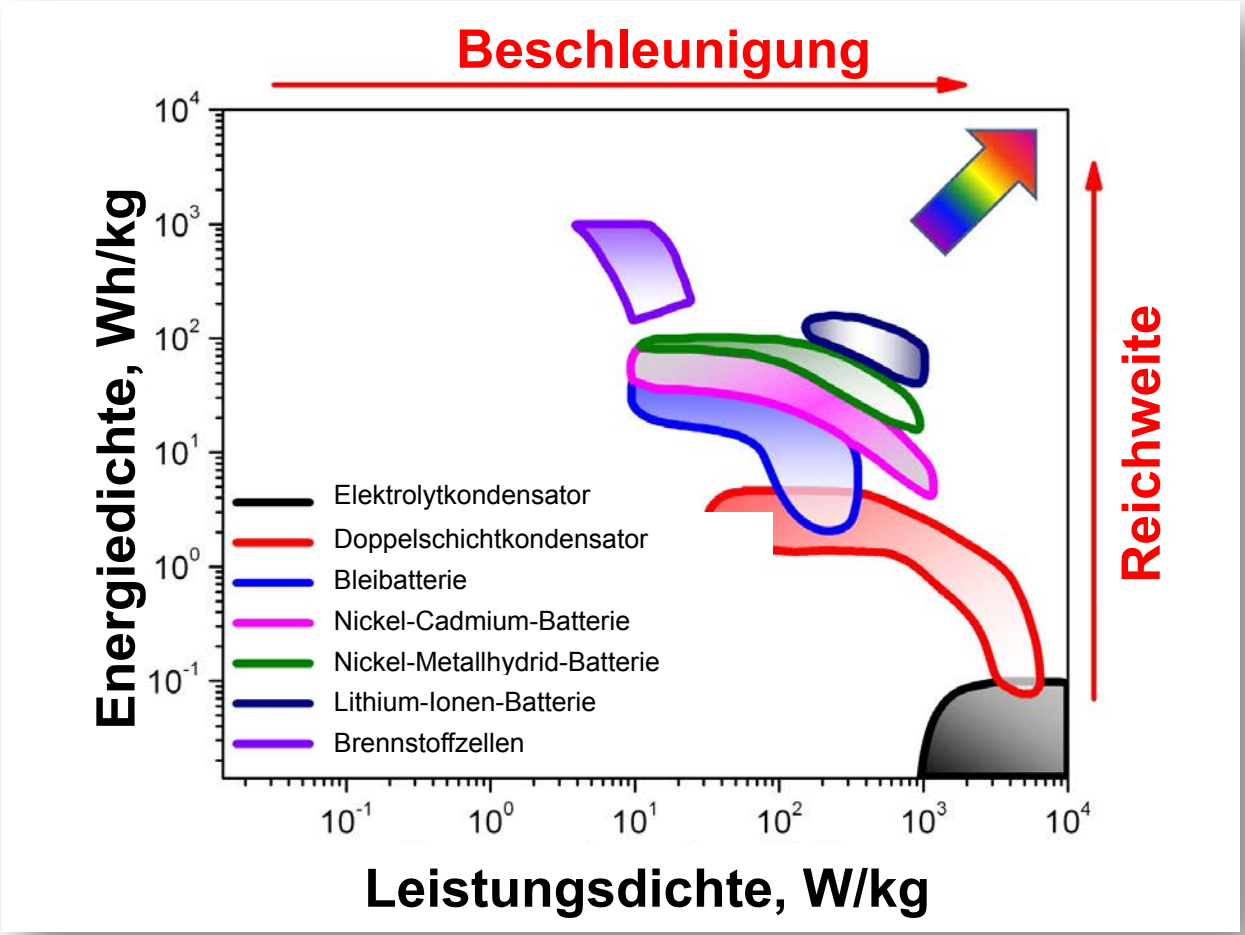
Neutronen für Forschung, Industrie und Medizin

→ Adressieren der Großen Herausforderungen unserer Zeit:

- Energiespeicherung, -umwandlung und –transport → bessere Batterien, Sicherstellung der Stromversorgung Bayerns, Deutschlands und Europas
- Magnetische Datenspeicherung → schnellere Rechner mit mehr Speicher
- Innere Spannungen in Bauteilen → Optimierung von industriellen Prozessen
- Struktur und Funktion von Proteinen → bessere Antibiotika
- Diagnose und Therapie in der Medizin
- Grundlagenforschung → Treiber von Innovation

Energie: Speicherung

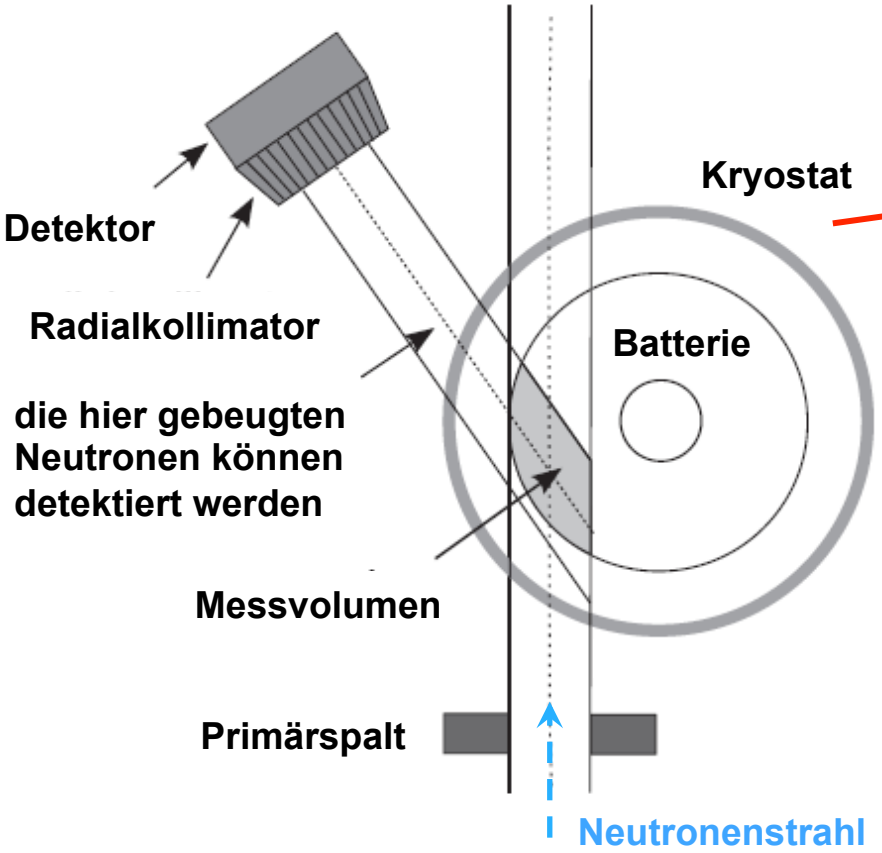
Warum Li-Ionen Batterien?



FRM II
Forschungs-Neutronenquelle
Heinz Maier-Leibnitz

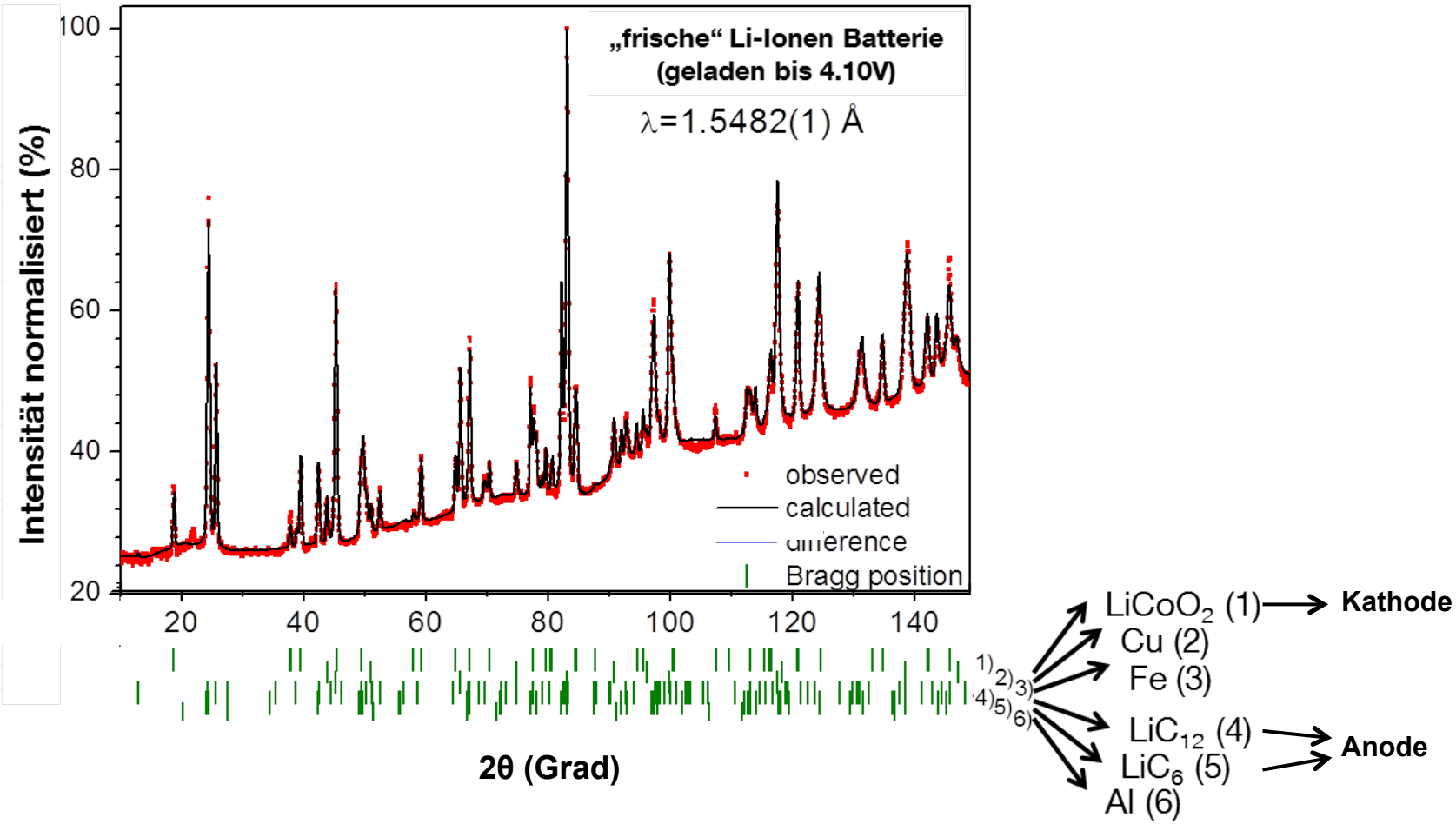
Energie: Speicherung

In-situ Neutronendiffraktion



Energie: Speicherung

Typische Diffraktionsmessung einer 18650 Li-Ionen-Batterie

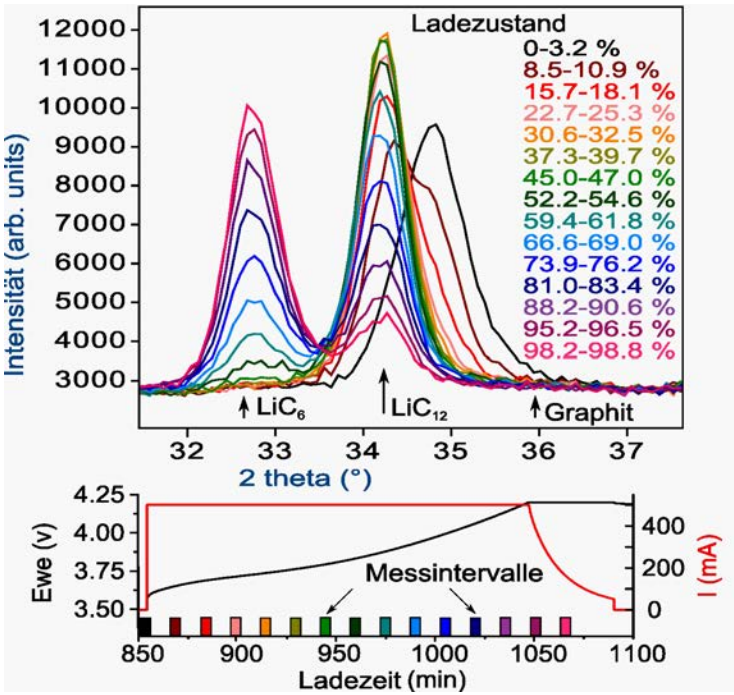


A. Senyshyn et al., J. Power Sources 203, 126 (2012);
B. Weitere Literatur zu Li-Ionen Batterien der Gruppe: O. Dolotko et al., J. Electrochem. Soc. 2159, A2082 (2012), A. Senyshyn et al., J. Electrochem. Soc., 160, A3198 (2013), O. Dolotko et al., J. of Power Sources 255, 197 (2014), A. Senyshyn et al., J. of Power Sources 245, 678 (2014), A. Senyshyn et al., J. of Power Sources 282, 235 (2015)

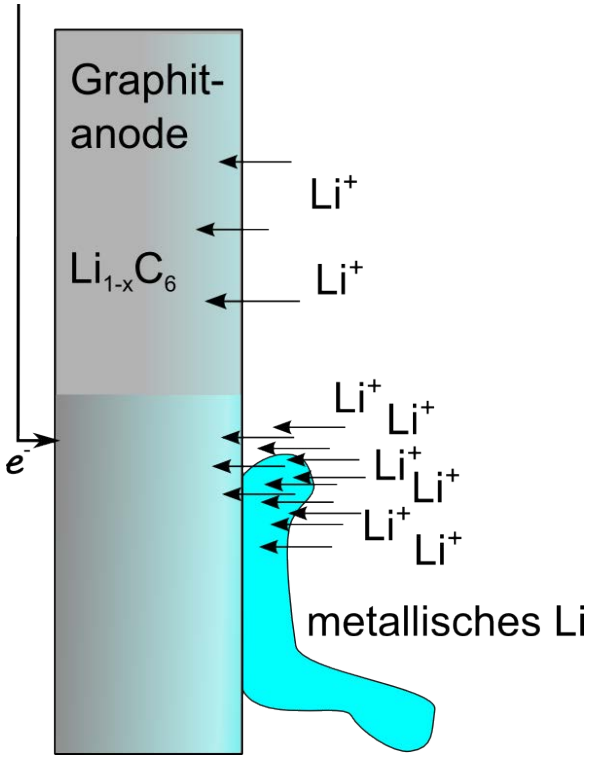
Energie: Speicherung

Ladung einer Li-Ionen Zelle / Li Plating

Der Einbau von Lithium in Graphit: Graphit → $Li_{1-x}C_{18}$ → LiC_{12} → LiC_6



- Bei **zu schneller Ladung Li Plating** = Abscheidung von metallischem Lithium auf der Anode
- Verstärkt bei tiefen Temperaturen (-40 ˚C to -10 ˚C)



→ Risiko: 'Li plating' verringert die Kapazität und führt zum Defekt der Zelle

V. Zinth et al, J. Power Sources, 271, 152 (2014); Weitere Literatur zu Li-Ionen Batterien der Gruppe:
S. Seidlmayer et al., J. Electrochem. Soc., 162 (2), A1 (2015), I. Buchberger et al., J. Electrochem. Soc., 162 (14), A2737 (2015)

Energie: Speicherung

Zerstörende Prozesse erscheinen nicht bei der einzelnen Untersuchung

In-situ / *in-operando* Studien decken Mechanismen der Degradation auf

Tesla-Brand nach internem Kurzschluss
(http://www.cnet.com
Screenshot by Wayne Cunningham/CNET)

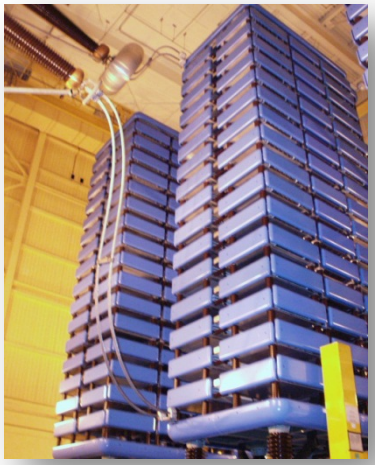
Auch Ursache bei Samsung Galaxy Note 7 ?
(Quelle: Tham Hua)

Boeing Dreamliner nach internem Kurzschluss
(https://en.wikipedia.org/wiki)

Energie: Transport

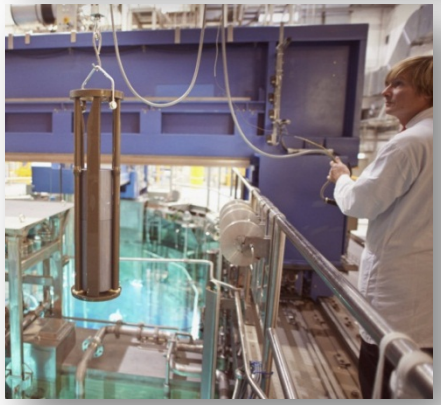
Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung

ABB: Gleichstromkabel an der Nordsee

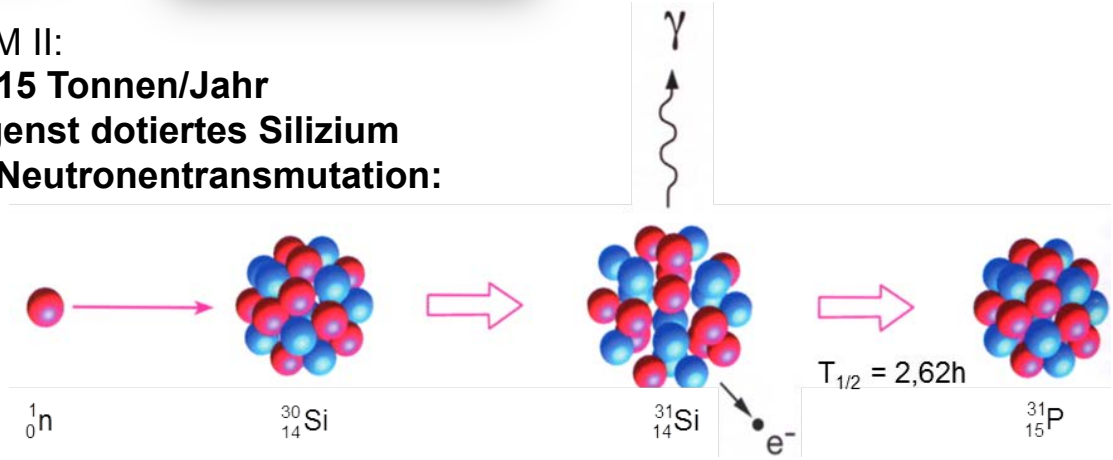


TUM E-car Visio.M: M. Lienkamp

Gesteuerte Gleichrichtertürme;
96 Thyristoren,
250 KV – 2000 A

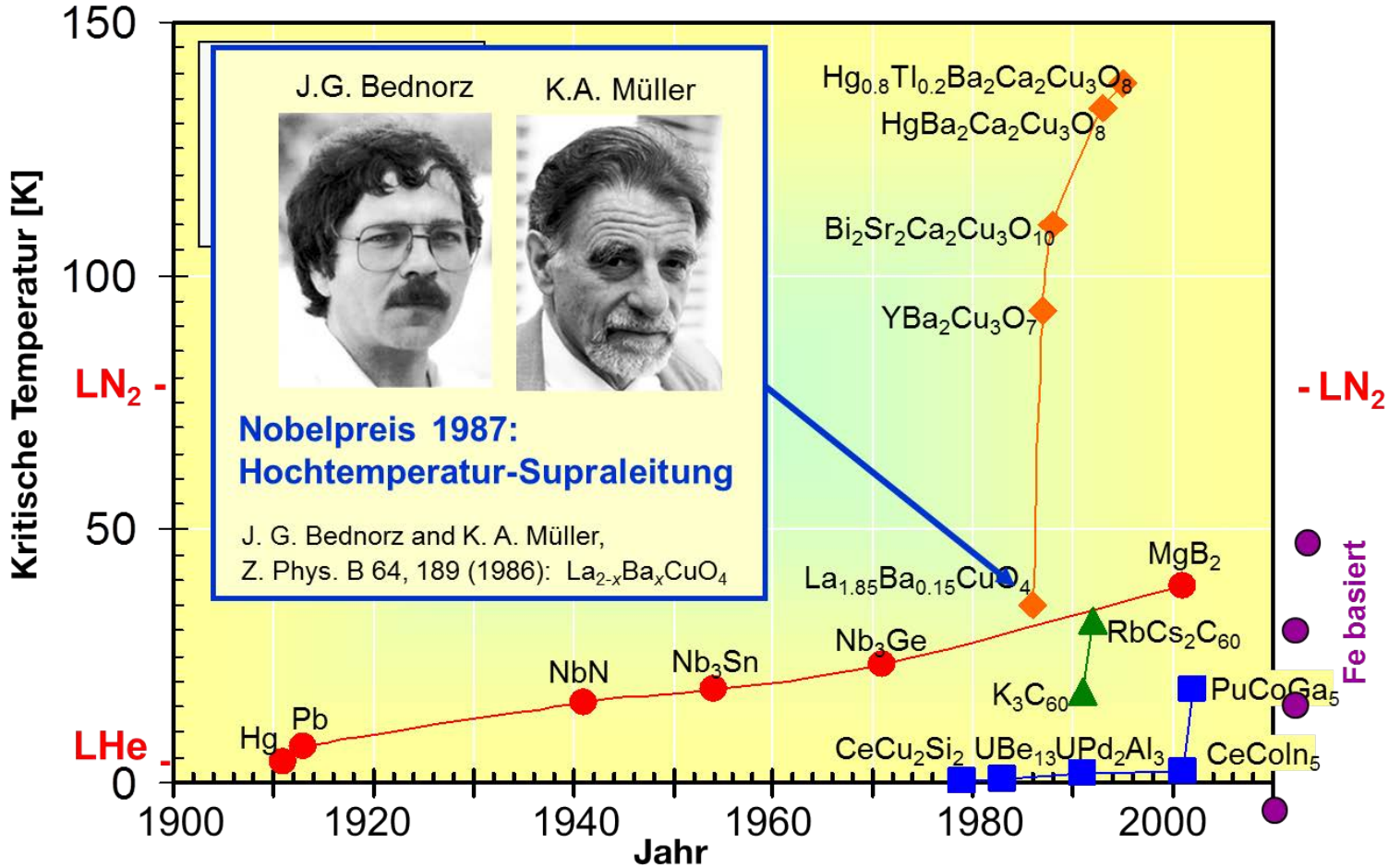


→ am FRM II:
bis zu 15 Tonnen/Jahr homogenst dotiertes Silizium durch Neutronentransmutation:



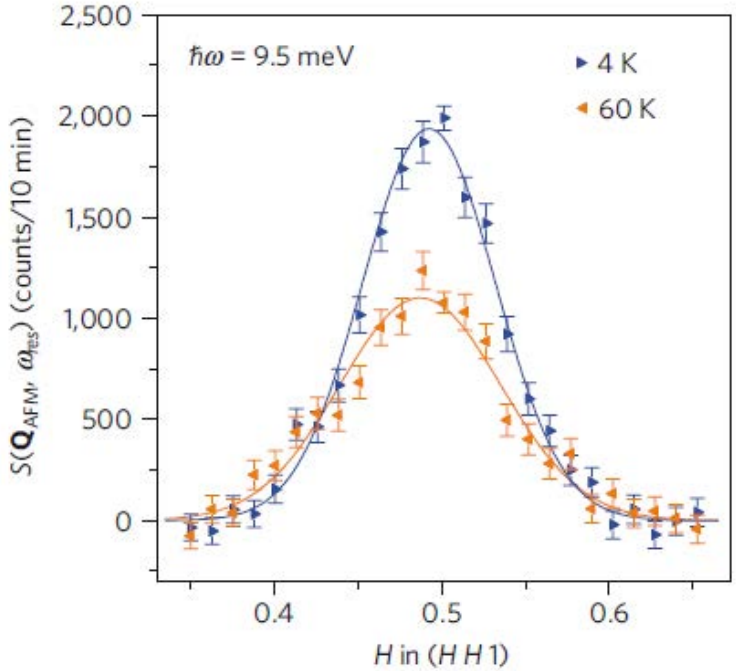
Energie: Transport

Supraleitung: kurze Historie

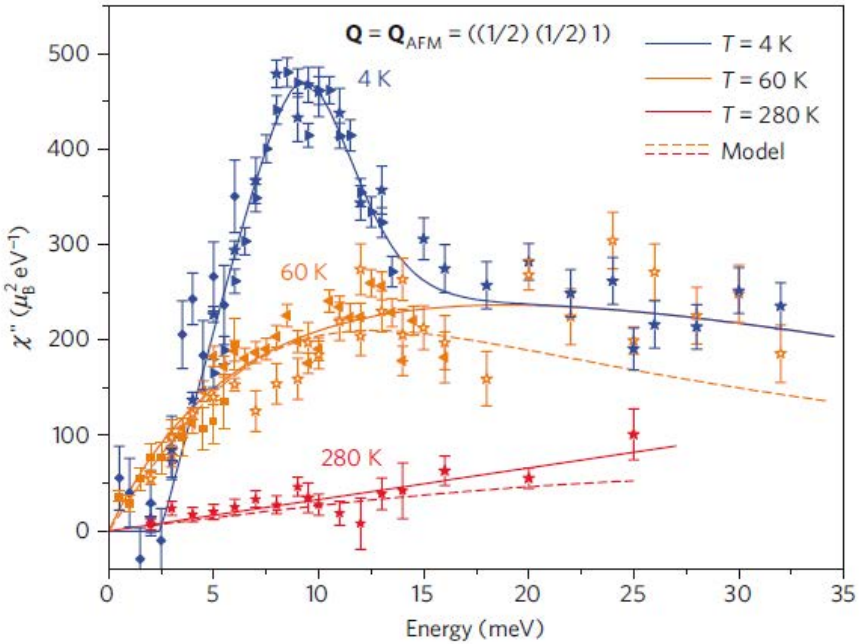


Energie: Transport

Fe-basierte Hochtemperatur-Supraleiter → Bsp.: optimal dotiertes $BaFe_{1.85}Co_{0.15}As_2$, T_c= 25K



Konstant-Energiescan bei der Resonanz-Energie



Spin-Suszeptibilität in der supraleitenden (T = 4K) und normal leitenden Phase (T = 60K und 280 K).

→ Magnetische Fluktuationen sind entscheidend zum Verständnis von Hochtemperatur-Supraleitung

Inosov et al., Nat. Phys. 6, 178 (2010); Weitere Literatur: P. Aynajian, et al., Science 319, 1509 (2008), Y. Li et al., Nat. Phys. 8, 404 (2012), Hamann et al., Phys. Rev. Lett 110, 096404 (2013), X. Lu et al., Science 345, 657 (2014), P.G. Niklowitz et al., Phys. Rev. B 92, 115116 (2015), T. Reimann et al., Nat. Commun. 6:8813 (2015)

Energie: Transport

Hochtemperatur-Supraleitung: Anwendungsbeispiele

Japan

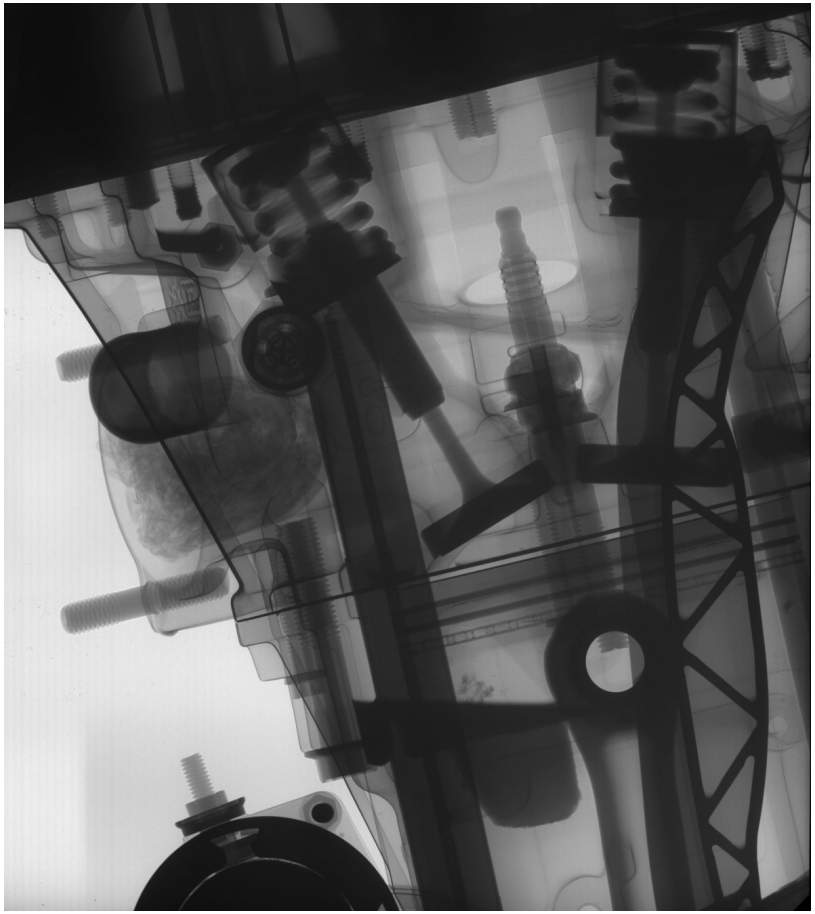
JR-Maglev:
Magnetische Levitation Schnellzug mit supra-leitenden Spulen: Geplante Geschwindigkeit > 500 km/h zwischen Tokio und Osaka

Deutschland

AmpaCity:
längstes Hochtemperatur-supraleitendes Kabel für Stromversorgung innerhalb Essens seit 30. April 2014

Schlüsseltechnologien

Ein-Zylinder-Motor



Schillinger et al. (ANTARES, FRM II)

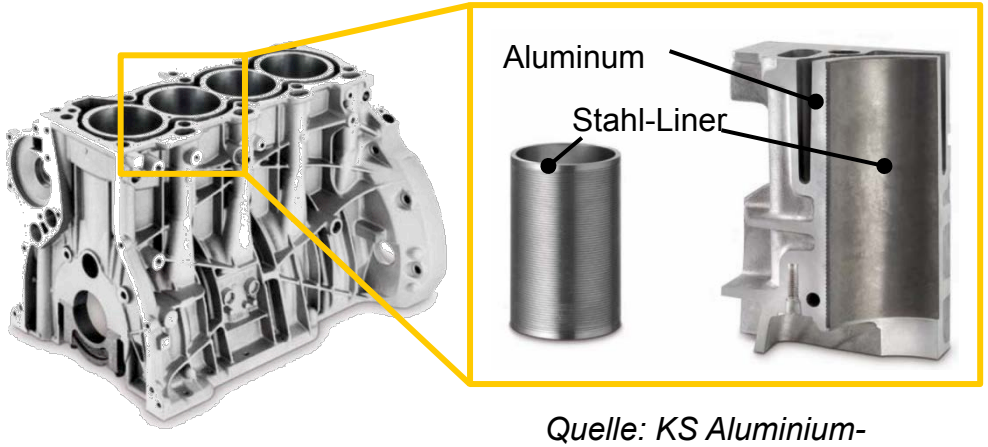
In-operando: Laufender Motor im Millisekunden Takt

B. Schillinger, et al., Physica B 921, 385-386 (2006)

Schlüsseltechnologien

Eigenspannungen während des Gießprozesses

- Messung von Eigenspannungen in Gussstücken bisher nur im Endzustand nach der Fertigung möglich, ohne zu wissen, wie sie entstehen
- Wissen über Eigenspannungen wichtig für das Design von Gussstücken (z.B. Motorblöcke)
- FEM-Simulationsberechnungen versuchen Verhalten während des Gießens vorauszusagen



Quelle: KS Aluminium-Technologie AG

Gussstück für Neutronenbeugungs-Experiment am Instrument STRESS-SPEC

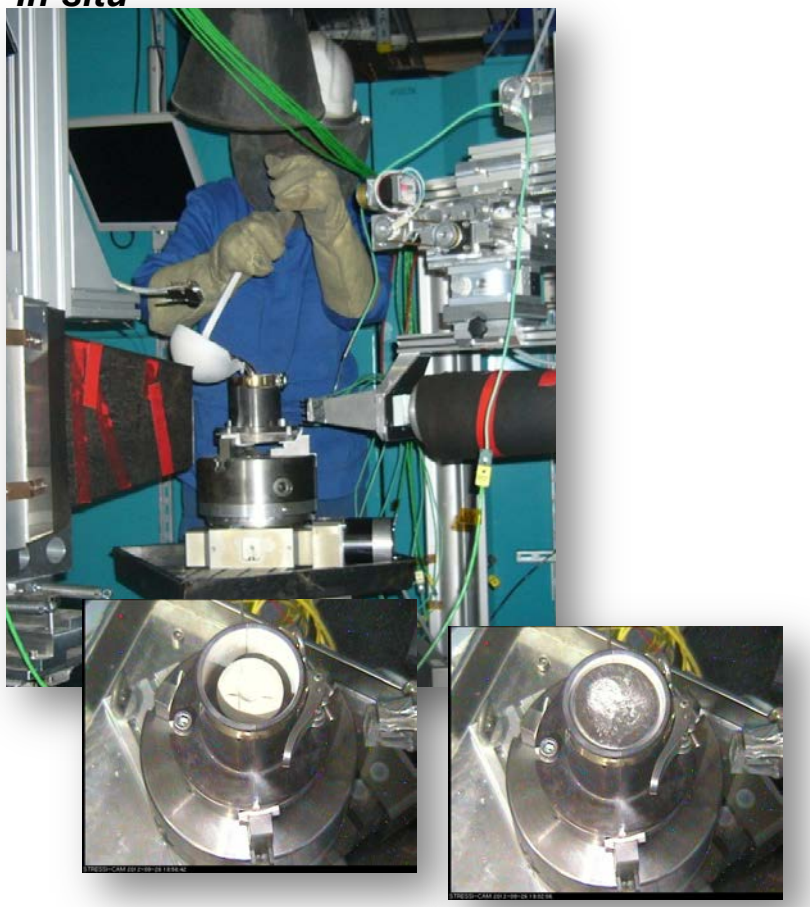
Kooperationsprojekt mit utg (Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, TUM), M. Hofmann, STRESS-SPEC (FRM II)

FRM II
Forschungs-Neutronenquelle
Heinz Maier-Leibnitz

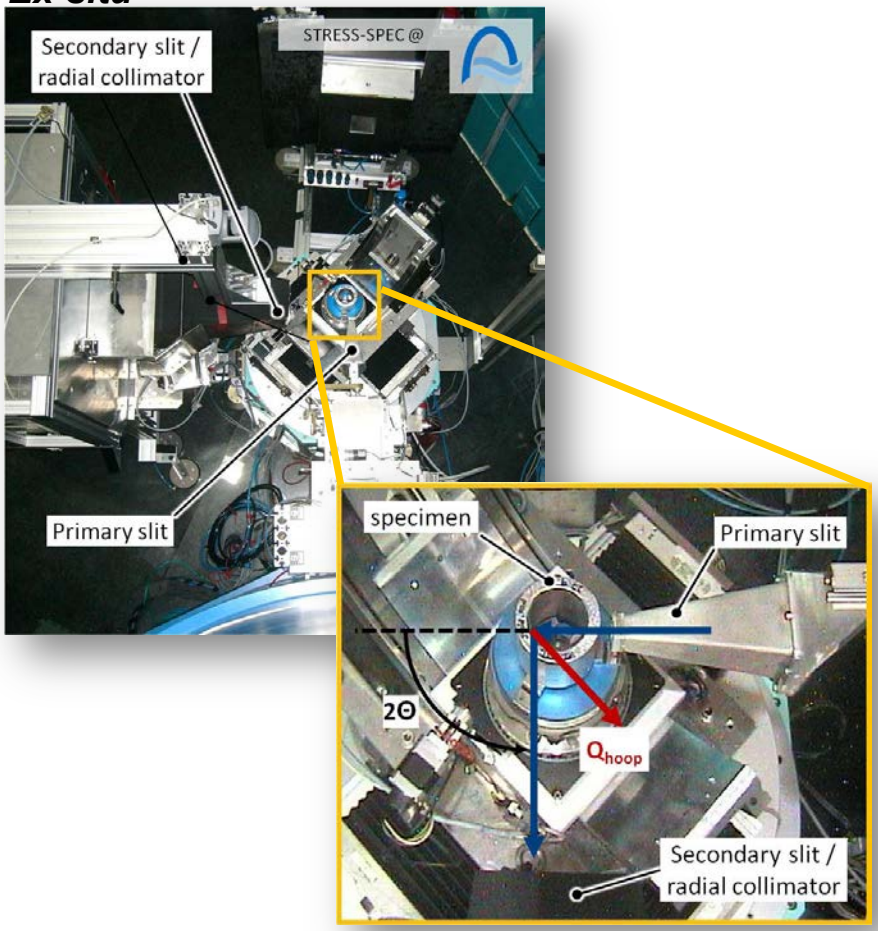
Schlüsseltechnologien

Eigenspannungen während des Gießprozesses

In-situ



Ex-situ



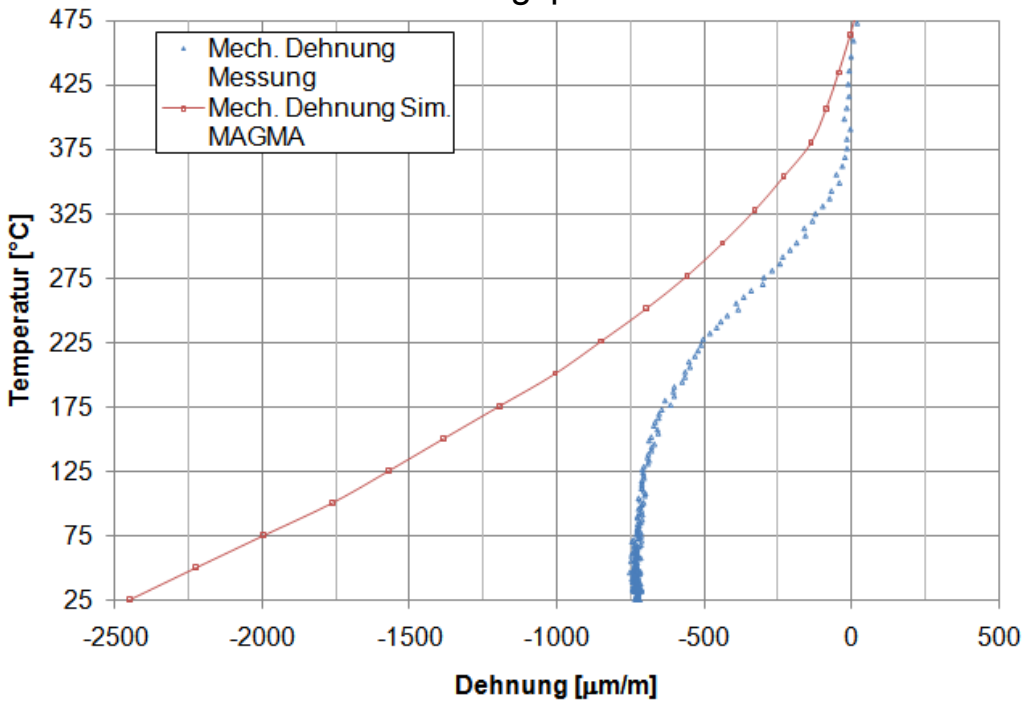
Kooperationsprojekt mit utg (Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, TUM), M. Hofmann, STRESS-SPEC (FRM II)

Schlüsseltechnologien

Eigenspannungen während des Gießprozesses

Stahl-Liner

Entwicklung der inneren Spannungen im Stahlliner während des Abkühlungsprozesses



→ Drastisch verbesserte Finite Elemente-Simulation des Gießvorgangs

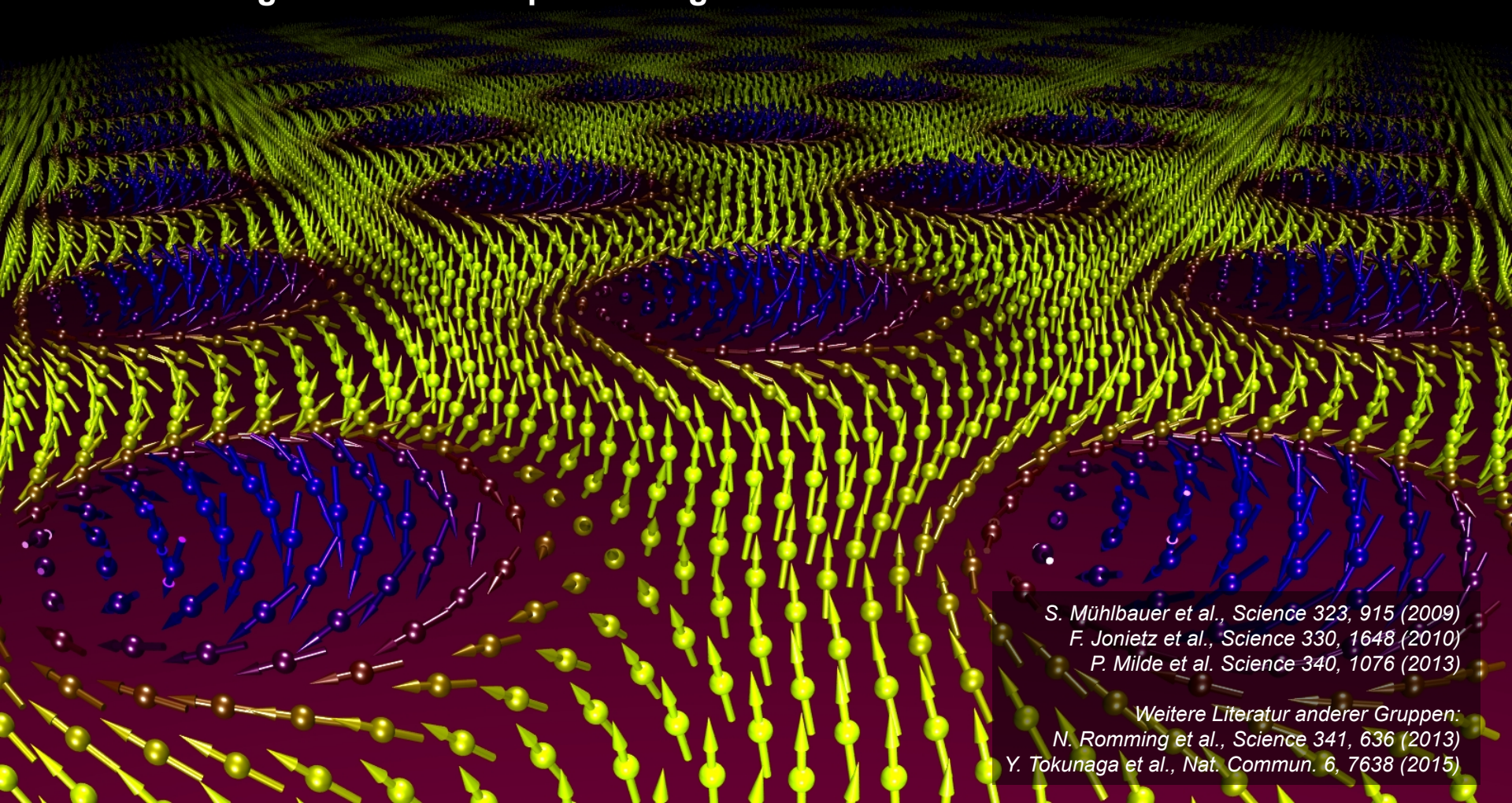
M. Reihle, Entstehung und Ausprägung von Eigenspannungen in Verbundgussteilen, Doktorarbeit, TUM utg (2015)
U. Wasmuth et al., CIRP Annals – Manufacturing Technology 57, 579 (2008), M. Reihle et al., Materials Science Forum 768-769, 484 (2014)

Information & Kommunikation

Skyrmionen-Gitter in MnSi

Neue Form von magnetischer Ordnung auf Nano-Skala

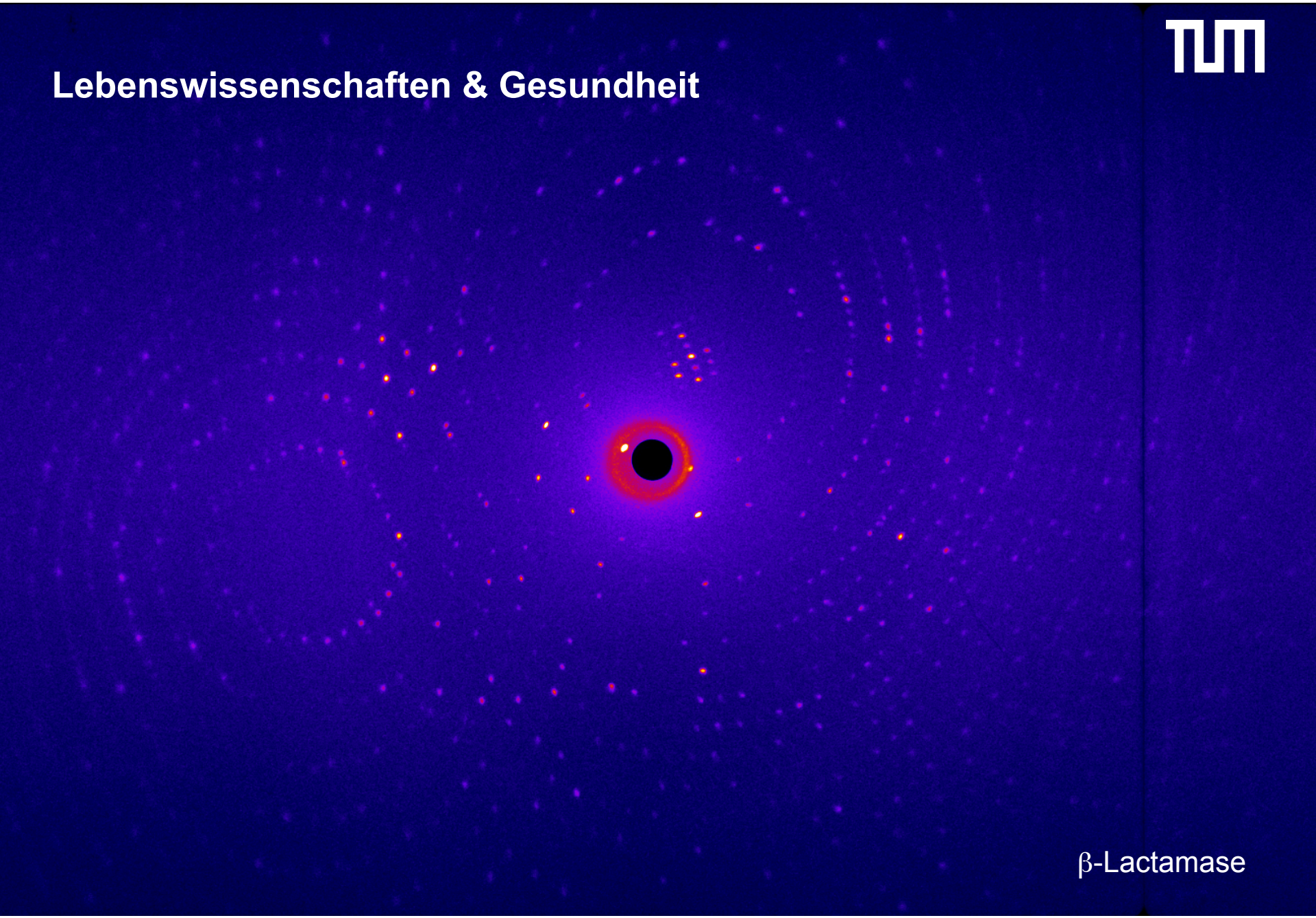
→ **Zukünftige Informationsspeicherung?**



S. Mühlbauer et al., Science 323, 915 (2009)
F. Jonietz et al., Science 330, 1648 (2010)
P. Milde et al. Science 340, 1076 (2013)

Weitere Literatur anderer Gruppen:
N. Romming et al., Science 341, 636 (2013)
Y. Tokunaga et al., Nat. Commun. 6, 7638 (2015)

Lebenswissenschaften & Gesundheit



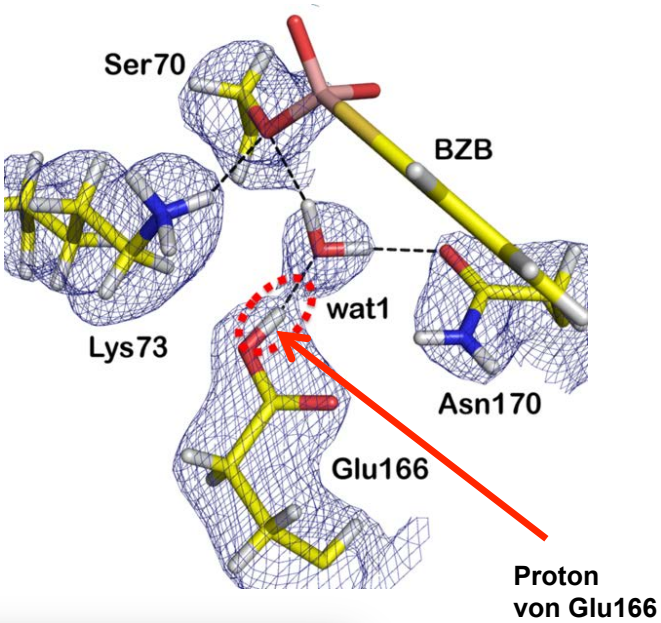
β-Lactamase

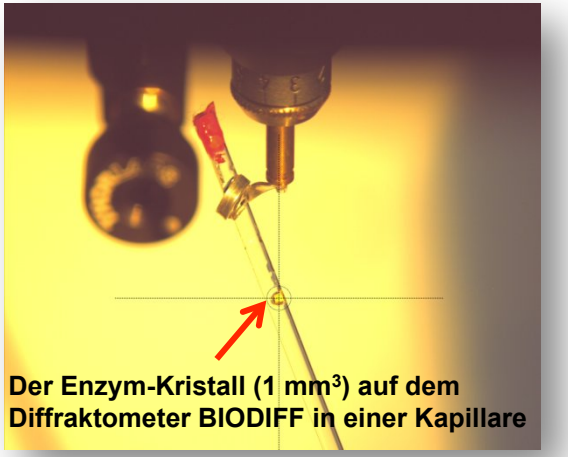
Lebenswissenschaften & Gesundheit

Mechanismus bakterieller Antibiotikaresistenz

- Bakterielle Antibiotikaresistenz durch von Bakterien erzeugte Enzyme (ß-Lactamasen), die ß-Lactam basierte Antibiotika spalten (z.B. Penicillin).
- Aufklärung enzymatischer Reaktionsmechanismen auf atomarer Ebene (**Wasserstoffatom-Positionen!**) mittels der **Neutronen-Diffraktion**.
- Aminosäure Glutaminsäure-166 fungiert als temporärer Protonen-Akzeptor während des katalytischen Zyklus des Enzyms.

→ **Entwicklung besserer Antibiotika**





Der Enzym-Kristall (1 mm³) auf dem Diffraktometer BIODIFF in einer Kapillare

Tomanicek et al., J. Biol. Chem., 288, 4715 (2013)

FRM II
Forschungs-Neutronenquelle
Heinz Maier-Leibnitz

Lebenswissenschaften & Gesundheit

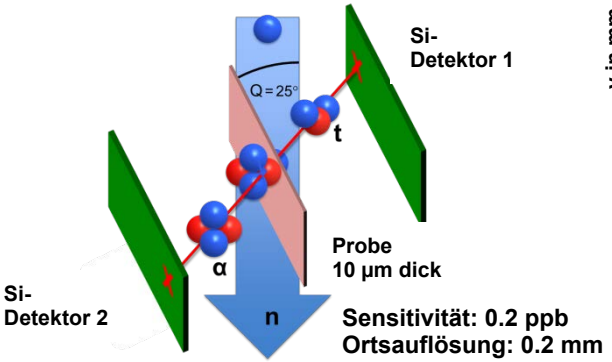
Lithium-Spuren im menschlichen Gehirn

- Bipolare Störung (manische Depression) ist eine relativ häufig auftretende Krankheit mit einer Erkrankungswahrscheinlichkeit von 1%
- Lithium ist ein effektives antimanisches Agens.
- Wirkungsweise von Lithium im Gehirn bis heute nicht geklärt.
- Ziel: Anfertigung einer genauen Landkarte der Verteilung von Lithium im Gehirn

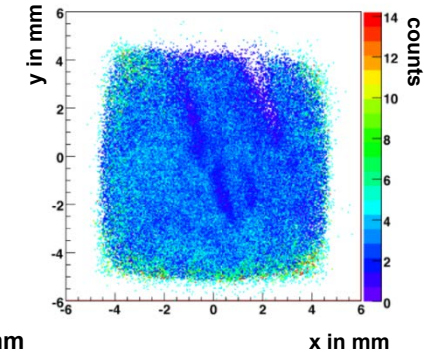
→ **Li-Anreicherung in weißer Substanz im Gehirn einer Anzahl von depressiven Patienten mit Li-Therapie**

→ **Li wirkt im Gegensatz zu anderen Psychopharmaka innerhalb der Nervenbahnen**

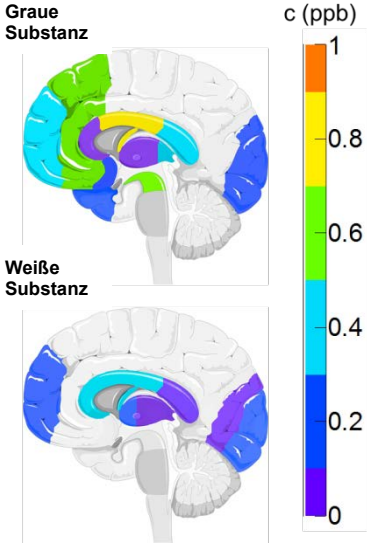
Spezieller Detektoraufbau



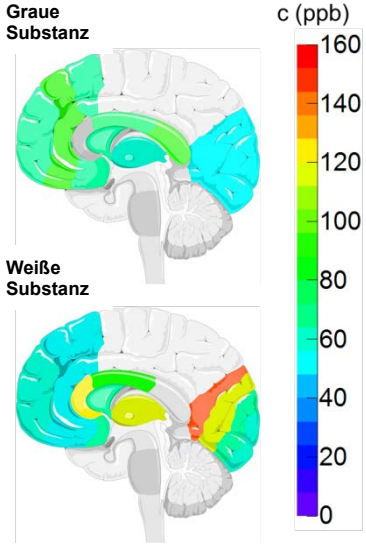
2D Lithium Probe



Suizidopfer



Person mit Li-Behandlung



J. Lichtinger, Quantitative Untersuchung der lokalen Lithiumkonzentration im menschlichen Gehirn und ihr Bezug zu affektiven Störungen, Doktorarbeit, TUM (2015),
J. Lichtinger, et al., Medical Physics. 40, 023501 (2013); Kollaboration: Physik Department E12/ZTL, Institut für Rechtsmedizin der LMU, FRM II (DFG project GE 2296/1-1)

Lebenswissenschaften & Gesundheit

Therapie eines Prostatakrebs-Patienten mit Lu-177 n.c.a.

- Diagnostik (PET/CT)
  mit Ga-68 gekoppelt an
  - Bisphosphonat
    → Bildgebung Knochenmetastasen
  - Molekül spezifisch für das Prostataspezifische Membranantigen (PSMA)
    → Bildgebung Gewebsmetastasen

- 2 Behandlungen mit Lu-177 n.c.a. mit jeweils 4 – 5 GBq/Dosis

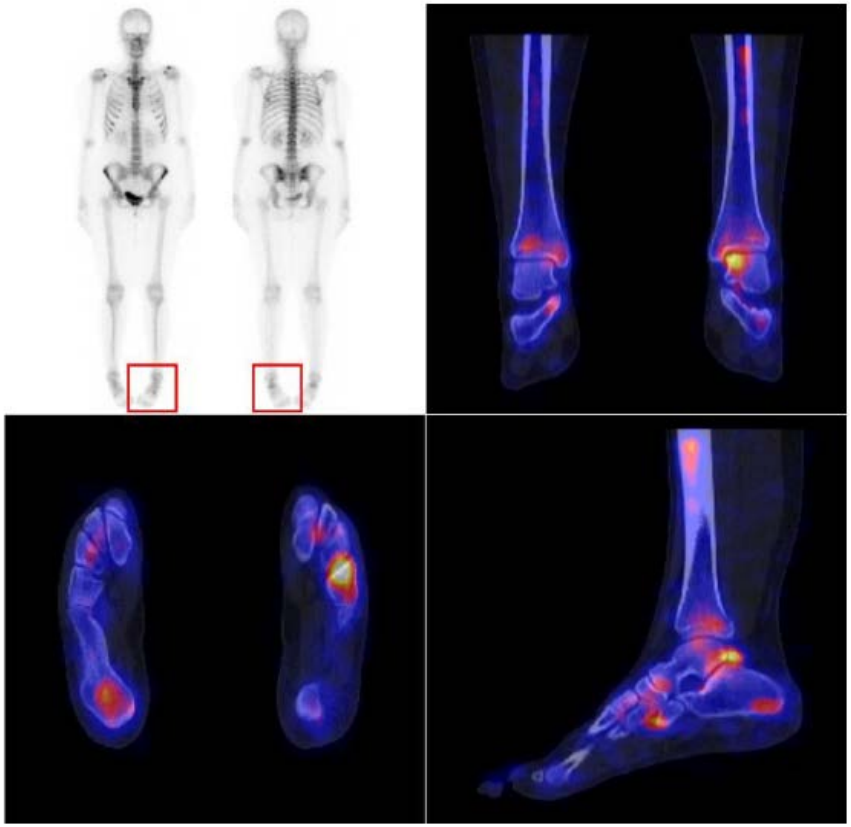
Vor Therapie (05/2015)

Nach Therapie
mit Lu-177 n.c.a. (11/2015)

→ Lu-177-PSMA-Therapie als neue Therapieoption mit großem Heilerfolg

und Prof. Dr. med. Richard P. Baum, Klinik für Nuklearmedizin/PET-Zentrum der Zentralklinik Bad Berka

Knochen Szintigraphie einer Articulatio talocrulis mit Mo-99/Tc-99m



- Überlagerung von CT und SPECT, hellleuchtend, ansteigender Knochen Metabollismus auf Grund von Entzündung, Klinikum rechts der Isar, 2014

- 3 Mio. Applikationen in Deutschland
- 9 Mio. in Europa
- 27 Mio. weltweit

- 2018 Inbetriebnahme am FRM II,
- 2019 kommerziell

- Die am FRM II Garching produzierte Menge deckt bis zu 50% des Jahresbedarfs in Europa = 2100 Ci/nach sechs Tagen

1. Wozu Neutronen?

2. Warum hochangereichertes Uran?

3. Besorgung und Entsorgung von hochangereichertem Uran – Aspekte der Proliferation und Endlagerung

Wissenschaft benötigt höchste Neutronen-Intensität pro Richtung, pro Wellenlängenband

- Für wissenschaftliche, industrielle und medizinische Anwendung wird nicht nur hohe Intensität des Neutronenflusses (Neutronen/(cm^2 s)), sondern auch hohe Intensität pro Raumrichtung und Wellenlängenband (Neutronen/(cm^2 s rad $\Delta\lambda$)) benötigt, einfach ausgedrückt eine Punktquelle in engem Wellenlängenband. Die bei der Kernspaltung entstehende Wärme setzt diesem Ziel technische Grenzen.

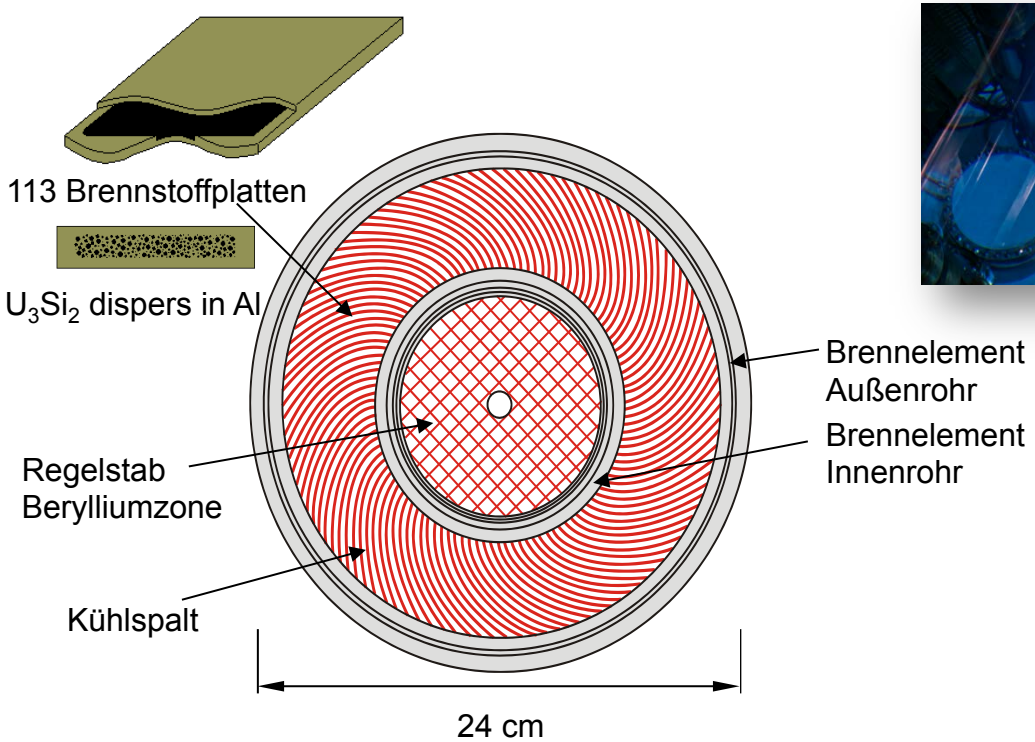
- Die totale Anzahl von Neutronen/s bzw. die thermische Leistung sind lediglich von sekundärer Bedeutung.

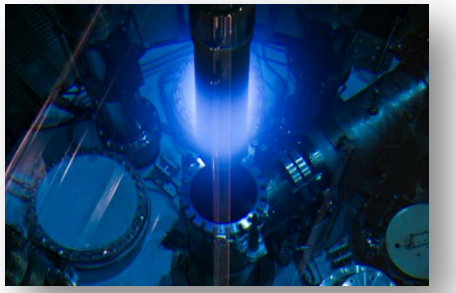
- In Technik übersetzt heißt dies nur das nutzbare Isotop U-235 (hohe Anreicherung) auf engstem Raum gepackt (höchste Packungsdichte) unter Einhaltung konservativer Sicherheitskriterien. Deshalb basieren heute weltweit ALLE kontinuierlichen Hochleistungsneutronenquellen auf hochangereichertem Uran-235 in möglichst dichter metallischer Packung.

- Eine auf Hochtechnologie basierende Wirtschaft wie die deutsche benötigt eine Neutronenquelle höchster Brillanz.

- Weltweit wird daran geforscht, die Packungsdichte des Urans weiter zu erhöhen, um in gleichem Masse die Anreicherung herabzusetzen zu können.

Was macht eine moderne Neutronenquelle – FRM II - aus?





→ FRM II Weltweit einzigartig:
Das kompakteste Brennelement
20 MW thermische Leistung
8,1 kg Uran (93% ^{235}U)
Höchstes Fluss-Leistungs-Verhältnis

Vergleich		Betrieb seit	Thermische Leistung	Zykluslänge	HEU	Thermischer Fluss
HFIR	Oakridge, USA	1965	100 MW	23 Tage	8 - 10 kg	~ 10^{15} Neutronen/cm^2
ILL	Grenoble, Frankreich	1972	58 MW	44 Tage		
FRM II	**München**	**2004**	**20 MW**	**60 Tage**		

→ Hochleistungsneutronenquellen mit hochangereichertem Uran sind das nachhaltigste Konzept zur Erzeugung von hoher Neutronen Brillanz

1. Wozu Neutronen?

2. Warum hochangereichertes Uran?

3. Besorgung und Entsorgung von hochangereichertem Uran – Aspekte der Proliferation und Endlagerung

Sicherstellung der langfristige Brennstoffversorgung des FRM II

- Die Versorgung des FRM II mit hochangereichertem Uran (HEU) erfolgt durch bilaterale Abkommen im Rahmen des Nichtverbreitungsvertrags von Kernwaffen (non-proliferation treaty).

- In der Vergangenheit haben die Geberländer aus Gründen der non-proliferation auf die Rückführung der abgebrannten Brennelemente bestanden, denn diese beinhalten nach wie vor HEU.
  Beispiel FRM II: frisches Brennelement 8,1 kg HEU, abgebranntes Brennelement 6,9 kg HEU

- Für die langfristige Versorgung des FRM II mit HEU ist es notwendig, die Option der Rückführung der abgebrannten Brennelemente in das Geberland des HEU offen zu halten.

Aspekte der Endlagerung abgebrannter Brennelemente von Forschungsreaktoren

- Endlagerung der abgebrannten BEs von HEU Reaktoren erfordert
  i) die ewige Sicherstellung der Unter-Kritikalität
  ii) der ewige Schutz vor Entwendung wegen Proliferation

- Deutsche Endlagerkonzepte berücksichtigen KEINE Vorsorge für die direkte Endlagerung von BEs mit erheblichem HEU Anteil. Vorsorge für die Lagerung von HEU BEs erschwert ein deutsches Endlager erheblich bzw. macht seine Realisierung de facto unmöglich.

- Lösungsweg: Konditionierung der abgebrannten HEU BEs, hierbei Trennung des wärmeentwickelnden radioaktiven Anteils vom HEU. Wärmeentwickelnder Abfall fällt in Form von Glaskokillen analog zum Abfall aus Kernkraftwerken an, reduziert drastisch das zu lagernde Volumen und ist völlig kompatibel mit dem deutschen Endlagerkonzept. Das Uran wird mit ca. 1 % Anreicherung in den Kreislauf für die zivile Nutzung rückgeführt.

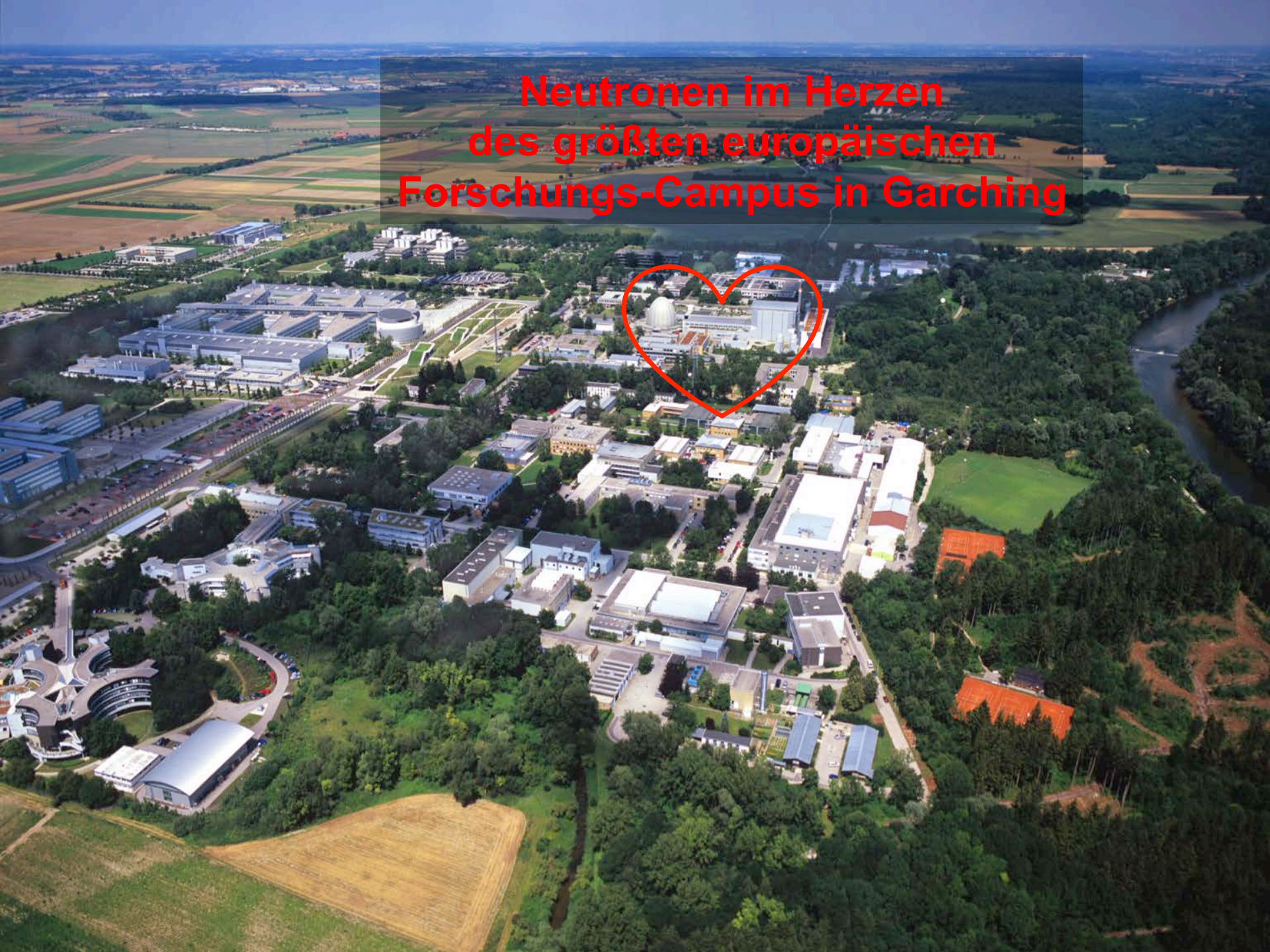
- Konditionierung ist technisch und rechtlich in Deutschland nicht möglich, jedoch im Ausland unter Rückführung des kompletten radioaktiven Abfalls nach Deutschland.

- Der FRM II arbeitet gemeinsam mit internationalen Partnern an der Entwicklung hochdichter Uranbrennstoffe, so dass mittelfristig die Anreicherung der Brennelemente des FRM II erniedrig werden kann

Neues Standortgesetz

- Mit den Formulierungen im neuen Standortgesetz ist sowohl dem Aspekt der Versorgung der Forschungsneutronenquelle als auch der Endlagerung ihres Wärme entwickelnden Abfalls Rechnung getragen und zwar unter Berücksichtigung der **non-proliferation** als auch der **Endlagerfähigkeit**.

Im neuen Standortauswahlgesetz heißt es:
„(6) Die Erteilung einer Genehmigung zur Ausfuhr von aus dem Betrieb von Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen zu Forschungszwecken stammenden bestrahlten Brennelementen darf nur aus schwerwiegenden Gründen der Nichtverbreitung von Kernbrennstoffen oder aus Gründen einer ausreichenden Versorgung deutscher Forschungsreaktoren mit Brennelementen für medizinische und sonstige Zwecke der Spitzenforschung erfolgen. Davon ausgenommen ist die Verbringung der Brennelemente nach Satz 1 mit dem Ziel der Herstellung in Deutschland endlagerfähiger und endzulagernder Abfallgebinde. Abweichend von Satz 1 darf eine Genehmigung zur Ausfuhr bestrahlter Brennelemente nach Satz 1 nicht erteilt werden, wenn diese Brennelemente auf der Grundlage einer Genehmigung nach § 6 im Inland zwischengelagert sind.“


Neutronen im Herzen
des größten europäischen
Forschungs-Campus in Garching