

RC-01



Prof. Dr. habil. Gert Bernhard

Professor (em.) Radiochemie/Radioökologie TU Dresden

und

Institut für Ressourcenökologie (ehemals Institut für Radiochemie)

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf

Vorlesung:

„Radiochemie“

Diese Vorlesung wurde im Mastermodul Umwelt- und Radiochemie an der Technischen Universität Dresden, Fachbereich Chemie- und Lebensmittelchemie gehalten.

Die Kopien von Vorlesungsfolien sind nur für den internen Gebrauch und nicht zur Weitergabe bestimmt, da insbesondere das Copyright von einzelnen Abbildungen diese Einschränkungen bedingt.

Die verwendeten allgemeinen Referenzen (siehe Folien 5/6) sind in der Regel auf den Folien per Zahl angegeben.

Seminare / Praktikum / Prüfung

Modul „Umwelt- und Radiochemie“:

- Thematische Seminare (je 0,5 h)

- * Strahlenschutz und Radioaktivitätsmessung**
- * Sorption von Uran an mineralischen Systemen**
- * Bestimmung der Bindungsform (Speziation) von Actiniden/Lanthaniden mittels spektroskopischer Methoden**
- * Wechselwirkung von Metallen in Biosystemen**

- Experimentelles Praktikum (5 Tage):

- * Radioaktivitätsmessung**
- * Sorption von Metallen an verschiedenen Mineralen**
- * Spektroskopie von Metallkomplexen**
- * Interaktion von Bakterien mit Metallverbindungen**

- Prüfung Modul:

- * Klausur (2h)**

- Prüfung nur „Umweltchemie“

- * Klausur (1h)**

0. Einleitung

0.1 Literatur, Gliederung

Literatur I

- 1.) K. H. Lieser:
Einführung in die Kernchemie,
VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1991, auch
J.-V. Kratz, K.H. Lieser:
Nuclear and Radiochemistry: Fundamentals and Applications, 2 Volume Set, 3rd Edition
Wiley-VCH Verlagsgesellschaft mbH
ISBN 978-3527329014
- 2.) G. Choppin, J. Rydberg, J. O. Liljenzin:
Radiochemistry and Nuclear Chemistry,
Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, 1995
- 3.) L. Herforth, H. Koch:
Praktikum der Radioaktivität und Radiochemie,
J. A. Barth, Leipzig, 1992
- 4.) C. Keller:
Radiochemistry,
Ellis Horwood Ltd., Chichester, 1988
- 5.) C. Keller:
Grundlagen der Radiochemie
Verlag Salle, Frankfurt
SBN-10: 3793554872

Literatur II

- 6.) A. Siehl:
Umweltradioaktivität,
Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1996
- 7.) H. Kiefer, W. Koelzer:
Strahlen und Strahlenschutz,
Springer Verlag, Berlin, 1987
- 8.) W. Stolz:
Radioaktivität (Grundlagen-Messung-Anwendungen)
B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1996
- 9.) Autorenkollektiv
Radioaktivität und Kernenergie
Forschungszentrum Karlsruhe, ISBN 3-923704-26-7
- 10.) M. Volkmer
Kernenergie Basiswissen
Hrsg. DAtF, 2013 bzw. Hrsg. Informationskreis Kernenergie 1985 u.f.
- 11.) M. Volkmer
Radioaktivität und Strahlenschutz
Hrsg. DAtF, 2012 bzw. Hrsg. Informationskreis Kernenergie 1985 u.f.
- 12.) U. Schindewolf, J. Hornke
Kernenergie
Bunsen-Magazin 1(12), 2010

0 **Einleitung**

0.1 **Literatur, Gliederung**

0.2 **Themen, Definitionen**

1 **Radioaktivität in der Natur**

1.1 **Entdeckung der Radioaktivität**

1.2 **Periodensystem, Nuklidkarte, Kernaufbau, Kernstabilität**

1.3 **Umwandlungsgesetz, Gleichgewichte**

1.4 **Kernumwandlungen, Strahlungsarten, Kernreaktionen**

1.5 **Umweltradioaktivität**

2 **Strahlenschutz und Dosimetrie**

2.1 **Strahlung und Risiko**

2.2 **Gesetzliche Grundlagen des Strahlenschutzes**

2.3 **Wechselwirkung Strahlung - Materie**

2.4 **Strahlungsmessung, Spektrometrie, Dosimetrie**

3 Analytik und Chemie radioaktiver Elemente und Isotope

- 3.1 Altersdatierung (^{14}C -Methode)**
- 3.2 Neutronenaktivierungsanalyse**
- 3.3 Indikatormethoden**
- 3.4 Tracertechnik und Markierung**
- 3.5 Strahlenchemie**
- 3.6 Actinidenchemie**

4 Radiochemie und Kerntechnik

- 4.1 Reaktoren**
- 4.2 Beschleuniger**
- 4.3 Bombe**

5 Radionuklidproduktion

- 5.1 Grundlagen**
- 5.2 Herstellung von Molybdän-99/Technetium-99m**
- 5.3 Anwendungen von Radionukliden**
- 5.4 Synthese künstlicher Elemente**

6 Nukleare Entsorgung

- 6.1 Kernenergie und Ausstieg**
- 6.2 Radioaktiver Abfall und Abbau von Kernanlagen**
- 6.3 Kernbrennstoffkreislauf**
- 6.4 Nukleare Entsorgung**

0.2 Themen, Definitionen

- Themen

Welche radiochemischen Themen sind von Aktualität auch vor dem Hintergrund des Ausstiegs aus der Kernenergieerzeugung in Deutschland.. Das Fukushima-Ereignis als auslösendes Moment des deutschen Ausstiegs.

Warum noch Beschäftigung mit Radioaktivität und Radiochemie.

Aktuelle radiochemische Themen

-
-
-
-
-
-



Themen der Radiochemie/Kernchemie

- **Radio- und Kernchemische Grundlagenforschung**
(Synthese schwerster Elemente, Kernreaktionen)
- **Kernenergiegewinnung**
(Reaktor, Kernbrennstoffzyklus, Entsorgung, Endlagerung)
- **Chemie der Actiniden/ radioaktiver Elemente**
- **Nuklearchemie in den Lebenswissenschaften**
- **Geowissenschaften und Kosmochemie**
- **Strahlenschutz und Radioökologie (Störfälle...)**
- **Bestrahlungsquellen, Radioindikatoren**
- **Tritium-Chemie in der Fusionstechnologie**
- **Nuklearmedizin (Diagnostik/Therapie)**
- **(Waffenproduktion)**



Kernkraftwerk Philippsburg
enbw.co



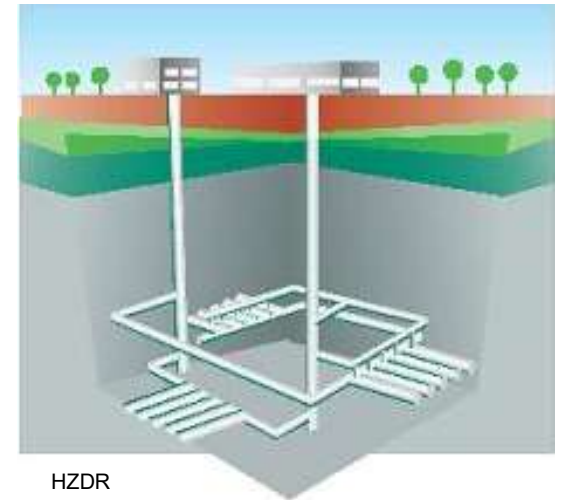
Bild WAA Sellafield
Wikipedia.org



WISMUT GmbH



<https://www.wikipedia.de/>



HZDR

Geschehen in Nuklear-Reaktoranlage

Fukushima Daiichi, Japan 2011

I

*Entscheidender Einschnitt für die weltweite Anwendung der Kernenergie,
Konsequenz für die Nutzung in D Ausstiegsbeschluss ... welche Kenntnisse technisch/wissenschaftlich
müssen trotzdem noch vorgehalten werden? Problem des Kompetenzerhalts!*



Geschehen in Nuklear-Reaktoranlage

Fukushima Daiichi, Japan 2011

II

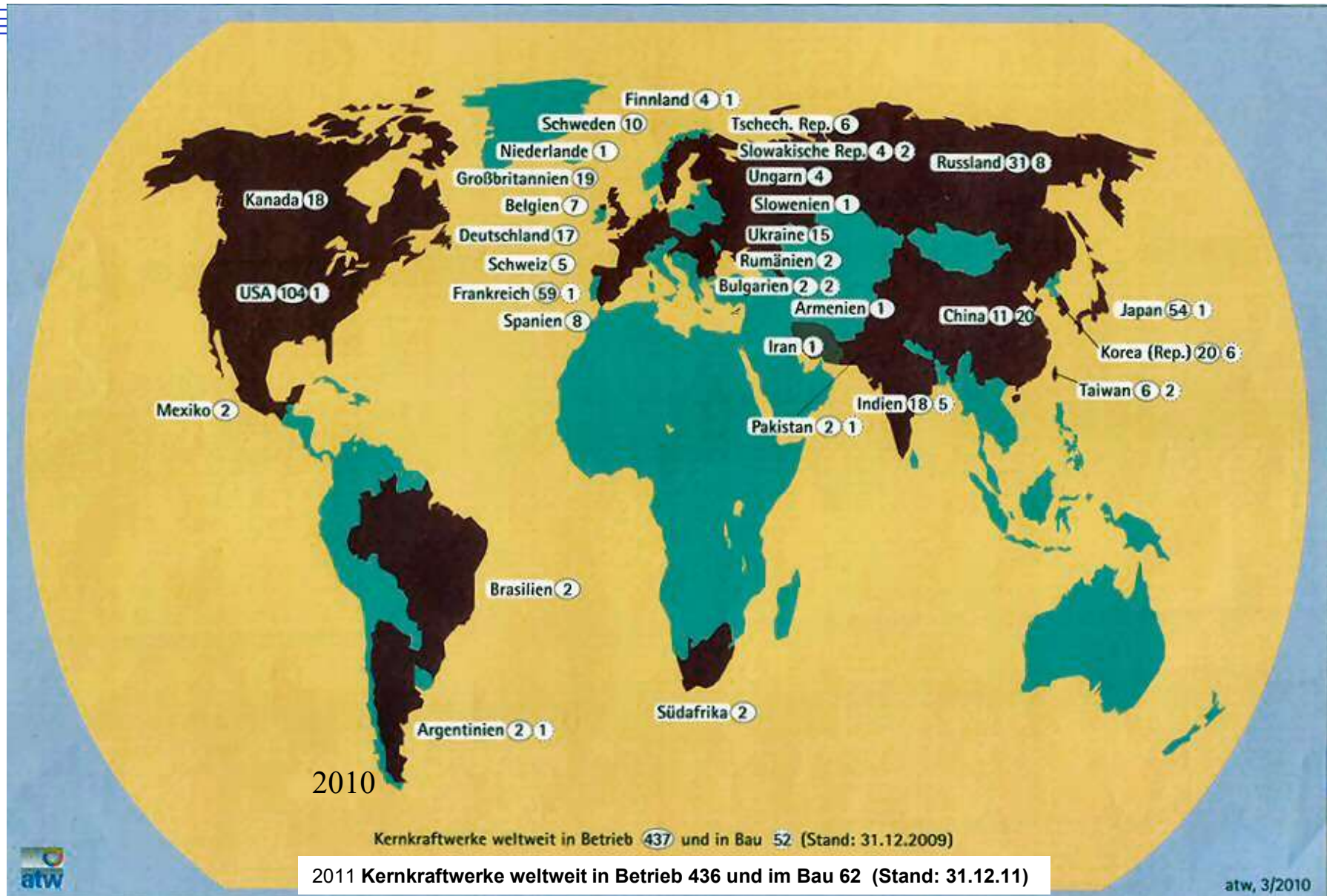
- Seebeben der Stärke 9,0 (Magnitude),
- Auslösung von Flutwellen (Tsunamis)
- Stromnetz der Region brach zusammen
- älteste Generation japanischer KKW
- durch Tsunami Ausfall der Notstromaggregate
- unzureichende Kühlung der aktiven Blöcke 1 bis 3
- Überhitzung, Wasserstoffbildung, Explosion



By Janet Loehrke, USA TODAY

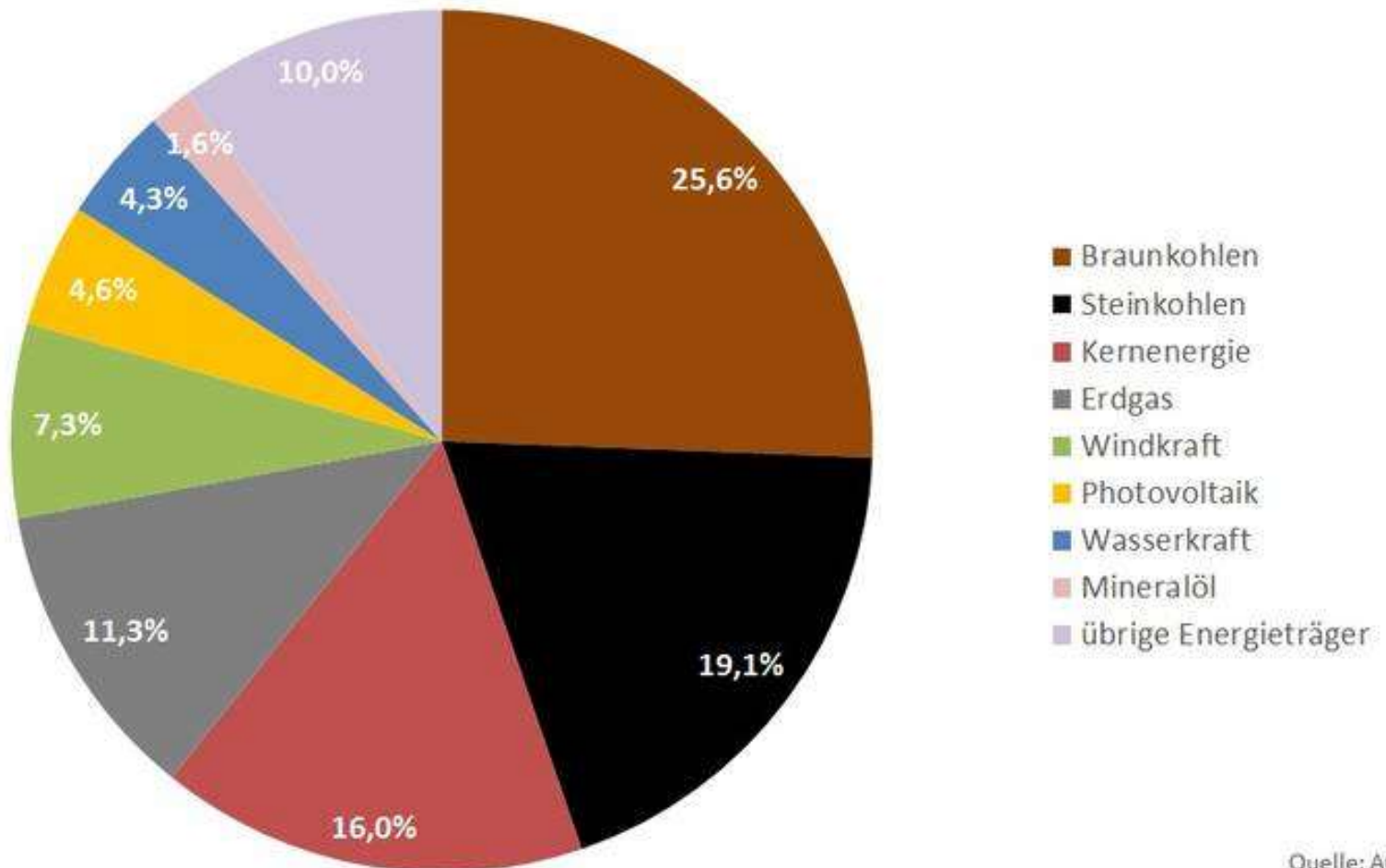


Übersichtskarte der Kernkraftwerke betreibenden Länder weltweit 2010/2011



Bruttostromerzeugung in Deutschland 2012

Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern 2012



Ausstiegsgang an Kernenergiestrombilanz ablesbar...

2010 wurden noch ca. 22,6% des Stroms aus Kernenergie erzeugt, 1990 ca. 27,7%

*Wo ordnet sich die Radiochemie/Nuklearchemie (nucleus – Kern, radio-) als Fachgebiet ein?
Kernwissenschaften, eingeteilt in Kernphysik, Kernchemie und Kerntechnik.
Kern- und Radiochemie und Strahlenchemie, diese sollen auch im engeren
Sinne in dieser Vorlesung behandelt werden, aber auch Aspekte der Kerntechnik.*

- Definitionen

Kernwissenschaften- I

(Nuklearwissenschaften)

Kernphysik

- physikalische Eigenschaften
- Eigenschaften der Atomkerne

Kernchemie

- *Radiochemie* -

- chemische Aspekte
- Kernumwandlungen
- Änderungen der chemischen Eigenschaften

Kerntechnik

- Grundlage ist Kernphysik und Kernchemie
- technische Auswertung (Energie, Medizin, Technik)

Kernwissenschaften- II

(Nuklearwissenschaften)

Kernchemie	Nuclear Chemistry	= Chemie der Kernreaktionen
Radiochemie	Radiochemistry	= Chemie der Radionuklide
Strahlenchemie	Radiation Chemistry	= Untersuchung chemischer Effekte unter Einfluss ionisierender Strahlung

Radioaktivität als natürliches Phänomen.

Die Geschichte der Entdeckung soll kurz gestreift werden, um dann die grundsätzlichen kernphysikalischen Grundlagen zu behandeln.

1. Radioaktivität in der Natur

1.1 Entdeckung der Radioaktivität

Entdeckung des Urans

1789

Martin Heinrich Klaproth

Analyse von Pechblende nach den Elementen Zn, Fe, W
trennte dabei UO_2 ab, dachte, es ist reines Metall
benannte es als Uran (nach dem Planeten Uranus)



Röntgenstrahlung

(Aufnahme der Hand Geheimrat von Kölliker; Würzburg 23.01.1896 mittels X-Strahlen durch W. C. Röntgen)



<https://www.wikipedia.de/medizinischestrahlung.de>



<http://images.google.de/imgres?imgur>

Wilhelm Conrad Röntgen entdeckte 1895 bei Untersuchungen der Elektrizitätsentladung von hoch evakuierten Röhren die später nach ihm benannte Röntgen-Strahlung. Innerhalb weniger Wochen hatte er das Verhalten und die Eigenschaften dieser „X-Strahlen“ untersucht und beschrieben, sodass zum Jahreswechsel die Würzburger Physikalisch-Medizinische Gesellschaft bereits einen Sonderdruck mit Röntgens vorläufiger Mitteilung „Über die neue Art von Strahlen“ versenden konnte. Auf den Wellencharakter dieser elektromagnetischen Strahlung wies 1912 Max Laue hin.

Entdeckung der Radioaktivität des Uran

1896 Henri Becquerel

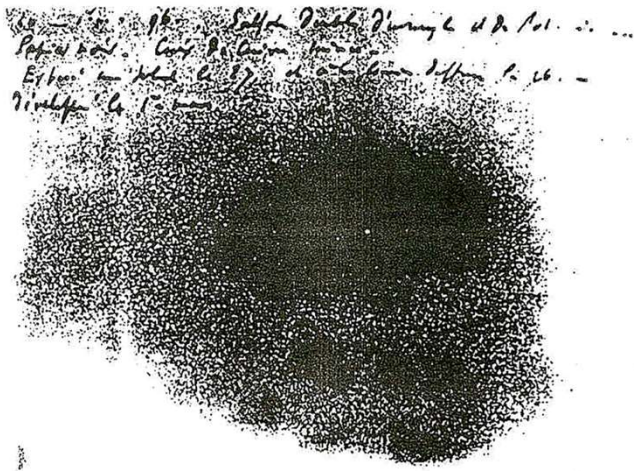
Untersuchungen zum Zusammenhang von X-Strahlung und Phosphoreszenz

Schwärzung von Fotoplatten durch in schwarzem Papier verpackte Uransalze (Ausschluss des Sonnenlichtes)

Schwärzungsintensität proportional der Uranmenge

Becquerelstrahlung

Entdeckung des „Phänomens Radioaktivität“



<https://www.wikipedia.de/>



Charakteristik Fluoreszenz/Phosphoreszenz

- Fluoreszenz

Lebensdauer $10^{-9}\text{s} - 10^{-7}\text{s}$ (nur während der Anregung beobachtbar)
je höher die Anregungsintensität, je intensiver die Fluoreszenz
Anzahl der fluoreszierenden Stoffe ist begrenzt
intensive Fluoreszenz: aromatische Moleküle (Anthracen, Fluorescein, Fluoren)
analytisch wird auch Fluoreszenzlöschung ausgenutzt (Quenching)
Selbstabsorption: Emission erfolgt bei Absorptionswellenlänge

- Phosphoreszenz

Lebensdauer $10^{-3}\text{s} - 10\text{s}$
Anregung muss mechanisch oder elektronisch unterbrochen werden, um Phosphoreszenz messen zu können
Probe stark kühlen um Deaktivierung durch Kollision mit Molekülen gering zu halten

Entdeckung der Radioaktivität



(Marie Curie 1867 – 1934, Pierre Curie 1859 – 1906)



deutsches-museum.de

1898 Marie Curie (mit Pierre Curie, H. Becquerel)

Th-Strahlung ähnlich Uran

1902 einige Uranerze waren radioaktiver als reines Uran (Polonium, Radium Entdeckung)

Strahlung ist unabhängig vom chemischen und physikalischen Zustand

Entdeckung der Radioaktivität

- 1909** **Geiger und Marsden Streuexperimente mit Alpha-Teilchen**
- 1911** **Interpretation durch Rutherford → Atomkern**
- 1919** **Rutherford: 1. Kernumwandlung**
 $N + \alpha \rightarrow O + p$
- 1930** **Cockcroft und Walton: 1. Beschleuniger**
 $Li + p \rightarrow \alpha + \alpha$ (1. Kernzertrümmerung)
- 1932** **Entdeckung des Neutrons durch Chadwick**
Erklärung der Isotopie
- 1934** **Irène Joliot-Curie und Frédéric Joliot**
Radioaktive Phosphor- und Silicium-Isotope durch Kernumwandlung
- 1938** **Entdeckung der Kernspaltung durch Otto Hahn und Fritz Straßmann, Lise Meitner**

Entdeckung der Radioaktivität

1938 Entdeckung der Kernspaltung durch Otto Hahn und Fritz Straßmann, Lise Meitner

Deutsches Museum, München



<https://www.wikipedia.de/>

O. Hahn und F. Straßmann
im Deutsches Museum München
vor dem Arbeitstisch des
Berliner Teams (1962)

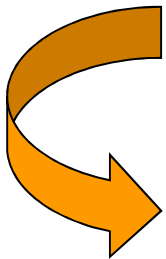
Teil des Arbeitstisches, auf dem O. Hahn und F. Straßmann
Ende des Jahres 1938 die Kernspaltung experimentell nachwiesen

Lise Meitner(1878-1968)



Entdeckung der Radioaktivität

- 1939 Synthese/Abtrennung der Elemente
Neptunium (Z=93), Plutonium (Z=94)**
- 1942 1. Kernreaktor kritisch
Enrico Fermi, Chicago – Manhattan Projekt**
- 1945 1. Atombomben auf Hiroshima und Nagasaki**
- 1951 1. Kernreaktor zur Energiegewinnung**



Industrielle Kernenergiegewinnung
Kernbrennstoffkreislauf
Radioaktive Nuklide und Bestrahlungsanlagen für Medizin und Wirtschaft
Arbeiten zur Kernfusion
Synthese schwerster Elemente

Erste Untersuchungen zum Wesen der Radioaktivität

- Begriff „Radioaktivität“ von **Marie Curie** geprägt:
„Aussenden energiereicher Strahlung aus Atomen“
lat. radius = der Strahl

Pierre Curie:

Ablenkungsversuche von radioaktiver Strahlung im Magnetfeld:
3 Arten der Strahlung, genannt α , β , γ – Strahlung
- positiv geladen, negativ geladen, nicht geladen

Ernest Rutherford und Mitarbeiter

α -Strahlen: positiv geladen, Heliumkerne ${}^4_2\text{He}^{2+}$
 β -Strahlen: negativ geladene Teilchen, schnelle Elektronen
 γ -Strahlen: ähnlich Röntgenstrahlung eine elektromagnetische Strahlung hoher Energie

Ernest Rutherford, Frederick Soddy 1902

Hypothese: Radioaktivität ist auf spontanen Zerfall von Atomkernen zurückzuführen,
bei Zerfall wird radioaktive Strahlung frei und es bilden sich Atome eines anderen Elementes

Definition der Radioaktivität

- **spontane Umwandlung instabiler Kerne unter Energieabgabe**
- **Energieabgabe erfolgt in Form ionisierender Strahlung**
 - * **direkt vom Atomkern aus**
 - * **indirekt durch die Kernumwandlung in der Elektronenhülle erzeugt**
- **spontaner exothermer Vorgang wird bezeichnet als:**
radioaktive Umwandlung – radioaktiver Zerfall
- **Arten der Umwandlungen:**
 - Alphaumwandlung
 - Betaumwandlung (β^- , β^+ , Elektroneneinfang)
 - Gammaübergänge (γ -Strahlung, Kernisomerie, innere Konversion, Mößbauer Effekt)
 - spontane Kernspaltung
 - spontane Nukleonenemission
 - spontane Emission schwerer Teilchen

Radioaktivität

Mensch hat kein Sinnesorgan für Radioaktivität (erst zu Erkennen an Schädigungen z.B. Hautrötungen), Radioaktivität macht das, was Alchimisten wollten, Elemente umwandeln.

- **Eigenschaft vieler Stoffe, die in der Natur vorkommen**
- **Mensch hat kein Sinnesorgan zur direkten Wahrnehmung der Radioaktivität**
- **Phänomen der Radioaktivität erst Ende des 19. Jahrhunderts entdeckt**
- **entscheidende Auswirkungen auf Wissenschaft und Technik; auf Mensch und Umwelt**