

## Technische Aspekte der Kernfusion

# Inhalt

## 1 Allgemeines Konzept

## Inhalt

- 1 Allgemeines Konzept**
  
- 2 Grundlegende Probleme und Lösungen**

## Inhalt

- 1 Allgemeines Konzept**
- 2 Grundlegende Probleme und Lösungen**
- 3 Gegenwärtige Projekte**

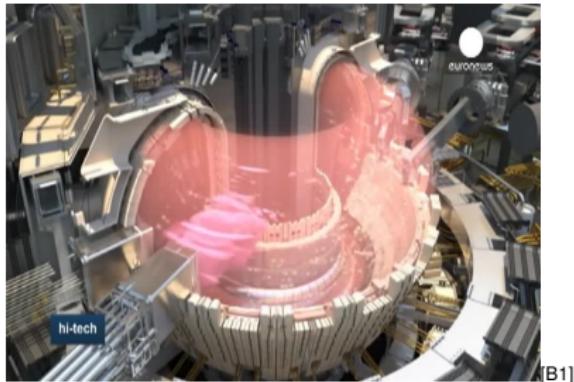
## Inhalt

- 1 Allgemeines Konzept**
- 2 Grundlegende Probleme und Lösungen**
- 3 Gegenwärtige Projekte**
- 4 Blick in die Zukunft**

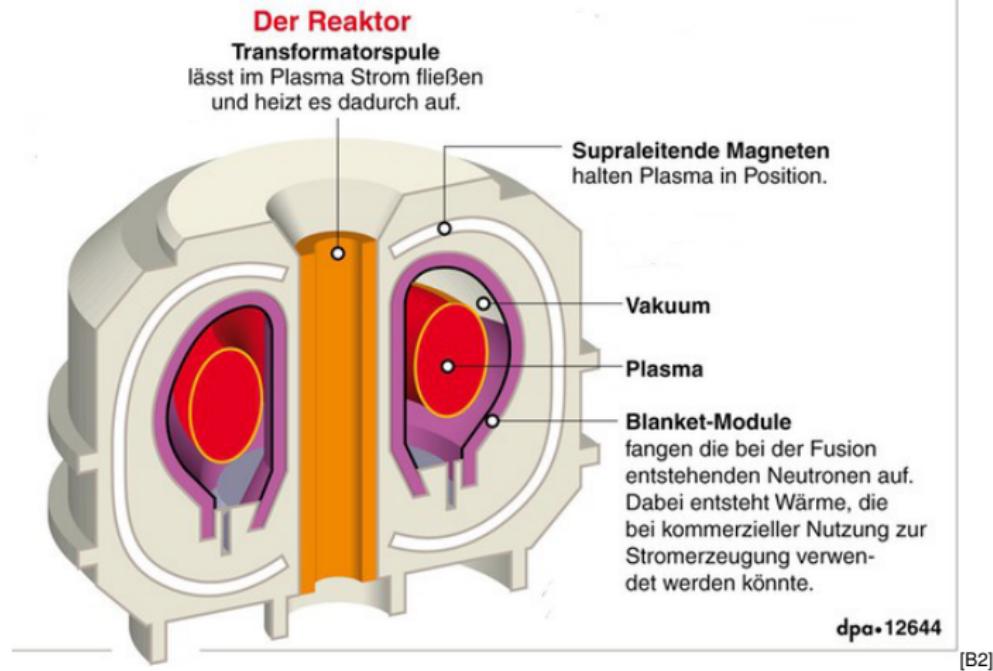
## Inhalt

- 1 Allgemeines Konzept**
- 2 Grundlegende Probleme und Lösungen**
- 3 Gegenwärtige Projekte**
- 4 Blick in die Zukunft**
- 5 Quellen**

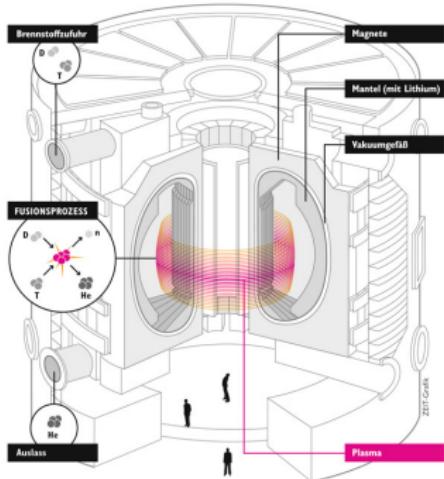
## Allgemeines Konzept



- $H_2 + H_3 \rightarrow He_4 (3,5\text{MeV}) + n (14,1\text{MeV})$
- Gasgemisch ( $< 0,1\text{g}$ ) bildet ab  $T \approx 200 \cdot 10^6 \text{ K}$  wirtschaftlich interessantes Plasma
- Supraleitende Elektromagnete (B bis zu 10 T) halten Plasma im Torus
- Plasmadruck von etwa  $10^6 \text{ Pa}$
- Leistung von mehreren MW/m<sup>3</sup>



## Energiegewinnung



Das Prinzip: Deuterium (D) und Tritium (T) fusionieren zu Helium (He) –  
dabei werden Neutronen ( $n$ ) und Energie frei

[B18]

- Ein Neutron (14,1 MeV) pro Reaktion
- Durch Stöße wird thermische Energie als Wärme abgegeben
- Teilenergie zur Heizung des Plasmas
- Rest durch Stöße im Blanket als Wärme abgegeben
- Wärmetauscher leitet Wärme weiter
- Erzeugter Wasserdampf: Antrieb für Dampfturbinen

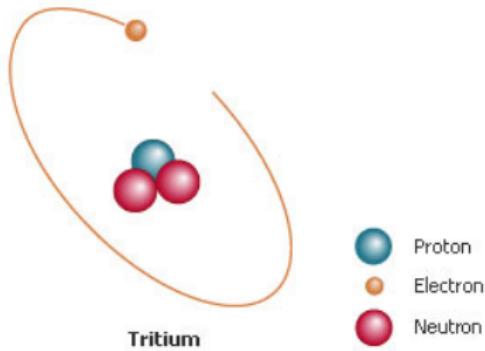
## Allgemeine Probleme



- Tritium ( $H_3$ ) kommt in der Natur fast nicht vor  
 $\tau_{1/2} \approx 12$  a
- Freie Neutronen aktivieren die verwendeten Materialien
- Sehr hoher Druck und Temperatur notwendig
- Messung der Temperatur innerhalb des Plasma

[B3]

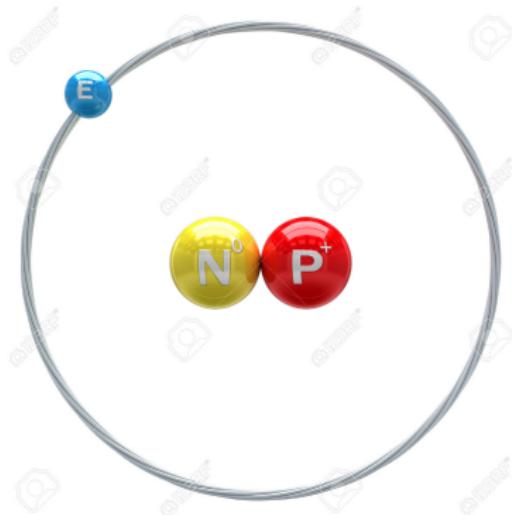
Tritium ( $H_3$ )



- Die Fusionsreaktoren müssen Tritium im Blanket selbst brüten
  - $n + Li_6 \rightarrow He_4 (2,1\text{MeV}) + H_3 (2,7\text{MeV})$
  - $n + Li_7 \rightarrow He_4 + H_3 + n - 2,46\text{MeV}$
  - Größter Anteil aus Reaktion mit  $Li_6$  welches 7,5%  $H_3$  beinhaltet
  - Im Jahr verbraucht ein [GW]-Fusionsreaktor etwa 120 kg  $H_2$  und 4 t Li

[B4]

## Deuterium



- $\text{H}_2$  kann günstig aus Meerwasser gewonnen werden
- Ein Liter Meerwasser beinhaltet etwa 0,02 g  $\text{H}_2$
- Weltweit verbrauchte Leistung im Jahr: 2,4 TW
- ⇒ Genug  $\text{H}_2$  für über 50 Milliarden Jahre

[B5]

## Lithium

- Weltvorrat an Li  $\approx 13,5 \cdot 10^6$  t
- $\Rightarrow$  Genug Brennstoff für etwa 1000 Jahre
- Meerwasser enthält etwa 0,2 mg Li pro Liter
- Genug Material für über 25 Millionen Jahre
- Effiziente Li Gewinnung aus Meerwasser nötig



## Aktives Material

- Freie Neutronen verursachen Transmutationen im umliegenden Material
- Stahl, Wolfram etc. werden aktiv



[B7]

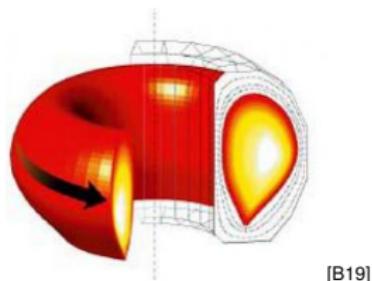
**EUROFER**  
The European Steel Association

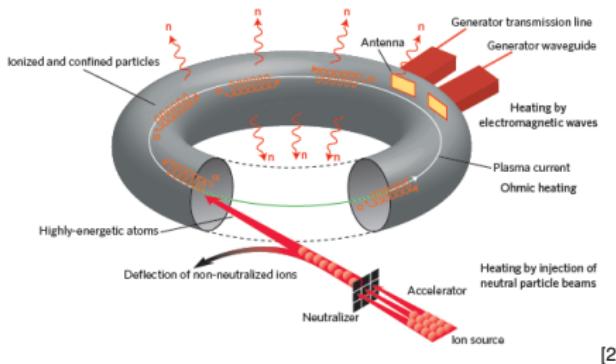
- Materialien wie EUROFER (Stahl) müssen verwendet werden
- Veränderungen resultieren in kurzlebige Radionuklide
- Innerhalb von 100–200 Jahren werden Materialien recyclebar

[B8]

## Temperaturmessung im Plasma

- Charakterisiert durch emittiertes Plasmalicht
- Höchste mittlere Temperatur in der Mitte des Plasmas
- Plasmaoberfläche: Dichte und Temperatur viel geringer
- Ionen und Elektronen besitzen verschiedene Temperaturen
- Verschiedene Verfahren notwendig





- Heizung des Plasmas durch elektromagn. Wellen
- Radio-Frequenz-Heizung (Wellenlängen 15 - 30 m)
- Verunreinigungen ins Plasma beschleunigt
- Neutral geladene Teilchen passieren Magnetfeld
- Eingebrachte Teilchen heizen Plasma durch Kollisionen
- Stöße der Fusionsprodukte heizen zusätzlich

## Messung der Temperatur von Ionen

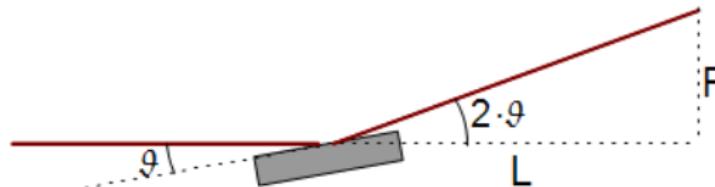
- Verunreinigungen (Fe, Ar) durch Beschleuniger injiziert
- Im Plasma ionisiert zu  $\text{Fe}^{24+}$ ,  $\text{Ar}^{17+}$  und  $\text{Ar}^{18+}$
- Heiße Ionen emittieren Wärmestrahlung
- Spektrum im Bereich der weichen Röntgenstrahlung (bis 15 keV)
- Reflexion an sphärischen Quartz oder Germanium Kristallen



[B20]

## Spektralanalyse

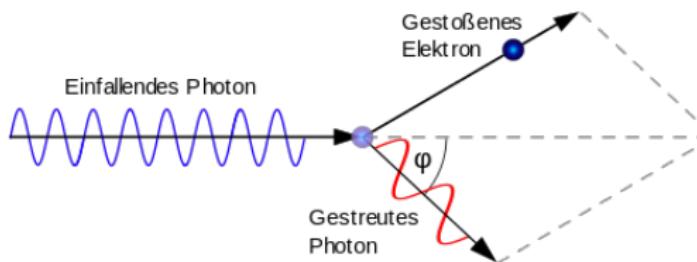
- Astigmatische Eigenschaft des sphärischen Kristalls
- Strahlen werden unterschiedlich stark gebrochen
- Braggreflexion
- Hohe räumliche Auflösung (1cm)
- Hohe zeitliche Auflösung (<10 ms)



[B21]

## Kerntemperatur: Thomson-Streuung

- Laser wird in das Plasma geschossen
- Streuung im Plasma charakterisiert Kenngrößen
- Laser-Repetitionsrate bestimmt zeitliche Auflösung
- Im zweistelligen ms Bereich
- Strahlintensität bestimmt räumliche Auflösung
- Wenige mm



[B23]

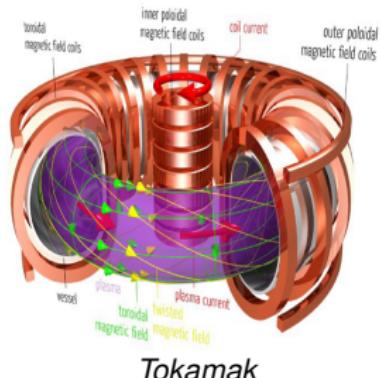
## Gegenwärtige Projekte

## Gegenwärtige Prinzipien: Stellarator und Tokamak

- Magnetfeld vollständig durch die Spulen erzeugt
- Magnetfeldlinien helikal verdrillt
- Wendelstein 7-AS und 7-X, LHD (Japan), TJ-II (Spanien) ...



[B9]



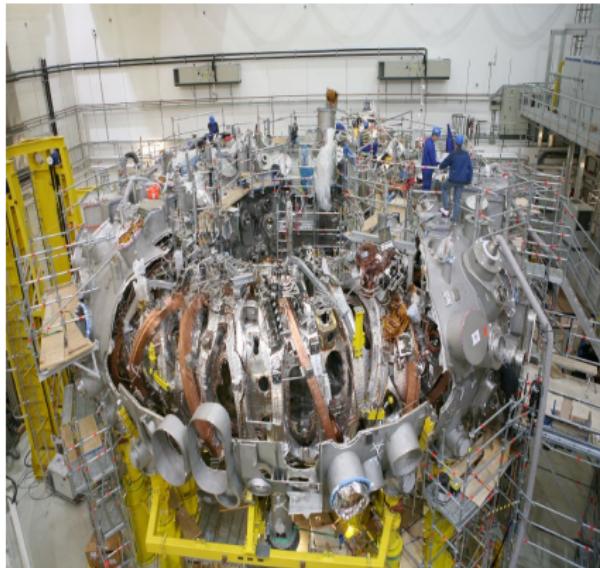
[B10]

- Magnetfeld teilweise durch Plasmastrom erzeugt
- Die leistungsfähigsten Anlagen basieren auf diesem Prinzip
- ITER (Südfrankreich), JET (Großbritannien), NSTX (USA), ...

Gegenwärtige Projekte



## Wendelstein 7-X



- Weltweit größte Stellaratoranlage
- Aufgabe: Untersuchung der Kraftwerkseignung von Stellaratoren
- Hauptmontage wurde 2014 abgeschlossen
- Erste Plasmaerzeugung am 10. Dezember 2015 aus He-Gas (seit Februar 2016 aus H)
- Ziel: bis zu 30 Minuten lange Plasmaentladungen

Technische Daten Wendelstein 7-X	
mittlerer großer Radius des Plasmas	5,5 m
mittlerer kleiner Radius des Plasmas	0,53 m
Volumen des Plasmas	$\approx 30 \text{ m}^3$
Masse des Plasmas	5–30 mg
erwartete Dichte des Plasmas	bis zu $1,5 \cdot 10^{20}$ Teilchen / $\text{m}^3$
erwartete Temperatur der Elektronen	bis zu 150 Millionen K
erwartete Temperatur der Ionen	bis zu 50 Millionen K
angestrebte Einschlussdauer (Langpuls-Betrieb)	30 min
Volumen des Plasmagefäßes	$\approx 50 \text{ m}^3$
Vakuumgefäß	Durchmesser: 16 m; Höhe: 5 m

[B13]

## Messergebnisse

- Pulsdauern von bis zu 6 Sekunden
- Höchste gemessene Plasmatemperaturen bei 4MW Mikrowellenheizleistung:  
100 Millionen Grad für die  $e^-$   
10 Millionen Grad für die Ionen
- Betrieb wurde am 10. März 2016 planmäßig eingestellt
- Momentan finden Umbauten statt

## Joined European Torus (JET)



[B14]

- Europaweit gemeinsam betriebene Versuchsanlage in Culham, Großbritannien
- 283 Millionen schwerer Finanzierungsvertrag zwischen EU-Kommission und dem CCFE
- Betrieb bis 2018 gesichert

## Technische Details



[B15]

- Tokamak: 15 m Durchmesser, 12 m Höhe
- Vakuumgefäß: D-förmiger Querschnitt
- 4,2 m Höhe und 2,5 m Breite
- Volumen  $\approx 200 \text{ m}^3$
- 2,96 m äußerer Plasmaradius
- 1,5 m mittlerer kleiner Plasmaradius
- 80 - 100  $\text{m}^3$  Plasmavolumen

## Messergebnisse

- Baubeginn 1977
- Weltrekord seit 1997
- Bei 24 MW Heizleistung wurde 16 MW Fusionsleistung erzeugt
- Magnetfeld von 4 T
- Temperatur  $\approx 325 \cdot 10^6$  K

## Gegenwärtiges Fazit

- Bisher nur negative Energiebilanz
- Keine kontrollierte Kernfusion
- Hauptgrund: Wärmeverlust im turbulenten Magnetfeld
- Wärmetransportmodell schwierig zu berechnen aber möglich
- Benötigt doppelt so großen JET
- Magnetfeldstärke  $B \approx 5\text{ T}$



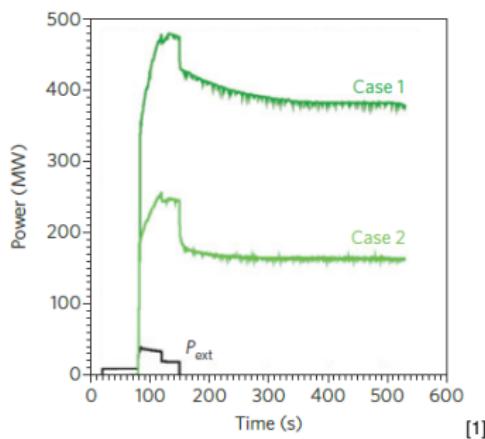
[B16]

## International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)



- Weltweite Kooperation
- Gegründet am 24. Oktober 2007
- Erprobung verschiedener Blanket-Konstruktionen (Tritium brüten)
- Verschiedene Methoden zur Plasmaheizung
- Plasma soll über eine Stunde kontrolliert brennen
- Mehr gewonnene Fusionsenergie als verbrauchte Heizenergie

## Theoretische Vorhersagen



- Maximaldruck: 1,4 Bar (Fall 1) und 0,94 Bar (Fall 2)
- Nach 80 Sekunden 40 MW Heizbetrieb
- Fusionsleistung fast 500 MW (Fall 1)
- Nach 150 Sekunden verbraucht Brennvorgang knapp 1/5 der Fusionsenergie
- Externe Heizquelle wird abgeschaltet
- Stabile Fusion bei 380MW (Fall 1)

## Wendelstein 7X: 2017

- 6000 Kohlenstoffkacheln zum Schutz der Gefäßwände verbaut
- Montage soll bis Mitte 2017 dauern
- Ab dann: Hochleistungsplasma
- 4 → 8 MW Heizleistung
- 6 → 10 Sekunden Pulsdauer

## Wendelstein 7X: 2020

- Kohlenstofffaserverstärkte Kohlenstoff-Elemente ersetzen Graphitkacheln
- Sind zusätzlich wassergekühlt
- Bis zu 30 Minuten lange Entladungen möglich (statt 10 s)
- Heizleistung von 8 → 10 MW

## Fazit

- Theoretischer Leistungsgewinn hunderter MW
- Brennstoff reicht über 25 Millionen Jahre
- Geringerer kurzlebiger Atommüll verglichen mit AKW
- Selbstabbruch bei Temperaturverlust
- Effiziente Lithiumgewinnung notwendig
- Noch keine stabile Kernfusion als Bestätigung theoretischer Annahmen

## Quellen: Paper und Links

- 1 The quest for fusion power, Steven C. Cowley, NATURE PHYSICS VOL 12 MAY 2016 [www.nature.com/naturephysics](http://www.nature.com/naturephysics)
- 2 Fusion Electricity, A roadmap to the realisation of fusion energy  
<https://www.euro-fusion.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>
- 3 As hot as it gets, Didier Mazon, Christel Fenzi and Roland Sabot, NATURE PHYSICS VOL 12 JANUARY 2016 [www.nature.com/naturephysics](http://www.nature.com/naturephysics)
- 4 <http://www.ipp.mpg.de/wendelstein7x>
- 5 [http://www.ipp.mpg.de/4095699/op1\\_1](http://www.ipp.mpg.de/4095699/op1_1)

## Quellen: Wikipedia

- W1 [https://de.wikipedia.org/wiki/Joint\\_European\\_Torus](https://de.wikipedia.org/wiki/Joint_European_Torus)
- W2 <https://de.wikipedia.org/wiki/ITER>
- W3 <https://de.wikipedia.org/wiki/Kernfusionsreaktor>
- W4 <https://de.wikipedia.org/wiki/Tokamak>
- W5 <https://de.wikipedia.org/wiki/Stellarator>

## Quellen: Bilder

- B0 Titelbild :  
<http://cdn2.spiegel.de/images/image-282591-galleryV9-lqyl-282591.jpg>
- B1 <http://videos.winfuture.de/14438.jpg>
- B2 <http://www.berlinerkurier.de/image/23211410/max600x600/600/429/f89a2679999f6fcfc6e77b95c51e00988/Nj/fusionsreaktor.jpg>
- B3 <http://www.experto.de/unloesbare-probleme-1024px-1024px.jpg>
- B4 <http://vignette3.wikia.nocookie.net/chemistry/images/3/39/Tritium-Structure.jpg/revision/latest?cb=20140113033817>
- B5 <http://previews.123rf.com/images/generalfmv/generalfmv1312/generalfmv131200021/24659998-Deuterium-atom-on-white-background-Stock-Photo.jpg>
- B6 <http://periodictable.com/Samples/003.3/s7s.JPG>
- B7 <http://images.china.cn/attachement/jpg/site1003/20110418/001372ac9cf20f1644080f.jpg>
- B8 [https://pbs.twimg.com/profile\\_images/621242151603585024/0kOsYWnh.jpg](https://pbs.twimg.com/profile_images/621242151603585024/0kOsYWnh.jpg)

## Quellen: Bilder

- B9 [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:W7X-Spulen\\_Plasma\\_blau\\_gelb.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:W7X-Spulen_Plasma_blau_gelb.jpg)
- B10 [https://de.wikipedia.org/wiki/Stellarator#Optimierter\\_Stellarator](https://de.wikipedia.org/wiki/Stellarator#Optimierter_Stellarator)
- B11 <http://www.revierkohle.de/wp-content/uploads/2016/02/wendelstein-anlage.jpg>
- B12 <http://cdn1.spiegel.de/images/image-930960-galleryV9-esey-930960.jpg>
- B13 [https://de.wikipedia.org/wiki/Wendelstein\\_7-X](https://de.wikipedia.org/wiki/Wendelstein_7-X)
- B14 <https://www.euro-fusion.org/jet/organisation/>
- B15 <https://www.euro-fusion.org/jet/research/>
- B16 [http://www.perspektive-zukunft.com/wp-content/uploads/2016/06/startseite\\_hauptbild\\_zukunft-1050x499.jpg](http://www.perspektive-zukunft.com/wp-content/uploads/2016/06/startseite_hauptbild_zukunft-1050x499.jpg)

## Quellen: Bilder

- B17 [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cf/ITER\\_Logo\\_NoonYellow.svg/2000px-ITER\\_Logo\\_NoonYellow.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cf/ITER_Logo_NoonYellow.svg/2000px-ITER_Logo_NoonYellow.svg.png)
- B18 <http://images.zeit.de/wissen/2010-06/s34-infografik/s34-infografik-thickbox.jpg>
- B19 <cdn.phys.org/newman/gfx/news/hires/2009/highperforma.jpg>
- B20 [http://img.directindustry.de/images\\_di/photo-m2/7436-2509341.jpg](http://img.directindustry.de/images_di/photo-m2/7436-2509341.jpg)
- B21 <http://gfs.khmeyberg.de/1011/1011Kurs13Ph3g/MaterialFuer101113PH3g/2010090913Ph3g06.png>
- B22 [https://wiki.physik.ruhr-uni-bochum.de/fpsowas/index.php/Datei:402\\_Sondenkopf.PNG](https://wiki.physik.ruhr-uni-bochum.de/fpsowas/index.php/Datei:402_Sondenkopf.PNG)
- B23 [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/5c/Compton\\_scattering-de.svg/500px-Compton\\_scattering-de.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/5c/Compton_scattering-de.svg/500px-Compton_scattering-de.svg.png)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!