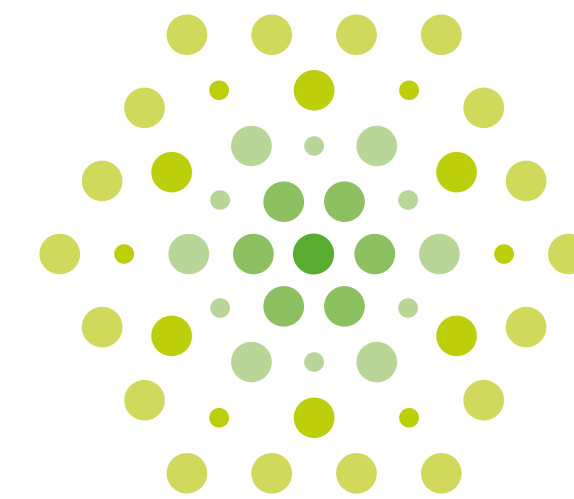


Abrüstung und Atommüll

Welche Materialien fallen bei der Abrüstung an & wie gehen wir damit um?

– Fachtagung atommuellreport 25.10.24

Sophie Kretzschmar



**Nuclear Verification
and Disarmament**

Dieser Vortrag

- 1. Kernwaffenabrüstung und -demontage**
 - Wie geht das & welche Materialien fallen an?
- 2. Entsorgung der Spaltmaterialien**
 - Hoch-angereichertes Uran
 - Plutonium
- 3. Verifikation und Irreversibilität**

Kernwaffenabrüstung und -demontage

Kernwaffenabrüstung

- **Kernwaffe**
= Nuklearer Sprengkopf + Trägersystem
- Bisherige nukleare Abrüstungsverträge:
Limitiert **direkt einsatzbereite Kernwaffen**
bzw. Trägersysteme

z.B. *New START* zwischen 🇺🇸 & 🇷🇺:
max. 1550 strategische einsatzbereite Kernwaffen
- Atomwaffenverbotsvertrag:
“[...] each State Party that owns [...] nuclear weapons or other nuclear explosive devices shall immediately [...] destroy them as soon as possible [...]”



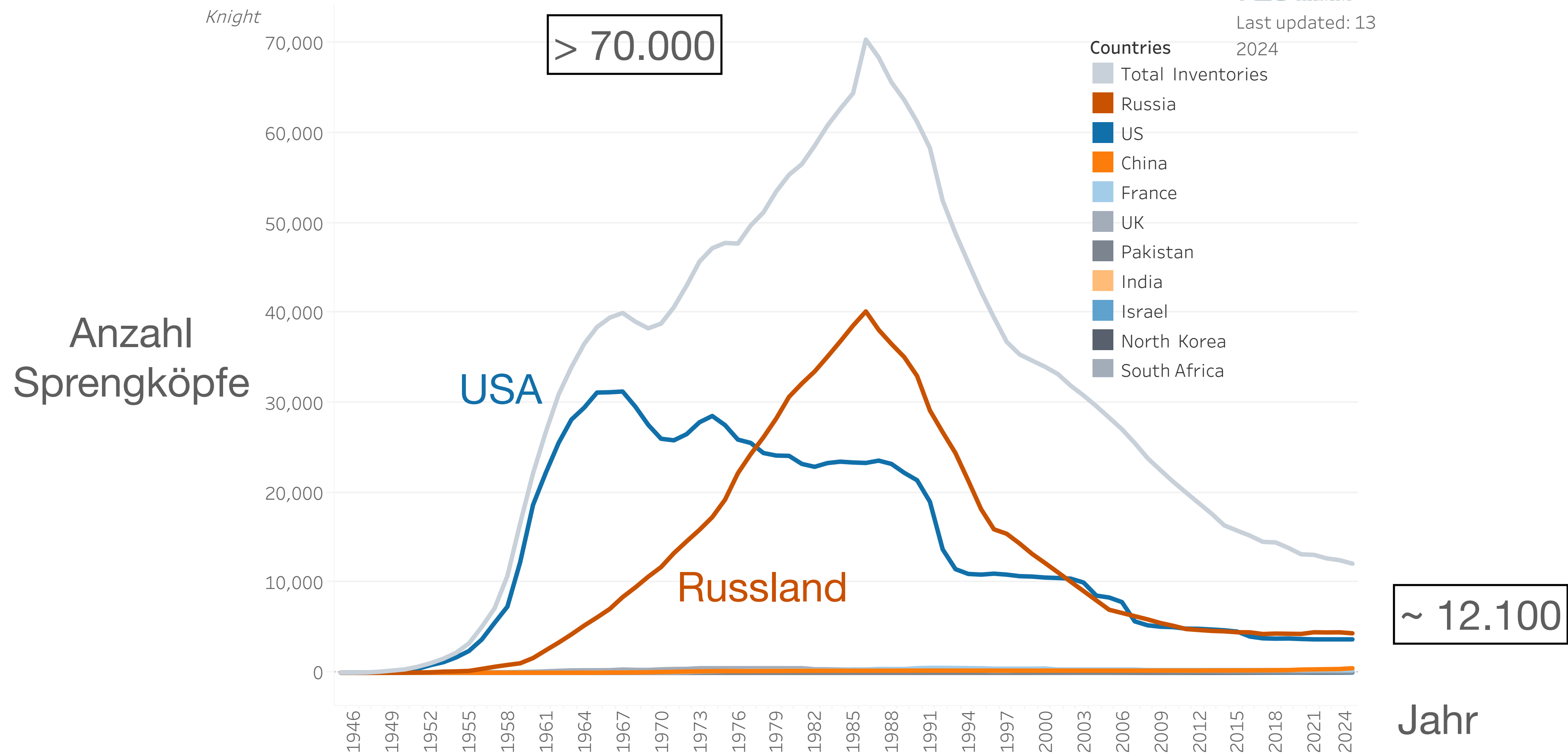
Photo by Zcobb99 / CC0 1.0. Taken from [here](#).

Sprengkopfinventare

Estimated Global Nuclear Warhead Stockpiles 1945 - 2024
 Hans M. Kristensen, Matt Korda, Robert S. Norris, Eliana Johns, and Mackenzie Knight



Last updated: 13 2024



Prozess: Sprengkopf zerlegen (1/2)

Beispiel USA: (*Pantex* in Texas)

- **Schritt 1:** Sprengkopf inspizieren & deaktivieren
- **Schritt 2:** Nicht-nukleare Komponenten entfernen

Photo by U.S. military / public domain. Taken from [here](#).



Prozess: Sprengkopf zerlegen (1/2)

Beispiel USA: (*Pantex* in Texas)

- **Schritt 1:** Sprengkopf inspizieren & deaktivieren
- **Schritt 2:** Nicht-nukleare Komponenten entfernen

Schwierigkeit: Komplexität

z.B. Lenksysteme, Sicherheitssysteme, Zündungssysteme, "Physikpaket", ...

- geheim (*classified*)
- gefährlich (teilw. toxisch, explosionsanfällig)

- **Schritt 3:** Nicht-nukleare, demilitarisierte & "sanitized" Komponenten entsorgen (verbrennen, recycling)

Photo by US DOD and/or DOE / public domain. Taken from [here](#).



Dauer: ~3-6 Arbeitstage/Sprengkopf

Prozess: Sprengkopf zerlegen (1/2)

Beispiel USA: (*Pantex* in Texas)

- **Schritt 1:** Sprengkopf inspizieren & deaktivieren
- **Schritt 2:** Nicht-nukleare Komponenten entfernen

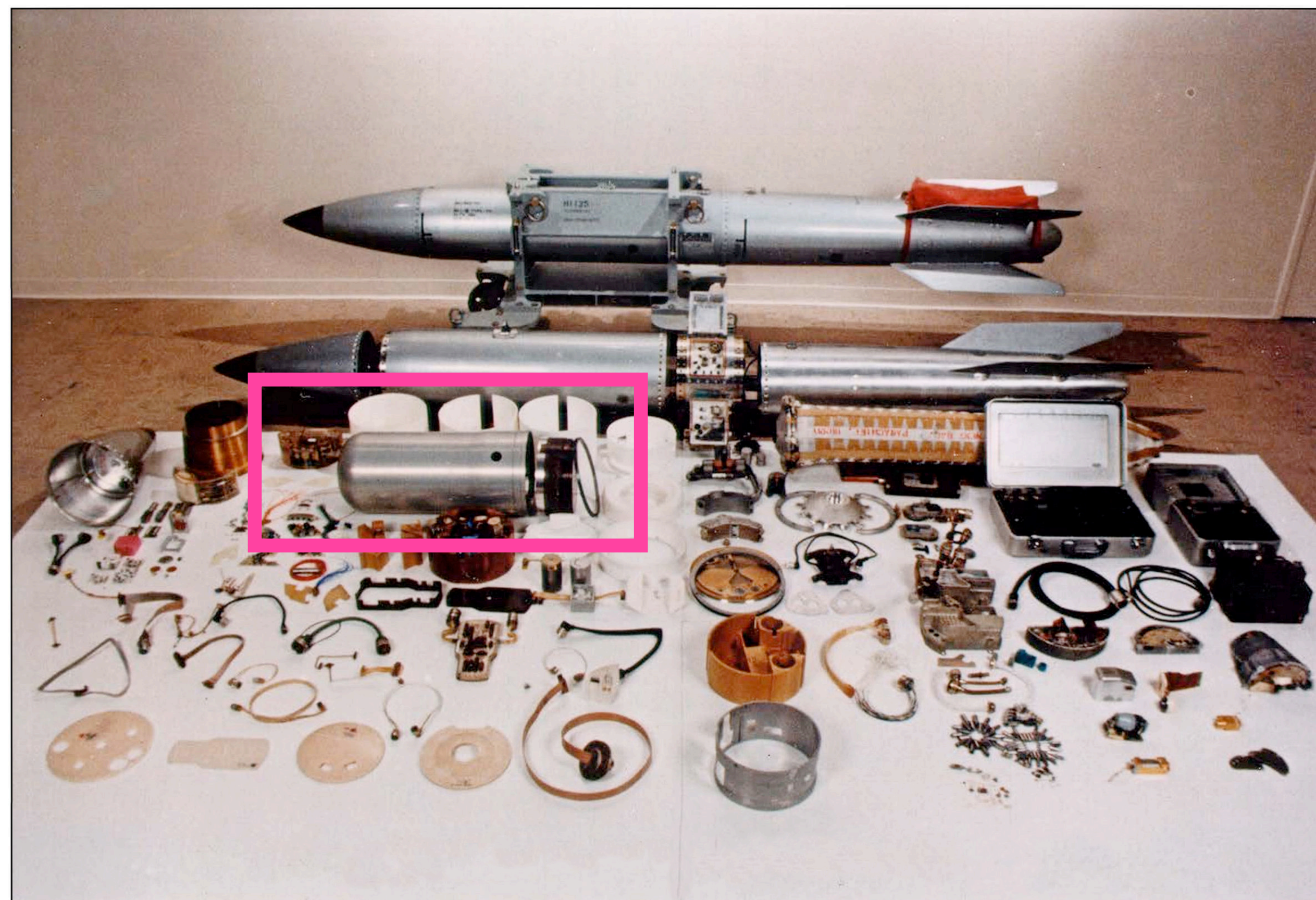
Schwierigkeit: Komplexität

z.B. Lenksysteme, Sicherheitssysteme, Zündungssysteme, "Physikpaket", ...

- geheim (*classified*)
- gefährlich (teilw. toxisch, explosionsanfällig)

- **Schritt 3:** Nicht-nukleare, demilitarisierte & "sanitized" Komponenten entsorgen (verbrennen, recycling)

Photo by US DOD and/or DOE / public domain. Taken from [here](#).

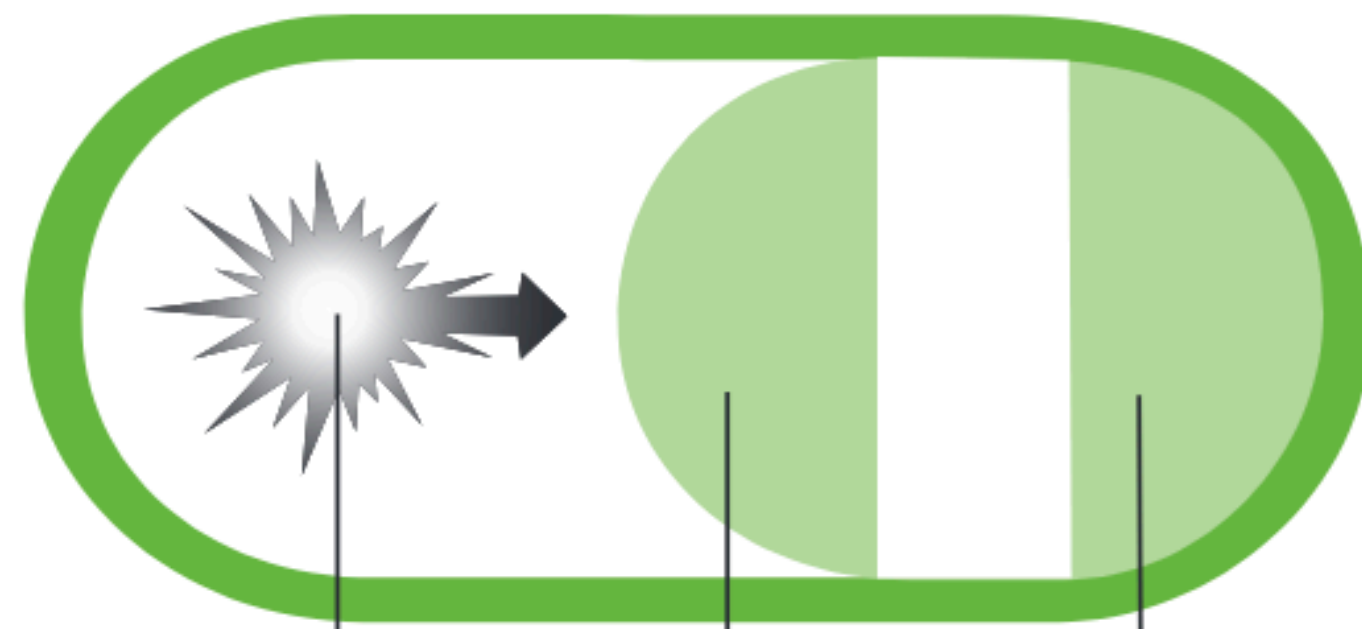


Dauer: ~3-6 Arbeitstage/Sprengkopf

“Physics package”

Kernwaffen auf Spaltmaterialbasis

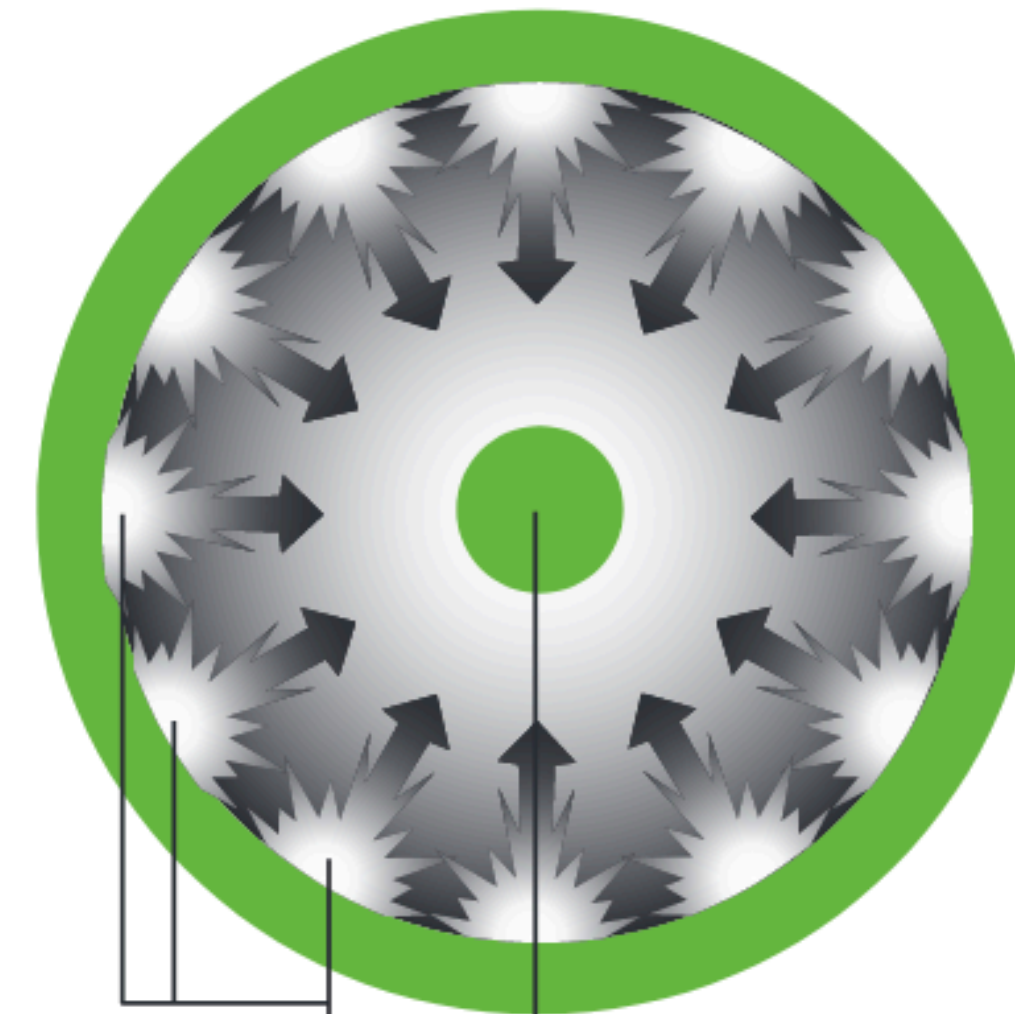
Gun-Design



Konventioneller
chemischer
Sprengstoff

Sub-kritische Teile
aus hoch
angereichertem Uran

Implosions-Design



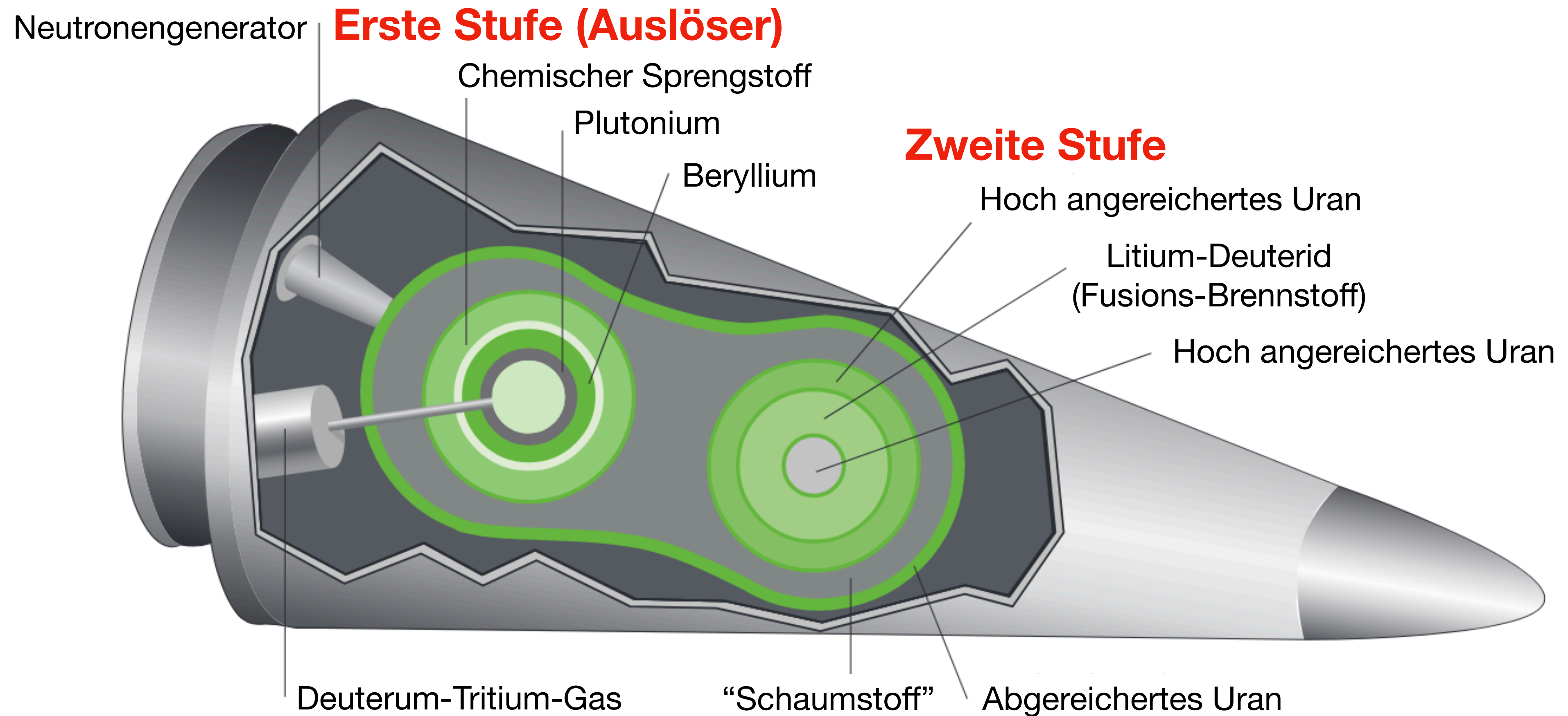
Hochexplosive
Linsen

Plutoniumkern

Graphic by IPFM, adapted/translated by SK. Taken from [here](#).

“Physics package”

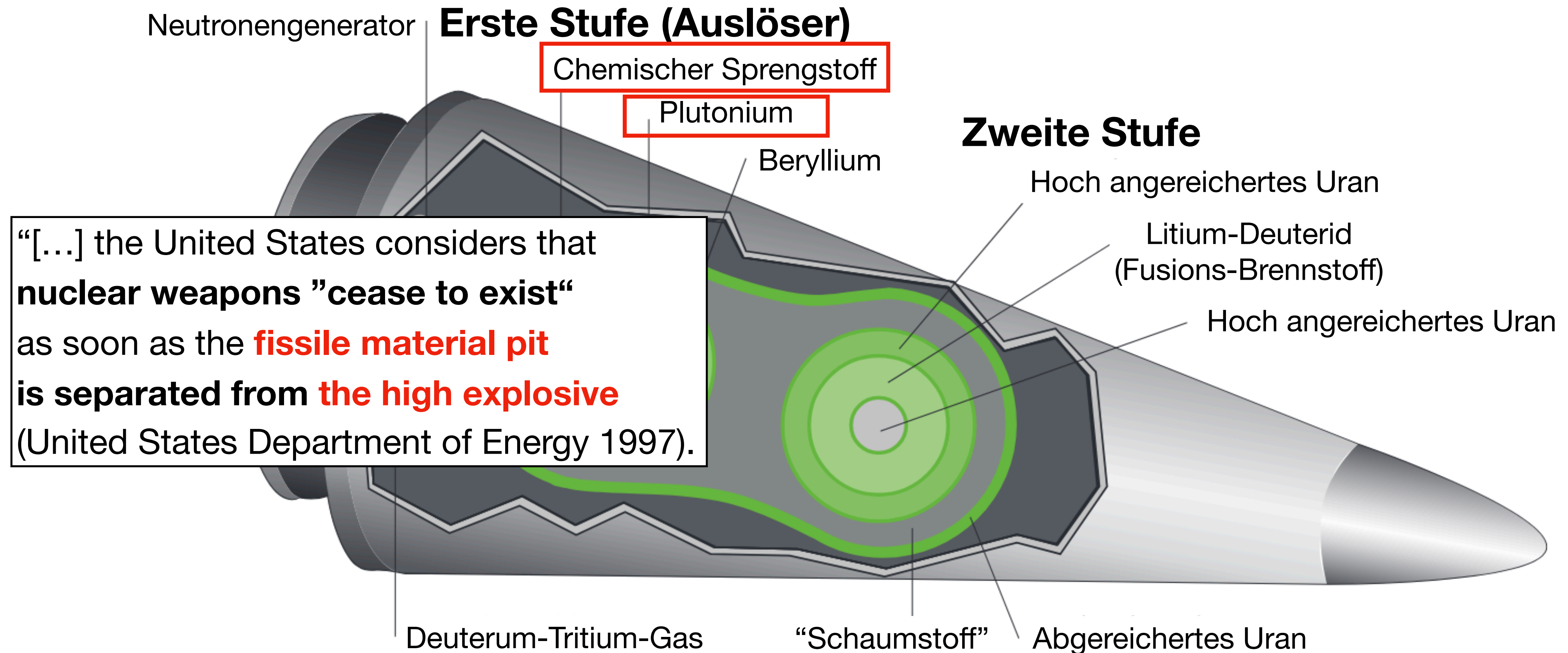
Moderne Thermonuklearwaffen



Graphic by IPFM, adapted/translated by SK. Taken from [here](#).

“Physics package”

Moderne Thermonuklearwaffen



Graphic by IPFM, adapted/translated by SK. Taken from [here](#).

“Physics package”

Moderne Thermonuklearwaffen

Neutronengenerator **Erste Stufe (Auslöser)**

Chemischer Sprengstoff

Plutonium

Beryllium

“[...] the United States considers that nuclear weapons ”cease to exist“ as soon as the **fissile material pit** is separated from **the high explosive** (United States Department of Energy 1997).

Deuterium-Tritium-Gas

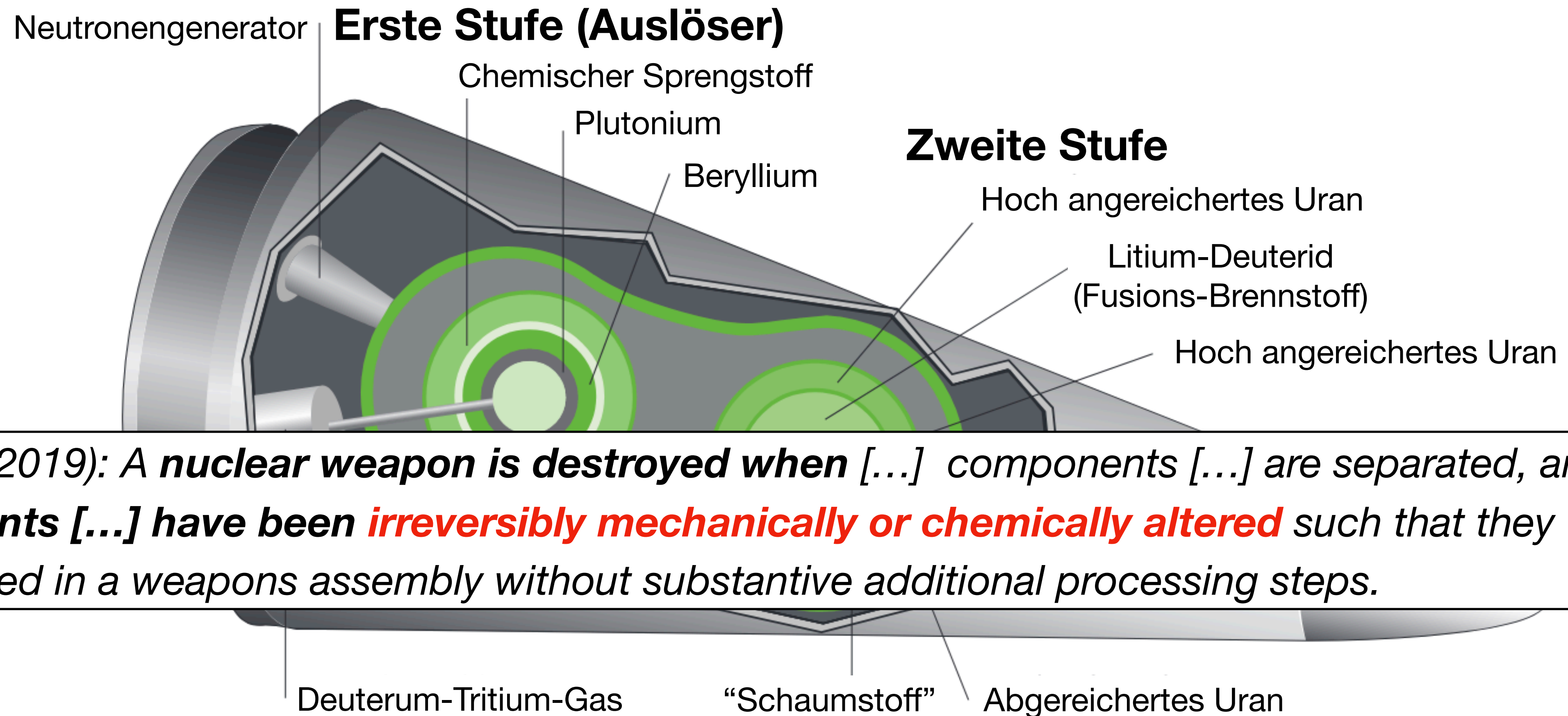
“Sch

Photo by R. Benali & Liaison / getty images. From [here](#).



“Physics package”

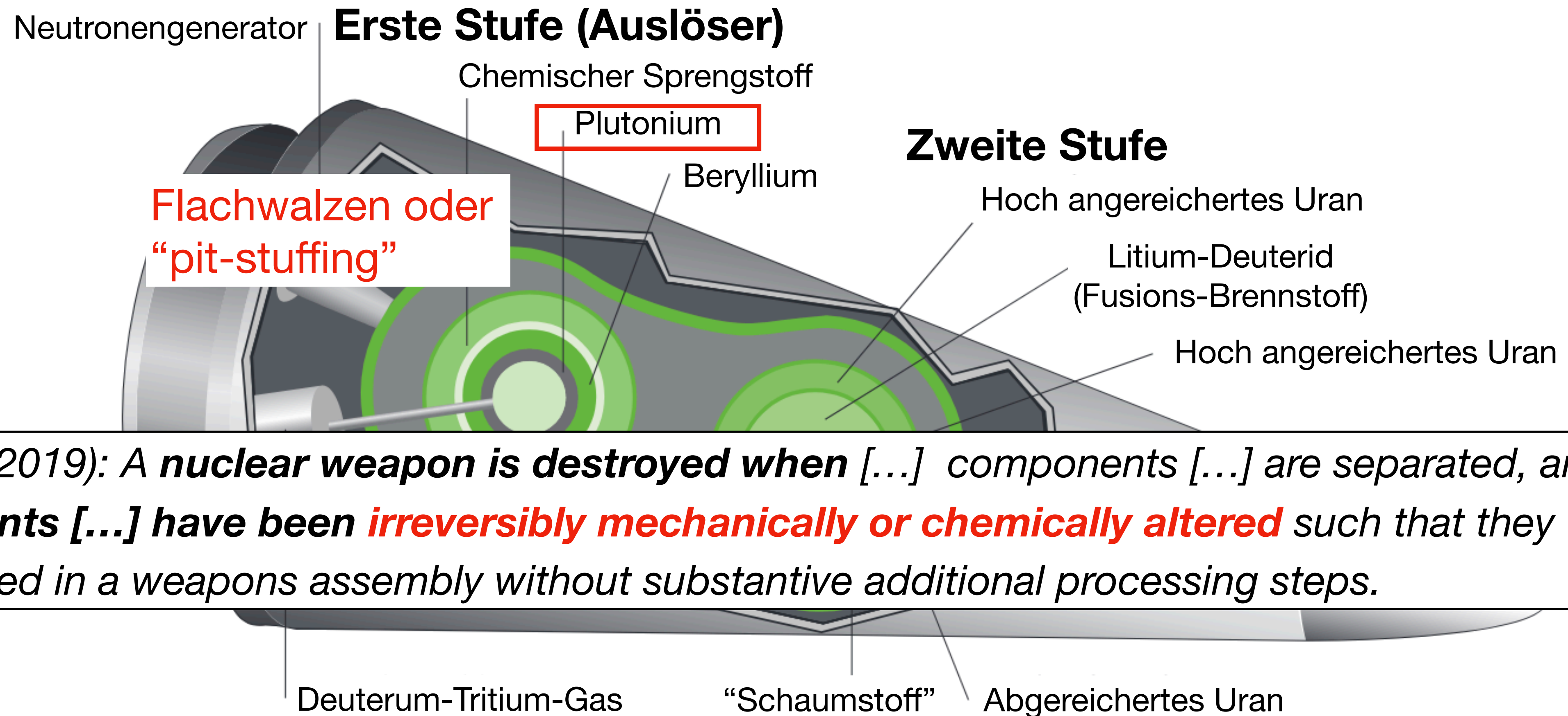
Moderne Thermonuklearwaffen



*Kütt & Mian (2019): A nuclear weapon is destroyed when [...] components [...] are separated, and all components [...] have been **irreversibly mechanically or chemically altered** such that they cannot be used in a weapons assembly without substantive additional processing steps.*

“Physics package”

Moderne Thermonuklearwaffen

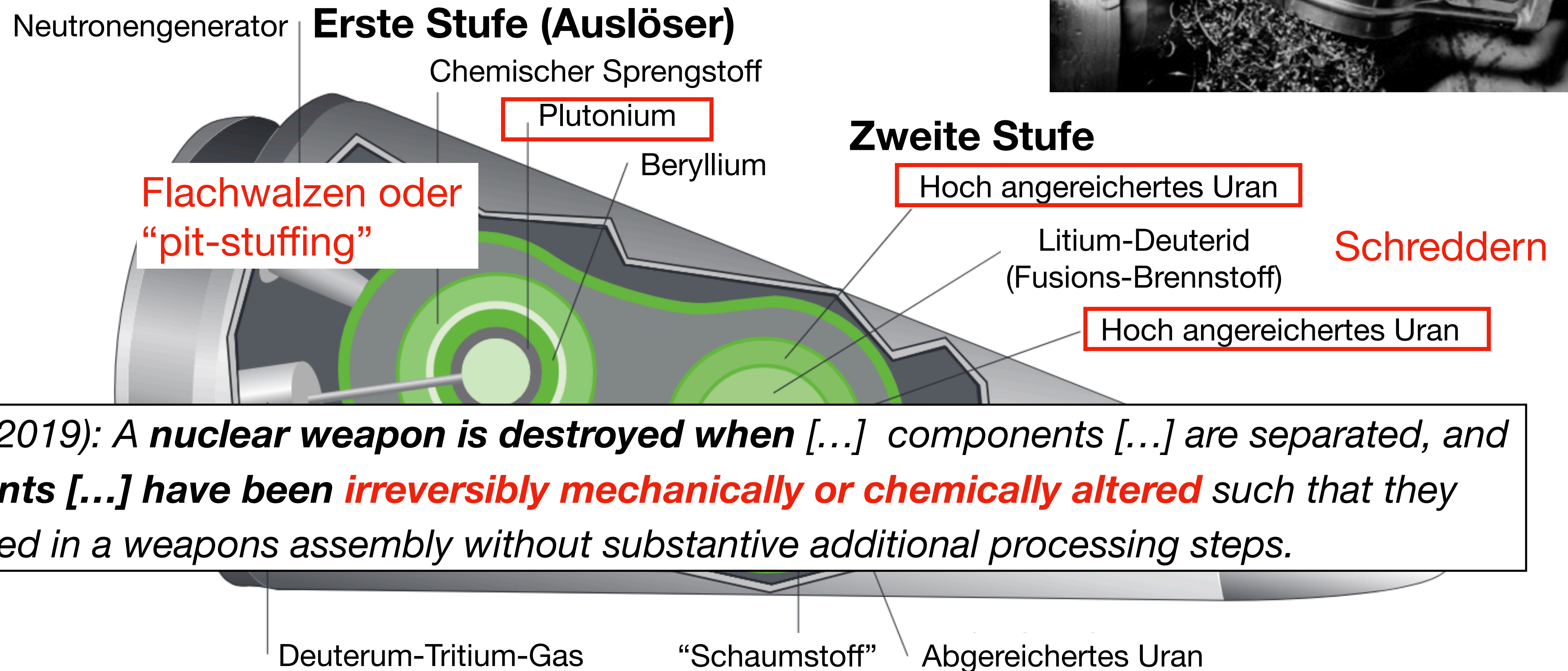


*Kütt & Mian (2019): A nuclear weapon is destroyed when [...] components [...] are separated, and all components [...] have been **irreversibly mechanically or chemically altered** such that they cannot be used in a weapons assembly without substantive additional processing steps.*

“Physics package”

Moderne Thermonuklearwaffen

Photo by US. DOE. Taken from [here](#).



*Kütt & Mian (2019): A nuclear weapon is destroyed when [...] components [...] are separated, and all components [...] have been **irreversibly mechanically or chemically altered** such that they cannot be used in a weapons assembly without substantive additional processing steps.*

Graphic by IPFM, adapted/translated by SK. Taken from [here](#).

Spaltmaterialentsorgung

Teil 1: Hoch angereichertes Uran (HEU)

Teil 2: Plutonium

Hoch angereichertes Uran (HEU)

Hoch angereichertes Uran (HEU):

Uran mit $> 20\%$ U-235 (Natur: 0.7% U-235, \sim Rest U-238)

Herstellung:

Natururan als UF_6 -Gas in Anreicherungsanlage

Nutzung:

- Waffenuran ($\sim 90\%$ U-235),
- U-Boot-Treibstoff,
- (zivile) Forschungsreaktoren (z.B. in Deutschland FRM-2)

Gefahren:

- toxisch (Schwermetall); radiotoxisch (haupts. Alpha-Strahler)

Proliferation:

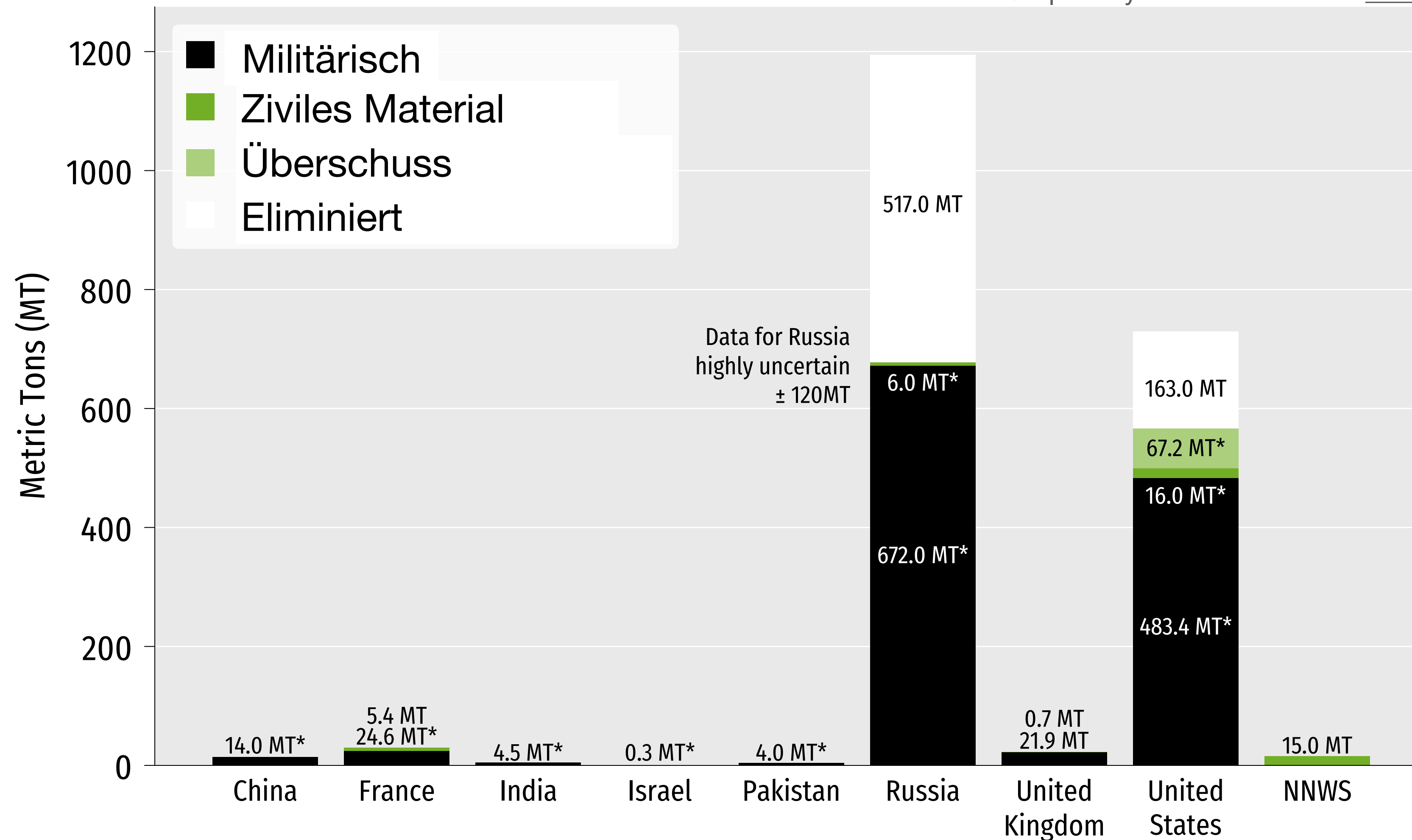
- *IAEA significant quantity*: 25kg U-235



Photo by US. DOE. Taken from [here](#).

Globales HEU (Stand Ende 2020)

Graphic by IPFM. Taken from [here](#).



HEU-Entsorgung

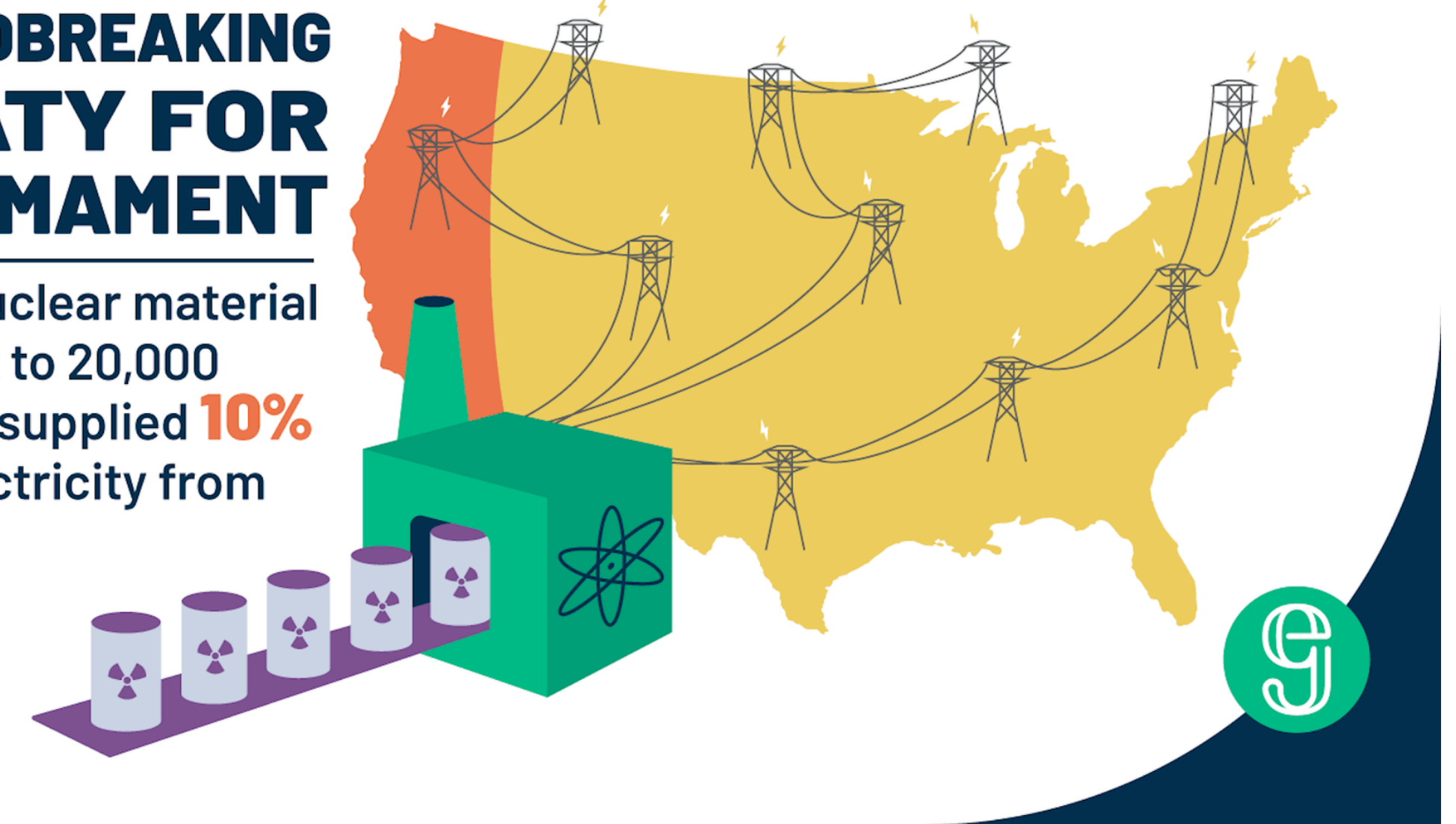
- Methode: “Untermischen” (*downblending*)
HEU + Natururan/abgereichertes Uran
→ leicht angereichertes Uran (LEU)
(Brennstoff für Kernkraftwerke)
- Programm “Megatons to megawatts” (1993):
USA kauft LEU von Russland
(aus 500t überschüssigem (!) HEU)

Keine andere Methode (z.B. Endlagerung) wird in Erwägung gezogen.

MEGATONS TO MEGAWATTS:

GROUND BREAKING TREATY FOR DISARMAMENT

Russian nuclear material
equivalent to 20,000
warheads supplied **10%**
of U.S. electricity from
1993-2013



Graphic by goodenergycollective. Taken from [here](#).

Plutonium

- Plutonium: Nicht natürlich vorkommendes Element, verschiedene Isotope (z.B. spaltbares Pu-239)
- Herstellung:
 - Bestrahlung von U-238 mit Neutronen im Kernreaktor,
 - dann Abtrennen (Wiederaufbereitung)
- Nutzung:
 - Kernwaffen (typisch: > 90% Pu-239)
- Gesundheitliche Risiken:
 - radiotoxisch (Alpha- und Gamma-Strahler), toxisch (Schwermetall)
- Proliferation:
IAEA significant quantity: 8kg separiertes Pu (alle Isotope!)

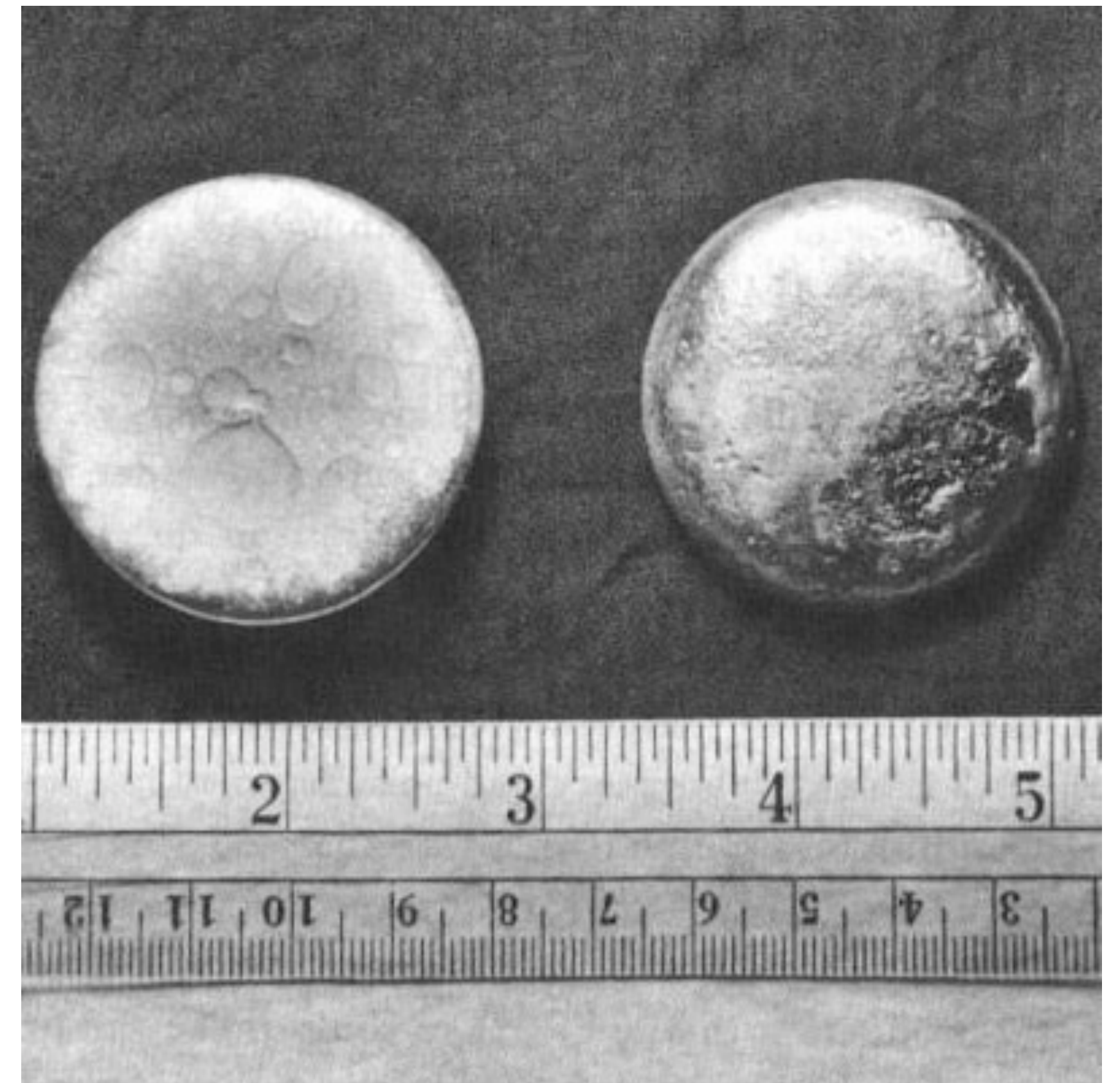
Photo by US DOE / CC BY 3.0. Taken from [here](#).



Plutonium

- Plutonium: Nicht natürlich vorkommendes Element, verschiedene Isotope (z.B. spaltbares Pu-239)
- Herstellung:
 - Bestrahlung von U-238 mit Neutronen im Kernreaktor,
 - dann Abtrennen (Wiederaufbereitung)
- Nutzung:
 - Kernwaffen (typisch: > 90% Pu-239)
- Gesundheitliche Risiken:
 - radiotoxisch (Alpha- und Gamma-Strahler), toxisch (Schwermetall)
- Proliferation:
IAEA significant quantity: 8kg separiertes Pu (alle Isotope!)

Photo by US DOE / CC BY 3.0. Taken from [here](#).



“Waffenfähiges” vs. “Reaktor”-Plutonium

- Waffenfähiges Plutonium: weniger als 7% Pu-240
- Reaktor-Plutonium: mehr als 19% Pu-240 (+ andere Isotope)

“Reaktor-Plutonium nicht geeignet für Waffen”

z.B. **erhöhter Anteil an Pu-240**: Hohe spontane Zerfallsrate (inkl. Neutronen)
→ Mögliche Frühdetonation

“Waffenfähiges” vs. “Reaktor”-Plutonium

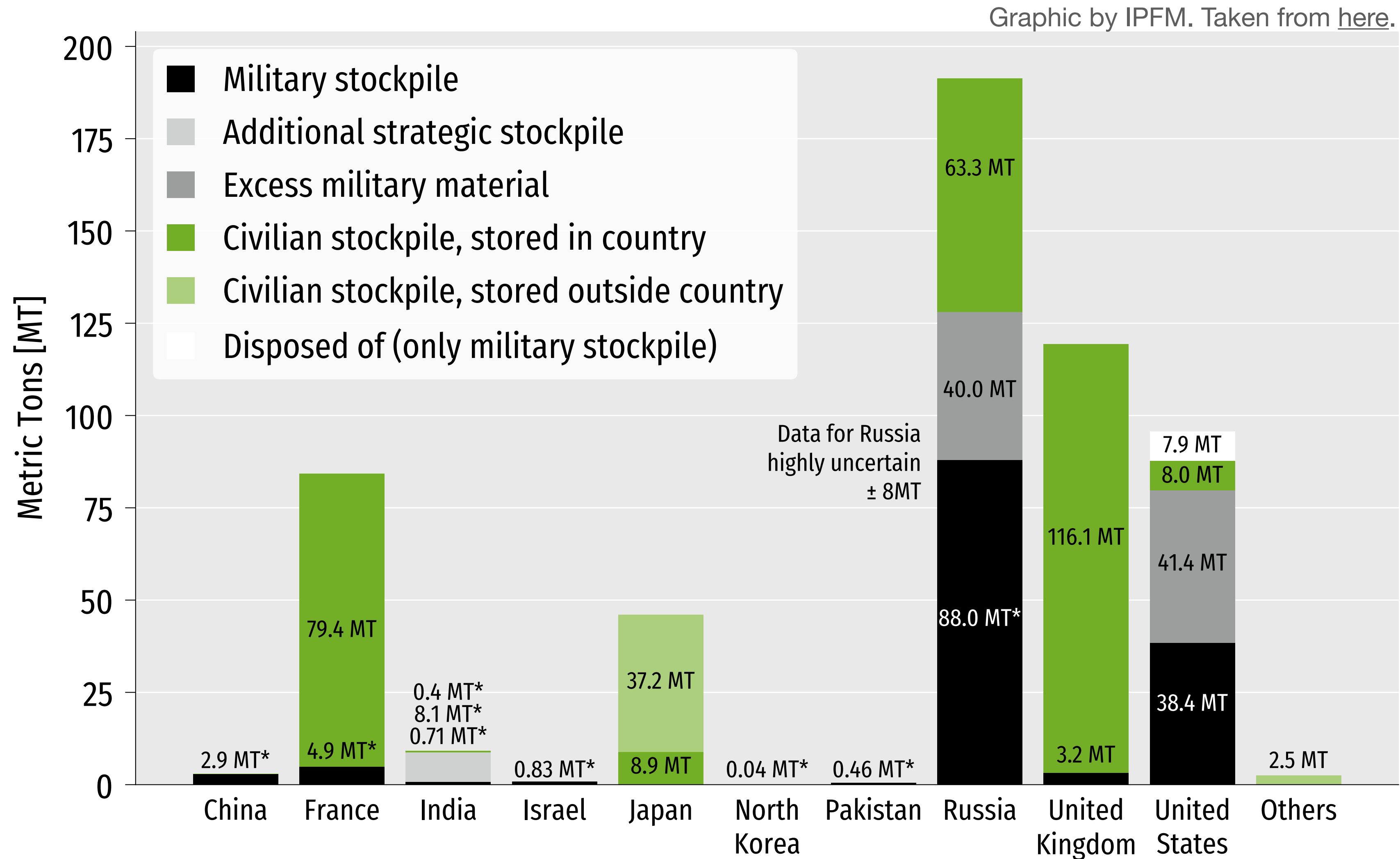
- Waffenfähiges Plutonium: weniger als 7% Pu-240
- Reaktor-Plutonium: mehr als 19% Pu-240 (+ andere Isotope)

“Reaktor-Plutonium nicht geeignet für Waffen”

z.B. **erhöhter Anteil an Pu-240**: Hohe spontane Zerfallsrate (inkl. Neutronen)
→ Mögliche Frühdetonation **Tritium hinzufügen (Boosting)**

→ **“Plutonium is Plutonium”.**

Globales separiertes Plutonium (Stand Ende 2020)



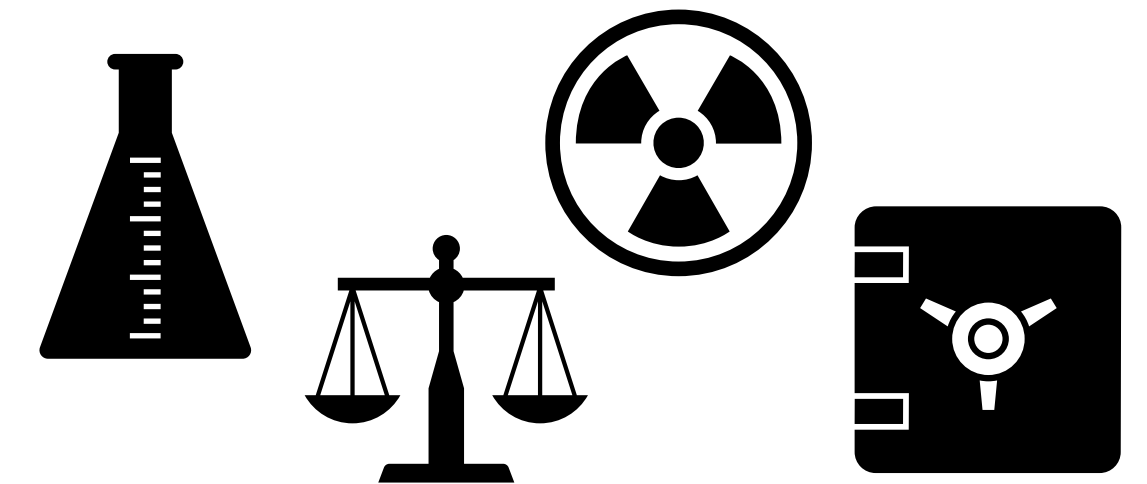
Plutonium-Entsorgung

- Plutonium = schwierig zu zerstören,
- Weltweit vorhanden in abgebrannten Brennstoffen.

Spent-Fuel Standard:

*"Roughly as **inaccessible for weapons use** as the much larger and growing quantity of plutonium that exists in **spent fuel from commercial reactors.**"*

- **Chemisch**, z.B. verdünnt, oxidiert;
- **Isotopisch**, z.B. Isotopenverhältnisse wie Reaktorplutonium
- **Physisch**, z.B. Lagerung an schwer zugänglichen Orten;
- **Radiologisch**, z.B. eingebettet in hochradioaktivem Abfall



Methoden:

- 1) Nutzung als Kernbrennstoff (in Leichtwasserreaktoren, in schnellen Brütern)
- 2) Direkte Endlagerung

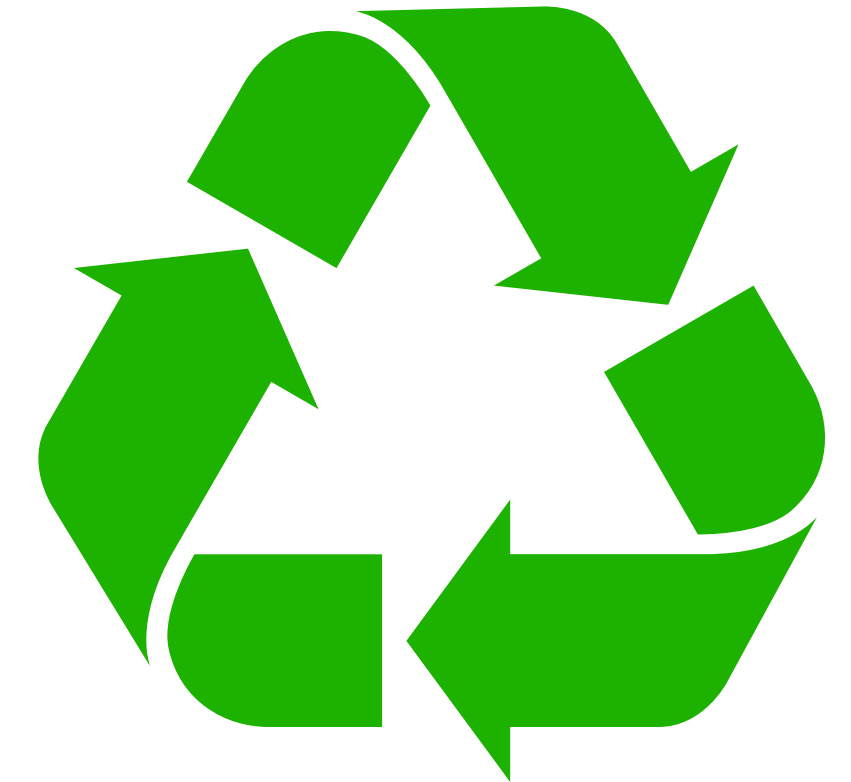
Nutzung als Kernbrennstoff (MOX)

- **Idee:** Spaltfähiges Plutonium als Kernbrennstoff verbrauchen
- Ersetze LEU in Kernkraftwerken durch MOX (Mischoxid)
z.B. 7% Plutonium PuO_2 + 93% Natur-/abgereichertes Uran UO_2
- **Schwierigkeit:**
 - nur ~ 30% der Brennstäbe können durch MOX ersetzt werden
 - abgebrannte Brennstäbe enthalten noch 60-75% des Plutoniums



Nutzung als Kernbrennstoff (MOX)

- **Idee:** Spaltfähiges Plutonium als Kernbrennstoff verbrauchen
- Ersetze LEU in Kernkraftwerken durch MOX (Mischoxid)
z.B. 7% Plutonium PuO_2 + 93% Natur-/abgereichertes Uran UO_2
- **Schwierigkeit:**
 - nur ~ 30% der Brennstäbe können durch MOX ersetzt werden
 - abgebrannte Brennstäbe enthalten noch 60-75% des Plutoniums
- **Nachteile:**
 - Höhere Strahlenbelastung im Umgang
 - Proliferation: Gefahr der Abzweigung von Plutonium
 - Sehr teuer in der Herstellung
- USA haben MOX-Programm aufgegeben (wie viele andere Länder)



Nutzung als Kernbrennstoff (MOX)

Idee: Nutzung von MOX als Brennstoff in schnellen Brütern

Schneller Brüter: Reaktor mit schnelle Neutronen

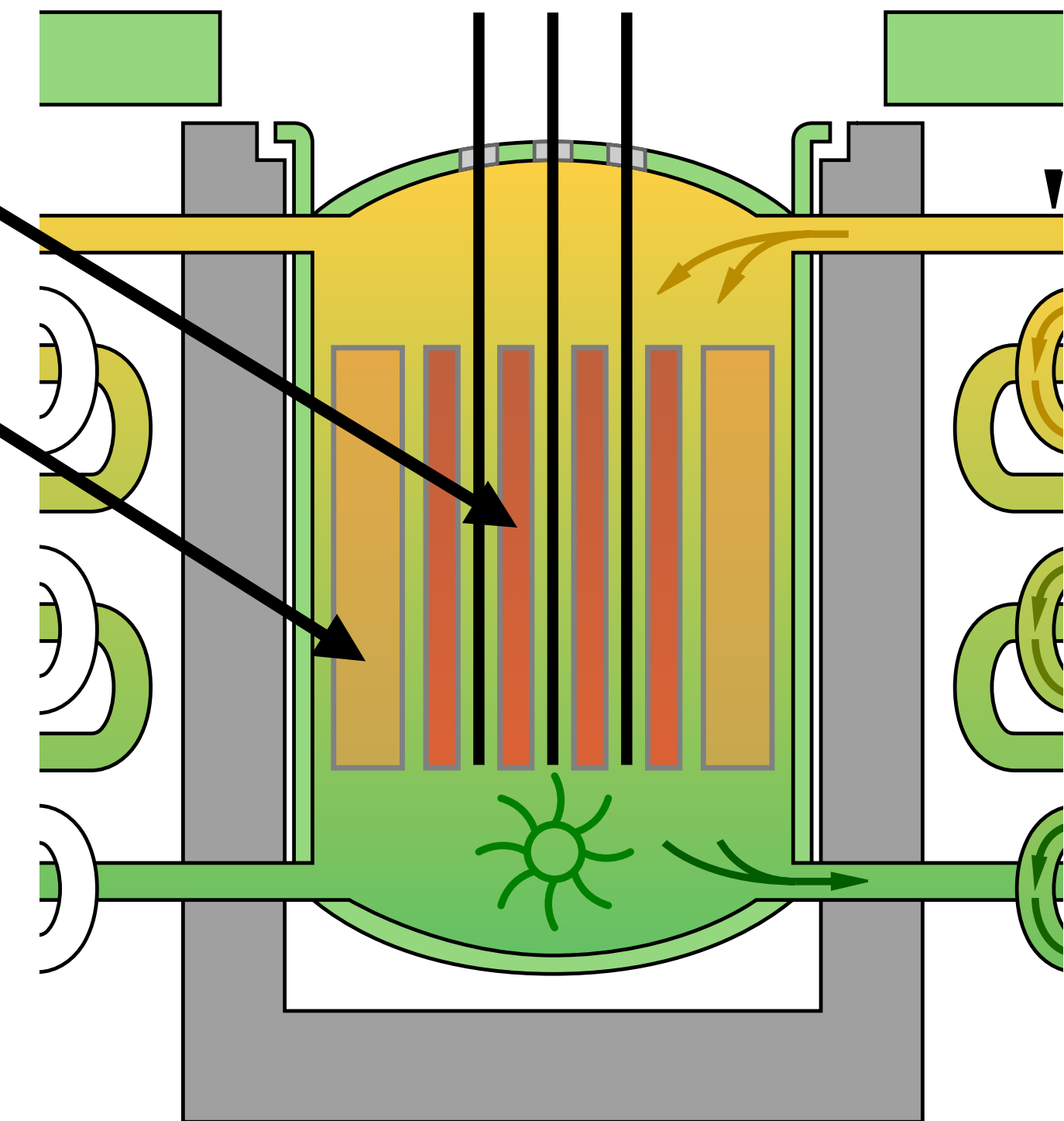
- kein Moderator
- schweres Kühlmittel, z.B. Natrium

Ohne Brutmantel: "Schneller Brenner"

Vorteil:

- Schnelle Neutronen spalten auch schwerere Kerne
- 100% MOX-Beladung möglich

- 1) Kerne spalten
- 2) Pu brüten



Excerpt of graphic by Emos / GFDL.
Taken from [here](#).

Nutzung als Kernbrennstoff (MOX)

Idee: Nutzung von MOX als Brennstoff in schnellen Brütern

Schneller Brüter: Reaktor mit schnelle Neutronen

- kein Moderator
- schweres Kühlmittel, z.B. Natrium

Ohne Brutmantel: "Schneller Brenner"

Vorteil:

- Schnelle Neutronen spalten auch schwerere Kerne
- 100% MOX-Beladung möglich

Nachteil:

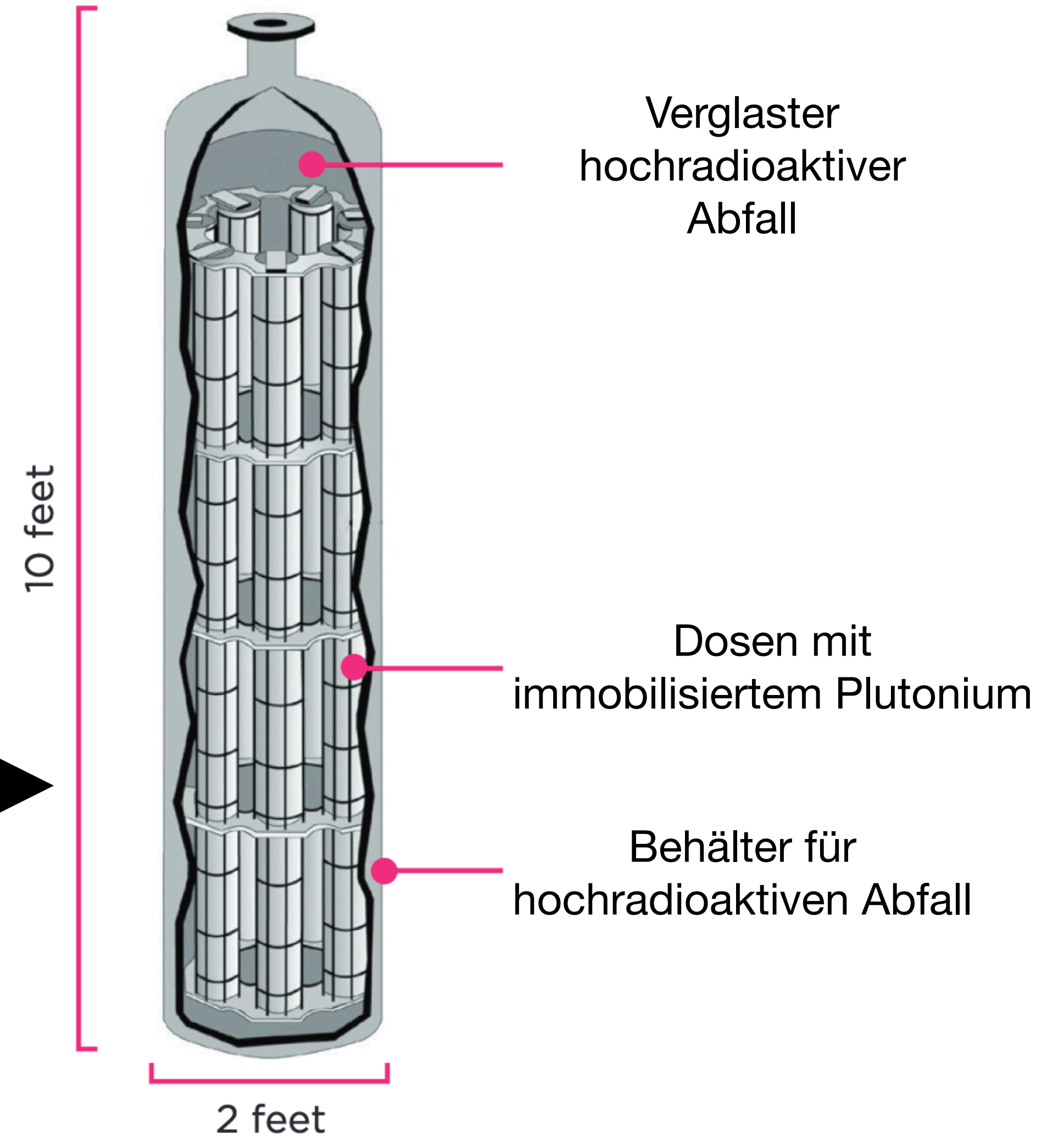
- Schwierig zu betreiben, störanfällig, sehr teuer (keine Kommerzialisierung bisher)
- Bn-800 (Russland): zerstört max. 10% des anfänglichen Plutoniums
- mit Brutmantel - perfekt, um Plutonium zu brüten

Photo of by Rosatom / CC0 1.0.
Taken from [here](#).



Direkte Entsorgung: Immobilisierung

- Plutonium mit hochradioaktivem Abfall mischen, dann verglasen/in Keramik gießen (→ Strahlenbarriere)
- Herausforderung:
 - geeignete Materialien
 - Prozesse entwickeln (insbs. Kritikalität kontrollieren)
- Bsp.: USA: “Can-in-canister”-Ansatz → **eingestellt wegen zu hoher Kosten**

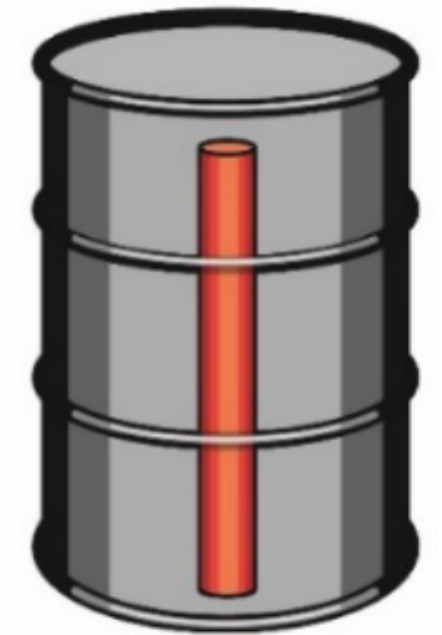


Graphic by Union of Concerned Scientists.
Taken from [here](#).

Direkte Entsorgung: Geologisches Endlager

- Gewählte Methode der USA: *dilute and dispose*
 - Plutonium mischen mit “stardust” (chemische Barriere)
 - in kritikalitätssicheren Stahlcontainern
- Entsorgung im Waste Isolation Pilot Plant:
 - geologisches Endlager, Salzstock,
 - 160.000 Container (für ~50 t Pu)
- Kritik (u.a.):
 - Plutonium ist dort nicht irreversibel genug gelagert (Möglichkeit, es chemisch auszuwaschen)
 - Expert:innen empfiehlt Entsorgung in tiefen Bohrlöchern

55-Gallon-Fass mit
300g Pu-239



Graphic by US NAS.
Taken from [here](#).



Verifikation und Irreversibilität

... und Atommüll

Bedingungen für Abrüstung

UN-Sprache: *Abrüstung muss verifizierbar und irreversibel sein.*

Bedingungen für Abrüstung

UN-Sprache: *Abrüstung muss **verifizierbar** und irreversibel sein.*

Verifikation

Vertragseinhaltung überprüfen
(z.B. Sprengkopfzerlegung)

Wurde alles Spaltmaterial deklariert
oder gibt es Geheimvorräte?



→ Nukleararchäologie

Nukleararchäologie

Wieviel Spaltmaterial wurde jemals produziert und verbraucht?
→ Vgl. mit Angaben des abrüstenden Staats



z.B: *Graphite Isotope Ratio Method*

Fallbeispiel: Südafrika

Bedingungen für Abrüstung

UN-Sprache: *Abrüstung muss verifizierbar und **irreversibel** sein.*

Verifikation

Vertragseinhaltung überprüfen
(z.B. Sprengkopfzerlegung)

Wurde alles Spaltmaterial deklariert
oder gibt es Geheimvorräte?



→ Nukleararchäologie

Irreversibilität = “Unumkehrbarkeit”

leicht umkehrbar: Sprengköpfe zerlegen

mittel: Sprengköpfe zerstören + Material überwachen

schwierig: Kernanlagen zerstören



Kernanlagen

SCIENCE & ENVIRONMENT

The radioactive legacy of the **Hanford** nuclear reservation will live on, even as plans for cleanup evolve



By **Allison Frost** (OPB)

Oct. 12, 2024 3 p.m. Updated: Oct. 15, 2024 11:02 p.m.

For decades, more than 400 billion gallons of contaminated waste seeped into the earth around Hanford — a fact that was only made public years later due to a culture of secrecy born in wartime.



Screenshots from opb.org, collated by SK. Taken from [here](#).

Alex Lawson and Anna Isaac

Wed 23 Oct 2024 06.01 CEST

The Guardian

Eur



Nuclear Leaks

Sellafield cleanup cost rises to £136bn amid tensions with Treasury

National Audit Office questions value for money as predicted bill for decommissioning increases by £21bn

Screenshots from theguardian.org, collated by SK. Taken from [here](#).

Abschluss

1. Kernwaffen zerlegen

- geübte Prozeduren, viel Erfahrung
- vollständige Demontage der Arsenale innerhalb von < 10 Jahren möglich

2. Spaltmaterial beseitigen

- Hoch angereichertes Uran: untermischen (downblending)
- Separiertes Plutonium: “spent-fuel standard” - kein allg. anerkanntes Vorgehen.
→ Auf jeden Fall: Separation stoppen!

3. Militärisch-industriellen Komplex beseitigen

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Sophie Kretzschmar

kretzschmar@nvd.rwth-aachen.de

Quellen & Möglichkeit zum Weiterlesen (1/2)

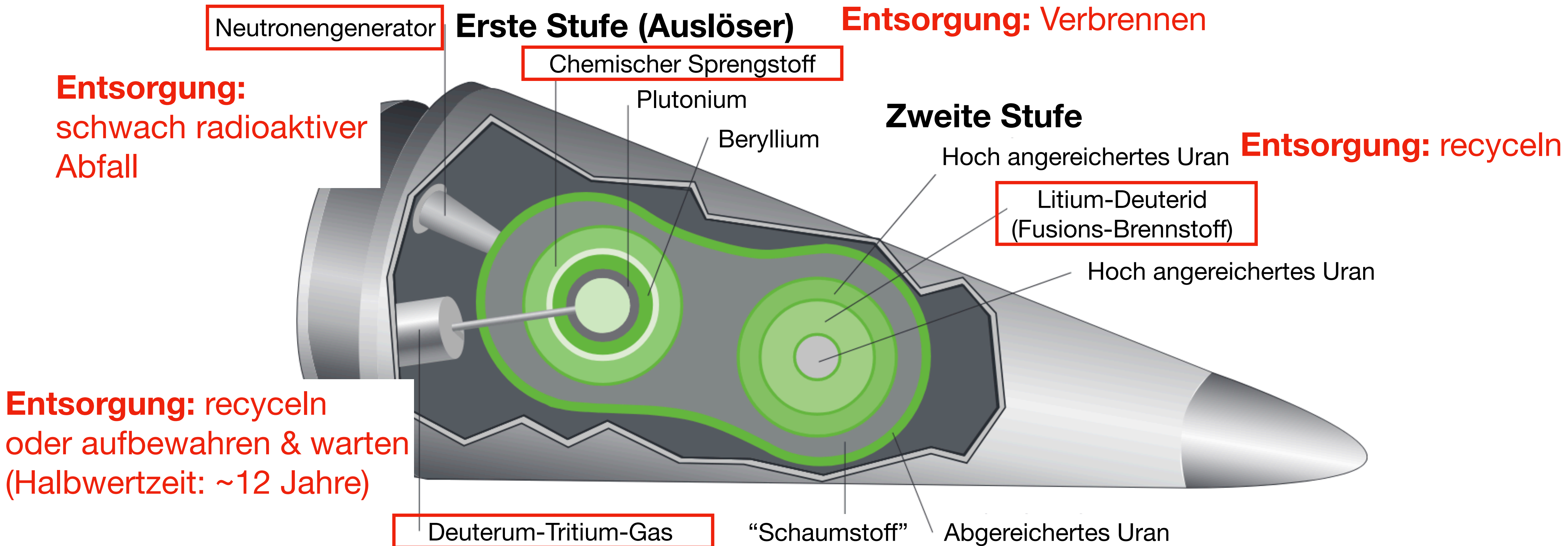
- **Kann man mittelhoch angereichertes Uran für Atomwaffen nutzen?** Kemp, R. S., Lyman, E. S., Deinert, M. R., Garwin, R. L., & Von Hippel, F. N. (2024). The weapons potential of high-assay low-enriched uranium. *Science*, 384(6700), 1071–1073. <https://doi.org/10.1126/science.ado8693>
- **Wieviele nukleare Sprengköpfe gibt es weltweit?** Status of World Nuclear Forces by the Federation of American Scientists: <https://fas.org/initiative/status-world-nuclear-forces/>
- **Wieviel separiertes Plutonium und hoch angereichertes Uran gibt es weltweit?** 2022 Report from the Panel for Fissile Materials, <https://fissilematerials.org/library/gfmr22.pdf>
- **Wie lange dauert globale Atomwaffenabrüstung vom technischen Gesichtspunkt her?** Kütt, M., & Mian, Z. (2019). Setting the Deadline for Nuclear Weapon Destruction under the Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons. *Journal for Peace and Nuclear Disarmament*, 2(2), 410–430. <https://doi.org/10.1080/25751654.2019.1674471>
- **Kann man Plutonium aus einem kommerziellen Atomkraftwerk für Atomwaffen nutzen?** Jones, G. S. (2019). Reactor-grade plutonium and nuclear weapons: Ending the debate. *The Nonproliferation Review*, 26(1–2), 61–81. <https://doi.org/10.1080/10736700.2019.1603497>
- **Warum hat sich MOX nicht durchgesetzt?** Kuperman, A. J. (2019). Challenges of plutonium fuel fabrication: Explaining the decline of spent fuel recycling. *Int. J. Nuclear Governance, Economy and Ecology*, 4(4). <https://sites.utexas.edu/ajk466/files/2021/06/Pu-fuel-IJNGEE-2019.pdf>

Quellen & Möglichkeit zum Weiterlesen (2/2)

- **Wieviel Plutonium verbrennt der russische BN-800 wirklich?** Kütt, M., Frieß, F., & Englert, M. (2014). Plutonium Disposition in the BN-800 Fast Reactor: An Assessment of Plutonium Isotopics and Breeding. *Science & Global Security*, 22(3), 188–208. <https://doi.org/10.1080/08929882.2014.952578>
- **Was also machen mit dem Plutonium?** Von Hippel, F., Ewing, R. C., Garwin, R. L., & MacFarlane, A. (2012, October 5). Vergrabt endlich das Plutonium. *Spektrum*. <https://www.spektrum.de/kolumne/vergrabt-endlich-das-plutonium/1151061>
- **Warum Plutonium-Separation gestoppt werden sollte.** Von Hippel, F., & Takubo, M. (n.d.). *Banning Plutonium Separation*. International Panel on Fissile Materials. Retrieved August 14, 2022, from <https://fissilematerials.org/library/rr20.pdf>
- **Detaillierter Report der USA über die Entsorgungspläne von überschüssigem Militär-Plutonium.** Committee on Disposal of Surplus Plutonium at the Waste Isolation Pilot Plant, Nuclear and Radiation Studies Board, Division on Earth and Life Studies, & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2020). *Review of the Department of Energy's Plans for Disposal of Surplus Plutonium in the Waste Isolation Pilot Plant* (p. 25593). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25593>
- **Detaillierter Bericht über Zerlegung von Atomwaffensprengköpfen in den USA.** United States. (1993). *Dismantling the bomb and managing the nuclear materials*. U.S. Congress, Office of Technology Assessment: For sale by the U.S. G.P.O., Supt. of Docs. <https://www.princeton.edu/~ota/disk1/1993/9320/9320.PDF>

Backup

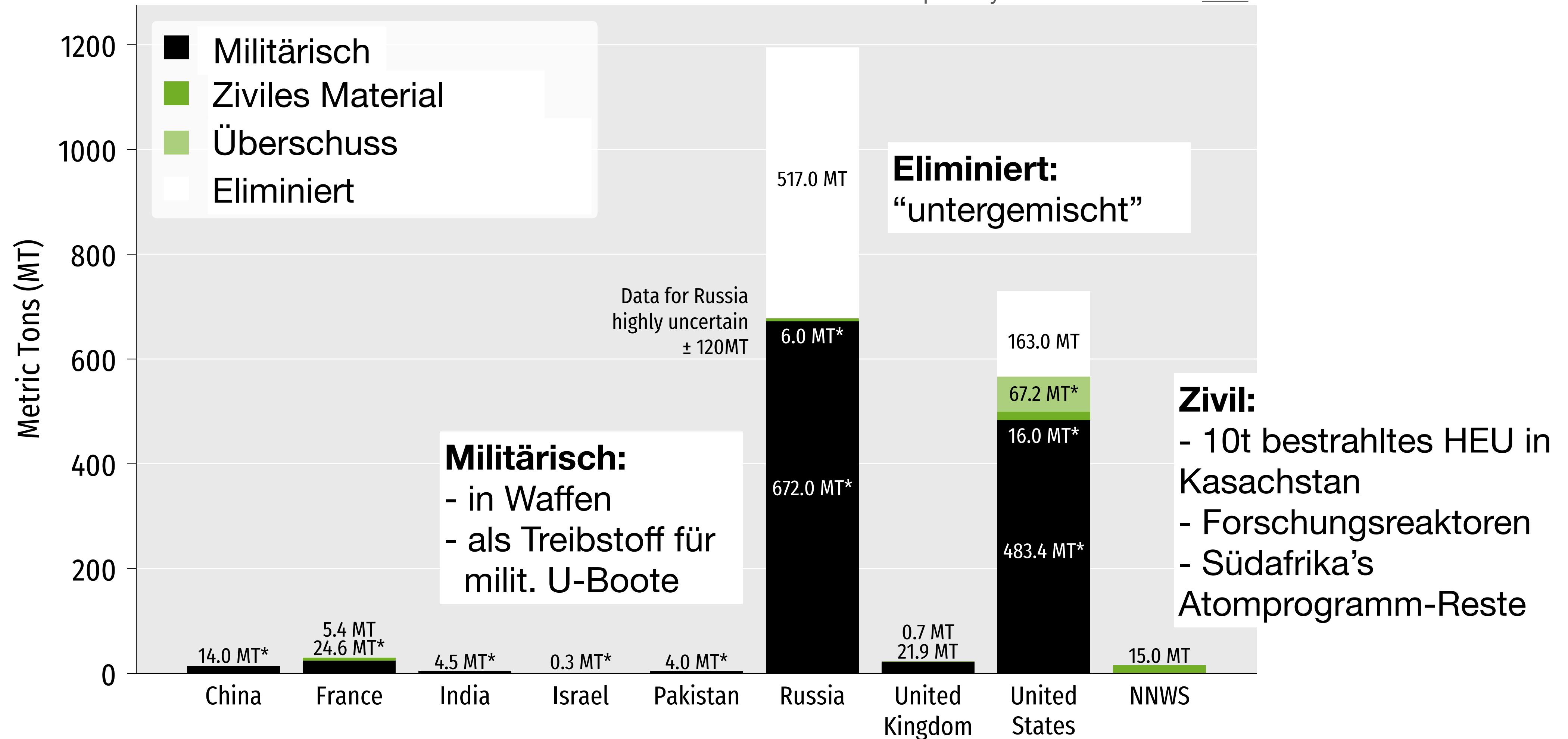
“Physics package” Moderne Thermonuklearwaffen



Graphic by IPFM, adapted/translated by SK. Taken from [here](#).

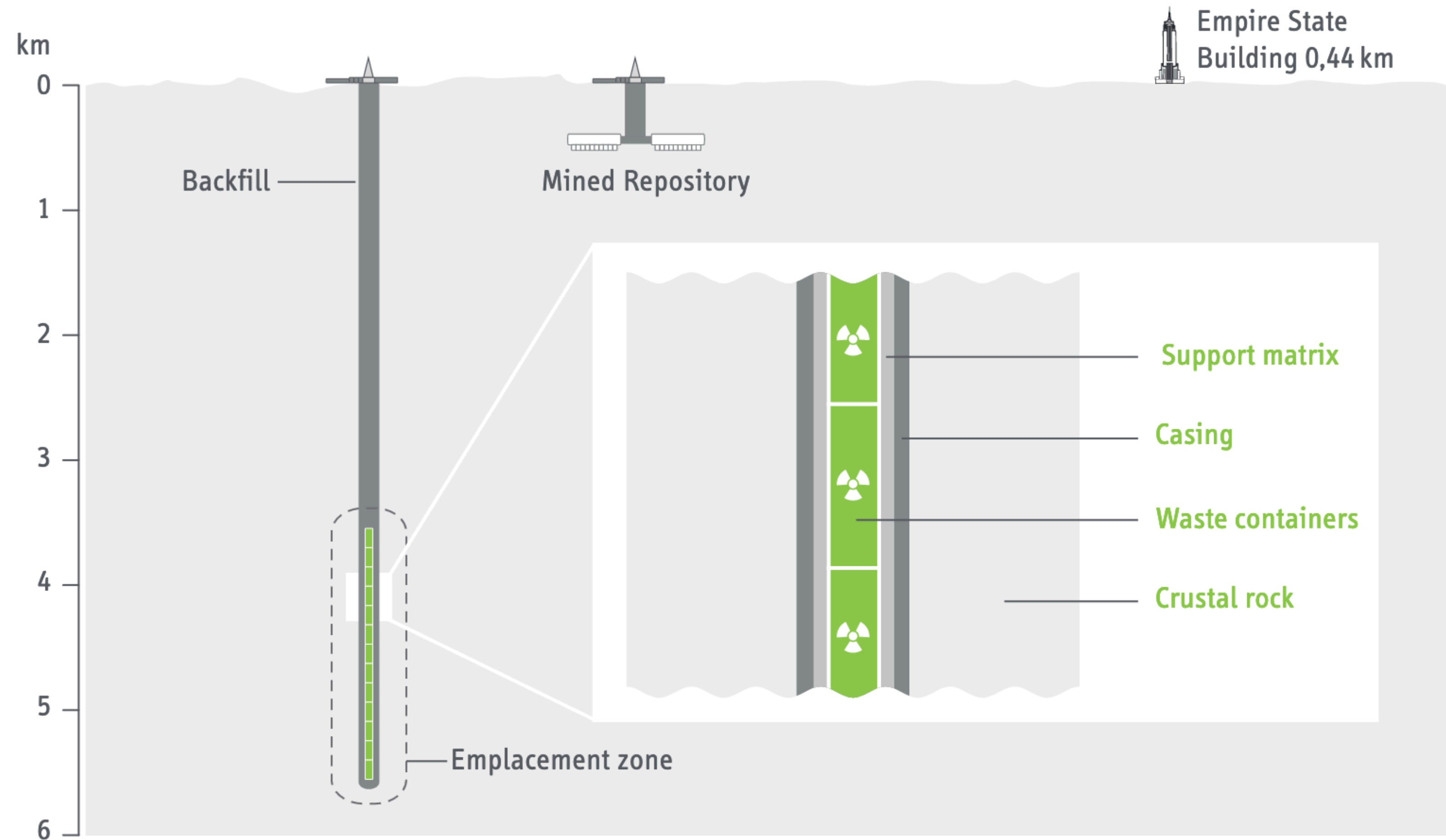
Globales HEU (Stand Ende 2020)

Graphic by IPFM. Taken from [here](#).



Plutonium: Direkte Endlagerung

Tiefe Bohrlöcher



Taken from [here](#).

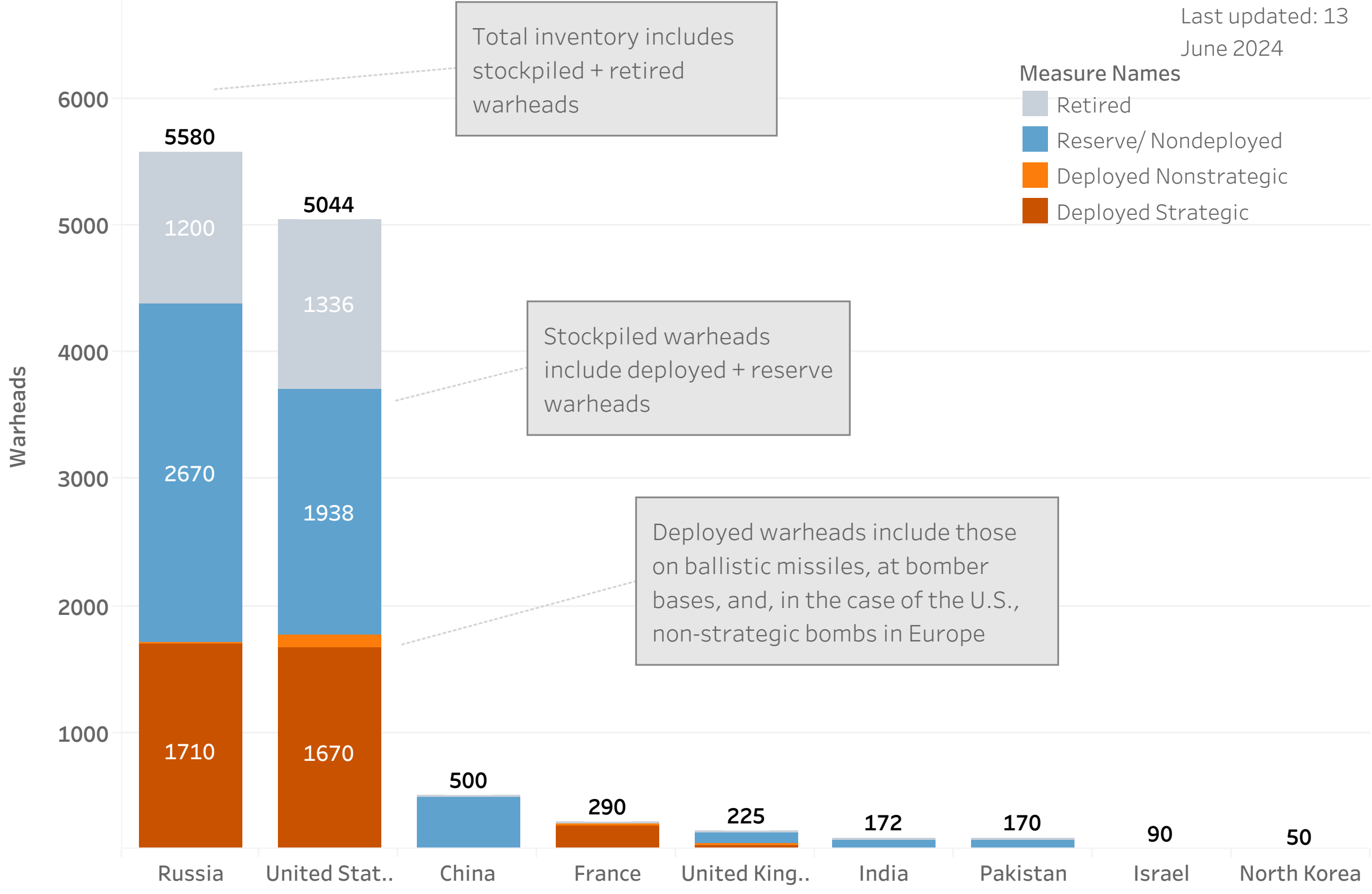
Globale Zahlen (2/2)

Estimated Global Nuclear Warhead Inventories, 2024

Hans M. Kristensen, Matt Korda, Eliana Johns, and Mackenzie Knight, Fe..



Last updated: 13 June 2024



<https://fas.org/initiative/status-world-nuclear-forces/>