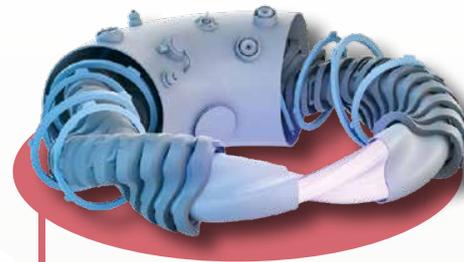


**TOKAMAK**

Die staatlich finanzierten Anlagen JT-60U, Asdex Upgrade (ein Projekt der MPG) oder Iter (im Bau) schließen Plasma mit einem äußeren Magnetfeld in einer donutförmigen Kammer ein und heizen es von außen.



**ADVANCED STELLARATOR**

Ein gewundenes Magnetfeld schließt das Plasma im ebenso geformten Plasma-gefäß etwa von Wendelstein 7-X ein. Die Heizung erfolgt von außen.

# WEGE ZUM FUSIONS-KRAFTWERK

22

Bei der Kernfusion verschmelzen – wie in der Sonne – Kerne leichter Atome, meist Wasserstoff, zu schwereren wie etwa Helium und setzen Energie frei. Auf der Erde lässt sich der Prozess nur in über hundert Millionen Grad heißem Plasma nachahmen. Solchen Temperaturen hält kein Material stand. Daher verfolgen Forschungseinrichtungen und Unternehmen verschiedene Konzepte, um das Plasma zu kontrollieren. Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik beispielsweise erforscht den Tokamak und den Stellarator.

**DAUERBETRIEB VERSUS PULSBETRIEB**

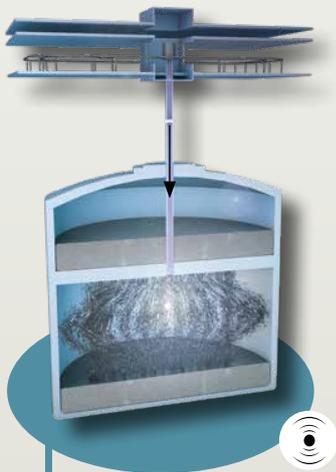
Herkömmliche Kraftwerke erzeugen kontinuierlich Strom, auch einige Fusionskonzepte sehen einen Dauerbetrieb vor (∞). Bei anderen findet die Kernfusion gepulst statt, also stoßweise (⊙). Bislang ist ungelöst, wie sich Fusionsreaktionen bei gepulstem Betrieb schnell genug hintereinander zünden lassen.



**REAKTOREN IM DAUERBETRIEB**

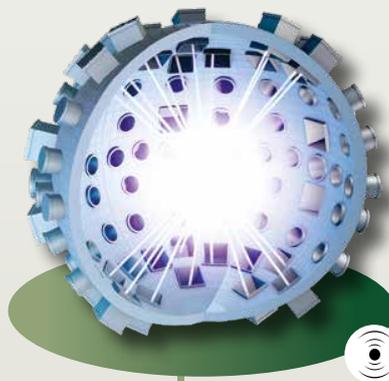


**GEPULSTE REAKTOREN**



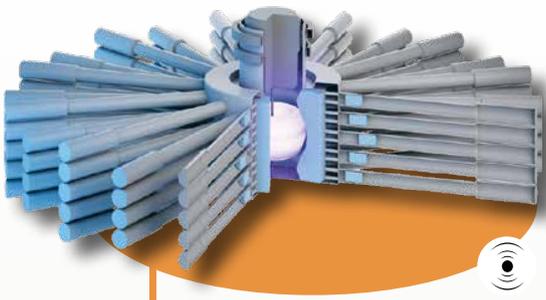
**PROJEKTIL-FUSION**

Das Spin-off First Light Fusion lässt in eine Reaktionskammer eine Kapsel mit Fusionsbrennstoff fallen, auf die ein Metallprojektile geschossen wird. Der Aufprall erzeugt in der Kapsel Schockwellen, die den Brennstoff komprimieren und zünden.



**LASER-FUSION**

Starke Laser verdichten und heizen Plasma im Zentrum. Beim indirekten Antrieb ● lösen die Laser in einer Metallkugel Röntgenstrahlung aus, die den Brennstoff darin aufheizt und komprimiert. So erzeugte die US-Forschungseinrichtung NIF mehr Fusionsenergie, als Laserenergie investiert wurde. Sie erforscht damit seit Jahrzehnten die Prozesse einer Wasserstoffbombe. Beim direkten Antrieb ● wird dazu eine Kapsel mit dem Brennstoff direkt beschossen und zur Implosion gebracht.



**TOKAMAK MIT ÄUSSERER KOMPRESSION**

General Fusion erzeugt ein Tokamak-Plasma in einem Behälter aus rotierendem, flüssigem Metall, das zur Zündung mit Kolben komprimiert und aufgeheizt wird.



**STABILISIERTER Z-PINCH**

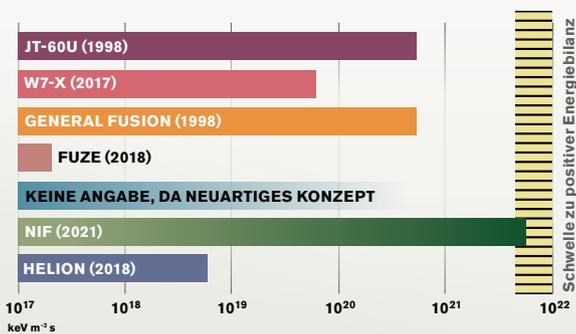
Das Start-up Zap Energy erzeugt zwischen zwei Elektroden einen dünnen Plasmaschlauch, durch den Strom fließt. Durch den Strom entsteht um den Plasmaschlauch ein zylinderförmiges Magnetfeld, das das Plasma extrem komprimiert und aufheizt.

**STAND DER ENTWICKLUNG**

Wie weit einzelne Fusionskonzepte gediehen sind, lässt sich anhand dreier Kriterien grob bewerten:

**TRIPELPRODUKT**

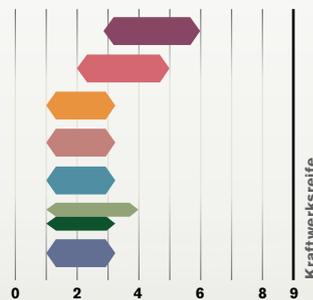
Produkt aus Plasmadichte, Temperatur und der Zeit, über die die Temperatur ohne Heizung aufrechterhalten bliebe. Je höher der Wert, desto höher die Energieausbeute der Fusionsreaktion. Der vertikale Balken markiert die Schwelle, ab der eine positive Energiebilanz erreicht wird. Die Schwellenwerte unterscheiden sich leicht je nach Plasmakontrolle.



Quelle: US-Department of Energy; doi: 10.1063/5.0083990

**STATUS DER KRAFTWERKSREIFE**

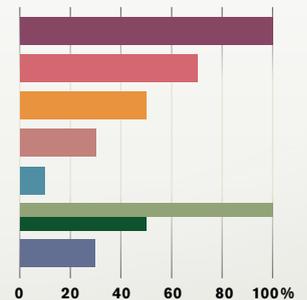
Auch ein Fusionskonzept mit physikalisch positiver Energiebilanz steht noch vor technischen Hürden – etwa die Gesamtenergiebilanz des Kraftwerks (Energiebedarf der Magnete, Laser oder Plasmaheizungen) oder eine hohe Frequenz von Zündungen bei gepulsten Fusionen.



Quelle: Müller & Zohm 2022 (hdl.handle.net/21.11116/0000-000D-EBAF-6); Häfner et al. 2023 (publikationen.bibliothek.kit.edu/1000164488)

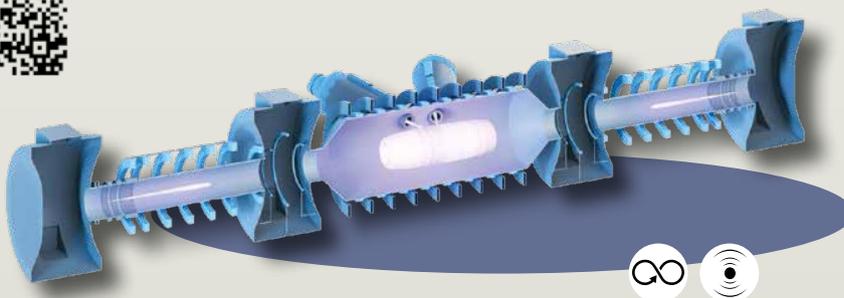
**ÜBEREINSTIMMUNG MIT PIONIER-KONZEPTEN**

Tokamak und Stellarator, aber auch die Laserfusion am NIF werden seit Jahrzehnten erforscht. Je stärker ein Konzept von diesen etablierten Verfahren abweicht, desto unklarer ist, wie lang der Weg zum Kraftwerk noch sein wird.



Quelle: K. Lackner, IPP

Weitere Infos zu den verschiedenen Konzepten der Kernfusion:



**STABILISIERTE FIELD-REVERSED CONFIGURATION (FRC)**

Die Unternehmen TAE und Helion schieben zwei Plasmapakete aufeinander, die zu einem heißen Ellipsoid verschmelzen. Dieses Plasma wird weiter geheizt, indem es durch ein äußeres Magnetfeld komprimiert oder mit schnellen Teilchen angereichert wird.