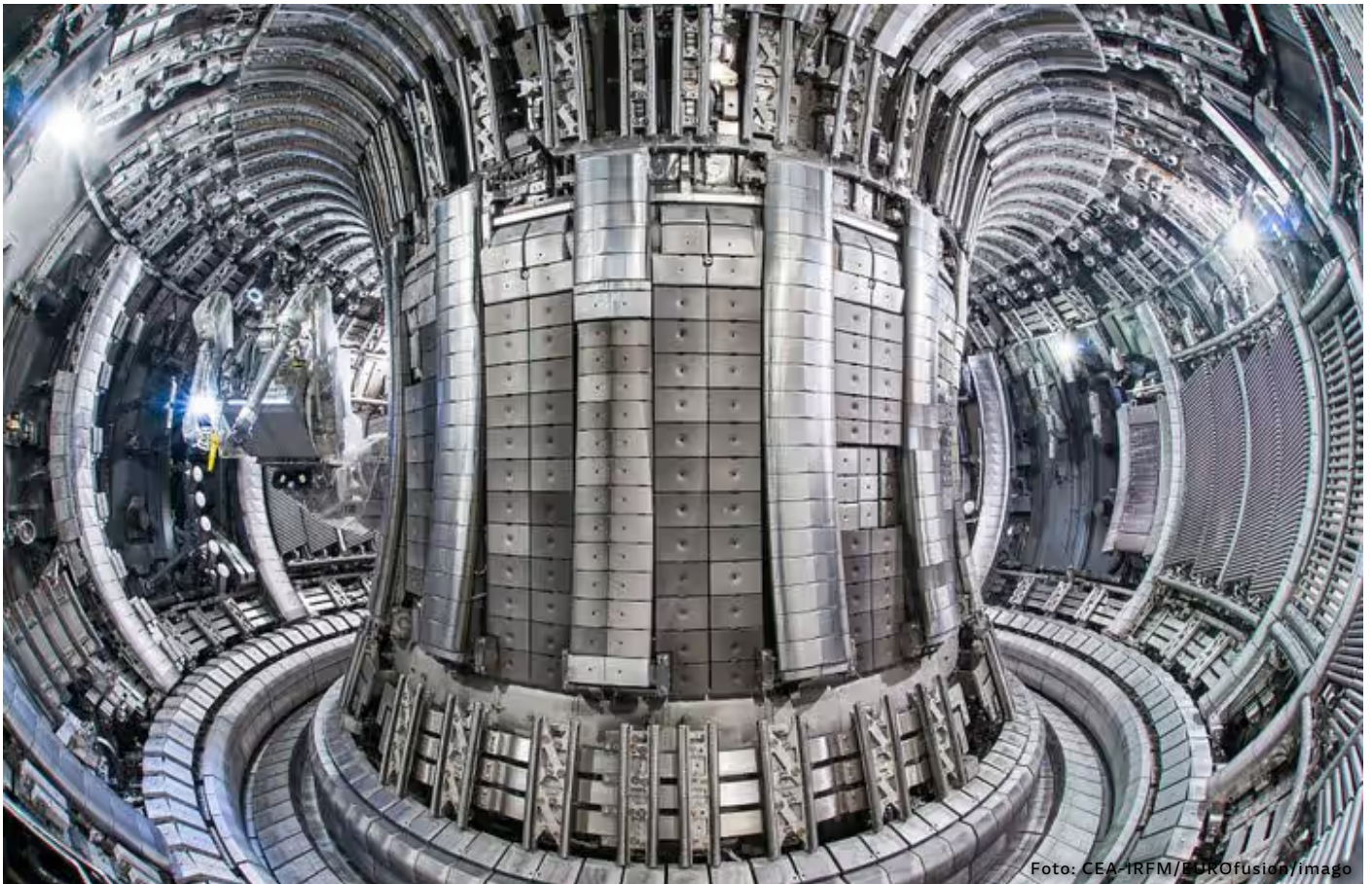




Energieforschung

Kann dieser Reaktor eines der größten Probleme der Menschheit lösen?



Start-ups tüfteln daran, Energie mittels Kernfusion zu erzeugen. Auf der Spur einer Forschung, in die mittlerweile Milliarden investiert werden.

Von Theresa Palm, Infografik: Jonas Jetzig

20. Oktober 2023 - 13 Min. Lesezeit

 Artikel verschenken

Es regnet gerade Geld auf die Fusionsforschung, richtig viel Geld: 1,8 Milliarden US-Dollar kamen 2022 von Investoren für das US-Unternehmen Commonwealth Fusion Systems. Eine halbe Milliarde für Helion, auch in den USA. Zusammen haben die 43 Fusions-Start-ups auf der Welt nach Industrieangaben 6,2 Milliarden US-Dollar eingesammelt. Und in Deutschland haben allein Bund und Länder bis 2028 eine Milliarde öffentliche Förderung für Fusionsforschung zugesagt.

Geld ist also da, und zwar auch jede Menge privates. Aber warum gilt Kernfusion plötzlich als lohnende Investition? Denn es gibt auf dem Weg zum Fusionsstrom weit mehr ungelöste als gelöste Probleme. Die Fusion muss herbeigeführt und erhalten werden, die Energie abgeführt, der Brennstoff erzeugt, und in weiten Teilen ist unklar, wie das alles gehen soll. Selbst der Verband der Fusionsforschung, in dem fast alle Fusions-Start-ups vertreten sind, räumt Probleme ein: hohe Entwicklungskosten, technische Schwierigkeiten, die Fusion herbeizuführen und zu erhalten, und die Unsicherheit, ob es sich am Ende rentiert. Es hakt also vorne und hinten und zwischendrin.

Und doch ist da eine Spur des Optimismus, die sich durch etablierte Forschungsinstitute und neue Start-ups zieht, die man bei Wissenschaftlerinnen ebenso bemerkt wie bei Gründern. Wenn man ihr folgt, erfährt man viel über Fortschritte und Durchbrüche, riesige Chancen und große Hoffnungen. Da ist aber auch ein Wort, das immer wieder fällt und alles andere mit einem Fragezeichen versieht: Hype. Was immer momentan über die Chancen der Fusion gesagt wird – es steht unter Hype-Verdacht. Ist das berechtigt?

ANZEIGE



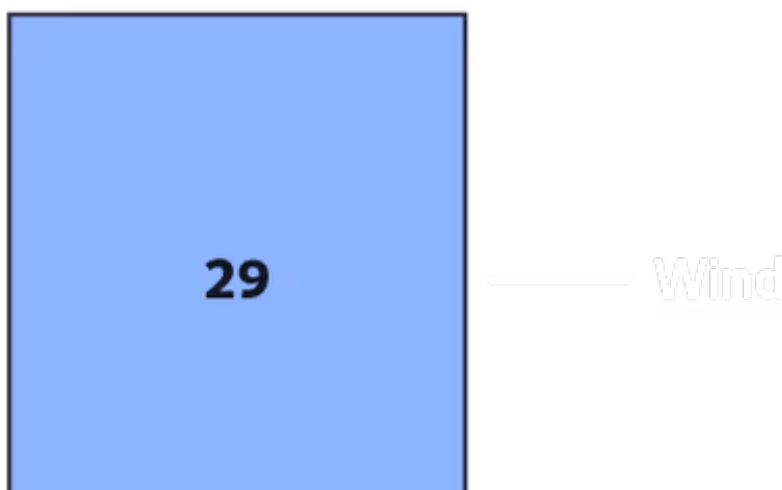


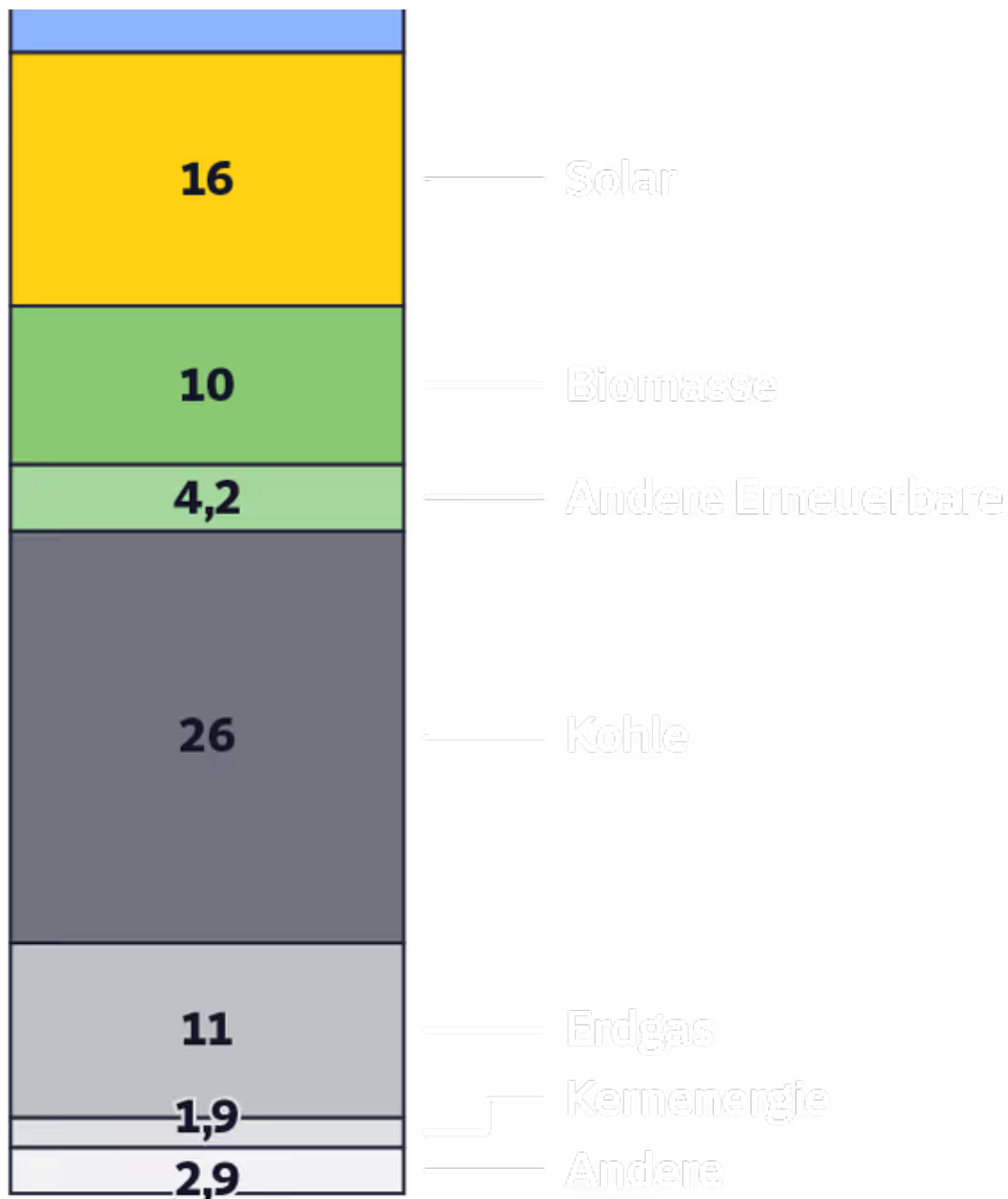
Auch Sibylle Günter kommt schnell auf das Thema, sie ist die Direktorin des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik in Garching (IPP). Dort und am Standort in Greifswald forschen 1100 Mitarbeiter. Also, um das gleich mal klarzustellen: „Ich bin Wissenschaftlerin, ich bin immun gegen Hypes“, sagt Günter. Ihrer Ansicht nach gibt es gute Gründe für den neuen Schwung. Zum einen sind da unbestreitbar Fortschritte in vielen Bereichen der Fusionstechnik. Und da ist die Weltlage.

Deutschland bezog in den vergangenen Monaten rund 60 Prozent seines Stroms aus erneuerbaren Energien, aber fast den ganzen Rest immer noch aus Öl, Kohle und Gas. Die Klimakrise, aber auch der Ukrainekrieg machen einen kompletten Ausstieg aus fossiler Energie dringender nötig denn je. Hinzu kamen lange niedrige Zinsen, sodass Investoren mit ihrem Geld wenig anfangen konnten – außer eben, es zu investieren. „Da kommen viele Dinge zusammen“, sagt Günter.

Deutscher Strommix

Verteilung der öffentlichen Nettostromerzeugung
in Prozent, Stand: 19.10.2023



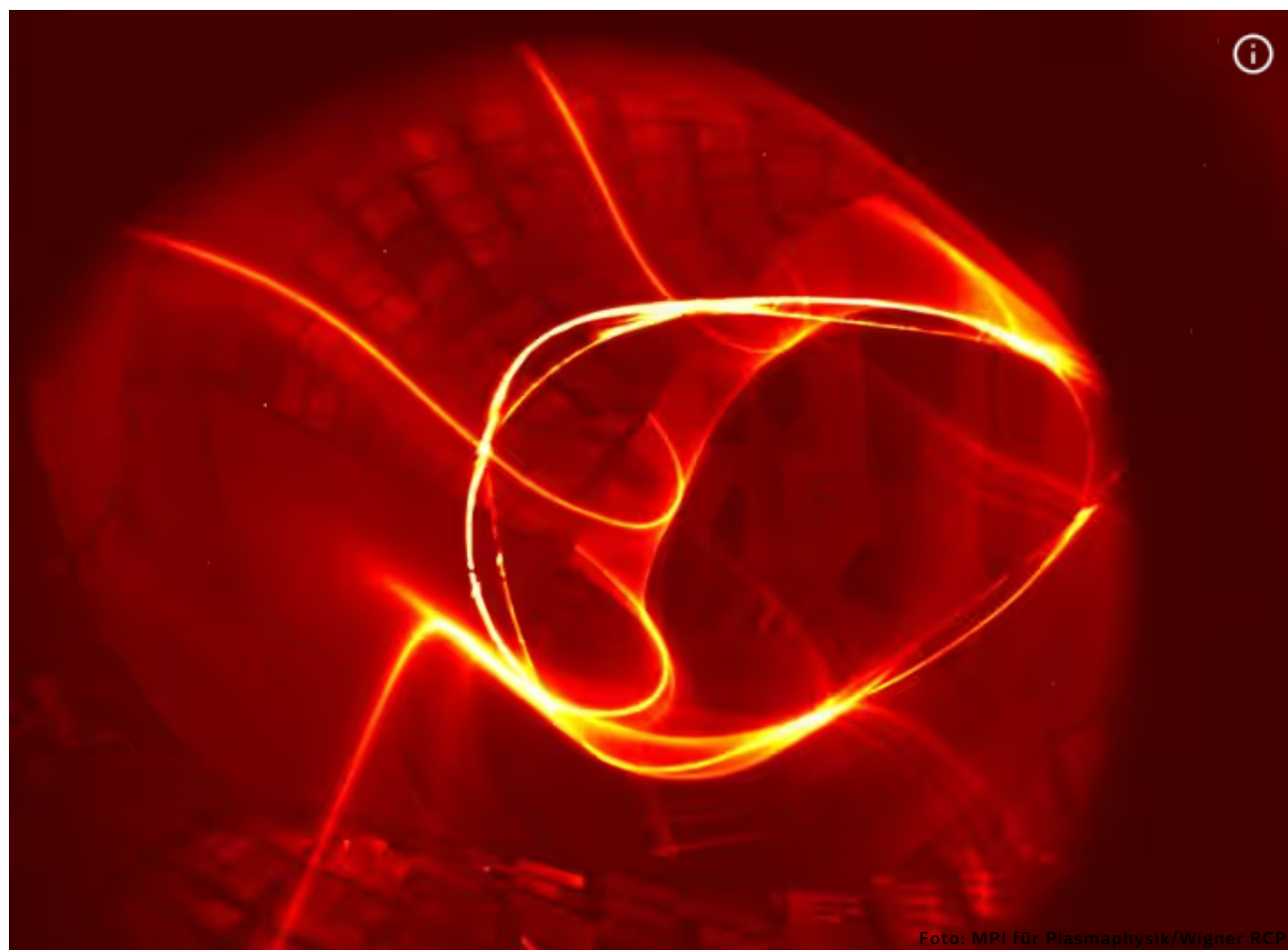


Grafik: jje/SZ. Quelle: Fraunhofer ISE

Und die Idee ist ja auch einfach zu verlockend. Atomkerne sollen ihre Energie abgeben ohne Risiko einer Kernschmelze, ohne radioaktiven Müll, ohne Explosionsgefahr. Der Energiebedarf der Welt wird weiter steigen, bis 2050 etwa um knapp ein Drittel, fossile Brennstoffe fallen weg. Kernfusion wirkt zumindest wie eine mögliche Erlösung, der Ausweg aus sehr vielen Probleme der Menschheit.

Das Versprechen der Fusion ist dabei ein altes. Schon 1934 gelang es Ernest Rutherford, Wasserstoffkerne zu fusionieren. In den 1950er-Jahren began-

nen die USA, Russland und weitere Länder mit ernsthaften Bestrebungen für ein Fusionskraftwerk. Doch der Weg zur kontrollierten Nutzung von Fusion ist noch weit. Immerhin muss dafür ein Plasma-Höllengefeuer von mehr als 100 Millionen Grad entfacht werden, sodass Atomkerne miteinander verschmelzen.



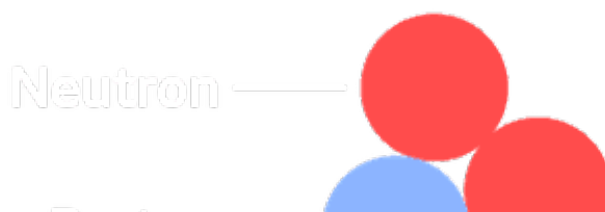
Die meisten Kernfusionsvorhaben setzen auf Deuterium und Tritium, zwei schwere Varianten von Wasserstoff. Sie verschmelzen zu Helium und geben dabei ein Kernteilchen ab, ein Neutron. Weil der neue Kern energetisch günstiger ist als die beiden ursprünglichen, steckt dieses Neutron voller Energie, die man nutzen kann – theoretisch.

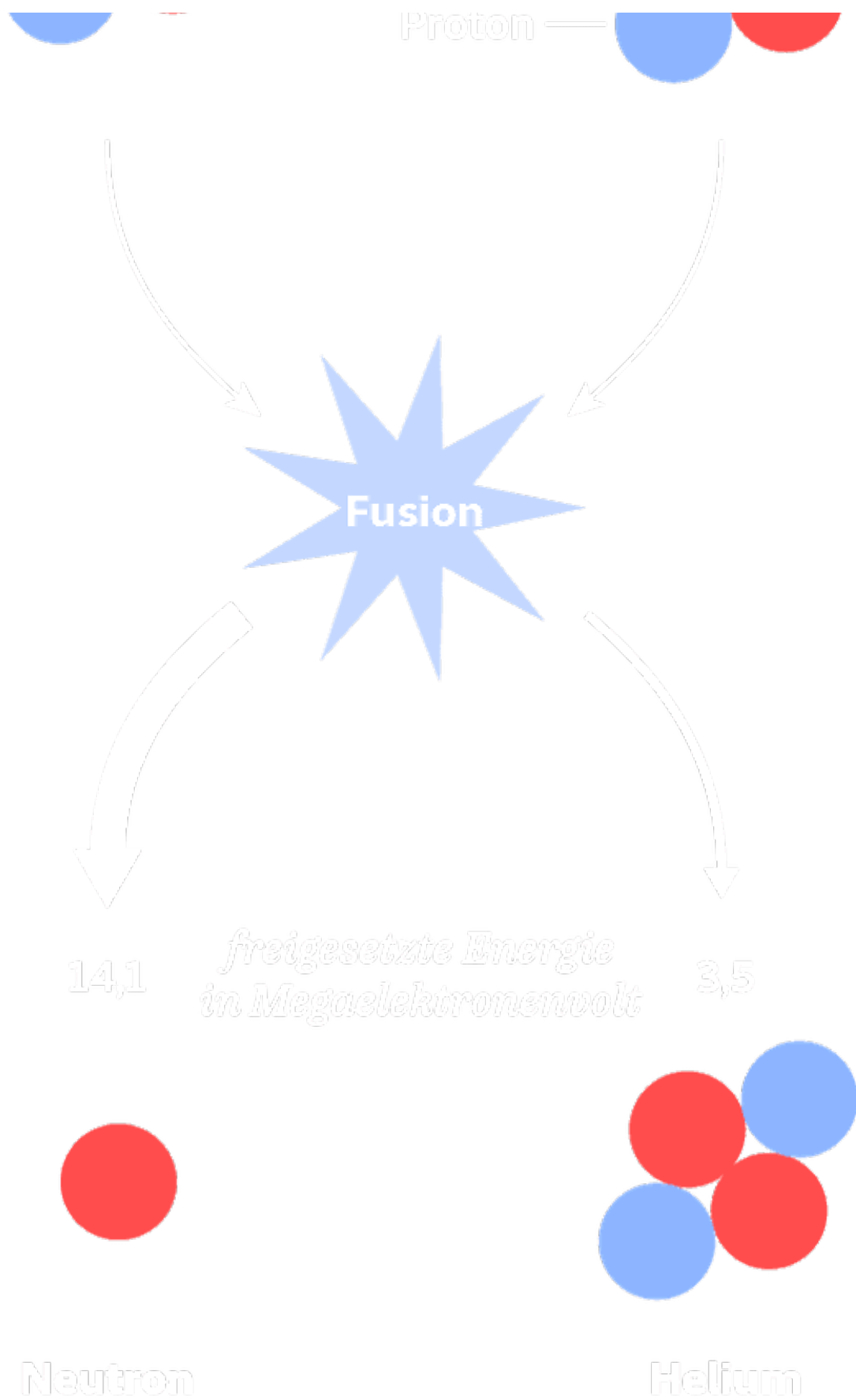
Deuterium



Tritium

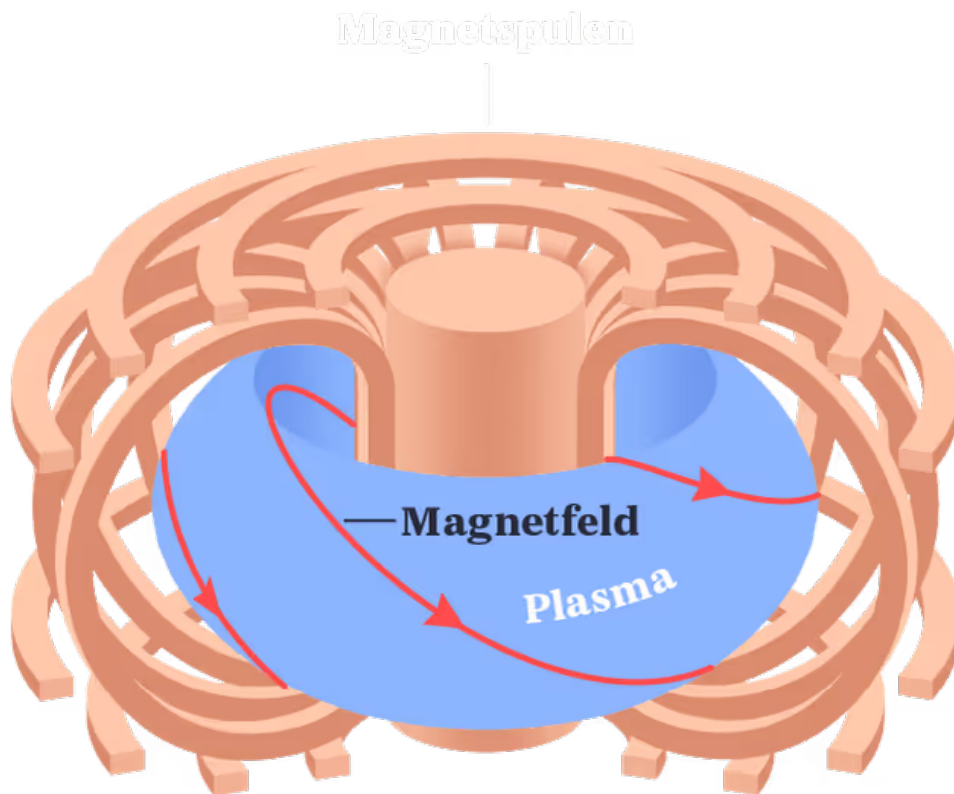
Neutron





Es gibt mehrere Ansätze dafür, Kerne zur Fusion zu bewegen.

In der Magnetfusion hält man das Plasma mit Magnetfeldern im Vakuum in einem Ring gefangen – kein festes Gefäß würde solche Hitze aushalten.



Dann erhitzt man es mit Mikrowellen und Teilchenbeschleunigern. Bei einer Temperatur von über 100 Millionen Grad können die Wasserstoff-Atome fusionieren.



Die freigesetzten Neutronen fliegen vom Magnetfeld unbehelligt aus dem Plasma heraus. Ihre Energie soll in einer speziellen Wandbe-

dem Plasma heraus. Die Energie von in einer speziellen Wandbe-

schichtung in Wärme umgewandelt werden.

In der Laserfusion wird das Brennmaterial in einer Kapsel von allen
Seiten mit Laserstrahlen beschossen.

192 Laserstrahlen feuern auf einen Zylinder, in dem der Brennstoff steckt, ein zunächst gefrorenes Kügelchen aus Deuterium und Tritium.

Die Innenwände der Brennstoffkapsel wandeln die Laserenergie in Röntgenstrahlen um, die das Kügelchen von allen Seiten treffen und zum Implodieren bringen

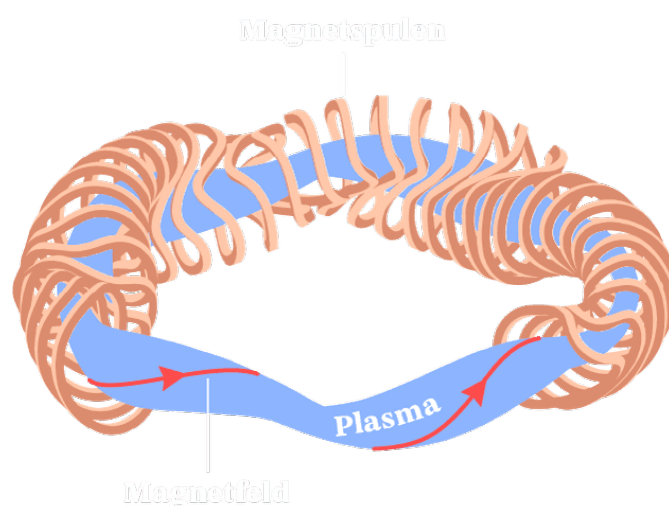
Die Wasserstoffteilchen heizen sich zum Plasma auf und fliegen so schnell nach innen, dass sie ihre Abstoßung überwinden und fusionieren. Dabei wird Energie frei.



Weitere Fusionsprojekte wollen statt Deuterium und Tritium andere Elemente fusionieren. Nahezu jeder Ansatz wird inzwischen von einem Start-up verfolgt, oft versuchen mehrere Firmen das Gleiche parallel.

Es sind Firmen wie Proxima Fusion. Francesco Sciortino kann das wissenschaftliche Paper benennen, das für ihn den Ausschlag gegeben hat, im Januar 2023 zu gründen: „Magnetische Felder mit präziser Quasisymmetrie für den Plasmaeinschluss“ lautet der übersetzte Titel. Proxima Fusion ist aus dem IPP heraus entstanden, sie wollen einen speziellen Ansatz der Magnetfusion zum Kraftwerk machen: den Stellarator, zu Deutsch Sternbringer.

Es ist ein Magnetring, der aussieht wie ein Simit, ein in sich verzwirbelter türkischer Teigkringel.



„Im Stellarator liegt die Zukunft“, sagt Francesco Sciortino. Er hat am Max-Planck-Institut gearbeitet, das am Standort Greifswald den weltweit stärksten Forschungsstellarator Wendelstein 7-X betreibt.



Jetzt entwickelt er mit seinen Mitarbeitern in einem irrwitzigen Tempo ein optimiertes Stellarator-Konzept. Sieben Millionen Euro haben sie im Mai eingeworben, bald folgt die Erweiterung der Funding-Runde. Im Moment ist der wertvollste Besitz der acht Monate alten Firma ein Kryostat für su-

praleitende Magnetspulen, also eine Art Extremkühlschrank, im Wert von hunderttausend Euro. Aber schon 2031 soll ein Prototyp eines Stellarators stehen.

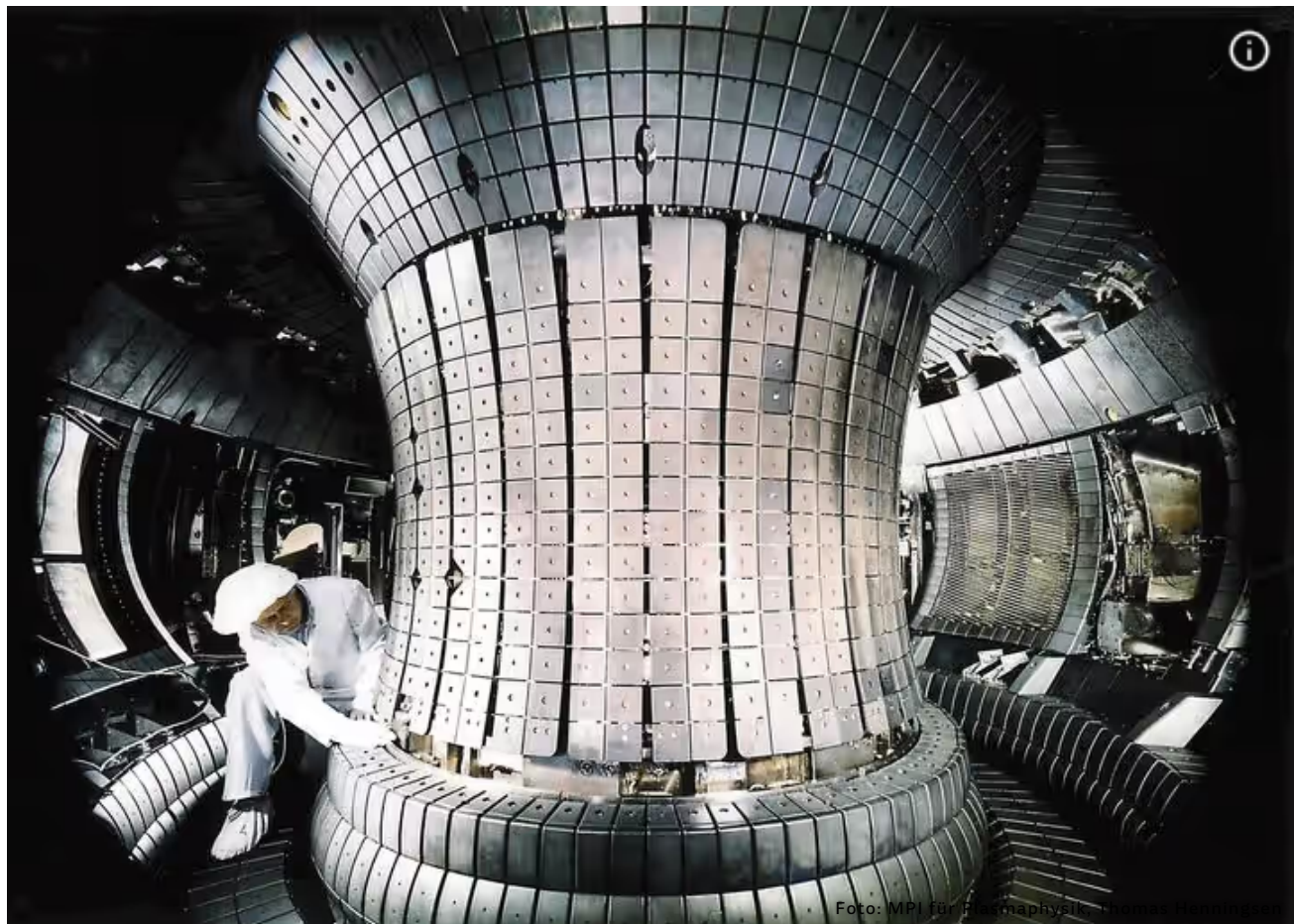
"Das wird nicht nur irgendeine App, sondern der Fortschritt der Menschheit"

Proxima Fusion sitzt im Werksviertel hinter dem Münchner Ostbahnhof, dort, wo die Landeshauptstadt ein bisschen cool wirkt. Auf einem Schotterplatz steht ein Riesenrad, in ehemaligen Industriegebäuden sitzen junge Menschen vor Laptops, es wird Englisch mit verschiedenen Akzenten gesprochen und mittendrin baut der Circus Roncalli sein Zelt auf. 18 Mitarbeiter arbeiten bisher für Proxima Fusion, die nagelneuen Büroräume würden bestimmt doppelt so vielen Platz bieten.

Noch sind die Räume karg, ein Whiteboard lehnt leer an der Wand, die einzige Dekoration ist eine Hängepflanze am Kleiderständer. Francesco Sciorino hat anderes im Kopf als Bürodekoration. „Fusion ist unser stärkstes Argument. Es ist keine Frage mehr, ob es klappt, nur noch wann“, sagt er.

Die Investoren wüssten: wenn seine Kollegen und er das hier hinkriegen, dann ist das nicht nur irgendeine neue App. „Das ist Fortschritt der Menschheit. Die Firmen, die das geistige Eigentum dafür halten, werden die wertvollsten Firmen der Welt sein.“ Und schnell soll es gehen. Am 1. November will Proxima Fusion das optimierte Konzept eines Stellarators vorstellen, neun Monate nach der Gründung. Die Software für die Simulation haben sie in der Zwischenzeit auch gleich noch geschrieben.

Am IPP in Garching gehen die Uhren anders. Seit vergangenem Jahr steht der dortige donutförmige Plasmabehälter namens Asdex Upgrade still. Techniker bauen neue Elemente ein. Wo sonst Wasserstoffteilchen mit 900 Kilometern pro Sekunde umhersausen, krabbeln Techniker in Reinraumanzügen durch den Ring. Im Herbst 2024 soll es hier weitergehen. Mitunter sind die Forschenden, die hier arbeiten, jünger als die Anlage: Der Tokamak in Garching wurde 1991 aufgestellt.



Aber vielleicht ist die Anlage altersweise, sie weiß, was auf die Start-ups mit ihrem jugendlichen Selbstvertrauen noch alles zukommt. Um das Plasma zu starten, verbraucht der Tokamak allein 32 Megawatt als Heizleistung und Strom für die Magnetspulen. In den 10 Sekunden, in denen das Plasma aufgeheizt wird, braucht Asdex Upgrade so viel Strom wie die Hälfte des Bedarfs der Stadt München. Damit sie das Netz nicht überlastet, zapft die Anlage kontinuierlich Strom ab und speichert diese Energie mechanisch in einem Schwungrad, so groß wie eine Schiffsturbine.

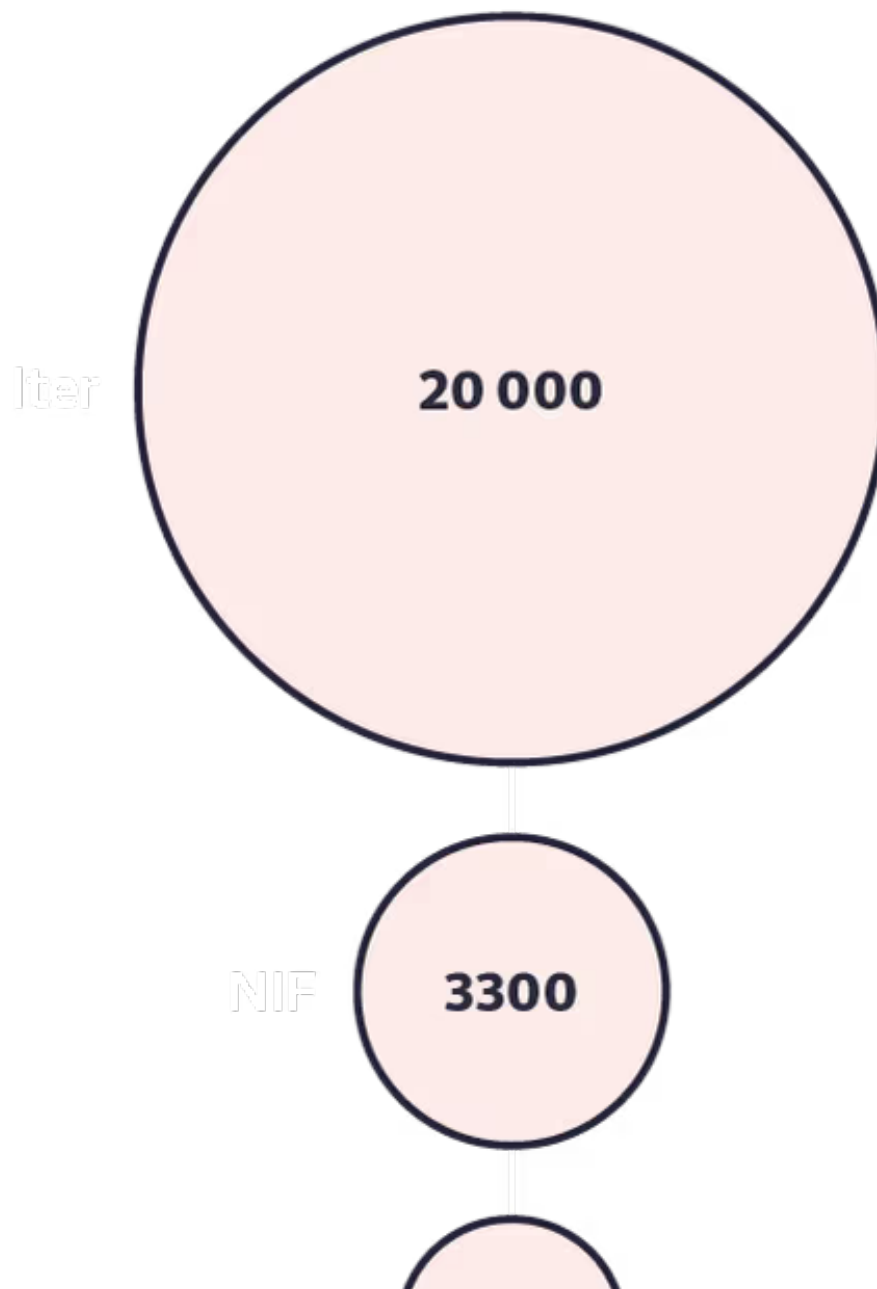
Auch Bayern will nun einen eigenen Demonstrationsreaktor bauen

Hier hat Bayerns Ministerpräsident Markus Söder gemeinsam mit IPP-Direktorin Sibylle Günter vor wenigen Wochen die Mission Kernfusion angekündigt, bei der am Ende ein bayerisches Demonstrationskraftwerk rausspringen soll. Dass die Pläne so konkret werden, das ist neu in der Kernfusion.

Jahrzehntelang hatten Forschungsinstitution in Europa hauptsächlich auf Iter gesetzt, eine internationale Anlage in Südfrankreich. Wenn Asdex Upgrade alt ist, ist Iter Methusalem, zumindest das Projekt: Das Vorhaben wurde 1985 von Reagan und Gorbatschow ins Leben gerufen und ist immer noch im Bau. Iters Verzögerungen und Kostensteigerungen sind längst legendär. Es ist das teuerste Wissenschaftsprojekt der Welt, aktuelle Kosten: 20 Milliarden Euro.

Wie viel Geld in den Projekten steckt

Gesamtbudget in Millionen Euro





Grafik: jje/SZ. Quelle: SZ-Recherche

Das liegt auch daran, dass 35 Länder beteiligt sind, die alle von der Technologieentwicklung profitieren sollten. Deswegen wurden von sechs Magnetspulen eine in Russland, eine in China und vier in Europa gefertigt, Teile der Vakuumkammer kommen aus Südkorea. Es ist eine Forschungsanlage mit eingebauter Verteilungsgerechtigkeit – und in jedem von unzähligen Einzelschritten bestimmt der Langsamste das Tempo. Die Organisationsform ist geradezu darauf ausgelegt, jeden Manager früher oder später in die Verzweiflung zu treiben.

Der Zeitplan des Großprojekts Iter verschiebt sich ins Ungewisse

Aktuell stolpert Iter schon wieder, einzelne Vakuumwände aus Südkorea sind verunreinigt und können das Vakuum nicht halten. Deshalb verschiebt sich der Zeitplan erneut, teils ist von fünf Jahren die Rede, genau wissen sie es erst nächstes Jahr. Wer sich mit Iter beschäftigt, dem eröffnen sich ganz

neue Perspektiven auf das Wesen der Zeit.



Zuletzt war geplant, 2025 erstmals ein Plasma zu zünden und 2035 mit Fusionsreaktionen zu beginnen, danach sollte mit den gesammelten Erfahrungen das Demonstrationskraftwerk Demo gebaut werden. Dieser Teil des Großprojekts beschleunigt sich nun: Das europäische Teil-Betreiberkonsortium Eurofusion von Iter, in dem immer noch 29 Länder und 195 Forschungseinrichtungen vereint sind, möchte nicht mehr so lange warten, sondern zieht die Entwicklung des Demonstrationsreaktors vor. Sogar das Tokamak-Design steht infrage, vielleicht wird es ein Stellarator.

Tony Donné ist der Chef von Eurofusion. Gerade verbringt er die Woche auf der Fusionskonferenz der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) in London. „Ich arbeite seit 1985 in der Fusionsforschung, noch nie habe ich einen solchen Hype erlebt wie jetzt“, sagt er, da ist das Wort schon wieder. „Es ist im Moment sehr einfach, als Firma fünf bis zehn Millionen Euro Investitionen zu bekommen.“ Mit den geänderten Plänen für den Demonstrationsreaktor reagiere Eurofusion sowohl auf die Iter-Verzögerung als auch auf die Bewegung um die Forschungsinstitute herum, sagt Donné.

Ist es ärgerlich, dass Start-ups jetzt an den von langer Hand geplanten Projekten der Forschungseinrichtungen vorbeiziehen könnten? „Genau dafür brauchen wir die Start-ups“, sagt Donné. „Ich bin froh, dass Firmen die Reaktoren bauen werden, denn das können wir als Forschungsinstitute nicht.“ Und ob am Ende tatsächlich ein Projekt aus dem Privatsektor schneller ist, sei noch nicht gesagt, meint er: „Die Zeitpläne, die diese Firmen aufstellen, sind für Investoren und Politiker gemacht.“

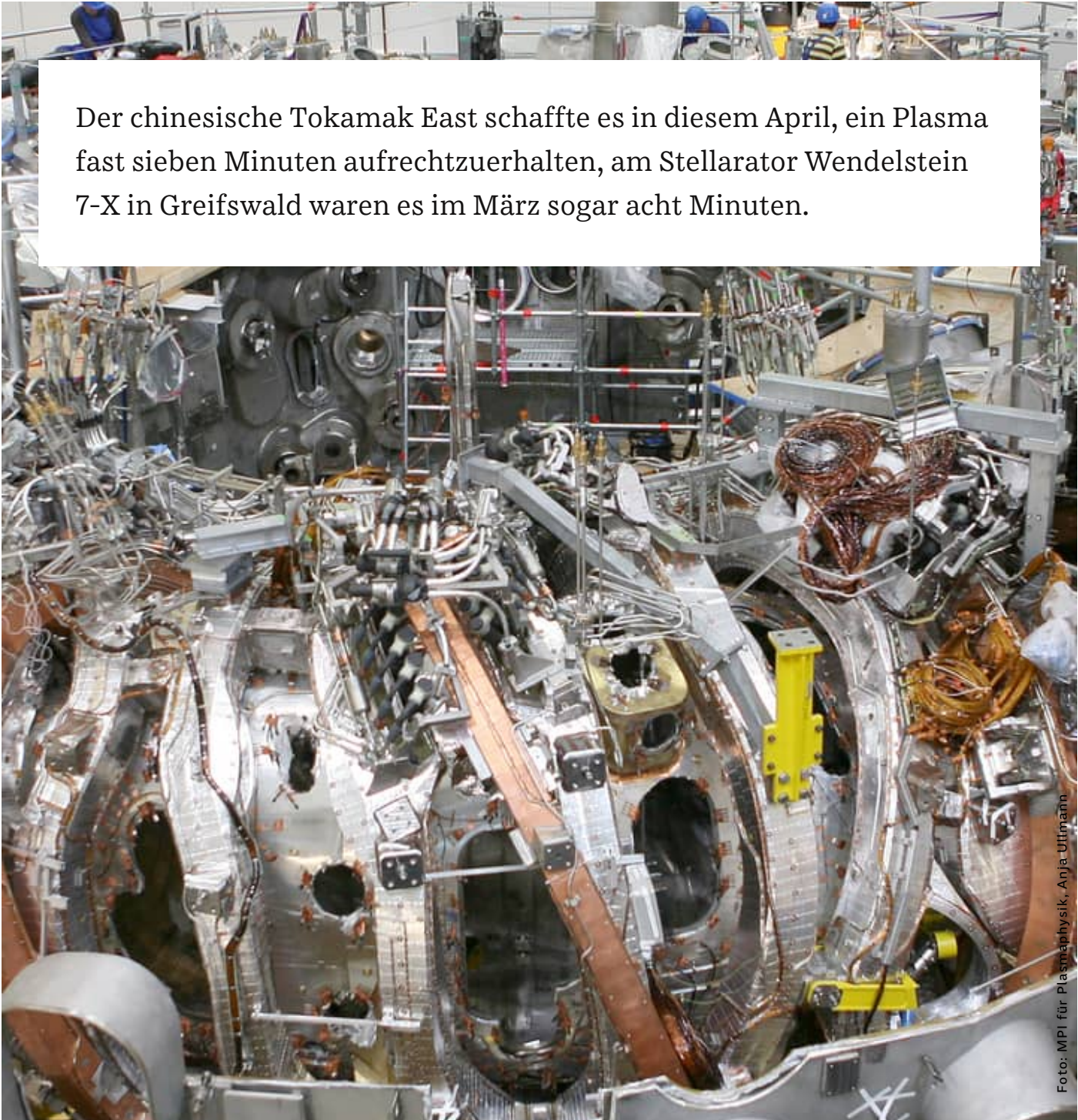
Vielleicht ist es weniger ein Wettrennen und eher ein gegenseitiges Aufschaukeln von Forschungseinrichtungen und Privatfirmen. Eurofusion gerät in Bewegung, weil Start-ups aufholen, und Start-ups wiederum können weiterkommen, weil öffentlich finanzierte Forschungsgruppen Ergebnisse veröffentlichen.



So erzeugte 2021 der Tokamak Jet in Oxford einen Rekord-Output von 16 Kilowattstunden.

Im Dezember 2022 bekam das Lawrence Livermore National Laboratory in den USA große Aufmerksamkeit mit dem ersten Nettoenergiegewinn in der Laserfusion.





Der chinesische Tokamak East schaffte es in diesem April, ein Plasma fast sieben Minuten aufrechtzuerhalten, am Stellarator Wendelstein 7-X in Greifswald waren es im März sogar acht Minuten.

Trotz aller eindeutigen Fortschritte und berechtigten Hoffnungen gibt auch der Proxima-Fusion-Gründer Sciortino zu, dass da momentan so mancher etwas übertreibt. „Es gibt definitiv einen Hype. Und einige der Konzepte sind für mich nicht nachvollziehbar. Ich glaube an keinen Fusionsantrieb in Kofferraumgröße und auch an keinen Ansatz, der zunächst andere Brennstoffe als Deuterium und Tritium benutzt.“

Das sieht man beim anderen Münchner Fusions-Start-up Marvel Fusion natürlich anders, sie setzen mittelfristig auf Bor und Wasserstoff als Brennstoff, den sie mit Laserstrahlen zünden wollen. Wenn man die Chefin Heike Freund nach dem Grund für die Entscheidung für diesen Brennstoff fragt, antwortet sie erst mal mit den Nachteilen des Konkurrenz-Brennstoffs Deuterium-Tritium.

Marvel Fusion ist vier Jahre alt, das Büro an der Theresienhöhe sieht schon etwas eingelebter aus. Auf den Whiteboards sind Skizzen von Kraftwerken zu sehen. Konzeptionell aber ist bei Marvel Fusion ein entscheidender Punkt noch unklar: Fachleuten zufolge ist ein Bor-Proton-Plasma zur Fusionsenergieerzeugung ungeeignet.

Wie ein Ofen verliert ein Plasma Energie über Strahlung. Und bei Proton-Bor, so die Kritik, übersteigt der Strahlungsverlust immer die erzeugte Fusionsenergie. Das Plasma würde also nie brennen können. Das wäre in etwa so, als versuchte man mit Holz zu heizen, das man ständig mit dem Feuerzeug am Brennen halten muss. Marvel Fusion sagt: „Es ist klar, dass das

Proton-Bor-System strahlungsdominiert ist. Das bedeutet aber nicht, dass man es nicht zum Brennen bringen kann.“ Was bisher öffentlich bekannt sei, stelle nicht das Fusionskonzept von Marvel Fusion dar, vielmehr solle Bor zunächst Deuterium-Tritium zum Stabilisieren, nicht als Brennstoff, beigemischt werden.

Bei allen Fusionsansätzen sind grundlegende technische Fragen unbeantwortet

Aber auch viele andere Punkte sind noch offen – wie bei im Grunde allen Fusionsplänen. Um im Jahr 2035 ein Kraftwerk zu betreiben, so der Plan von Marvel Fusion, sollen einmal Hunderte Laser das Plasma zünden, zehnmal pro Sekunde. Aktuell experimentiert das Start-up noch unter anderem an einem Forschungslaser der Ludwig-Maximilians-Universität München, groß wie eine Sporthalle. „Wenn der morgens eingeschaltet wird, schießt er nachmittags zum ersten Mal“, sagt Heike Freund.

Die Brennstoffstäbchen aus Protonen und Bor werden auch erst noch entwickelt, im Kraftwerksbetrieb braucht eine Anlage 900 000 am Tag. Von der Zündung über die Brennstoffproduktion bis zur Umwandlung der Fusionsprodukte in Strom: all diese Schritte sind noch in der Entwicklung. Das ist bei den meisten Unternehmen ähnlich. Trotzdem schloss etwa die US-amerikanische Fusionsfirma Helion schon einen Stromliefervertrag für 2028 ab. 50 Megawatt soll der Kunde Microsoft aus deren zukünftigem Fusionskraftwerk bekommen, mehr als die Leistung, die drei Offshore-Windräder erzeugen.

Wie weit die Technologie ist, geben Forschungsinstitute und Firmen mit Zahlen von eins bis neun an, den „Technology Readiness Levels“. Bei der Laserfusion liegt eine Komponente sogar noch bei 1, das ist das Design der Kammer. Das bedeutet: Das Funktionsprinzip ist beschrieben, aber noch überhaupt keine Technologie. Keine der Komponenten hat Level 5 erreicht, den Versuchsaufbau in einer Einsatzumgebung. Die Selbsteinschätzung der Magnetfusion lautet: viele Dreier, Vierer und Fünfer, höchstens eine Sechs. Ein laufendes Kraftwerk hat überall eine Neun.

Doch in der Branche sind sich alle sicher, egal, wo man fragt: Es ist keine Frage, ob die Kernfusion kommt, sondern nur wann. Die internationale Energieagentur IAEA gab am Montag die Devise aus, sie wolle ihre Mitgliedsstaaten bei der „großen technischen Herausforderung des 21. Jahrhunderts“ stärker unterstützen. Das klingt, als müsste von nun an nur noch gebaut werden, was konzeptionell vorliegt. Aber schaut man auf die Details, stößt man überall auf Lücken, wo grundlegende technische Fragen noch völlig offen sind.

Kritik an der Kernfusion kommt nur von außen

Bei vielen Fachleuten, die einhellig Optimismus verbreiten, sind gewisse Interessenskonflikte offensichtlich. Da ist ein Blick von außen hilfreich. Im September tagte der Ausschuss für Technikfolgenabschätzung des Bundestages, um darüber zu beraten, ob Kernfusion stärker gefördert werden sollte. Einer der einberufenen Sachverständigen war der Technikpolitikforscher Tobias Schmidt von der ETH Zürich, einer von zweien in der Runde, die Fusionsförderung kritisch sehen. Er ist kein Kernfusionsexperte, seine Gegenargumente basieren nicht auf plasmaphysikalischen Feinheiten, sondern auf einer einfachen Abschätzung: Kernfusion ist extrem kompliziert und sehr teuer.

Schmidt zweifelt nicht grundsätzlich daran, dass es möglich wäre, etwa bis 2040 ein Kernfusionskraftwerk zum Laufen zu bringen. Er zweifelt an dessen gesellschaftlichem Nutzen. „Ein Fusionskraftwerk ist zu komplex, als dass es irgendwann wesentlich billiger werden könnte“, sagt er. Photovoltaik konnte als Technologie rentabel werden, weil ihr Design vergleichsweise einfach ist und Massenherstellung möglich.

Die Erwartung von extrem günstiger, nahezu unerschöpflicher Energie aus Fusion sieht Schmidt kritisch: „Kernfusionsstrom wird nicht umsonst sein. Die Hoffnung war bei den Atomkraftwerken schon da. Damals wurde damit geworben, dass der Strom zu billig zum Messen werden würde. Heute subventionieren wir Atomkraft immer noch.“

Fusionsfans wie Sibylle Günter halten mit einem anderen Bedürfnis dagegen: Die Versorgungssicherheit, die Kernfusion in einem künftigen Energiesystem bieten könne, sei so essenziell für eine stabile Stromversorgung, dass der Preis nicht die allein entscheidende Rolle spielen werde. Darauf angesprochen, sagt Tobias Schmidt: „Dieses Argument ist für mich schlicht falsch.“ Für die letzten zehn bis 20 Prozent Energie, die erneuerbare Energien und Speicher nicht abdecken können, brauche es das Gegenteil: eine Stromerzeugung, die günstig in der Anschaffung und vergleichsweise teuer im Betrieb ist, etwa ein Gaskraftwerk mit eingebauter Carbon-Capture-and-Storage-Funktion.

„Der Durchbruch in der Laserfusion hat einen Hype ausgelöst, der meiner Meinung nach nicht gerechtfertigt ist“, sagt Schmidt. Als Grundlagenforschung zu Materialien, Lasern und Supraleitern sei Fusionsforschung für andere Anwendungen, beispielsweise in der Medizintechnik, extrem relevant. Aber als angewandte Energiewissenschaft? Dafür sei es noch zu früh. Sein Urteil im Bundestagsausschuss lautete daher: Ein Fokus auf Fusionsenergie ist nicht zielführend.

Politisch und wirtschaftlich aber sieht es weiterhin gut aus für die Kernfusion. Die neueste Meldung kommt aus Großbritannien, dort gibt es zusätzliche 650 Millionen Pfund für Fusionsförderung, der Geldregen geht weiter. Am Ende wird die Zeit zeigen, ob das erste Fusionskraftwerk 2028, 2035 oder 2045 ans Netz geht. Oder nie.

Text: Theresa Palm, **Infografik:** Jonas Jetzig, **Redaktion:** Marlene Weiß, **Bildredaktion:** Natalie Isser, **Schlussredaktion:** Cosima Kopfinger

© SZ - Rechte am Artikel können Sie [hier](#) erwerben.

Diese Geschichte teilen



Süddeutsche Zeitung



SZ Plus-Abonnent:

[AGB](#)

[Datenschutz](#)

[Datenschutz-Einstellungen](#)

[Abo kündigen](#)

Vertrag mit Werbung:

[Vertragsbedingungen](#)

[Datenschutz](#)

[Cookie Policy](#)

[Vertrag mit Werbung kündigen](#)

[Widerruf nach Fernabsatzgesetz](#)

[Widerspruch](#)

[Kontakt und Impressum](#)