

Willkommen! Vielen Dank für dein Interesse. Dieser Text ist ein Entwurf.

Wenn du den Text liest, kannst du mir weiterhelfen, indem du vor allem auf diese Dinge achtest:

1. Die Zielgruppe: Er ist für Menschen geschrieben, die sich fürs Klima interessieren, aber nicht für die technischen Details der Kernfusion per se. Passt der Text für diese Zielgruppe? (Ich schreibe einen zweiten Text, der sich mehr an ein Fachpublikum richtet.)

2. Die Fakten: Stimmt alles? Habe ich irgendwo unsauber formuliert?

3. Die Belege: Fehlen welche?

Wenn du etwas findest, kommentiere einfach direkt an der entsprechenden Stelle.

Shortcut: Strg+Alt+M

Danke! 🌟

Kernfusion ist kinderleicht. 2008 baute der damals 14 Jahre alte US-Amerikaner Taylor Wilson ein Gerät, in dem Atomkerne von Wasserstoffteilchen verschmolzen. Wilson war noch nicht einmal der Erste, dem es gelang. Mehr als zwei Dutzend Menschen hatten vor ihm in ihrer Freizeit bereits Atomkerne fusioniert.

Und trotzdem gibt es bis heute kein einziges funktionierendes Fusionskraftwerk.

Dass der 14-Jährige Wilson eine Fusionsanlage baute, war eine wahre Wunderkindtat, aber sein Gerät war so gebaut, dass es keine Energie liefern konnte. Nur Neutronen. Die sind auch nützlich, aber eben

nicht ganz so nützlich und potentiell zivilisationsverändernd wie eine Energiequelle, die “alle unsere Energieprobleme lösen” können soll (Bettina Stark-Watzinger, Forschungsministerin, FDP).

Die Menschheit muss in den nächsten 25 Jahren nochmal 30 Prozent mehr Energie produzieren als heute. Wie diese Lücke klimaschonend gefüllt werden kann, diskutieren Fachleute verbissen. Sie bewegen sich dabei zwischen zwei Polen: Die Einen meinen, dass wir voll auf erneuerbare Energie setzen sollten, die derzeit billigste und am einfachsten verfügbare Energiequelle. 100 Prozent Erneuerbare muss das Ziel sein.

Andere glauben, dass das nicht realistisch sei. Zu viele Probleme gäbe es bei Speicherung und Transport von grünem Strom und zu viel Widerstand beim Ausbau speziell von Windrädern. Sie glauben, dass die Menschheit zusätzlich große zentrale Kraftwerke brauche, die rund um die Uhr Wärme und Strom liefern können. Das könnten Atomkraftwerke (AKWs), Gaskraftwerke, bei denen das CO₂ eingefangen wird oder eben Fusionskraftwerke sein.

CDU, SPD und FDP setzen auf Kernfusion

Die Unionsfraktion im Bundestag [fordert](#) die Ampel-Regierung auf, mit Kernfusion Klimaneutralität zu erreichen. Die SPD und CDU in Hessen haben Kernfusion im Koalitionsvertrag verankert und [wollen](#) ihr Bundesland zum “Leitstandort für laserbasierte Kernfusion” machen. Das Forschungsministerium wiederum [hat](#) gerade seine Unterstützung für die Fusionsforschung aufgestockt. 90 Millionen Euro sollen in entsprechende Start-Ups fließen. Insgesamt fördert die Regierung die Technologie bis 2028 mit einer Milliarde Euro.

Um in der Klimakrise noch einen Unterschied zu machen, muss Kernfusion allerdings schnell kommen. Denn die meisten Länder der Erde wollen bis zum Jahr 2050 klimaneutral sein.

Aber selbst wenn Kernfusion schon in – sagen wir – fünf Jahren einsatzbereit wäre, gäbe es eine weitere Hürde. Und sie ist höher als die technischen Schwierigkeiten, an denen Fusionsforscher gerade tüfteln.

[paywall]

Fusionsforscher wollen die Sonne übertreffen

Kernfusion erzeugt Energie, in dem Atomkerne dazu gebracht werden, miteinander zu verschmelzen und die dabei entstehende Wärme mit großen Dampfturbinen, wie sie auch in Kohle- oder Gaskraftwerken verwendet werden, in Strom umgewandelt wird. Kernfusion ist ein substantiell anderer Prozess als Atomspaltung, die Technik hinter den heutigen AKWs.

[note]

In einem Fusionsreaktor findet Albert Einsteins berühmte Formel $E=MC^2$ eine ganz praktische Anwendung. Die Masse (M) der Atomkerne wird in Energie (E) umgewandelt.

[/note]

Oft kann man lesen, dass es bei der Kernfusion darum ginge, die “Sonne nachzubauen”. In der Sonne wie in einem Fusionsreaktor läuft prinzipiell der gleiche physikalische Prozess ab. Aber eigentlich wollen Fusionsforscher die Sonne sogar übertreffen. Denn die Sonne produziert nirgendwo in ihrem Inneren mehr Energie als ein Komposthaufen auf der Erde. Nur weil sie so groß ist, reicht das trotzdem aus, um alles Leben auf der Erde zu ermöglichen.

Fusionsforscher allerdings haben mal eben keine Kugel mit 1,39 Millionen Kilometern Durchmesser zur Hand; so groß ist die Sonne. Sie brauchen die stärksten Magnete der Erde und 150 Millionen Grad Celsius, um die widerspenstigen Atomkerne dazu zu bringen, zu verschmelzen – und um daraus irgendwann einmal Energie zu gewinnen.

Der letzte Punkt ist entscheidend. Bisher ist es keiner Fusionsanlage gelungen, mehr Energie zu erzeugen als für den gesamten Prozess aufgewendet wurde.

Noch immer 99 Prozent Energieverlust in den Fusionsanlagen

Zwar ging im Winter 2022 eine [Erfolgsmeldung](#) um die Welt (“Durchbruch bei Kernfusion: Mehr Energie gewonnen als verbraucht”); sie hatte aber einen nur für Spezialisten sofort erkennbaren Haken. Es ging bei diesem Versuch im US-Wasserstoffbombenlabor Lawrence Livermore National Laboratory allein um die Energie des Lasers, mit dem die Fusion ausgelöst wurde, nicht um die Gesamtenergie. Da machte der Versuch immer noch Verlust, 99 Prozent um genau zu sein.

[note]

Markus Prössel dröselt die zwei Energiebilanzen der Kernfusion [hier](#) gut auf.

[/note]

Sollte es aber eines Tages gelingen, mit Kernfusion wirklich Energie zu produzieren, wäre das ein epochaler Durchbruch. Denn die Menschheit hätte dann eine CO₂-freie Energiequelle zur Verfügung, die bei geringem Ressourceneinsatz große Mengen Strom und Wärme liefern kann. Ein Gramm Fusionsbrennstoff kann [laut](#) Max-Planck-Institut so viel Energie erzeugen wie elf Tonnen Kohle. Und sollte es gelingen, diese Energie günstig zu produzieren, könnte die Menschheit plötzlich Ideen umsetzen, die bisher vor allem daran scheitern, dass sie sündhaft viel Energie verbrauchen; wirklich groß angelegtes Recycling von Plastik zum Beispiel.

[note]

Die Internationalen Energieagentur IEA prognostiziert, dass die Menschheit 250 Millionen Terawattstunden Primärenergie im Jahr 2050 brauchen wird. Heute sind es 187 Millionen Terawattstunden.

[/note]

Wegen solcher Aussichten [flossen](#) in den vergangenen Jahren €5,7 Milliarden in die mehr als 30 Fusions-Start-Ups weltweit. Auch deutsche Unternehmen wie Proxima Energy aus München mischen mit. Wie groß die Hoffnungen (und Verheißungen) bei der Fusionsenergie sind, [zeigt](#) ein Blogpost des Open-AI-Chefs Sam Altman. Darin begründet er, warum er in ein Fusions-Start-Up investiert hat: "Wenn das alles so funktioniert, wie wir es uns erhoffen, könnten wir einen Weg aus der Klimakrise finden".

Über eine andere Energiequelle [wurde](#) auch schon einmal mit ähnlich warmen Worten geredet: über die Atomkraft in den 1950er und 1960er Jahren. Heute ist sie fester Bestandteil des globalen Energiesystems, die ganz großen Hoffnungen haben sich allerdings nicht erfüllt.

Warum Kernfusion Atomkraft überlegen ist (theoretisch)

Kernfusion ist aber der Atomkraft überlegen. Denn Kettenreaktionen sind bei der Kernfusion physikalisch ausgeschlossen. Das heißt: die Gefahr großer für die Allgemeinheit gefährlicher Unfälle ist niedriger.

Außerdem entsteht bei der Fusion deutlich weniger Radioaktivität; der anfallende Müll strahlt vergleichsweise leicht nur für 100 Jahre. Zuletzt brauchen Fusionskraftwerke kein Uran, die meisten Typen benötigen nur Wasser und Lithium.

Fusionskraftwerke teilen aber mit der Atomkraft einen Vorteil: Sie sind klein. Auf wenig Fläche wird viel Energie produziert. Atomkraftwerke [brauchen](#) nur 0,36 Prozent der Fläche eines vergleichbaren Solarkraftwerkes. Bei Fusionskraftwerken wird es noch weniger sein, weil die Uran-Minen und Endlager wegfallen können.

Allerdings gibt es einen sehr großen, für die Klimakrise entscheidenden Unterschied zwischen Atomkraft und Kernfusion: Es gibt bereits funktionierende Atomkraftwerke. Kernfusion kann solange keine Rolle bei der Lösung der Klimakrise spielen solange es keine funktionierende Kraftwerke gibt. Wann diese kommen sollen, ist Gegenstand eines berühmten Witzes ("Immer nur noch 30 Jahre entfernt") und komplett unklar.

Das erste Kraftwerk kommt Mitte der 2030er Jahre – vielleicht

Das Start-Up, in das Sam Altman investiert hat, will schon in wenigen Jahren Strom liefern. Andere Start-Ups sprechen von Mitte der 2030er oder gar Mitte der 2040er Jahre. Das staatliche ITER-Projekt in Frankreich rechnet nicht vor 2050 mit dem ersten Test-Reaktor, der ans Netz gehen kann.

Schließlich stammen die ersten Konzepte für Fusionskraftwerke aus den 1950er Jahren; sie wurden parallel zu AKWs entworfen.

Einen Eindruck von der *Komplexität eines Fusionsreaktors* konnte ich in Greifswald gewinnen. Dort am Rande der Stadt, neben einem Feld steht eines der wichtigsten Fusionsforschungszentren der Welt, eine Außenstelle des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik. In einer Halle hoch wie ein Baukran und breit wie der Sockel des Berliner Fernsehturms türmt sich ein metallenes Gebilde auf, das sich schwer mit einem Wort fassen lässt. An einem wuchtigen metallenen Körper hängen Apparate, Türen, Steckvorrichtungen, die von Hunderten verschlungenen Röhren, Schläuchen und Kabeln verbunden werden. Von der Empore in der Halle betrachtet, sieht die ganze Anlage am ehesten aus wie ein Herz. In seinem Inneren biegen und beugen sich gewaltige Magnete aus Niob-Titan, Sonderanfertigen eines deutsch-italienischen Konsortiums, die das nur wenige Milligramm schwere Fusionsplasma einschließen.

Läuft die Anlage einmal, beziehen die Forscher eine eigens, vom öffentlichen Internet abgeschirmte Steuerungszentrale und arbeiten von dort monatelang in 12-Stunden-Schichten, um ihre Experimente durchzuführen. In Greifswald arbeiten sie an einem ganz bestimmten Reaktordesign, einem sogenannten Stellarator. Ziel der Forscher ist es, Fusions-Plasma 30 Minuten lang zu erzeugen. Das ist schwerer als es sich anhört. Der Rekord der Anlage [liegt](#) bei acht Minuten und war erst zu erreichen, nachdem die Forscher den Reaktor für drei Jahre umgebaut und dabei unter anderem 657 voneinander unabhängige Kühlkreisläufe installiert haben.

[note]

Den Weltrekord [halten](#) Forscher aus China: 17 Minuten.

[/note]

Das Plasma über Tage, Wochen, Monate hinweg stabil zu halten, ist aber nicht die einzige technische Hürde. Bisher weiß etwa niemand, wie die ganze Wärme abgeführt werden soll, die der Reaktor im Dauerbetrieb produziert oder welche Materialien dauerhaft Druck, Hitze und Radioaktivität im Inneren der Anlage aushalten können.

[note]

Das ist nur ein ganz kleiner Überblick über die technischen Hürden. In meinem nächsten Text gehe ich stärker in die Details. Abonniere hier meinen Newsletter, um diesen Text nicht zu verpassen.

[/note]

Fusionsforscher arbeiten an all diesen Problemen; manche Start-Ups verlassen dabei auch die bisher eingeschlagenen Wege und versuchen ganz neue Lösungsansätze. Das ist vielversprechend, aber für einen Beitrag zur Lösung der Klimakrise aktuell zu wenig.

Fusionskraftwerke passen immer weniger in das Energiesystem von heute

Außerdem sind Fusionskraftwerke darauf ausgelegt, rund um die Uhr Strom zu liefern. Fachleute nennen das "grundlastfähig" und das war *die* eine Bedingung, die ein Kraftwerk erfüllen musste – im *Energiesystem des 20. Jahrhunderts*. Heute aber ist Flexibilität im Markt wichtiger. Denn Sonne und Wind

liefern nicht immer die gleiche Menge an Strom. Deswegen braucht es andere Kraftwerke, die einspringen können, wenn es zu wenig Strom gibt. Grundsätzlich [könnten](#) Fusionskraftwerke das auch leisten, aber technische Machbarkeit wird dabei nicht entscheidend sein.

Womit wir zu der einen entscheidenden Hürde kommen, die höher ist als all die technischen Probleme: *Geld* (wie immer). Fusions-Start-Ups geben Kostenprognosen ab, die vermuten lassen, dass ihre Kraftwerke eines Tages konkurrenzfähig Strom produzieren könnten. Immer wieder hört man Zahlen von 50 bis 60 Euro für die Megawattstunde. Diese Spanne ist kein Zufall, sondern genau jene Spanne, in der sich auch die teuersten Solarkraftwerke inklusive Speicher [laut Fraunhofer](#) im Jahr 2040 bewegen werden. Die Start-Ups haben ein Interesse daran, ihre Prognosen schön zu rechnen. Sie brauchen schließlich Investoren. Forscher [gehen eher](#) davon aus, dass sich die finalen Kosten inflationsbereinigt in ein paar Jahrzehnten bei 80 bis 130 Euro für die Megawattstunde einpendeln werden.

Das bedeutet, dass Fusionsenergie von Beginn an eine sehr teure, vielleicht sogar die teuerste Energieform sein wird; sie ist Stand heute nicht konkurrenzfähig im Strommarkt.

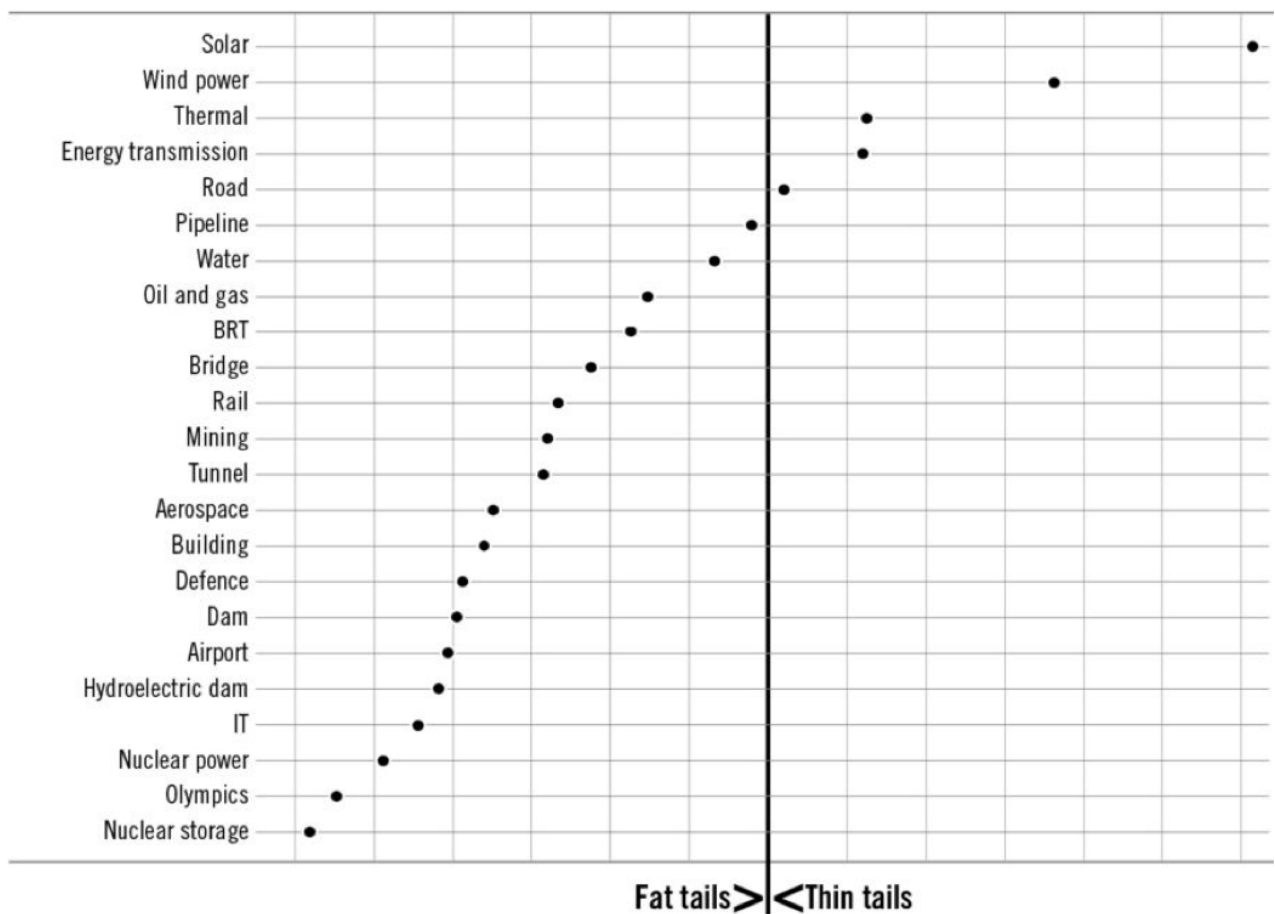
Die Rechnung verschlechtert sich noch weiter, würden die Fusionskraftwerke nur dann einspringen, wenn Solar, Wind, Wasser, Geothermie und Biomasse zu wenig liefern. Denn dann bliebe für die Betreiber der Kraftwerke noch weniger Zeit, um die Kosten für die Anlage wieder reinzuholen.

Ein letzter Punkt ist bedenkenswert: Der Bau von Fusionskraftwerke wäre ein Großprojekt ähnlich wie es der Neubau von Atomkraftwerken ist. Aber in den vergangenen Jahrzehnten hat sich [gezeigt](#), dass speziell die Länder des Westens schlecht darin geworden sind, solche *Großprojekte auch umzusetzen*. Neu gebaute Atomkraftwerke in den USA, Frankreich und Großbritannien kommen zum Teil bis zu 15 Jahre später als geplant und kosten mehr als das Doppelte als ursprünglich gedacht.

[note]

Der dänische Wirtschaftsprofessor Bent Flyvbjerg und Dan Gardner haben mehr als 15.000 Projekte untersucht und sie danach sortiert, wie hoch die Gefahr ist, dass sie länger dauern und teurer werden als gedacht. Die Infografik zeigt eine Übersicht verschiedener Arten von Infrastrukturprojekten, sortiert nach der Häufigkeit und Schwere von Kostenüberschreitungen – dies wird durch die Konzepte “Fat tails” (dicke Enden) und “Thin tails” (dünne Enden) dargestellt. Projekte mit “Fat tails” weisen eine höhere Wahrscheinlichkeit für extreme Kostenüberschreitungen auf, während “Thin tails” eine geringere Wahrscheinlichkeit und

Schwere solcher Überschreitungen anzeigen. Von oben nach unten sind die Projekte gelistet, beginnend mit denen, die am ehesten geringere Kostenüberschreitungen haben (Solar, Windkraft usw.), bis hin zu denen mit den größten Risiken für signifikante Kostenüberschreitungen (Olympische Spiele, Kernkraft, Kernkraftlagerung). Projekte wie Solarenergie und Windkraft liegen im Bereich der “Thin tails”, was bedeutet, dass ihre Kosten relativ vorhersehbar sind. Im Gegensatz dazu haben die Olympischen Spiele, Kernkraftprojekte und Projekte zur Lagerung von Kernabfällen “Fat tails”, was auf ein hohes Risiko für Kostenexplosionen hinweist.



[/note]

Für Fusionskraftwerke braucht es wirklich gute Gründe – billiger Strom kann es nicht sein

Wer also ein Fusionskraftwerk in der Zukunft bauen will, braucht einen wirklich guten Grund, um hohe Kosten und lange Bau- und Vorlaufzeiten in Kauf zu nehmen. Dieser Grund kann nicht sein, billig Strom zu produzieren, sondern etwas anderes muss ausschlaggebend sein.

Fusionskraftwerke könnten so betrachtet nur in der Nische eine Rolle spielen. Etwa bei der CO₂-neutralen Wärmeversorgung in der Nähe großer Industrieparks, speziell zur Meerwasserentsalzung in Ländern, die viel Geld, aber zu wenig Wasser haben oder bei der [Produktion von Wasserstoff](#), in Ländern, die sowohl viel Geld als auch viel Wasser haben.

Ein letztes Argument [bringen](#) Fusionsforscher vor allem seit dem Ukraine-Krieg für die Technologie noch vor: Energieunabhängigkeit. Kernfusion wäre, weil sie so wenig Ausgangsstoffe benötigt, geeignet, um sich von Ländern wie Russland oder Katar unabhängig zu machen. Praktisch könnte die Technologie am Ende aber vor den gleichen Problemen wie die ebenfalls autarke Solarenergie stehen: Die Lieferketten [wären](#) anfällig.

Es ist ein Szenario denkbar, in dem endlich das erste Fusionskraftwerk ans Netz gehen könnte, es aber niemand mehr so richtig braucht. Weil dann im Jahr 2060, 2070 oder wann auch immer es soweit ist, das Energiesystem komplett anders aussieht als heute: Dominiert von erneuerbaren Energien, hier und da ergänzt durch herkömmliche Atomkraft oder Gaskraftwerke.

Oder anders formuliert: Sollte Fusionsenergie wirklich helfen können, die Klimakrise zu lösen, wäre das eine schlechte Nachricht. Denn nach Stand der Dinge würde das bedeuten, dass alle Klimaziele gerissen wurden.

Redaktion: Isolde Ruhdorfer & die [Community des BANG-Discord](#); Schlussredaktion: Susan Mücke;
Fotoredaktion