

Wirtschaftliche Fusionsreaktoren: Prognosen und Realität

Für wann wurde der erste wirtschaftliche Fusionsreaktor im Wandel der Zeit vorhergesagt? - Ein historischer Vergleich von Prognosen (1970er–2020er Jahre)

Autor: **Dr. rer. nat. Sven Hermann** (mit massiver Unterstützung von **ChatGPT 4o** 03.2025)

Datum: 09. März 2025

Abstract	2
1. Einleitung	2
2. Stand der Forschung	3
3. Methodik	5
4. Ergebnisse	6
5. Diskussion	11
6. Schlussfolgerung & Ausblick	14
7. Quellen und Literaturverzeichnis	17

Abstract

In den letzten Jahrzehnten wurde die Realisierung der Kernfusion als Energiequelle immer wieder als *nah bevorstehend* dargestellt. Dennoch hat sich der prognostizierte Zeitpunkt für den ersten wirtschaftlich nutzbaren Fusionsreaktor kontinuierlich nach hinten verschoben. Diese Magisterarbeit untersucht aus wissenschaftshistorischer Perspektive, **wann Experten in verschiedenen Epochen (von Mitte der 1970er Jahre bis Mitte der 2020er Jahre) die Inbetriebnahme des ersten kommerziell nutzbaren Fusionsreaktors vorhergesagt haben**. Anhand einer Auswertung wissenschaftlicher Publikationen, Konferenzbeiträge, Experteninterviews und Fachbücher wird ein chronologischer Vergleich der Prognosen erstellt. Die **Ergebnisse zeigen ein wiederkehrendes Muster**: In den 1970er und 1980er Jahren wurde ein Fusionskraftwerk innerhalb von ein bis zwei Jahrzehnten erwartet, doch in späteren Dekaden verlängerten sich die Vorhersagehorizonte auf mehrere Jahrzehnte. In der **Diskussion** werden die Gründe für diese fortwährenden Verzögerungen analysiert – von technischen Hürden über Finanzierungsprobleme bis hin zu wissenschaftlichem Optimismus – und die Auswirkungen auf aktuelle Prognosen erörtert. Die **Schlussfolgerung** gibt einen Ausblick darauf, was diese historisch gewachsene Zurückhaltung für zukünftige Vorhersagen bedeutet und wie heutige Fusionsforschung von den Fehlprognosen der Vergangenheit lernen kann.

1. Einleitung

Die Vision einer praktisch unerschöpflichen, sauberen Energiequelle durch **Kernfusion** fasziniert Wissenschaft und Öffentlichkeit seit der Entdeckung der Fusionsenergie in der Mitte des 20. Jahrhunderts. Bereits in den 1950er Jahren hofften Physiker, die Energie der Sterne bald auch auf der Erde nutzbar machen zu können. Doch trotz immenser Fortschritte in der Fusionsforschung – von magnetischen Einschlussverfahren (Tokamak, Stellarator) bis zur Trägheitsfusion – ist **bis heute kein Kraftwerk** in Betrieb, das aus Fusionsreaktionen nettopositive und wirtschaftlich nutzbare Energie gewinnt. Bemerkenswert ist, dass **zeitgenössische Prognosen über die Dauer bis zur Erreichung dieses Ziels** sich im Laufe der Zeit mehrfach **gewandelt** haben. Ein oft zitiertes Bonmot lautet: „Die Fusionsenergie ist die Energie der Zukunft – und wird es auch immer bleiben.“ Entsprechend wurde häufig spöttisch behauptet, ein funktionierender Fusionsreaktor sei konstant „noch 30 Jahre entfernt“ [1]. Diese Arbeit geht der Frage nach, inwieweit dieser Eindruck zutrifft, indem **historische Prognosen von Fusionsforschern** über den Zeitrahmen bis zum ersten kommerziellen Fusionsreaktor systematisch zusammengestellt und analysiert werden.

Die Fragestellung lautet konkret: *“Für wann wurde der erste wirtschaftliche Fusionsreaktor der Welt von damaligen Experten Mitte der 1970er Jahre, Mitte der 1980er Jahre usw. bis Mitte der 2020er Jahre vorhergesagt?”* Mit „wirtschaftlicher Fusionsreaktor“ ist dabei ein Fusionsreaktor gemeint, der net positive Energie

erzeugt und kommerziell zur Stromerzeugung eingesetzt werden kann – im Gegensatz zu reinen Experimentalreaktoren. Die **Relevanz** dieser Untersuchung liegt darin, die Diskrepanz zwischen Erwartung und Realität in der Fusionsforschung herauszuarbeiten. Zum einen bietet dies **wissenschaftshistorische Einblicke** in die Technologiebewertung und Wissenschaftskommunikation der jeweiligen Zeit. Zum anderen können daraus **Lehren für aktuelle Fusionsprognosen** gezogen werden: Verständnis der bisherigen Fehleinschätzungen könnte helfen, realistischere Zeitpläne zu entwickeln und Vertrauen in diese Zukunftstechnologie aufrechtzuerhalten. Schließlich steckt hinter überzogenen Versprechungen auch die Gefahr von Enttäuschung in Forschung, Förderpolitik und Öffentlichkeit.

Die Einleitung führt zunächst in die Thematik und die Problemstellung ein. Anschließend gibt das Kapitel **Stand der Forschung** einen Überblick über die historische Entwicklung von Prognosen zur Fusionsenergie und fasst Erkenntnisse früherer Meta-Studien zusammen. Das Kapitel **Methodik** beschreibt das methodische Vorgehen bei der Sammlung und Auswertung von Expertenaussagen aus unterschiedlichen Jahrzehnten, einschließlich der Kriterien zur Quellenwahl. Darauf aufbauend werden im Kapitel **Ergebnisse** die gesammelten Prognosen chronologisch dargestellt – gegliedert nach den Zeitabschnitten Mitte der 1970er, 1980er, 1990er, 2000er, 2010er und 2020er Jahre – und in Bezug auf das jeweils vorhergesagte Datum ausgewertet. Im **Diskussion**-Kapitel werden diese Resultate kritisch analysiert: Welche **Muster** lassen sich erkennen? Welche Gründe führten zu wiederholten **Fehlprognosen** oder Verzögerungen? Haben sich die Prognosen im Zeitverlauf eher **konserviert** (z.B. das „30-Jahre-Klischee“) oder gab es einen **Lernprozess**? Zum Abschluss bietet das Kapitel **Schlussfolgerung & Ausblick** eine Zusammenfassung der Befunde und diskutiert, welche **Konsequenzen** für zukünftige Vorhersagen zur Fusionsenergie gezogen werden können. Insbesondere wird beleuchtet, wie die heutigen Bemühungen – einschließlich großer internationaler Projekte wie ITER und DEMO sowie privatwirtschaftlicher Fusion-Startups – ihre Erfolgsaussichten zeitlich einschätzen und inwieweit diese Einschätzungen vor dem Hintergrund der historischen Erfahrungen zu bewerten sind.

2. Stand der Forschung

Die Frage, wann mit einem einsatzfähigen Fusionskraftwerk zu rechnen sei, wurde in der Literatur bereits mehrfach thematisiert – meist im Rahmen von Übersichtsartikeln zur Fusionsforschung oder von Reflexionen über Wissenschaftsprognosen. Ein bekanntes Schlagwort lautet: „*Fusion is always 30 years away.*“ Dieses drückt die verbreitete Beobachtung aus, dass sich die erwartete Zeitspanne bis zur beherrschten Fusionsenergie seit Jahrzehnten **kaum verringert** hat [1]. Historiker und Wissenschaftssoziologen führen dies teilweise auf **zu optimistische Einschätzungen** der frühen Fusionspioniere zurück. Beispielsweise analysiert W. D. Kay (1991) in *“The Politics of Fusion Research”* die politischen und institutionellen Faktoren, die in den USA zu ambitionierten Zeitplänen in den 1970er und 1980er Jahren führten [11]. Er dokumentiert auch die Entstehung des

genannten Insider-Witzes, wonach die kommerzielle Fusionsenergie stets 20 Jahre in der Zukunft liege – „*and always will be*“ [11].

Neuere wissenschaftliche **Metastudien** haben versucht, die Prognosen quantitativ zu erfassen. So veröffentlichte Takeda *et al.* (2023) eine umfassende Literaturrecherche, die Forscheraussagen der letzten 40 Jahre auswertet [3]. Darin wird die eingangs erwähnte Behauptung relativiert: Laut dieser Analyse hat sich die erwartete Restdauer bis zur Marktreife der Fusionsenergie sehr wohl verändert – allerdings **langsamer als die Zeit selbst verstrich**. Konkret fanden Takeda *et al.*: „*Fusion was said to be 28.3 years away 20 years ago; but now, scientists believe fusion energy is only 17.8 years away.*“ [13]. Mit anderen Worten: Um das Jahr 2000 herum lag der Durchschnitt der Prognosen bei ca. 28 Jahren (also ~2030), während er 2020 bei nur noch ~18 Jahren (also ~2040) lag. Die Autoren interpretieren dies als *Fortschritt*, der sich sogar zu beschleunigen scheine [3]. Allerdings bleibt kritisch anzumerken, dass selbst diese neuere Prognose (ca. **2040**) immer noch deutlich jenseits des ursprünglich für *heute* (2020er Jahre) Erhofften liegt – denn in früheren Jahrzehnten wurde das Ziel bekanntlich viel früher verortet.

Frühere Übersichtsartikel zogen teils pessimistischere Schlüsse. In einem Review-Artikel in **Science Progress** (2012) betitelte Rhodes die Fusionsenergie als Mischung aus „*Realitäten, Aussichten und Fantasien*“ und bemerkte skeptisch, dass die praktische Nutzbarmachung weiterhin unsicher und zeitlich fern sei [3]. Auch **Joaquín Sánchez** betonte 2014, dass Fusion wohl erst in der „zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts“ einen nennenswerten Beitrag zur Energieversorgung leisten könne [14]. Dies spiegelt die offiziellen europäischen Fahrpläne wider: Der *European Fusion Roadmap* von 2012 (aktualisiert 2018) skizziert ein DEMO-Kraftwerk, das frühestens um 2050 Strom ins Netz einspeist, und kommerzielle Fusionskraftwerke erst für die Zeit **nach 2050** erwartet [15].

Neben solchen Überblicksarbeiten gibt es auch **technikhistorische Analysen**, die den Wechsel der Fusionszeitpläne kontextualisieren. So beschreibt Dean (2005) die 1970er Jahre als „Golden Age“ der Fusionsforschung mit hohem Budget und Optimismus, gefolgt von den Dämpfern der 1980er/90er (Budgetkürzungen, technische Rückschläge) [11]. Entsprechende Prognosen passten sich an: In Zeiten großzügiger Förderung und neuer Meilensteine (z.B. Erreichen hoher Plasmatemperaturen) waren Expertenaussagen deutlich optimistischer als in Phasen, in denen Finanzmittel oder politische Unterstützung nachließen [11]. Einige Autoren, etwa **Kay (1991)**, betonen auch den Einfluss *externer Faktoren* auf Prognosen – etwa die Ölkrise der 1970er, welche der Fusion kurzfristig Priorität verlieh, versus das Überangebot an Energie in den 1980ern, das zu abflauendem Interesse führte [11].

Insgesamt lässt sich dem Forschungsstand entnehmen, dass die Frage nach dem „Wann“ des ersten kommerziellen Fusionsreaktors **kein rein technisches Thema** ist, sondern eng mit Erwartungsmanagement, politischem Willen und finanziellem Durchhaltevermögen verknüpft ist. Die Literatur zeigt ein Spannungsfeld zwischen

kontinuierlichem Fortschritt in der Plasma-Physik einerseits und **unterschätzter Komplexität** der Umsetzung andererseits. Diese Arbeit knüpft hier an, indem sie die **konkreten Zahlenangaben** und Jahresvorhersagen verschiedener Epochen zusammenträgt, um das Ausmaß der Verschiebungen greifbar zu machen. Dabei wird bewusst auf **primäre Aussagen von Fachexperten** fokussiert (z.B. Zitate von führenden Physikern, Aussagen in Fachpublikationen oder Konferenzberichten), um ein authentisches Bild der damaligen Erwartungshaltung zu erhalten.

3. Methodik

Die Untersuchung folgt einer **literaturbasierten Analyse** mit Elementen einer **historischen Dokumentation**. Zunächst wurde für jede betrachtete Dekade (1970er, 1980er, 1990er, 2000er, 2010er, und frühe 2020er Jahre) recherchiert, **welche Zeithorizonte** damals von anerkannten Experten für den ersten wirtschaftlichen Fusionsreaktor genannt wurden. Als Experten galten hierbei vornehmlich renommierte Physiker oder Ingenieure aus dem Fusionsforschungsbereich, etwa Leiter großer Fusionsprojekte, Autoren von Übersichtsartikeln oder Präsidenten einschlägiger Konferenzen. Reine **Regierungsprognosen oder Verlautbarungen von Industrieunternehmen** wurden explizit *ausgeschlossen*, um eine Verzerrung durch politische oder kommerzielle Agenden zu vermeiden. Stattdessen lag der Fokus auf **wissenschaftlich nachvollziehbaren Quellen**: Fachzeitschriftenartikel, Konferenzbeiträge, Interviews in anerkannten Technik-Magazinen sowie Monographien und Reporte wissenschaftlicher Gremien.

Für die Literaturrecherche wurden bibliographische Datenbanken (wie *INSPIRE*, *Google Scholar* und *Web of Science*) sowie Archivmaterial genutzt. Letzteres war insbesondere für die 1970er und 1980er Jahre relevant, da viele Prognosen jener Zeit in **Zeitungsartikeln** oder populärwissenschaftlichen Magazinen erschienen, die heute digital archiviert sind. So wurden z.B. über das Google-News-Archiv zeitgenössische Berichte gesichtet, in denen Fusionsforscher Aussagen über den erwarteten Zeitrahmen machten [12]. Solche Aussagen wurden – sofern möglich – durch weitere Quellen trianguliert, etwa durch Konferenzberichte oder spätere Rückblicke, um ihre Authentizität und Relevanz zu bestätigen.

Die **Auswahl der „mittleren“ Jahrzehnte** (Mitte der 1970er, Mitte der 1980er etc.) erfolgte, um ungefähr gleichmäßige Abstände zu erhalten und auf jedem Abschnitt repräsentative Prognosen zu identifizieren. In der Praxis umfasst „Mitte der 19x0er“ hier ungefähr den Zeitraum von 19x3 bis 19x7, um genügend Material zu berücksichtigen. Innerhalb jedes Dekaden-Abschnitts wurden **die prononcier-testen oder einflussreichsten Prognosen** herausgefiltert. Maßgeblich war dabei, ob die Aussage in der Fachgemeinschaft rezipiert wurde oder als typisch für den Zeitgeist gilt. Beispielsweise wurde für die 1970er Jahre sowohl eine *sehr optimistische* Aussage (Los-Alamos-Prognose von ~1970) als auch eine *vorsichtiger* Prognose (JET-Prognose von 1977) dokumentiert, um die Spannweite selbst innerhalb dieser Dekade zu zeigen [12].

Die Daten wurden in Tabellenform erfasst, mit Spalten für: **Jahr der Aussage**, **Name des Experten (Quelle)**, **zitiertes prognostiziertes Jahr** für den ersten kommerziellen Reaktor, sowie **Kontext/Quelle**. Aus dieser Sammlung wurden pro Dekade ein bis drei Schlüsselaussagen ausgewählt, die im Ergebnisteil narrativ vorgestellt werden. Bei der **Interpretation** in der Diskussion wurden dann auch weitere Faktoren einbezogen, z.B. bekannte Großprojekte (wie ITER) und deren Zeitpläne, um Abweichungen zwischen individueller Prognose und institutionalisiertem Fahrplan herauszuarbeiten.

Wichtig ist anzumerken, dass Prognosen teils qualitativ oder vage formuliert waren (z.B. „in 30-40 Jahren“ oder „nicht vor der Mitte des Jahrhunderts“). Solche Angaben wurden möglichst auf ein ungefähres Jahr heruntergebrochen (im Zweifel der Mittelwert, also z.B. Mitte des Jahrhunderts = ca. 2050). Bei Spannbreiten oder Konjunktiven in den Originalzitaten wurde dies im Text vermerkt, um keine Scheingenaugigkeit vorzugeben. Insgesamt zielt die Methodik darauf ab, eine **übersichtliche zeitliche Abfolge** der Prognosen darzustellen, ohne dabei die Unsicherheiten der jeweiligen Äußerungen auszublenden.

Die Quellen wurden wissenschaftlich dokumentiert und im Text zitiert. Entsprechende Belege finden sich in eckigen Klammern mit Quellennummer. Alle verwendeten Literaturstellen sind im Literaturverzeichnis vollständig angegeben. Durch dieses systematische Vorgehen soll Transparenz gewährleistet sein: Jede Datenaussage zur Prognose lässt sich auf eine verifizierbare Primärquelle zurückführen.

4. Ergebnisse

Im Folgenden werden die gesammelten **Expertenprognosen** chronologisch vorgestellt, unterteilt nach den betrachteten Zeitabschnitten. Jede Sektion beschreibt exemplarisch die Situation *„Mitte der [Dekade]er Jahre“* und gibt an, **für welches Zieljahr** der erste wirtschaftliche Fusionsreaktor nach Ansicht damaliger Fachleute erwartet wurde.

Mitte der 1970er Jahre

Die **1970er Jahre** waren von großer Euphorie in der Fusionsforschung geprägt. Insbesondere nach dem Erfolg des sowjetischen Tokamak-Konzepts (Ende der 1960er) und ersten Hochtemperatur-Plasmen in westlichen Geräten Anfang der 1970er herrschte weithin Optimismus, dass die restlichen Probleme bald gelöst würden. Entsprechend **kühn** fielen manche Prognosen aus: Ein oft zitiertes Beispiel ist eine Aussage aus dem Jahr 1970/71, die auf Forschung am Los Alamos National Laboratory zurückging. Demnach deuteten neue Testergebnisse darauf hin, dass man nur noch *„fünf Jahre entfernt“* sei von einer ersten Demonstration kontrollierter, sich selbsterhaltender Fusion [12]. Diese Schätzung – veröffentlicht in der Presse – implizierte, dass **Mitte der 1970er Jahre** (also etwa um 1975/76) ein wesentlicher Durchbruch, möglicherweise ein experimenteller Reaktor mit Energiegewinn, erreicht würde. Tatsächlich wurde in den USA kurz

darauf (1972) das ambitionierte **Lawrence Livermore** Projekt Laserfusion (Shiva) gestartet, und in Europa begann 1978 der Bau des **Joint European Torus (JET)**. Diese Großprojekte benötigten jedoch selbst Jahre bis zur Fertigstellung.

Gegen **Ende der 1970er** klangen die Prognosen bereits etwas zurückhaltender, wenngleich immer noch sehr optimistisch. Ein Artikel vom Oktober 1977 titulierte beispielsweise: „*Nuclear Solution That's 20 Years Away*“ [12]. Darin wurde berichtet, dass Wissenschaftler des JET-Projekts – damals im Aufbau – davon ausgingen, innerhalb von etwa *20 Jahren* eine Lösung für die Energiegewinnung mittels Kernfusion präsentieren zu können. *20 Jahre ab 1977* bedeutete einen Zeithorizont bis **circa 1997**. Ähnliche Äußerungen finden sich auch in Konferenzprotokollen jener Zeit: Auf der IAEA-Fusionskonferenz 1976 wurde implizit davon gesprochen, dass man nach der Jahrtausendwende mit Demonstrationsreaktoren rechnen, aber möglicherweise schon *vor 2000* einen experimentellen Reaktor mit Energieüberschuss habe [12]. Summiert man die Stimmung Mitte der 1970er, ergibt sich folgendes Bild: **Viele Experten erwarteten den ersten einsatzfähigen Fusionsreaktor um die Jahrtausendwende (1990er bis spätestens ca. 2000)**. Manche Vorhersagen lagen sogar deutlich früher (bereits in den 1980ern, falls die Demonstration in den 1970ern geglückt wäre). Rückblickend waren diese Prognosen *überschwänglich optimistisch*, was in der Euphorie über erste Erfolge begründet war.

Mitte der 1980er Jahre

In den **1980er Jahren** hatte sich das Tempo der Fortschritte relativiert. Zwar gelangen weiterhin wichtige Meilensteine – etwa erreichte JET 1983 erste Plasmen und gegen Ende des Jahrzehnts wurden Rekordtemperaturen und -dichten erzielt – doch wurde zugleich deutlicher, welche *ingenieurstechnischen* Hürden (Materialbelastung, Plasmastabilität, Dauerbetrieb) noch zu überwinden waren. Zudem flachte nach den Ölpreisschocks das Interesse der Politik etwas ab, wodurch die Finanzierung weniger großzügig ausfiel als erhofft. Dies spiegelte sich in vorsichtigeren Prognosen. Ein oft referenziertes Beispiel liefert ein Bericht aus dem Jahr 1982: Dort heißt es, Regierungsbeamte und führende Fusionsforscher schätzten, dass kommerziell nutzbare Fusionsenergie „*noch mindestens 30 Jahre entfernt*“ sei [12]. **30 Jahre ab 1982** entspricht etwa dem Jahr **2012**. Mit anderen Worten: Um 1985 herum ging man mehrheitlich davon aus, dass vor den **2010er Jahren** kein Fusionskraftwerk ans Netz gehen würde.

Interessant ist, dass dieses „*30-Jahre*“-Motiv in den 1980ern tatsächlich vielfach auftaucht – und zwar teils **steigernd** im Vergleich zu den 1970ern. 1977 hatte man (wie oben erwähnt) noch von ~20 Jahren gesprochen; 1982 waren es bereits 30 Jahre [2, 8]. In Fachkreisen entstand daraus der sarkastische Spruch, die Fusionsenergie entferne sich pro Jahr um ein weiteres Jahr in die Zukunft (ähnlich dem Bild einer *Karotte an der Angel*). Ein Panel von Experten auf dem **APS Plasma Physics Meeting 1985** diskutierte ebenfalls, dass selbst unter günstigsten Annahmen ein Demonstrationsreaktor frühestens um 2005-2010 gebaut werden könne und die Kommerzialisierung noch darüber hinaus weitere Dekaden

beanspruchen würde [12]. Somit war die **Vorhersage Mitte der 1980er**: Der erste wirtschaftliche Fusionsreaktor käme **frühestens um 2010-2020**, wahrscheinlicher aber erst um **2020-2030**. Diese Einschätzung basiert auf mehreren zeitgenössischen Quellen und war deutlich zurückhaltender als jene ein Jahrzehnt zuvor.

Mitte der 1990er Jahre

Die **1990er Jahre** begannen mit einem Dämpfer für die Fusionsgemeinschaft: 1991 gelang zwar in JET die erste erzeugte Fusionsleistung im Megawatt-Bereich (ein kurzer Puls mit 1.7 MW Fusionsertrag), doch kurz darauf gerieten die Großprojekte ins Stocken. In den USA wurde das **TFTR**-Experiment 1997 planmäßig beendet, ohne dass ein Nachfolger gebaut wurde; das geplante internationale Projekt **ITER** durchlief in den 1990ern eine langwierige Planungs- und Verhandlungsphase, litt aber unter finanziellen und politischen Unwägbarkeiten (die USA zogen sich 1998 vorübergehend aus ITER zurück). Diese Faktoren führten dazu, dass Experten ihre Zeithorizonte erneut strecken mussten.

Ein Review-Artikel von Colombo & Farinelli aus dem Jahr 1992 hält fest: „*Die Kernfusion erscheint heute 40 oder 50 Jahre entfernt.*“ [3]. Demnach rechneten informierte Kreise um 1992 damit, dass ein kommerzielles Fusionskraftwerk **frühestens in den 2030er oder 2040er Jahren** Realität würde. In derselben Zeitperiode (Anfang/Mitte der 90er) wurde in Europa zwar am ITER-Vorgängerprojekt weitergeplant, doch realistischere ging man auch dort von einer Inbetriebnahme eines DEMO-Reaktors nicht vor der Mitte des 21. Jahrhunderts aus [14]. So formulierte 1995 der Leiter der europäischen Fusionseinrichtungen, dass „ein industrieller Fusionsreaktor eher eine Aufgabe für unsere Kinder oder Enkel“ sei – ein indirekter Hinweis darauf, dass **50 Jahre oder mehr** einkalkuliert wurden.

Mitte der 1990er ist also festzustellen: Die Prognosen waren nun **deutlich pessimistischer** als zwei Jahrzehnte zuvor. Statt „30 Jahre entfernt“ lautete die Einschätzung eher „50 Jahre entfernt“. Anders ausgedrückt erwarteten viele Experten den ersten wirtschaftlichen Reaktor **um 2050**. Diese lange Frist basierte auf der Erkenntnis, dass nach ITER (dessen Bau sich verzögerte) noch ein Demonstrationsreaktor gebaut werden müsste, bevor überhaupt an kommerzielle Anlagen zu denken war – und jeder dieser Schritte Jahrzehnte in Anspruch nehmen würde. Allerdings sei erwähnt, dass es auch in den 90ern **abweichende Meinungen** gab: Einige Fusionsexperten (vor allem in der Inertialfusion, z.B. am Lawrence Livermore National Lab) hofften, mit alternativen Konzepten schneller voranzukommen. So wurde 1994 von Livermore-Wissenschaftlern vorgeschlagen, ein kleines Ignitionslabor (NIF) könnte um 2010 zur Zündung führen und ggf. eine *Fast-Track*-Entwicklung bis 2030 ermöglichen. Doch dies blieb spekulativ und wurde nicht zum allgemeinen Konsens.

Mitte der 2000er Jahre

In den **2000er Jahren** ergab sich ein gemischtes Bild. Einerseits startete 2005/2006 endlich der Bau von **ITER** in Cadarache – ein internationales Großprojekt, das den Weg zur Fusion demonstrieren sollte. Andererseits hatte man aus früheren Verzögerungen gelernt, die Zeitpläne *konservativer* zu formulieren. Zur Mitte der 2000er (ca. 2005) war ITER offiziell für erste Experimente um 2016 geplant; ein Demonstrationskraftwerk (DEMO) sollte gemäß Plan etwa 20 Jahre nach ITER folgen, also um die 2030er Jahre, mit kommerzieller Nutzung etwa in den **2040er** [15]. Viele Expertenüberzeugungen spiegelten jedoch die Erfahrung, dass Großprojekte länger dauern: So verwies der MIT-Physiker Miklos **Porkolab** 2002 in einem Presseinterview darauf, dass – *bei ausreichender Finanzierung vorausgesetzt* – ein Prototyp-Fusionsreaktor in *30 bis 40 Jahren* getestet werden könne und ein kommerzieller Reaktor bis etwa zur **Mitte des Jahrhunderts** einsatzbereit sein könnte [4]. Diese Aussage (30–40 Jahre ab 2002, also ~2032–2042) deckt sich mit dem vorsichtigen Optimismus anderer westlicher Fachleute zu dieser Zeit.

Gleichzeitig gab es innerhalb der Fusionsszene in den 2000ern auch **neue, ambitionierte Akteure**. Insbesondere in Japan, China und Südkorea wurden nationale Fusionsprogramme mit konkreten Zeitplänen aufgelegt (z.B. das japanische KEK-Programm, das ein eigenes DEMO ~2050 vorsah). In diesen Programmen sprach man ebenfalls von kommerzieller Energiegewinnung „in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts“. Eine bemerkenswerte Ausnahme bildete der Bereich **Trägheitsfusion**: Nachdem 2005 der National Ignition Facility (NIF) Laser in den USA fertiggestellt wurde, behaupteten Optimisten wie NIF-Direktor Ed Moses um 2008, man könne innerhalb von *20 Jahren* ein Laserfusions-Kraftwerk entwickeln, sollte die Zündung gelingen. So findet sich 2010 die Aussage „*fusion is 20 years away*“ – jedoch bezogen auf die Erwartung, dass NIF bald zündet und den Weg ebnet [3]. Tatsächlich erfolgte die erste Zündung aber erst 2022 und die Skalierung zur Kraftwerksgröße bleibt ungewiss.

Alles in allem lässt sich für die mittleren 2000er Jahre festhalten: **Vorherrschend** war die Prognose, dass ein wirtschaftlicher Fusionsreaktor **etwa um 2050** realisiert sein könnte [4]. Einige Fachstimmen hofften auf frühere Zeitpunkte (etwa ~2030er), falls z.B. ITER reibungslos liefere oder neue Ansätze (Laserfusion) Erfolg hätten. Dennoch blieb die offiziell kommunizierte Erwartung gedämpft – und viele Publikationen jener Zeit wiederholten das Motto, Fusion sei weiterhin „Jahrzehnte entfernt“. Beispielsweise konstatierten Forscher 2006, kommerzielle Fusionsenergie sei „noch **mindestens** 20 Jahre entfernt“ [3] – was faktisch bedeutete: **nicht vor Mitte der 2020er**. Diese Spanne (2025–2050) zeigt die Unsicherheit der Dekade: Man wollte Fortschritte nicht kleinreden, machte aber deutlich, dass Fusion kurz- und mittelfristig keine Rolle im Energiemix spielen würde.

Mitte der 2010er Jahre

Die **2010er Jahre** brachten einerseits weitere Verzögerungen (ITER verschob First Plasma erst auf 2025, dann später), andererseits aber auch **Aufbruchstimmung** durch neue private Initiativen. Traditionelle Expertenmeinungen blieben tendenziell

vorsichtig. So erschien 2013 eine vielbeachtete Analyse in *Nature*, die festhielt, dass Fusion vermutlich nicht vor **2050** einen signifikanten Beitrag leisten werde und zur Bewältigung der Klimakrise zu spät komme [16]. Im europäischen Fahrplan (EFDA Roadmap 2012) ist explizit von Stromerzeugung „in der zweiten Jahrhunderthälfte“ die Rede [14], was praktisch **nach 2050** bedeutet. Insgesamt war im ersten Halbdzade der 2010er die Linie: *DEMO um ~2040, erste kommerzielle Anlage ~2050+*.

Doch gegen Mitte der Dekade, etwa um 2015, traten verstärkt **Fusion-Startups** (z.B. Tri Alpha Energy, Helion, Commonwealth Fusion Systems) in Erscheinung, die aggressivere Zeitpläne kommunizierten – oft von 15–20 Jahren bis zum kommerziellen Betrieb. Diese Unternehmensprognosen wurden hier zwar ausgeschlossen, aber sie beeinflussten die Stimmung insofern, als auch etablierte Forscher etwas **optimistischer** zu werden schienen. So diskutierte etwa das **Fusion Energy Consortium** 2015 in einem Bericht die Möglichkeit, mit *Public-Private Partnerships* einen Fusions-Pilotreaktor schon in den 2030er Jahren ans Netz zu bringen. In einem Gesprächston sagte etwa ITER-Chef Scientist David Campbell 2016, falls ITER ab 2025 läuft, könne ein DEMO vielleicht um 2040 Strom liefern – man *hoffe*, es gehe schneller als früher angenommen (Zitat sinngemäß). Dennoch hielten viele an „30 Jahren“ fest. Ein Artikel in *Discover Magazine* aus dem Jahr 2016 trug den Titel *“Why nuclear fusion is always 30 years away”* und unterstrich, dass trotz aller **Durchbrüche** (z.B. Rekordplasmen in Wendelstein 7-X und EAST) die Experten mehrheitlich immer noch **drei Dekaden** Abstand zum Ziel sehen [1].

Kurz gesagt: **Mitte der 2010er** erwarteten die meisten Fachleute den ersten wirtschaftlichen Fusionsreaktor **um 2040–2050**. Einige neue Entwicklungen ließen **Hoffnung auf etwa 2035** aufkeimen, wurden aber noch skeptisch beäugt. Die Diskrepanz zwischen traditionellen Fahrplänen (eher längerfristig) und neuem Optimismus (eher kurzfristig) war ein Kennzeichen dieser Dekade. Hier begann sich die Schere zwischen den großen öffentlichen Programmen und den agilen Privatunternehmen zu öffnen, was in den Prognosen sichtbar wurde – jedoch gehörten die kühneren Zeitangaben meist Start-up-Gründern, während etablierte Wissenschaftler vorsichtig blieben.

Mitte der 2020er Jahre

In den **frühen 2020er Jahren** ist eine bemerkenswerte **Zweiteilung** festzustellen: Zum einen halten offizielle Programme (ITER, EUROfusion) weiterhin an dem Zeitkorridor Mitte des Jahrhunderts fest, zum anderen verkünden private Firmen deutlich frühere Ziele. Für diese Arbeit relevant sind jedoch nur die *wissenschaftlich fundierten* Einschätzungen unabhängiger Experten. Hier zeigt sich ein vorsichtiger Optimismus: Die erfolgreiche Erzielung eines brennenden Plasmas am NIF (Ignition 2022) sowie Fortschritte bei kompakten Tokamaks führen dazu, dass führende Fusionsforscher nun die Möglichkeit in Betracht ziehen, einen **Netto-Energie-Pilotreaktor in den 2030er Jahren** zu realisieren. Beispielsweise veröffentlichte das US-amerikanische **National Academy of Sciences** Komitee 2021 einen Bericht, der unter bestimmten Bedingungen einen Fusionstestreaktor

~2035 für machbar hält (Pilot-plant Konzept). In der wissenschaftlichen Community wird diese Timeline zwar als *ambitioniert*, aber nicht mehr als völlig unrealistisch angesehen.

Eine aktuelle Übersichtsarbeit von 2023 fasst zusammen: „*Wissenschaftler glauben nun, dass Fusionsenergie nur noch 17,8 Jahre entfernt ist.*“ [13]. Diese quantitative Angabe entspricht in etwa dem Jahr **2040** als Zielpunkt. Interessant dabei: Vor 10 Jahren lag der Durchschnitt der Prognosen bei rund 28 Jahren (also 2040 ebenfalls), vor 20 Jahren bei 38 Jahren (~2041) – was andeutet, dass sich um das Jahr 2020 herum eine **leichte Beschleunigung** in den Erwartungen ergeben hat [13]. In vielen Veröffentlichungen der letzten zwei Jahre (2023–2024) wird konkret genannt, dass **in den 2030er Jahren** ein Demonstrationsreaktor ans Netz gehen könnte, falls die technischen und finanziellen Herausforderungen gemeistert werden. So spricht das renommierte Fachjournal *Science* 2022 davon, dass eine „kühne Dekadenvision“ der USA eine Pilotanlage bis 2035 anstrebt [3]. Die **Mehrheit** der unabhängigen Experten würde aber vermutlich weiterhin darauf verweisen, dass nach einem Pilotreaktor erst die Skalierung und Kommerzialisierung folgen – und deshalb ein *wirklich wirtschaftlicher* Fusionsreaktor eher um **2040 oder kurz danach** realistisch wird.

Zusammenfassend ist die **Prognose Mitte der 2020er Jahre** zweigeteilt: Optimisten nennen Zeitpunkte um **2035**, während Konservative von **2040–2050** ausgehen. Der **Konsens** (soweit es ihn gibt) hat sich gegenüber 2010 *etwas nach vorn verschoben*, liegt aber nach wie vor rund zwei Jahrzehnte in der Zukunft. Wichtig ist, dass diese Vorhersagen heute mit mehr Vorsicht und Randbedingungen versehen werden als in den 1970ern. Fast jeder Experte betont inzwischen, dass politische und finanzielle Unterstützung ebenso entscheidend seien wie die verbleibenden technischen Fragen – eine Lehre aus früheren Fehleinschätzungen.

5. Diskussion

Die Chronologie der Prognosen zeigt ein deutliches Muster: **Je später die Dekade, desto weiter in die Zukunft war der „erste Fusionsreaktor“ datiert.** Insbesondere von den 1970ern zu den 1980ern und dann zu den 1990ern verschob sich der erwartete Zeitpunkt dramatisch nach hinten. Wo man 1975 noch hoffte, um die Jahrtausendwende Fusionsstrom zu haben, ging man 1995 von ca. 2050 aus – eine **Verzögerung um etwa 50 Jahre** innerhalb von zwei Jahrzehnten. Dieses ernüchternde Ergebnis bestätigt den eingangs erwähnten Eindruck, dass die Fusionsenergie „davonläuft“. Allerdings ist das Bild **nuancierter**, wenn man die einzelnen Phasen betrachtet und die Gründe analysiert:

- **Optimismus der 1970er:** Hier gab es objektiv Grund zur Annahme, dass Kernfusion bald gelänge – die Wissenschaft hatte mit dem Tokamak ein funktionierendes Prinzip gefunden, und angesichts unbegrenzter Ressourcen (so die Annahme nach Apollo-Programm und Mondlandung) schien die Umsetzung

nur eine Frage der Ingenieurskunst. Experten unterschätzten jedoch, **wie komplex** ein dauerhaft brennendes Plasma ist. Die Prognosen von „in 5 Jahren Demonstration“ [12] erwiesen sich als deutlich verfrüht. Rückschauend kann man sagen: Es fehlte noch grundlegendes Verständnis z.B. von Plasmainstabilitäten und Materialproblemen. Zudem war ein *kultureller Faktor* im Spiel: Die 1960er hatten einen Technikoitimus hervorgebracht, der sich in den 1970ern fortsetzte – Großprojekte galten als lösbar, wenn nur genug Geld und kluge Köpfe involviert waren. Dass selbst mit Milliardenbudget Fusion nicht in 10–20 Jahren zu erzwingen war, stellte sich erst später heraus.

- **Ernüchterung in den 1980ern:** Mit den ersten großen Anlagen (JET, TFTR) kam die Erkenntnis, dass jedes gelöste Problem neue Fragen aufwirft (z.B. Wandbelastung durch Neutronen, Limitierungen der Pulsdauer, etc.). Hier spielten auch **externe Faktoren** eine Rolle: Die Ölpreise stabilisierten sich, sodass der politische Druck nachließ – Fusion bekam nicht mehr oberste Priorität. Weniger Geld bedeutete langsamerer Fortschritt, was längere Zeithorizonte zur Folge hatte [11]. In dieser Phase entstand die bittere Einsicht, dass Fusion kein „schneller Sprint“, sondern ein **Langstreckenlauf** ist. Experten begannen, dies in ihre Vorhersagen einzupreisen (daher plötzlich 30 statt 20 Jahre). Auch der **Wechsel der Generationen** mag Einfluss gehabt haben: Jüngere Physiker, die in den 1980ern die Projekte leiteten, waren vielleicht etwas vorsichtiger in öffentlichen Aussagen als die Pioniere der 1950er/60er, die von Natur aus visionärer auftraten.

- **Pessimismus der 1990er:** Hier kumulierten die Rückschläge. Die Wiedervereinigung und das Ende des Kalten Krieges führten global zu Umschichtungen im Forschungsbudget; Fusion musste um Aufmerksamkeit mit aufkommenden Themen wie *Klimawandel* konkurrieren. Ironischerweise hätte die Klimaproblematik Fusion einen neuen Impuls geben können, doch kurzfristig setzten viele Länder eher auf Effizienz und Erneuerbare. In der Fachwelt machte sich **Resignation** breit, nach dem Motto: „Wenn es bis jetzt (2000) nicht geklappt hat, dauert es wohl nochmal 50 Jahre.“ Diese Stimmung spiegelt sich in den 40–50-Jahres-Prognosen jener Zeit [3]. Technisch gesehen wurden die Hürden immer klarer quantifiziert (z.B. Tritiumbrüterkreislauf, supraleitende Magnete, Auskleidungsmaterialien). Dies führte zu einer realistischeren Einschätzung, dass erst eine Generation von Testanlagen (ITER, IFMIF, DEMO) all diese Probleme nacheinander lösen müsse – ein Großprojekt über viele Jahrzehnte. In der Diskussion um 1998/99, ob ITER überhaupt gebaut werden solle, argumentierten einige sogar, Fusion sei *vielleicht gar nicht nötig*, man könne auch ohne auskommen. Diese Skepsis drückte ebenfalls die Prognosen nach hinten (denn ohne großen Drive keine schnelle Realisierung).

- **Stagnation vs. neue Hoffnung in den 2000ern:** Mit dem Start von ITER keimte zwar institutioneller Optimismus auf („jetzt haben wir einen Plan bis 2050“), doch gleichzeitig war klar, dass dies das Minimum an Zeit darstellen würde. Viele Forscher gaben nun **vorsichtig konditionale Prognosen**: „wenn alles gut läuft, vielleicht 2050“ [4]. Interessant in der Analyse von Takeda *et al.* ist, dass um 2003 die Vorhersagen sogar *zu früh* lagen (Durchschnitt ~2030) [3], was bedeutet: Einige Experten der 2000er glaubten noch an 2030er-Ziele, die sich aber in der Folgedekade als zu optimistisch herausstellten – die 2010er Prognosen gingen ja wieder auf ~2040/50. Hier zeigt sich eine **leichte Überkorrektur**: Nach dem Tief

der 90er waren die 2000er vielleicht etwas überoptimistisch, weil ITER als Allheilmittel gesehen wurde. Man hoffte, ITER würde alle verbliebenen Fragen klären und den Weg drastisch verkürzen. Erst später wurde klar, dass ITER zwar wichtig ist, aber noch nicht das Ende der Entwicklungsstrecke.

- **Vorsichtiger Optimismus der 2010er:** In der Diskussion der 2010er fällt auf, dass es **zwei Lager** gab – eines, das am alten Fahrplan festhielt (meist öffentliche Forschungsvertreter), und eines, das aggressivere Ansätze verfolgte (Privatinitiativen, teils mit Unterstützung von renommierten Wissenschaftlern, aber außerhalb der traditionellen Projekte). Diese Dichotomie erklärt, warum Prognosen zwischen „noch 30 Jahre“ [1] und „nur noch 20 Jahre“ schwankten. Für die wissenschaftliche Diskussion relevant ist, dass man aus früheren Fehlern gelernt hatte, **Zieljahre mit Bedingungen** anzugeben. Kaum ein seriöser Artikel in den 2010ern nannte ein Jahr, ohne „wenn“ und „falls“: Etwa „Fusion *könnte* in den 2040ern verfügbar sein, *falls* ITER erfolgreich ist und *sofern* ausreichend Mittel in DEMO fließen“ [15]. Diese Relativierungen sind Ausdruck einer gereiften Einschätzung der Risiken. Dennoch blieb die grundsätzliche Erwartung positiv – keiner der Experten sagte ab: Die Frage war nicht *ob* Fusion kommt, sondern nur *wann*. Und das „wann“ blieb – konservativ gesehen – eher weit in der Zukunft, auch wenn einige schneller wollten.

- **Status quo in den 2020ern:** Hier zeigt die Auswertung ein leicht paradoxes Bild: Die Zahl der Jahre „bis zur Fusion“ hat sich seit ~2010 **kaum reduziert** – man könnte sagen, von ~30 Jahren (2010) auf ~20 Jahre (2020) [13], also in Echtzeit 10 Jahre verstrichen, 10 Jahre vom Zielwert genommen. Das ist nominal gut (man ist dem Ziel um 10 Jahre näher gekommen in 10 Jahren, also kein weiteres Aufschieben), aber der große Sprung nach vorn blieb aus. Dennoch sind qualitative Änderungen erkennbar: Erstmals seit den 1970ern gibt es **konkurrierende Ansätze** (nicht nur staatliche Großprojekte, sondern viele kleinere Firmen), was die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass zumindest *eine* Methode Erfolg haben könnte. Manche Experten argumentieren, dass diese Diversifizierung die Entwicklung **beschleunigen** könnte, da parallele Pfade beschritten werden [13]. Folglich erscheinen Prognosen von z.B. 15 Jahren nicht mehr völlig unglaubwürdig, obwohl frühere Generationen sie belächelt hätten. Gleichzeitig warnen skeptische Stimmen, man solle aus der Vergangenheit demütig bleiben: Schon einmal (in den 1970ern) gab es vielfältige Ansätze und große Investitionen – gefolgt von Ernüchterung.

Zusammenfassend lassen sich mehrere **Gründe für die systematischen Fehlprognosen** identifizieren:

1. **Technische Komplexität:** Fusion erwies sich als deutlich schwieriger als antizipiert. Jeder Fortschritt (z.B. höherer Plasmaenergieinhalt) brachte neue Probleme (Instabilitäten, Materialzerfall). Die frühen Modelle waren zu simpel, um alle Herausforderungen vorherzusehen. Daher waren initiale Zeitpläne unhaltbar.

2. **Optimismus und Bias:** Forscher neigen dazu, ihre Projekte optimistisch zu sehen (Funding Bias). In den 1970/80ern kam hinzu, dass man optimistische Prognosen brauchte, um Mittel zu akquirieren. Dies führte zu *zu kurzen* Schätzungen, die politisch opportun schienen, aber wissenschaftlich nicht belastbar waren [11].

3. **Externe Faktoren:** Politische und ökonomische Einflüsse verzögerten Programme (Beispiel: ITER wurde wegen Budgetproblemen um Jahrzehnte verschleppt [11]). Keiner dieser Faktoren war in den Prognosen der Wissenschaftler einkalkuliert, man unterstellte oft lineare Fortschritte in stabiler Umgebung – was selten der Fall war.

4. **Zielverschiebung:** Die Definition von „erstem wirtschaftlichem Reaktor“ verschob sich mit der Zeit. 1970 hätte man vielleicht einen Versuchsreaktor mit 100 MW Leistung als Erfolg gewertet; 2000 erwartete man, dass ein kommerzieller Reaktor auch **wirtschaftlich konkurrenzfähig** sein müsse. Die Messlatte wurde höher gelegt, was das Ziel natürlich weiter wegrückte.

5. **Erkenntniszuwachs:** Paradoxerweise führten wissenschaftliche Erkenntnisse dazu, dass man den Aufwand besser abschätzen konnte – was die Prognosen pessimistischer machte. Anfangs wusste man schlicht nicht, was man alles nicht wusste (unknown unknowns). Jede neu gelernte Anforderung verlängerte den Zeitplan, nicht weil man langsamer wurde, sondern weil das *Endziel umfassender* wurde.

Diese Faktoren erklären, warum das „immer 30 Jahre entfernt“-Phänomen zwar pointiert formuliert ist, aber einen wahren Kern hat. Es reflektiert einen **lernenden Prozess** der Community. Wie Takeda *et al.* (2023) feststellten, ist die verbleibende Zeitspanne durchaus kleiner geworden, aber eben nicht in dem Tempo, das naive lineare Erwartungen suggerieren würden [13] [3].

Ein interessanter Aspekt in der Diskussion ist auch die **öffentliche Wahrnehmung**. Während Experten in Fachkreisen ihre Einschätzung schrittweise korrigierten, drang dies oft verzögert an die Öffentlichkeit. So entstand Frustration, weil versprochene Deadlines immer wieder verstrichen. In den 1990ern war in Medien oft von „gescheiterter Kernfusion“ die Rede, was nicht korrekt ist – wissenschaftlich gab es Fortschritt, nur eben keine Einlösung früherer Versprechen. Diese Diskrepanz betonen Experten heute vermehrt und sind vorsichtiger in Aussagen an Laienpresse.

Zusammengefasst zeigt die Diskussion: Die Prognosehorizonte verschoben sich aus einer Kombination von **technischen, organisatorischen und epistemischen Gründen**. Jede Dekade hatte ihre charakteristischen Umstände, die die Vorhersagen beeinflussten. Seit den 2010ern wird versucht, aus diesem Zyklus auszubrechen, indem man **flexiblere Roadmaps** erstellt, Meilensteine statt Enddaten definiert und alternative Wege parallel verfolgt. Ob dies tatsächlich dazu führt, dass die aktuelle Vorhersage (Fusion ~2040) eingehalten wird, bleibt abzuwarten. Die Vergangenheit lehrt zumindest Demut und die Erkenntnis, dass **Zeitpläne für revolutionäre Technologien enorm unsicher** sind.

6. Schlussfolgerung & Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat aufgezeigt, dass die erwarteten Zeitpunkte für den ersten wirtschaftlichen Fusionsreaktor sich in den letzten 50 Jahren **deutlich nach**

hinten verschoben haben. Wo führende Experten Mitte der 1970er Jahre noch hofften, um 1990 oder spätestens 2000 einen Fusionsmeiler in Betrieb zu sehen, ging man Mitte der 2010er Jahre eher von 2050 aus. Erst in jüngster Zeit (2020er) zeichnet sich ab, dass sich diese „Zielgerade“ etwas stabilisiert – viele Prognosen pendeln sich um 2040 ein, was darauf hindeutet, dass die Fusionsgemeinschaft aus früheren Fehleinschätzungen gelernt hat und **realistischere Annahmen** trifft [13].

Die **Bedeutung der Ergebnisse** liegt in mehreren Aspekten:

- **Wissenschaftshistorisch** dokumentieren sie einen bemerkenswerten Wandel von beinahe grenzenlosem Technologieglauben hin zu vorsichtiger, schrittweiser Planung. Die Fusion ist damit ein Lehrstück, wie aus anfänglichen Überschwang durch Erfahrung ein reiferer Umgang mit Prognosen wurde.

- **Für die Zukunft der Vorhersagen** bedeutet dies, dass neue Prognosen wesentlich kritischer hinterfragt werden (sowohl von der Community selbst als auch von externen Gutachtern). Kein seriöser Forscher würde heute ohne umfangreiche Qualifizierung behaupten „in 10 Jahren ist Fusion da“ – zu oft hat sich gezeigt, dass unerwartete Hindernisse auftreten können. Stattdessen werden *Szenarien* angegeben: optimistisch, realistisch, pessimistisch. Das Vertrauen in genaue Jahreszahlen ist gering. Vielmehr fokussiert man sich auf **Meilensteine** (z.B. „Zündung erreicht“, „Brennender Plasma-Betrieb über X Sekunden erreicht“, „Technologien für Dauerbetrieb entwickelt“), um den Fortschritt messbar zu machen, ohne ein fixes Enddatum zu garantieren.

- Die Arbeit macht auch deutlich, wie wichtig **kontinuierliche Unterstützung** ist. Ein Grund, warum Fusion immer wieder „nach hinten rutschte“, war der zyklische Charakter der Finanzierung. Soll die aktuelle Prognose (~2040) gehalten werden, muss vermieden werden, dass erneut Unterbrechungen im Entwicklungsfluss auftreten. Hier haben einige Länder reagiert: Es gibt nun langfristige *Commitments* (z.B. EU-Fusionsprogramm bis 2050, US-Fusionsinitiative mit Dekadenplan [3]). Diese politischen Maßnahmen sind teilweise eine direkte Konsequenz aus der Erkenntnis, dass zu oft Zeit verloren ging.

- **Fehlprognosen als Lernchance:** Die gesammelten Fehlprognosen sind im Nachhinein leicht belächelbar, doch sie dienten jeweils als Motor, der die Forschung anspornte. Interessanterweise hätte ohne den Optimismus der 1970er die massive Investition vielleicht nie stattgefunden – und Fusion wäre heute nicht so weit, wie sie ist. Insofern waren die frühen kurzen Prognosen zwar falsch, aber *performativ wirksam* (self-fulfilling up to a point). Die Herausforderung wird sein, einen **Balanceakt** zu finden: Genügend Optimismus zu verbreiten, um Förderung und kluge Köpfe anzuziehen, ohne jedoch ungerechtfertigte Versprechen zu machen, die später enttäuschen. Dieser Balanceakt ist in den 2020er Jahren aktueller denn je, da private Firmen teils aggressive Zeitpläne vermarkten. Hier sind neutrale wissenschaftliche Stimmen gefragt, die Chancen und Risiken transparent kommunizieren.

Abschließend lässt sich sagen, dass **kein spezifisches Jahr** garantiert genannt werden kann, an dem der erste kommerzielle Fusionsreaktor ans Netz gehen wird – die Bandbreite realistischer Schätzungen bleibt etwa ein Jahrzehnt oder mehr.

Aus heutiger Sicht scheint ein Zeitraum um die **2040er Jahre** plausibel, mit der Möglichkeit von Verschiebungen nach vorne (bei schnellen Erfolgen, z.B. einem erfolgreichen Pilotreaktor 2035) oder hinten (bei unerwarteten technischen Schwierigkeiten oder gesellschaftlichen Krisen). Wichtig ist, dass die Fusionsforschung mittlerweile auf einem solideren Fundament steht: Viele der grundsätzlichen wissenschaftlichen Fragen sind gelöst oder verstanden, es geht „nur“ noch um Umsetzung und Optimierung – freilich gigantische Aufgaben, aber nicht mehr völliges Neuland wie 1950. Somit darf man vorsichtig formulieren: Die Aussage „*Fusion ist immer 30 Jahre entfernt*“ könnte in den kommenden Jahrzehnten endlich an Gültigkeit verlieren, wenn die derzeitigen Pläne eingehalten werden. Die Analyse der Vergangenheit hilft dabei, diese Pläne mit Augenmaß zu stecken und weder falsche Hoffnungen zu wecken noch aufgrund früherer Enttäuschungen in Untätigkeit zu verfallen.

Ausblick: Sollten in den 2030er Jahren tatsächlich ein oder mehrere Demonstrations-Fusionsreaktoren den Betrieb aufnehmen – sei es ITERs Nachfolger DEMO oder ein privates Pilotkraftwerk – so wird dies einen neuen Datenpunkt für zukünftige „Prognose-Rückblicke“ liefern. Es wird spannend sein zu sehen, ob die dann retrospektiv betrachteten Vorhersagen der 2020er weitgehend zutrafen oder ob erneut unerkannte Hürden für Verschiebungen sorgten. Unabhängig vom exakten Jahr der Erstinbetriebnahme ist bereits jetzt klar, dass der Weg zur kommerziellen Fusion lehrreich war und bleibt. Diese Arbeit trägt einen kleinen Teil dazu bei, die **Erwartungshaltung** an diese Schlüsseltechnologie realistisch einzuordnen. Fusion kommt – aber ihr Tempo wird von Naturgesetzen, Ingenieurskunst und menschlichen Entscheidungen gemeinsam bestimmt. Die Vergangenheit mahnt, mit **Prognosen demütig** zu bleiben und zugleich **beharrlich das Fernziel** zu verfolgen.

7. Quellen und Literaturverzeichnis

- [1] **Scharping, N. (2016):** “*Why Nuclear Fusion Is Always 30 Years Away.*” In: **Discover Magazine**, 23. März 2016 (Online-Artikel). (Populärwissenschaftlicher Artikel, der die Geschichte des 30-Jahres-Klischees beleuchtet und aktuelle Herausforderungen der Fusion erläutert; repräsentativ für die öffentliche Wahrnehmung Mitte der 2010er Jahre). <https://www.discovermagazine.com/technology/why-nuclear-fusion-is-always-30-years-away#:~:text=Still%2C%20even%20with%20these%20steps,know%20what%20we%20don%E2%80%99t%20know> (besucht 09.03.2025)
- [2] **Schultz, K. (2006):** “*Why fusion? A discussion of energy alternatives.*” In: **IEEE Control Systems Magazine**, 26(2), S. 32–35. (Kurzer Fachaufsatz, der Fusion im Kontext anderer Energiequellen betrachtet; erwähnt, dass kommerzielle Fusionsenergie aus damaliger Sicht noch *mindestens* 20 Jahre entfernt sei). https://www.researchgate.net/publication/3207708_Why_fusion_A_discussion_of_energy_alternatives#:~:text=Is%20the%20age,of%20this%20ultimate%20clean%20energy (besucht 09.03.2025)
- [3] **Takeda, S.; Keeley, A. R.; Managi, S. (2023):** “*How Many Years Away is Fusion Energy? A Review.*” In: **Journal of Fusion Energy**, 42:16 (12 S.). (Aktuelle Metastudie, die zahlreiche Prognosen der letzten 40 Jahre zusammengetragen hat; kommt zum Schluss, dass die verbleibende Zeit bis zur Fusionsenergie sich verkürzt, 2023 aber immer noch ca. 18 Jahre beträgt). https://www.researchgate.net/publication/370691322_How_Many_Years_Away_is_Fusion_Energy_A_Review#:~:text=ResearchGate%20www.17 (besucht 09.03.2025)
- [4] **Porkolab, M. (2002):** “*Fusion energy may be here by 2050, MIT physicist predicts.*” MIT News (Pressemitteilung), 27. Feb. 2002. (Bericht über einen Vortrag von Prof. Porkolab auf der AAAS-Tagung 2002; prognostiziert einen Fusions-Prototyp in 30–40 Jahren und kommerzielle Umsetzung bis etwa Mitte des 21. Jahrhunderts). <https://news.mit.edu/2002/aaas3-0227#:~:text=Fusion%20energy%2C%20the%20process%20that,%C3%AF%C2%BF%C2%BD%C3%AF%C2%BF%C2%BD%C3%AF%C2%BF%C2%BD%C3%AF%C2%BF%C2%BD%C3%AF%C2%BF%C2%BD%C3%AF%C2%BF%C2%BD%C3%AF%C2%BF%C2%BD> (besucht 09.03.2025)
- [5] **Princeton Plasma Physics Lab – Statement (1982):** (Regierungsnahe Einschätzung aus dem Jahr 1982, zitiert nach einem Zeitungsbericht, wonach kommerzielle Fusionskraftwerke „noch mindestens 30 Jahre“ entfernt seien; verdeutlicht den Stimmungsumschwung nach den 1970ern. Vollquelle: z.B. “*Fusion Power 30 Years Away*”, The Hartford Courant, 9. Mai 1982).
- [6] **Kay, W. D. (1991):** “*The Politics of Fusion Research.*” In: **Issues in Science and Technology**, Vol. 8, No. 2 (Winter 1991), S. 40–46. (Analyse der US-

Fusionsprogramme und ihrer politischen Einflussfaktoren; diskutiert u.a. frühe Zeitpläne und das „20 years away“-Paradox).

[7] **Colombo, U.; Farinelli, U. (1992):** *“Progress in Fusion Energy.”* In: **Annual Review of Energy and the Environment**, 17, S. 123–146. (Übersichtsartikel zum Stand der Fusionsforschung Anfang der 1990er; enthält die Einschätzung, kommerzielle Fusion sei noch „40 oder 50 Jahre“ entfernt).

[8] **Li, J.; Zhang, J.; Duan, X. (2010):** *“Magnetic fusion development for global warming suppression.”* In: **Nuclear Fusion**, 50(1), 014005 (8 S.). (Technischer Artikel aus China, der die Beschleunigung der Fusionsentwicklung diskutiert; enthält das oft zitierte Bonmot: „Fusion war schon immer 50 Jahre entfernt und wird es immer bleiben“, aber plädiert für einen *“Apollo-Pragmatismus”*, um Fusion ggf. schneller zu erreichen).

[9] **Donné, A. (2019):** *“The European roadmap towards fusion electricity.”* In: **Phil. Trans. Royal Society A**, 377, 20170432 (11 S.). (Übersicht des europäischen Fusions-Fahrplans, beschreibt Schritte bis DEMO und darüber hinaus; legt dar, dass Fusionsstrom erst in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts erwartet wird).

[10] **Joint European Torus – Press Release (1977):** *“Nuclear solution that’s 20 years away.”* (Zeitgenössische Pressemitteilung/News-Artikel vom Oktober 1977, in dem JET-Wissenschaftler prognostizieren, in ca. 20 Jahren die Fusionsenergie nutzbar zu machen; Quelle zitiert nach Google News Archive, Spokane Daily Chronicle, 26. Okt. 1977).

[11] **Reddit** https://www.reddit.com/r/askscience/comments/pj9uz/regular_fusion_reactors_in_2050_how_accurate_is/#:~:text=In%201958%2C%20the%20Wall%20Street,away%2C%20and%20always%20will%20be (besucht 09.03.2025)

[12] **Reddit** https://www.reddit.com/r/Futurology/comments/5gi9yh/fusion_is_always_50_years_away_for_a_reason/#:~:text=By%201971%20,at%20least%205%20years%20off (besucht 09.03.2025)

[13] **Formaspace** [#:~:text=Researchers%20Shutaro%20Takeda%2C%20Alexander%20Ryota,%E2%80%9D](https://formaspace.com/articles/wet-lab/fusion-is-always-30-years-in-the-future-is-that-still-true/?srsltid=AfmBOoq0JnqyfVrZCClpyDE78bcyFX-YCrsmPK3rgpZBa6BVoyKG0ct) (besucht 09.03.2025)

[14] **Wiley** <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ese3.43#:~:text=Nuclear%20fusion%20as%20a%20massive%2C,the%20difficulties%2C%20the%20current%20status> (besucht 09.03.2025)

[15] **Eurofusion** https://euro-fusion.org/wp-content/uploads/2022/10/2018_Research_roadmap_long_version_01.pdf#:~:text=Working%20Paper%20Series%2C%20www,scale (besucht 09.03.2025)

[16] **The Guardian** <https://www.theguardian.com/environment/2019/oct/27/nuclear-fusion-research-power-generation-iter-jet-step-carbon-neutral-2050-boris-johnson#:~:text=Guardian%20www,which%20time%20many%20scientists> (besucht 09.03.2025)