Westfälisches Energieinstitut

Tempo, Menge, Form — Der Elektrolysehochlauf in Deutschland im Beta-Diffusionsmodell.

Empirische Kalibrierung mittels Daten von 2013–2023, Szenarienrechnung nach NEP 2025, Zielkonflikt zwischen Ausbaugeschwindigkeit und angestrebter Nennleistung.

von Markus J. Löffler



Bild: KI (Bing Image Creator)

Schriftenreihe des Westfälischen Energieinstituts

Herausgeber:
Direktorium des Westfälischen Energieinstituts

Heft 5/2026

Dieses Werk mit dem Titel ‚**Tempo, Menge, Form — Der Elektrolysehochlauf in Deutschland im Beta-Diffusionsmodell**‘ von **Markus-J. Löffler** ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0)

KI-Kennzeichnung (Art. 50 AI Act): Hinweis gemäß Art. 50 der EU-KI-Verordnung (EU) 2024/1689 („AI Act“): Texte, Grafiken und Berechnungen dieses Dokuments wurden mit Unterstützung von Künstlicher Intelligenz (Claude) erstellt bzw. bearbeitet.

Diese Veröffentlichung erscheint zwar in der Schriftenreihe des Westfälischen Energieinstituts, für die Inhalte ist aber ausschließlich der Verfasser verantwortlich.

 ISSN: 3035-3007

Kurzfassung

Die Bundesnetzagentur hat im April 2025 für das Jahr 2045 drei Ausbauszenarien für Elektrolyseure in Deutschland genehmigt, die von installierten Leistungen zwischen 31.6 und $70.0\ GW$ ausgehen. Tatsächlich waren Anfang 2026 rund $0.2\ GW$ in Betrieb.

Der vorliegende Bericht untersucht, ob sich diese Lücke bis 2045 schließen lässt. Grundlage ist der Zubau der Jahre 2013 bis 2023, ausgewertet mit einem Diffusionsmodell, das eine Vielfalt möglicher Ausbauverläufe abbilden kann. Es zeigt sich, dass der deutsche Elektrolyseur-Zubau bislang exponentiell verläuft und sich etwa alle drei Jahre verdoppelt. Eine unabhängige Erhebung bestätigt diese Rate bis 2025.

Schreibt man diese Entwicklung fort, so werden im Jahr 2045 je nach Szenario 16 bis $19\ GW$ erreicht. Das entspricht rund der Hälfte des niedrigsten und gut einem Viertel des höchsten Ausbauziels. Der Ausbaustand von 95% wird zwischen 2046 und 2060 erreicht, im Mittel um das Jahr 2052. Das Zieljahr 2045 wird damit um 7 bis 15 Jahre verfehlt, und zwar in allen betrachteten Fällen.

Bemerkenswert ist dabei, dass die Höhe des Ausbauziels für den Zeitpunkt seiner Erreichung kaum eine Rolle spielt. Zwischen dem kleinsten und dem größten Szenario liegt mehr als der doppelte Umfang, aber nur gut drei Jahre Unterschied im Fertigstellungstermin. Entscheidend ist allein die Geschwindigkeit des Zubaus.

Ein Erreichen der Ziele im Jahr 2045 setzte voraus, dass die jährlich errichtete Leistung in der Spitze das 30- bis 230-fache des bisher höchsten deutschen Jahreswerts erreicht. Dieser stammt aus dem Jahr 2025 und beträgt $0.074\ GW$.

Der Bericht untersucht außerdem, was nach Abschluss des Ausbaus geschieht. Da Elektrolyseure regelmäßig zu ersetzen sind, erzeugt ein zeitlich stark konzentrierter Aufbau einen ebenso konzentrierten Ersatzbedarf, der sich im Abstand der Anlagenlebensdauer wiederholt. Die aufgebaute Industrie müsste dann abwechselnd stark unter- und überlastet arbeiten. Ein gleichmäßiger Übergang in das Ersatzgeschäft gelingt nur, wenn der Ausbau am Ende sanft ausläuft.

Die Untersuchung schreibt die bisherige Entwicklung fort. Ob der eingeschlagene Weg verlassen wird, ist eine politische und wirtschaftliche Frage; der Bericht liefert den Maßstab, an dem eine Beschleunigung zu messen wäre.

Stichwörter: Elektrolyse, Wasserstoffhochlauf, Technologiediffusion, Adoptionsprozess, Netzentwicklungsplan, Szenarienanalyse, Zubaurate, Ersatzbedarf.

Abstract

In April 2025, the German Federal Network Agency approved three scenarios for the year 2045 assuming installed electrolyzer capacities between 31.6 and $70.0\ GW$. In early 2026, roughly $0.2\ GW$ were actually in operation.

This report examines whether that gap can be closed by 2045. The analysis is based on the electrolyzer capacity actually installed in Germany between 2013 and 2023, evaluated with a diffusion model capable of representing a variety of possible deployment paths. German electrolyzer capacity has so far grown exponentially, doubling roughly every three years. An independent survey confirms this rate through 2025.

Extrapolating this development yields 16 to $19\ GW$ by 2045, depending on the scenario — about half of the lowest and roughly a quarter of the highest target. A completion level of 95% is reached between 2046 and 2060, on average around 2052. The target year 2045 is therefore missed by seven to fifteen years, in every case examined.

Notably, the size of the target has little bearing on when it is reached. The largest scenario exceeds the smallest by more than a factor of two in capacity, yet differs by barely three years in completion date. What governs the outcome is the rate of deployment alone.

Meeting the targets by 2045 would require peak annual additions between 30 and 230 times the highest annual figure achieved in Germany to date, namely $0.074\ GW$ in 2025.

The report further examines what follows once deployment is complete. Because electrolyzers must be replaced at regular intervals, a temporally concentrated build-up produces an equally concentrated replacement demand recurring at the interval of plant lifetime. The construction capacity established during the build-up would then alternate between severe under- and over-utilization. A smooth transition into replacement business occurs only where deployment tapers off gently.

The study extrapolates the development observed to date. Whether the present course will be abandoned is a political and economic question; the report supplies the yardstick against which any acceleration would have to be measured.

Keywords: electrolysis, hydrogen ramp-up, technology diffusion, adoption process, grid development plan, scenario analysis, deployment rate, replacement demand.

Inhalt

1 Einleitung 2

2 Datengrundlage 3

3 Modell und Kalibrierung 4

3.1 Das Diffusionsmodell 4

3.2 Näherung für die Frühphase 4

3.3 Ergebnis der Ausgleichsrechnung 5

4 Prognose-Szenarien 6

4.1 Vorgehen 6

4.2 Adoptionsgrade und Zubauraten 7

4.3 Fertigstellungsjahre und Zwischenstand 2045 8

5 Eingrenzung des Parameterbereichs 9

5.1 Zubauraten bis zur Erreichung des Ausbauziels 9

5.2 Ersatzwellen nach Erreichen des Ausbauziels 10

5.3 Schwankungsbreite im eingeschwungenen Zustand 12

5.4 Festlegung des Wertebereichs 13

6 Fazit 14

Quellen 17

Anhang 1: Formenvielfalt der Beta-Funktion 18

1 Einleitung

Für das Zieljahr 2045 genehmigte die *Bundesnetzagentur*, *BNetzA (2025)*, im April 2025 drei Szenarien A/B/C, bei denen von Elektrolyseleistungen von 31.6/58.5/70.0 GW ausgegangen wird: *„Dafür wird in Szenario A im Vergleich zu den übrigen Szenarien unterstellt, dass mehr Wasserstoff aus dem Ausland importiert wird. Szenariopfad B […] liegt damit auch in der Bandbreite der Systementwicklungsstrategie. In Szenariopfad C wird weiterhin ein ambitionierter Ausbaupfad angenommen, der im Jahr 2037 im Gleichlauf mit Szenario B […] liegt. Für das Zieljahr 2045 wird angenommen, dass ein deutlich beschleunigter Ausbau erreicht werden kann, wobei die Leistung mit 70 GW noch leicht unter dem Vorschlag der Übertragungsnetzbetreiber bleibt.“*

Im Januar 2026 konstatierte das *Energiewirtschaftliche Institut an der Universität zu Köln*, *EWI (2026)*: *„Eine Auswertung der EWI-Elektrolysedatenbank zeigt: Aktuell liegt die installierte Leistung von Elektrolyseuren in Deutschland bei 181 MW_{el}, weitere 1,3 GW_{el} haben eine finale Investitionsentscheidung (FID) oder sind im Bau. Demnach könnten Ende des Jahres 2027 bis zu 1,5 GW_{el} Elektrolysekapazität in Betrieb sein. […] Das 10-GW-Elektrolyseziel bis 2030 wird vermutlich verfehlt*“.

Im Juni 2026 heißt es in einer im Auftrag der *Deutschen Industrie- und Handelskammer*, *DIHK (2026)*, erstellten Studie: „*Insgesamt zeigt sich, dass der Wasserstoffhochlauf nicht an einem einzelnen Engpass scheitert, sondern an der fehlenden Gleichzeitigkeit von wirtschaftlicher Tragfähigkeit, regulatorischer Klarheit, verlässlicher Nachfrage und koordinierter Umsetzung.*“

Zwischen der genehmigten Planungsgrundlage und der beobachteten Entwicklung besteht damit eine erhebliche Diskrepanz. Sie ist für sich genommen unstrittig; strittig ist allein, ob sie sich bis 2045 schließen lässt. Die vorliegende Untersuchung prüft, welche Ausbaudynamik sich aus den bisher realisierten Anlagen ableiten lässt und wohin sie bei Fortschreibung führt.

Dazu wird ein vom Autor, *Löffler (2026)*, vorgestelltes Diffusionsmodell mit invertierter regularisierter unvollständiger Beta-Funktion verwendet. Es wird an der deutschen Ausbaureihe von 2013–2023 kalibriert und auf die drei genehmigten Zielwerte angewendet. Zu klären ist, unter welchen Umständen diese Werte bei Fortschreibung der bisherigen Dynamik erreicht würden, welche jährliche Zubauleistung für das Zieljahr 2045 erforderlich wäre und um welchen Faktor sie den heutigen Zubau überschreitet.

2 Datengrundlage

Grundlage der nachfolgenden Prognosen zum Elektrolyseur-Zubau gemäß BNetzA (2025) ist die Datenlage bzgl. des bisherigen Elektrolyseur-Zubaus. Abbildung 1 stellt die von 2011 ─ 2025 in Deutschland installierte Elektrolyseleistung dar. Die schwarz und grau markierten Daten sind *acatech/DECHEMA (2024)* und die blau markierten *dena (2026)* entnommen.

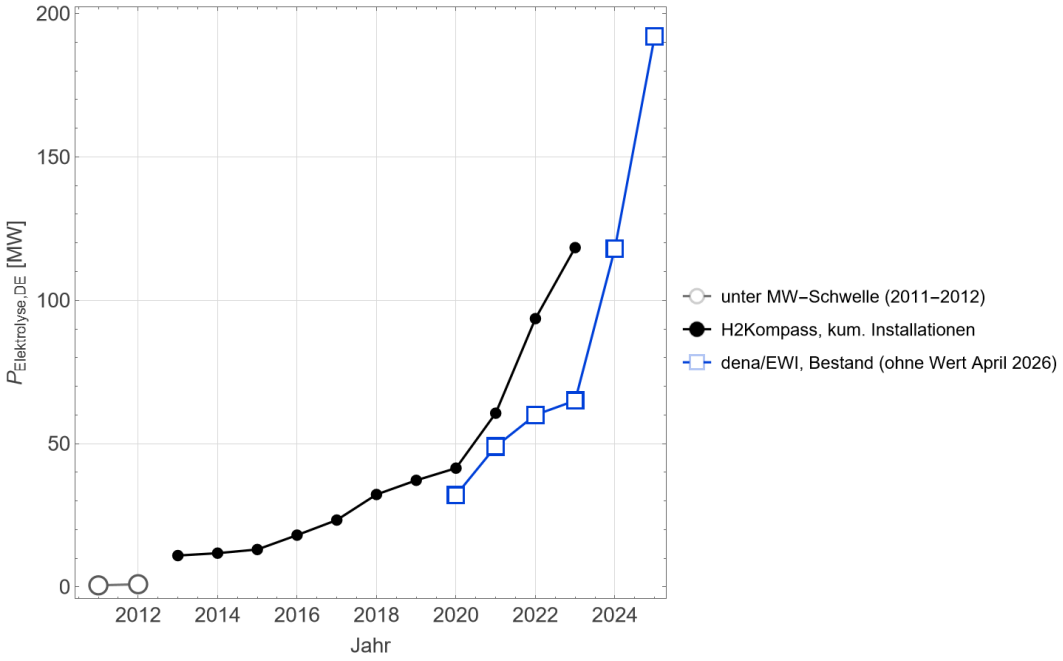


Abbildung 1: Katalogisierte installierte Elektrolyseleistung in Deutschland nach zwei Erhebungen. Schwarze Punkte: kumulierte Installationen einschließlich stillgelegter Anlagen, eigene Auswertung des Elektrolyse-Monitors, *acatech/DECHEMA (2024)*. Blaue Quadrate: Bestand nach der dena-Projektdatenbank und der EWI-Elektrolysedatenbank, *dena (2026)* / *EWI (2026)*. Graue Kreise: Jahre 2011 und 2012, in denen ausschließlich Anlagen unterhalb des Megawattbereichs erfasst wurden; diese Werte bleiben von der nachfolgenden Kalibrierung ausgenommen. Weitere Erläuterungen siehe Text. Bild: Löffler.

Die grau markierten Daten werden wegen ihrer Geringfügigkeit als Vorläufer der schwarz markierten Daten nicht weiter berücksichtigt. Die schwarz und die blau markierten Datenreihen beschreiben zwar denselben Vorgang, weichen im Niveau jedoch systematisch voneinander ab. Im Überlappungsbereich 2020 bis 2023 liegt die schwarze Reihe um den Faktor 1.3 bis 1.8 höher. Ursache hierfür ist, dass die schwarze Reihe alle jemals installierten Anlagen einschließlich der zwischenzeitlich wieder stillgelegten erfasst; die blaue hingegen beschreibt lediglich den zum jeweiligen Stichtag betriebenen Bestand.

Der Kalibrierung liegen ausschließlich die schwarzen Datenpunkte zugrunde, da für die späteren Prognosen lediglich die *insgesamt* installierte Elektrolyseleistung betrachtet werden soll, woraus sich die erbrachte Aufbauleistung ablesen lässt. Die

blaue Reihe reicht zwei Jahre weiter und dient der Überprüfung, ob die ermittelte Wachstumsrate auch nach 2023 noch zutrifft.

3 Modell und Kalibrierung

3.1 Das Diffusionsmodell

Nachfolgende Prognosen werden unter Anwendung der in *Löffler (2026)* vorgestellten inversen regularisierten unvollständigen Beta-Funktion I^{-1} durchgeführt.[1] Diese Funktion verallgemeinert die bisher bekannte logistische Funktionenfamilie, wodurch sich Adoptions- bzw. Wachstumsprozesse und -raten in großer Formenvielfalt abbilden lassen, wie Anhang 1 zeigt.

Die Funktion ist definiert mit

$$F(t) = (1+C)\cdot I^{-1}_{\Lambda\cdot(t-t_0)+I_{x_0}(a,b)} - C \text{ mit } \Lambda = \frac{\nu\cdot(1+C)^{1-a-b}}{\mathrm{B}(a,b)} \text{ und } x_0 = \frac{C}{1+C} \qquad (1)$$

Dabei ist $F(t_0) = 0$. B ist die Beta-Funktion und I die regularisierte unvollständige Beta-Funktion. Weiterhin gilt $F(t) = f(t)/M$, wobei $f(t)$ die eigentlich zu bestimmende Adoptionsfunktion ist mit ihrem Sättigungsmaximum M. Die frei wählbaren Parameter a, b, C und ν werden mit Hilfe entsprechender Berechnungsverfahren in der Weise ermittelt, dass die Funktion eine gegebene Datenreihe mit möglichst geringen Abweichungen nachbildet. Alle vier Parameter lassen sich jedoch nur dann gemeinsam bestimmen, wenn eine den S-förmigen Adoptionsprozess beschreibende Datenreihe schon ein erkennbares Sättigungsverhalten aufweist. Die in Abbildung 1 dargestellte Datenreihe weist ein derartiges Sättigungsverhalten noch nicht auf, da sie erst angelaufen ist und noch weit vom Sättigungsende eines Adoptionsprozesses entfernt ist. Die Ermittlung zumindest eines Teils der freien Parameter erfordert daher eine andere Vorgehensweise.

3.2 Näherung für die Frühphase

Hierfür ist zunächst auf die in *Löffler (2026)* angegebene Differentialgleichung zur Bestimmung von F zurückzugreifen:

$$\frac{dF}{dt} = \nu\,(C+F)^{1-a}(1-F)^{1-b} \qquad (2)$$

[1] Auf die in *Löffler (2026)* ebenfalls vorgestellte Anwendung der dort so benannten Betalets wird hier verzichtet, da für die hier durchgeführten Prognosen davon ausgegangen wird, dass die Entwicklung der Elektrolyseursleistung keinen zusätzlichen oder ungeplanten wesentlichen Förder- oder Störprozessen unterworfen ist.

Die Parameter a und b werden als Anlauflockerung beziehungsweise Abschlusslockerung bezeichnet. Beide lösen jeweils eine Bremse: In Gleichung (2) hemmt der Faktor F^{1-a} den Anlauf, weil F zu Beginn klein ist, der Faktor $(1-F)^{1-b}$ den Abschluss, weil der verbleibende Anteil zum Ende hin klein wird. Bei $a = 1$ beziehungsweise $b = 1$ wird der zugehörige Exponent null und die Bremse damit vollständig gelöst; der Vorgang setzt dann unmittelbar mit voller Rate ein beziehungsweise endet unvermittelt.

Der Parameter C beschreibt eine von außen wirkende Anfangsanregung des Adoptionsprozesses und verhindert, dass die Lösung im Ursprung verharrt. Für die vorliegende Datenreihe wird $C = 0$ gesetzt. Die Anfangsbedingung wird stattdessen durch den beobachteten Wert $f(t_1) = f_1$ vorgegeben, der als Stützstelle bereits vorliegt und damit dieselbe Aufgabe erfüllt.

Solange sich die Funktion noch am Adoptionsbeginn befindet, ist $F \ll 1$. Für diesen Fall lässt sich die Differentialgleichung umformen und vereinfachen zu

$$\frac{df}{dt} \approx \mu\, f(t)^{1-a};\; f(t_1) = f_1;\; \mu = \nu\, M^a \tag{3}$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung lautet

$$\mathrm{f}(t) = (A + B\, t)^{1/a}; A = f_1^a - B\, t_1; B = a\, \mu \tag{4}$$

Die Parameter a, A und B werden aus der Datenreihe mittels einer nichtlinearen Ausgleichsrechnung ermittelt, woraus bei bekanntem f_1 die Parameter μ und t_1 bestimmt werden.

3.3 Ergebnis der Ausgleichsrechnung

Abbildung 2 zeigt als Ergebnis o.g. Ausgleichsrechnung Datenpunkte und Fit-Kurve in originaler (links) und in logarithmischer (rechts) Darstellung.

Die Ausgleichsrechnung führt mit $f_1 = 0.011\ GW$ zu folgenden Parametern:

$$\begin{aligned} \mathrm{a} &= 0.001921 \\ \mu &= 0.246361\ \mathrm{GW} \\ t_1 &= 2013.78 \end{aligned} \tag{5}$$

Der Parameter a ist auffällig klein und nahe 0. Dies ist gleichbedeutend damit, dass der Adoptionsprozess für Elektrolyseure derzeit praktisch exponentiell verläuft, wie

im linken Teilbild gut erkennbar ist.[2] Das rechte Teilbild betont diesen Sachverhalt, da hier in der logarithmischen Darstellung die Exponentialfunktion zu einer Geraden wird.

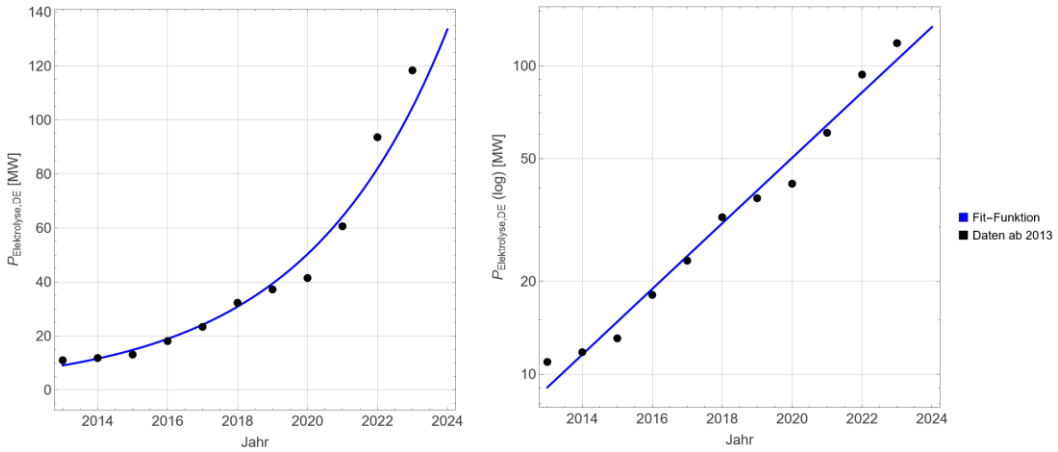


Abbildung 2: Fit-Funktion $f(t) = P_{Elektrolyse,DE}$ in linearer (links) und logarithmischer (rechts) Skalierung durch die katalogisierten Elektrolyse-Nennleistungen der Jahre 2013–2023 gemäß Abbildung 1. Bild: Löffler.

Auf Basis dieser Daten lassen sich für verschiedene b und M mehrere Szenarien durchrechnen mit dem Ziel, den Zeitraum der Fertigstellung des in *BNetzA (2025)* in seinen drei Szenarien A/B/C vorgeschlagenen Elektrolyseur-Parks für Deutschland einzugrenzen.

4 Prognose-Szenarien

4.1 Vorgehen

Zur Erstellung der Prognose-Szenarien wird wieder auf Gleichung (1) zurückgegriffen. Sie ist wegen $C = 0$, siehe Erläuterung oben, noch wie folgt anzupassen:

$$f(t) = M I^{-1}_{\Lambda\cdot(t-t_1)+I_{x_1}(a,b)};\ \Lambda = \frac{\nu}{\mathrm{B}(a,b)}\ ;\ x_1 = \frac{f_1}{M};\ \nu = \frac{\mu}{M^a} \qquad (6)$$

Da M gemäß *BNetzA (2025)* $31.6/58.5/70.0\ GW$ vorgegeben und μ sich aus (5) ergibt, lässt sich ν mit Hilfe von Gleichung (6), rechts, ermitteln. Der einzige noch verbliebene Parameter $0 \leq b \leq 1$ ist unbekannt und bleibt dies auch bis zur Annäherung an die Adoptionssättigung. Er wird von 0.0 bis 1.0 in Schritten von 0.1 variiert, wodurch zehn Prognose-Szenarien zur Eingrenzung des Fertigstellungsjahres des künftigen deutschen Elektrolyseure-Parks entstehen.[3] Bei diesen Prognosen wird

[2] Mit einer Nebenrechnung kann gezeigt werden, dass für $a = 0$ $f(t) = f_1\ e^{\mu\,(t-t_1)}$ wird.

[3] Der Grenzfall $b = 0.0$ bei $a \approx 0$ entspricht dabei dem klassischen logistischen Verlauf, der somit ebenso in die Berechnungen einbezogen wird.

angenommen, dass keine weiteren, die begonnene Adoptionsdynamik ungeplant beeinflussenden äußeren Einflüsse hinzukommen. Mit den zehn Festlegungen für b wird allerdings das Ausklingen des Elektrolyseur-Adoptionsprozesses bzw. dessen Sättigungsverhalten variiert.

4.2 Adoptionsgrade und Zubauraten

Das Ergebnis der Berechnungen stellt Abbildung 3 grafisch dar. Im linken Teilbild sind die resultierenden Adoptionsgrade $f(t) = P_{Elektrolyse,DE}$ in GW (kumulierte Elektrolyse-Nennleistung) und im rechten Teilbild die hieraus resultierenden Adoptionsraten df/dt, also der jährliche Leistungszubau in GW/a in Abhängigkeit von der Jahreszahl dargestellt.

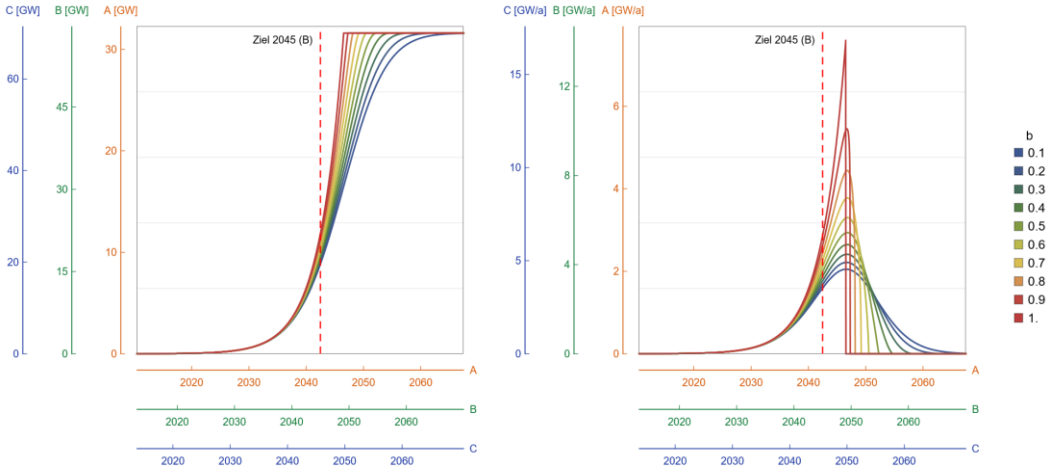


Abbildung 3: Zu erwartende kumulierte Elektrolyse-Nennleistungen (links, in GW) und jährliche Elektrolyse-Nennleistung-Zubauten (rechts, in GW/a) zur Erzielung der in den Szenarien A/B/C gem. *BNetzA (2025)* genannten Werte unter Zugrundelegung des in Abbildung 2 dargestellten Fit-Verlaufs durch die katalogisierten Elektrolyseur-Nennleistungen der Jahre 2013–2023 in Abhängigkeit verschiedener „Abschlusslockerungen“ b. Die drei Abszissen und Ordinaten sind den jeweiligen Szenarien zugeordnet. Die scheinbar identischen Verläufe ergeben sich aus den entsprechenden Normierungen. Bild: Löffler.

Beide Teilbilder weisen drei unterschiedliche Abszissen und Ordinaten auf, die den drei Szenarien A/B/C (Orange, Grün, Blau) in *BNetzA (2025)* zugeordnet sind. Auf diese Weise gelingt die gemeinsame Darstellung der drei Adoptionsprozesse mit nur einem Kurvensatz. Die Kurven sind über ihre Farbgebung dem Parameter b, wie in der Legende rechts dargestellt, zugeordnet.

Die rot-strichlierten Linien kennzeichnen beispielhaft das Jahr 2045 für Szenario B.

Beide Teilbilder zeigen, dass die drei Adoptionsprozesse bis zum Jahr 2035 näherungsweise identisch verlaufen. Bis dahin sind sie praktisch unabhängig vom Parameter b.

Das linke Teilbild zeigt, dass bei der aktuellen Ausbaudynamik keiner der Prozesse sein Ausbauziel bis zum Jahr 2045 erreicht.[4] Parameter b entfaltet erst nach Erreichen von etwa 30% des jeweiligen Ausbauziels seine Wirkung; ab diesem Punkt beginnen die Kurven, sich deutlich zu unterscheiden. Je größer b wird, umso abrupter endet der Ausbau, wie an den Abschlusskrümmungen der Kurven zu erkennen ist.[5]

Das rechte Teilbild zeigt die Adoptionsrate, also den jährlichen Leistungszubau. Die Kurven weisen ein ausgeprägtes Maximum auf. Bereits jetzt ist per Augenschein erkennbar, dass diese Maxima in erheblicher Weise von b abhängen. Der Abfall der Ausbaurate kurz vor Erreichen der jeweiligen Ausbauziele fällt für $b = 0.6$ bis 1.0 besonders steil aus. Die Bedeutung dieser auffälligen Sachverhalte wird noch weiter unten zu diskutieren sein.

4.3 Fertigstellungsjahre und Zwischenstand 2045

Abbildung 4 zeigt eine Auswertung der Adoptionskurven im linken Teilbild von Abbildung 3.

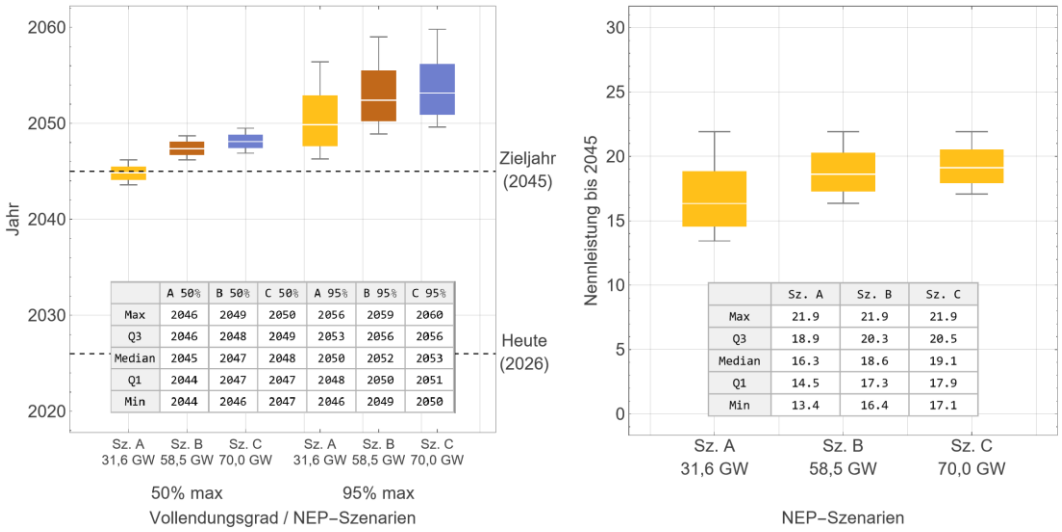
In Form eines Box-Whisker-Diagramms stellt das linke Teilbild für die Szenarien A/B/C und für zwei Vollendungsgrade $50\%\ max$ $(15.8/29.3/35.0\ GW)$ und $95\%\ max$ $(30.0/55.6/66.5\ GW)$ die jeweils erreichbaren Ausbaujahre dar. Die Tabelle im Bild schlüsselt die grafischen Elemente noch weiter auf. Die strichlierten Linien kennzeichnen das aktuelle Jahr 2026 und das Zieljahr des Elektrolyse-Ausbaus 2045. Wie bereits aus Abbildung 3 erkennbar war, wird bei Beibehaltung der aktuellen Ausbaudynamik im Jahr 2045 nur im Fall des Szenarios A ein 50%-Ausbau erreicht. Die beiden anderen Szenarien erreichen diese Ausbaustufe im Median in den Jahren 2047 bzw. 2048. 95% des jeweiligen Ausbauziels wird für Szenario A im Zeitbereich 2046–2056 (Median: 2050), für Szenario B im Zeitbereich 2049–2059 (Median: 2052) und für Szenario C im Zeitbereich 2050–2060 (Median: 2053) erreicht.

Das rechte Teilbild schließlich zeigt noch, mit welchen Ausbau-Leistungen bis zum Jahr 2045 zu rechnen ist. Im Szenario A werden 13.4 bis $21.9\ GW$ (Median: $16.3\ GW$) von bis dahin angestrebten $31.6\ GW$ erreicht, im Szenario B 16.4 bis $21.9\ GW$

[4] Lediglich ein Ausbau gemäß Szenario A kommt in die Nähe von 2045.Dies ist auf den deutlich geringeren Ausbauhorizont wie in den Szenarien B und C zurückzuführen.

[5] Das Teilbild bestätigt außerdem *EWI (2026)*: „*Das 10-GW-Elektrolyseziel bis 2030 wird vermutlich verfehlt.*“ Auf Basis der dem Bild zugrundeliegenden Daten wäre für alle Szenarien bis 2030 sogar von lediglich $0.6\ GW$, jedenfalls von weniger wie $1\ GW$ auszugehen.

(Median: $18.6\ GW$) von angestrebten $58.5\ GW$ und in Szenario C 17.1 bis $21.9\ GW$ (Median: $19.1\ GW$) von angestrebten $70.0\ GW$.



	A 50%	B 50%	C 50%	A 95%	B 95%	C 95%
Max	2046	2049	2050	2056	2059	2060
Q3	2046	2048	2049	2053	2056	2056
Median	2045	2047	2048	2050	2052	2053
Q1	2044	2047	2047	2048	2050	2051
Min	2044	2046	2047	2046	2049	2050

	Sz. A	Sz. B	Sz. C
Max	21.9	21.9	21.9
Q3	18.9	20.3	20.5
Median	16.3	18.6	19.1
Q1	14.5	17.3	17.9
Min	13.4	16.4	17.1

Abbildung 4: Box-Whisker-Diagramm zur Bandbreite der möglichen Abschlussjahre bis zur Erzielung von 50% und 95% der Elektrolyseur-Nennleistungen gem. den NEP-2025-Szenarien A/B/C (links) und der bis zum Jahr 2045 erzielbaren Elektrolyseur-Nennleistungen. Die Werte sind abgeleitet aus Abbildung 3. Vom unteren Strich bis zur Unterkante eines gelben Kastens liegen 25% aller Werte (1. Quartil) zum jeweiligen Szenario, von der Unterkannte bis zum weißen Strich eines gelben Kastens liegen weitere 25% aller Werte (2. Quartil), usw. Bild: Löffler.

5 Eingrenzung des Parameterbereichs

5.1 Zubauraten bis zur Erreichung des Ausbauziels

Bei der Diskussion des rechten Teilbilds in Abbildung 3 wird bereits auf die Maxima der jeweiligen Adoptions- bzw. Leistungszuwachsraten hingewiesen. Zu deren Interpretation wird Abbildung 5 herangezogen.

Im linken Teilbild sind die für die drei Szenarien (A ─ Orange, B ─ Grün, C ─ Blau) zu erwartenden maximalen Elektrolyse-Zubauraten in GW/a über dem Parameter b dargestellt. Die Tabelle links oben gibt die entsprechenden Werte an einigen Stützstellen für b wieder.

Wie bereits in Abbildung 3, rechtes Teilbild, ist deutlich zu erkennen, dass die maximale Zubaurate erheblich vom Parameter b abhängt. Die grau-strichlierte Linie unten im Bild kennzeichnet die aktuell maximale Zubaurate von $0.074\ GW/a$. Mit Größenordnungen von $1.9\ GW/a$ bis $16.9\ GW/a$ liegen die gegen Ende des Zubaus zu erwartenden bzw. zu fordernden Zubauraten-Maxima sehr erheblich über diesem Wert.

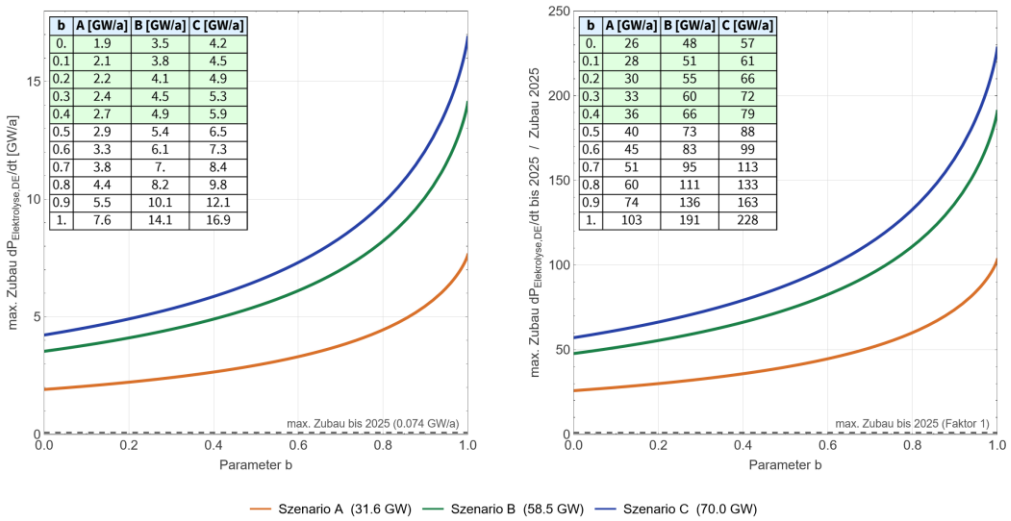


Abbildung 5: Zielkonflikt zwischen Zubautempo und dem maximalem Leistungszubau (links) bzw. der Zubau-Anstrengung (rechts) zur Erfüllung der NEP-2025-Zielszenarien A/B/C. Hellgrüner Bereich in den Tabellen: Empfohlener Wertebereich für b. Weitere Erläuterungen siehe Text. Bild: Löffler.

Die entsprechenden Vergleichsfaktoren sind im rechten Teilbild dargestellt, bei denen auf der Ordinate der maximale jährliche Zubau ins Verhältnis zur aktuell maximalen Zubaurate gestellt wird. Im Vergleich hierzu muss die Zubaurate demnach um einen Faktor 26 bis 228 erhöht werden, um zumindest in den Jahren 2046–2060 95% des gewünschten Endausbaus bewerkstelligen zu können, vergleiche Abbildung 4.

5.2 Ersatzwellen nach Erreichen des Ausbauziels

Die bisherigen Betrachtungen enden mit dem Erreichen des Sättigungsniveaus. Tatsächlich endet der Aufbau dort nicht, denn Elektrolyseure haben eine begrenzte Lebensdauer und sind zu ersetzen. Wird jede Anlage nach L Jahren erneuert, so ist der Bestand die Summe der jeweils letzten L Jahrgänge, und für die *kumulierte Bruttoinstallation* $K(t)$ folgt daraus die geschlossene Summe

$$K(t) = \sum_{k\geq 0} f(t - k\,L);\; \dot{K}(t) = \sum_{k\geq 0} \dot{f}(t - k\,L) \qquad (7)$$

Abbildung 6 zeigt beides für eine Lebensdauer von $L = 15\,Jahren$. Im linken Teilbild steigt die kumulierte Bruttoinstallation $K(t)$ in der Aufbauphase steil an und geht anschließend in einen linearen Ast über, dessen Steigung dem Dauerbedarf

$$\frac{M}{L} = \begin{cases} 2.1\;GW/a & Szenario\;A \\ 3.9\;GW/a & Szenario\;B \\ 4.7\;GW/a & Szenario\;C \end{cases}$$

entspricht. Im rechten Teilbild ist die zugehörige Rate dargestellt.

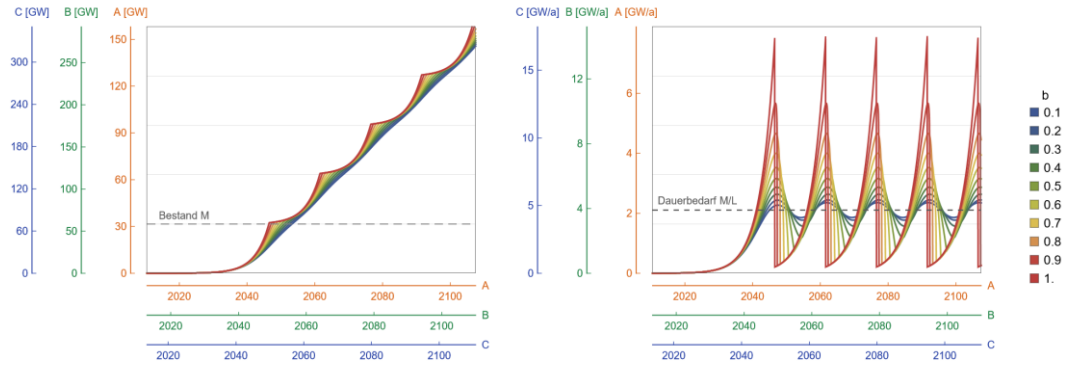


Abbildung 6: Zu erwartende kumulierte Elektrolyse-Nennleistungen (links; installierte Nennleistung vor Abzug rückzubauender Elektrolyseure) und jährliche Elektrolyse-Nennleistung-Zubauten (rechts) gemäß Abbildung 3 unter Berücksichtigung regelmäßigen 15-jährigen Ersatzes abgeschriebener Elektrolyseure in Abhängigkeit verschiedener „Abschlusslockerungen“ b. Die drei Abszissen und Ordinaten sind den jeweiligen Szenarien zugeordnet. Die scheinbar identischen Verläufe ergeben sich aus den entsprechenden Normierungen. Bild: Löffler.

Diese Lebensdauerbetrachtung gilt streng genommen nur für die Elektrolyseur-Kernelemente, nicht für Grundstück, Netzanschluss und Peripherie. Darauf wird am Ende dieses Abschnitts eingegangen; zunächst wird *vereinfacht* angenommen, dass sich der gesamte Aufbauprozess regelmäßig wiederhole.

Dies vorangestellt enthält das *rechte* Teilbild den für die Wahl von b entscheidenden Befund: Nach dem Aufbaugipfel folgt keine Ruhe, sondern eine im Abstand der Lebensdauer ($L = 15\,Jahre$) wiederkehrende Ersatzwelle. Sie entsteht, weil ein zeitlich konzentrierter Aufbau eine ebenso konzentrierte Altersstruktur des Anlagenbestands hinterlässt. Die gestrichelte Waagerechte markiert den Dauerbedarf M/L, der sich normiert zu $1/L = 0.067\ 1/a$ ergibt und daher für alle drei Szenarien identisch ist. Um diesen Wert schwankt die Bau- bzw. Ersatzleistung dauerhaft, und zwar umso stärker, je größer b ist.

Dies sei am *Beispiel von Szenario B* erörtert; maßgeblich sind dort die grünen Skalen: Bei $b = 0.1$ pendelt die Rate zwischen 3.4 und $4.4\ GW/a$ und bleibt damit praktisch auf dem Niveau des Dauerbedarfs von $3.9\ GW/a$. Der Aufbau geht übergangslos in das Ersatzgeschäft über, und die einmal aufgebaute Errichtungskapazität bleibt vollständig ausgelastet. Bei $b = 1.0$ dagegen springt die Rate zwischen 0.4 und $14.4\ GW/a$, also etwa um den Faktor 37; und dies nicht einmalig, sondern alle 15 Jahre auf unbegrenzte Zeit. Wer die Belegschaft um 2050 abbaut, müsste sie um 2065 wieder aufbauen, um 2080 erneut abbauen und so fort.

Das *linke* Teilbild zeigt denselben Sachverhalt als Treppe. Bei großem b sind die Stufen scharf ausgeprägt und durch nahezu waagerechte Abschnitte getrennt, in

denen keine Bautätigkeit stattfindet. Bei kleinem b verschmelzen sie zu einer nahezu geraden Linie gleichmäßiger Auslastung.

5.3 Schwankungsbreite im eingeschwungenen Zustand

Tabelle 1 beziffert die in Abbildung 6 sichtbaren Ersatzwellen für den eingeschwungenen Zustand, also für den Zeitraum, in dem die Aufbauphase nicht mehr nachwirkt.

Angegeben sind die Maxima und Minima der jährlichen Bauleistung, jeweils bezogen auf den Dauerbedarf M/L, sowie deren Verhältnis. Da beide Größen normiert sind, gelten sie unabhängig vom betrachteten Szenario.

Tabelle 1: Schwankung der jährlichen Bauleistung im eingeschwungenen Zustand in Abhängigkeit vom Sättigungsparameter b. Maxima und Minima sind auf den Dauerbedarf M/L bezogen und daher für alle drei Szenarien identisch; die absoluten Werte ergeben sich durch Multiplikation mit 2.11 (A), 3.90 (B) beziehungsweise 4.67 GW/a (C). Lebensdauer $L = 15\,Jahre$.

b	Max / (M/L) [%]	Min / (M/L) [%]	Max/Min
0.0	109.4	90.7	1.2
0.1	111.9	88.3	1.3
0.2	116.2	84.1	1.4
0.3	125.1	74.8	1.7
0.4	136.3	56.6	2.4
0.5	150.1	36.0	4.2
0.6	167.4	24.7	6.8
0.7	190.0	18.4	10.3
0.8	221.3	14.4	15.3
0.9	269.2	11.8	22.8
1.0	371.1	9.9	37.3

Der Übergang vollzieht sich zwischen $b = 0.3$ und $b = 0.4$, und zwar deutlicher, als die Maxima allein erkennen lassen. Diese steigen in diesem Schritt lediglich von 125% auf 136%, während die Minima von 75% auf 57% einbrechen. Begrenzend wirkt somit das Tal, nicht die Spitze: Bei $b = 0.4$ wäre die Errichtungskapazität zeitweise nur noch zu gut der Hälfte ausgelastet, bei $b = 0.5$ zu gut einem Drittel. Oberhalb von $b = 0.6$ fällt die Bauleistung in den Tälern unter ein Viertel des Dauerbedarfs, während die Spitzen das Anderthalbfache überschreiten; ein Wechsel zwischen Unter- und Überlastung, der sich alle $15\,Jahre$ wiederholt.

Bis $b = 0.2$ bleibt die Bauleistung in den Tälern $Min/(M/L)$ oberhalb von 84% des Dauerbedarfs und damit in einem Bereich, der im verarbeitenden Gewerbe als

normale Auslastung gilt. Bei $b = 0.3$ fällt sie auf 75%, ein Niveau, auf dem deutsche Industriezweige gegenwärtig Beschäftigung abbauen. Ein Ausgleich über Auftragsvorlauf oder Lagerhaltung scheidet dabei aus, da diese Instrumente Wochen bis Monate überbrücken, der Ersatzzyklus jedoch eine Periode von $15\,Jahren$ aufweist.

5.4 Festlegung des Wertebereichs

Daraus ergibt sich die Eingrenzung nach oben. Bei $b = 0.4$ überschreitet das Verhältnis von Spitze zu Tal mit 2.4 erstmals den Faktor 2.0, vergleiche auch Tabelle 1, und der Rückgang von der Spitze auf die Hälfte vollzieht sich in weniger als $5\,Jahren$. Oberhalb von $b = 0.6$ wird der Rückgang auf $3\,Jahre$ und weniger zusammengedrängt. Eine Errichtungskapazität, die in dieser Geschwindigkeit auf- und wieder abgebaut werden müsste, ist industriell kaum sinnvoll zu führen. Betroffen wären Fertigungslinien, Montagekapazitäten, Planungsbüros und Genehmigungsstellen, deren Aufbau mehrere Jahre an Qualifizierung erfordert und die bei einem Rückgang dieser Größenordnung nicht erhalten werden könnten.

Nach unten ist der Bereich weniger scharf begrenzt. Bei kleinem b verschmilzt der Aufbaugipfel zunehmend mit der ersten Ersatzwelle, und die Sättigung wird nur noch asymptotisch erreicht. Für Szenario B vergehen zwischen dem Erreichen von 95% und der vollständigen Sättigung bei $b = 0.4$ rund $3\,Jahre$, bei $b = 0.2$ $12\,Jahre$ und bei $b = 0.1$ $31\,Jahre$. Für die Elektrolyse als solche ist das unproblematisch, da die Auslastung dabei besonders gleichmäßig bleibt. Nachgelagerte Anlagen wie Speicher, Leitungen und Abnehmer werden jedoch auf das Sättigungsniveau ausgelegt und blieben entsprechend lange unterhalb ihrer Auslegung.

Für die weitere Betrachtung wird der Wertebereich $b \leq 0.4$ zugrunde gelegt. Dieser Bereich ist in den in Abbildung 5 dargestellten Tabellen in Hellgrün hinterlegt. Die Grenze ist bewusst großzügig gewählt: Bereits bei $b = 0.3$ fällt die Auslastung in den Tälern auf 75%, sodass eine strengere Fassung mit $b \leq 0.3$ begründbar wäre. Nach unten bleibt der Bereich offen, da kleines b industriell keine Schwierigkeiten aufwirft, die Auslastung ist dort besonders gleichmäßig, und der Grenzfall $b \to 0$ gerade dem klassischen logistischen Verlauf entspricht. Die Obergrenze wirkt dabei in die für das Zieljahr 2045 günstige Richtung: Sie begrenzt die zulässigen Spitzen-Zubauraten nach oben und die Zeitpunkte nach unten.

Zwei Einschränkungen sind dabei festzuhalten:

1. Die dauerhafte Zyklizität ist eine Eigenschaft des Modells, das eine für alle Anlagen exakt gleiche Lebensdauer unterstellt. Real streut die Lebensdauer, was die Ersatzwellen über die Zyklen hinweg dämpft; der qualitative Befund bleibt davon unberührt.
2. Die Rechnung unterstellt, dass eine Ersatzinvestition denselben Aufwand erfordert wie eine Neuerrichtung, siehe die einleitend genannte Vereinfachung. Tatsächlich entfallen aber die Flächenbeschaffung, das Genehmigungsverfahren und der Netzanschluss vollständig; die Peripherie überdauert mehrere Stack-Generationen. Die laufende Erneuerung bindet damit weniger Errichtungskapazität als angenommen, sodass der Dauerbedarf eine niedrigere Auffangschwelle bildet und der Rückgang des Bedarfs an Ressourcen nach Beendigung der ersten Aufbauphase stärker ausfällt. Die angegebene Obergrenze für b ist deshalb eher großzügig bemessen.

6 Fazit

Der deutsche Elektrolyseur-Zubau verläuft seit 2013 exponentiell mit einer Rate von rund $0.25/a$ entsprechend einer Verdoppelung alle $2.8\,Jahre$. Diese Rate ist der einzige Parameter, den die Datenreihe belastbar hergibt; sie wird durch die unabhängige Erhebung der *dena (2026)* bis 2025 bestätigt.

Schreibt man die Datenreihe unter Zugrundelegung des Beta-Diffusionsmodells fort und setzt als Sättigungsniveau die von *BNetzA (2025)* genehmigten Werte der Szenarien A, B und C ein, so ergibt sich ein von der Wahl des Abschlussparameters weitgehend unabhängiges Bild. Bis etwa 2035 verlaufen alle Prognosen praktisch deckungsgleich. Im Zieljahr 2045 sind in Szenario A rund $16\,GW$ der angestrebten $31.6\,GW$ erreicht, in Szenario B rund $19\,GW$ von $58.5\,GW$ und in Szenario C rund $19\,GW$ von $70.0\,GW$. Der Ausbaustand von 95% wird im Median in den Jahren 2050, 2052 beziehungsweise 2053 erreicht, im ungünstigen Fall erst 2060.

Das Zieljahr 2045 wird damit um 7 bis $15\,Jahre$ verfehlt. Für alle drei Szenarien gilt diese Aussage für alle betrachteten Werte des Abschlussparameters bzw. der Abschlusslockerung b; sie gilt somit unabhängig davon, wie der Ausbau gegen Ende ausläuft.

Selbst auf den fortgeschriebenen Verläufen, die das Zieljahr verfehlen, steigt die jährliche Zubaurate in der Spitze auf das 30- bis 230-fache des bislang höchsten

deutschen Jahreswerts von $0.074\ GW/a$. Ein Erreichen der Ziele bereits 2045 setzte entsprechend höhere Werte voraus.

Der weit überwiegende Teil dieser Vervielfachung steckt bereits im fortgeschriebenen Verlauf selbst: Eine Wachstumsrate, die den Bestand knapp alle $3\ Jahre$ verdoppelt, vervielfacht auch die jährliche Zubauleistung, ganz ohne politische Beschleunigung. Gemessen an der heutigen Entwicklung müsste die Wachstumsrate lediglich um 40% bis 90% steigen, damit der Ausbau 2045 statt in den Jahren 2052 bis 2062 abgeschlossen werden könnte; die Verdopplungszeit sänke damit von knapp drei auf etwa anderthalb bis zwei Jahre. Der erforderliche Faktor entspricht dabei unmittelbar dem Verhältnis der verbleibenden Zeitspannen.

Erst beide Aussagen zusammen ergeben das vollständige Bild. Die erforderliche Wachstumsrate liegt durchaus im Bereich dessen, was in Deutschland beim Ausbau anderer Energietechnologien bereits erreicht wurde. Unerreichbar erscheint vielmehr die absolute Zubauleistung, die sich daraus ergibt: mehrere Gigawatt jährlich über ein Jahrzehnt hinweg, gegenüber $0.074\ GW$ im bislang stärksten Jahr.

Die Untersuchung des Auslaufverhaltens grenzt den Abschlussparameter b auf $b \leq 0.4$ ein. Oberhalb dieser Grenze müsste die aufgebaute Errichtungskapazität innerhalb weniger Jahre wieder abgebaut und im Abstand der Anlagenlebensdauer erneut aufgebaut werden; ein Wechsel zwischen Unter- und Überlastung, der industriell nicht zu führen wäre. Diese Einschränkung schließt gerade die schnellsten der gerechneten Verläufe aus. Da auch diese das Zieljahr verfehlen, ändert sie am Ergebnis nichts.

Bemerkenswert ist, was das Modell *nicht* zeigt. Die Höhe des Ausbauziels ist für den Zeitpunkt seiner Erreichung nahezu belanglos: Zwischen den Szenarien A und C liegt ein Faktor 2.2 im Sättigungsniveau, aber nur gut drei Jahre in der Fertigstellung. Der Grund liegt darin, dass das Ziel logarithmisch, die Wachstumsrate dagegen linear in die Zeitrechnung eingeht. Die Debatte über 31.6 gegenüber $70.0\ GW$ ist für die Frage des Zeitpunkts zweitrangig; entscheidend ist allein, ob sich die Wachstumsrate anheben lässt.

Dieser Sachverhalt schließt an die eingangs zitierte Diagnose der *DIHK (2026)* an: Wenn der Hochlauf an der fehlenden Gleichzeitigkeit von wirtschaftlicher Tragfähigkeit, regulatorischer Klarheit, verlässlicher Nachfrage und koordinierter Umsetzung

scheitert, dann ist es diese Gleichzeitigkeit, die die Wachstumsrate bestimmt. Eine Anhebung des Ausbauziels als solchem ändert daran nichts.

Die vorliegende Untersuchung schreibt die bisherige Entwicklung fort und beantwortet damit die Frage, wohin der eingeschlagene Weg führt, solange er beibehalten wird. Ob und in welcher Weise er verlassen wird, ist eine politische und wirtschaftliche Frage. Sollen die Ausbauziele erreicht werden, verlangt dies eine Vervielfachung der jährlichen Zubauleistung um mindestens den Faktor 30 bis 230, beginnend in den nächsten Jahren.

Quellen

acatech / DECHEMA (2024): Wass*erstoff-Kompass — Elektrolyse-Monitor, Projektdatenbank.* Stand 13.05.2024. https://www.wasserstoff-kompass.de/elektrolyse-monitor

BNetzA (2025): Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: *Bedarfsermittlung 2025-2037/2045. Genehmigung des Szenariorahmens 2025-2037/2045*. Bonn, April 2025, Az. 4.14.01.01/001#2. Elektrolyseure: Tabelle 11, S. 43; Szenariopfad C: S. 42.

dena (2026): *Deutsche Energie-Agentur (dena): Elektrolysekapazitäten in Deutschland.* Stand April 2026. https://www.dena.de/infocenter/elektrolysekapazitaeten-in-deutschland/

DIHK (2026): r2b energy consulting GmbH: *Meilensteine für einen erfolgreichen Wasserstoffhochlauf bis 2040 unter Einbeziehung konkreter Handlungshindernisse und Umsetzungsperspektive aus Sicht der Unternehmen.* Studie im Auftrag der Deutschen Industrie- und Handelskammer (DIHK), Projektnummer 2025-10-1001. Köln, 26.06.2026.

EWI (2026): Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI): *Entwicklungen im Elektrolyse-Hochlauf in Deutschland*. Köln, 20. Januar 2026. https://www.ewi.uni-koeln.de/de/aktuelles/ewi-analyse-elektrolysehochlauf-in-deutschland-verlaeuft-stockend/. Pressemitteilung: https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2026/01/20260120_PM_EWI-Analyse_Elektrolysehochlauf-in-Deutschland-verlaeuft-stockend-.pdf

Löffler (2026): Markus J. Löffler: *Zeitreihen als Summe endlicher Wachstumsvorgänge. Ein Diffusionsmodell mit unvollständiger Beta-Funktion*. Westfälischen Energieinstitut, 09.08.2026, https://doi.org/10.82479/tq1m-4x63.

Anhang 1: Formenvielfalt der Beta-Funktion

Wachstums- und Ausbreitungsvorgänge verlaufen typischerweise S-förmig: Sie beginnen langsam, beschleunigen sich, und flachen zum Ende hin wieder ab, wenn der Wachstumsprozess beendet ist. Der Anteil des bereits Erreichten am erreichbaren Endzustand wird als Adoptionsgrad F bezeichnet und wächst von 0% auf 100%.

Zur Beschreibung solcher Verläufe wird seit Langem die logistische Funktion verwendet. Sie ist einfach zu handhaben und hat sich in vielen Anwendungen bewährt, von der Ausbreitung von Krankheiten über die Verbreitung technischer Neuerungen bis zum Wachstum von Populationen.

Sie kennt allerdings nur eine einzige Form. Sie steigt symmetrisch an, hat ihren Wendepunkt stets bei genau der Hälfte des Endwerts und läuft am Ende genauso aus, wie sie am Anfang eingesetzt hat. Wird sie verwendet, ist damit über den Verlauf eines Adoptionsprozesses ohne Berücksichtigung dessen tatsächlichen Verlaufs bereits alles entschieden.

Reale Vorgänge verhalten sich anders. Manche kommen zäh in Gang und enden abrupt, andere setzen sofort ein und ziehen sich am Ende lange hin. Um solche Verläufe abzubilden, braucht es eine Funktionenfamilie mit mehr als einer Form.

Genau das leistet die hier verwendete inverse regularisierte unvollständige Beta-Funktion gemäß *Löffler (2026)*. Sie besitzt, wie die Gleichungen (1) und (2) zeigen, zwei Formparameter: Die „Anlauflockerung“ a steuert das Verhalten am Anfang, die „Abschlusslockerung“ b jenes am Ende.[6] Beide lassen sich unabhängig voneinander zwischen 0.0 und 1.0 wählen.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Wirkung der beiden Parameter auf die Funktionsverläufe. Aufgetragen sind diese über der normierten Zeit τ, die den gesamten Adoptionsprozess von seinem Anfang bei $\tau = 0$ bis zu seinem Ende bei $\tau = 1$ umfasst. Alle dargestellten Verläufe beginnen und enden also am selben Punkt; unterschiedlich ist allein der Weg dazwischen.

[6] Die in *Löffler (2026)* so geprägten Bezeichnungen rühren daher, dass beide Parameter jeweils eine Bremse lösen. Bei a=0 kommt der Prozess nur zäh in Gang, weil zu Beginn kaum Adoptoren vorhanden sind, die weitere anstoßen könnten; mit wachsendem a wird diese Anlaufhemmung zunehmend aufgehoben, bis der Vorgang bei $a = 1$ sofort mit voller Rate einsetzt. Entsprechend wirkt b am anderen Ende: Bei $b = 0$ flaut der Prozess asymptotisch aus, weil der verbleibende Rest immer kleiner wird; bei b=1 entfällt diese Abschlusshemmung, und der Vorgang endet unvermittelt.

In Abbildung A.1.1 ist der Adoptionsgrad F dargestellt, in Abbildung A.1. 2 die zugehörige Zuwachsrate dF/dt. Jedes Teilbild gehört zu einem Wert von b, innerhalb der Teilbilder ist a in elf Stufen verändert; insgesamt ergeben sich 121 verschiedene Verläufe.

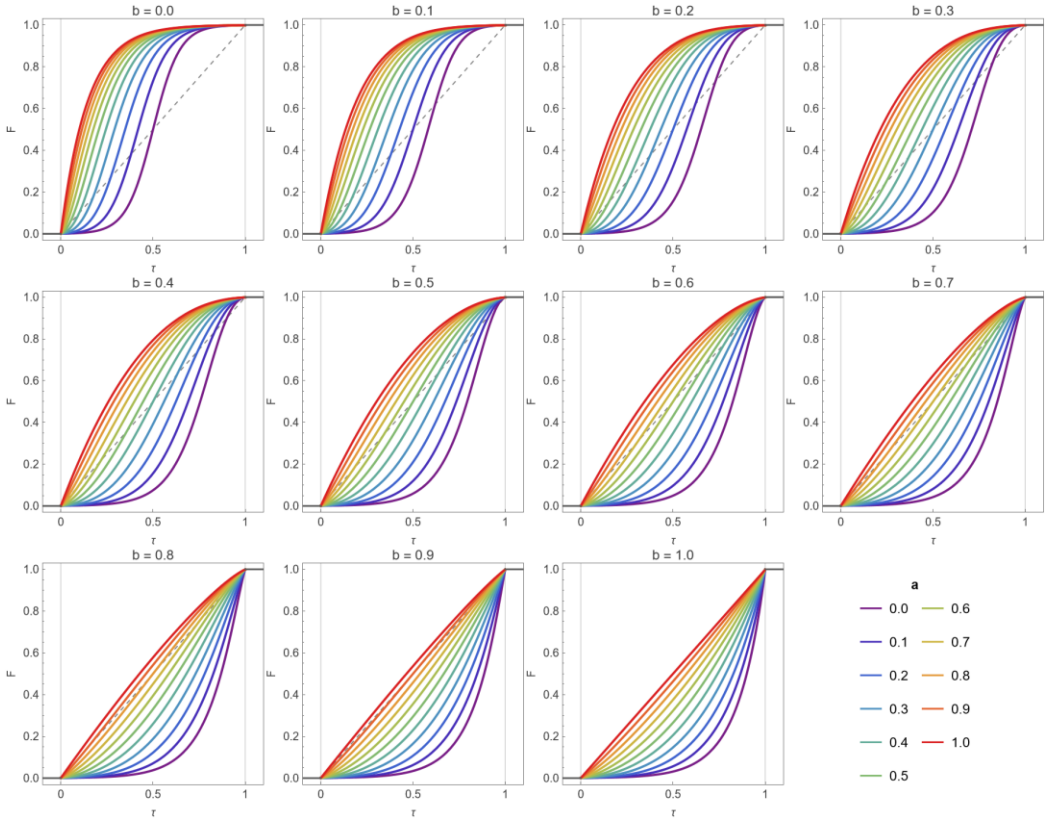


Abbildung A.1.1: Formenvielfalt des Adoptionsgrads F über der normierten Zeit τ, die den gesamten Adoptionsprozess vom Anfang ($\tau = 0$) bis zum Ende ($\tau = 1$) umfasst. Jedes Teilbild gilt für einen Wert der Abschlusslockerung b, innerhalb der Teilbilder ist die Anlauflockerung a variiert. Die klassische logistische Funktion entspricht dem einzelnen Fall $a = b = 0$ im ersten Teilbild, die gestrichelte Diagonale dem linearen Verlauf $a = b = 1$. Bild: Löffler.

Die logistische Funktion findet sich darin wieder, und zwar als ein einziger dieser 121 Fälle: im ersten Teilbild, als rechte Kurve bei $a = b = 0$. Alles andere, was die beiden Abbildungen zeigen, ist mit der einfachen logistischen Funktion nicht mehr nachbildbar.

Besonders deutlich wird das bei den Zuwachsraten in Abbildung A.1. 2. Der Zeitpunkt der höchsten Adoptionsrate wandert über den gesamten Zeitbereich, von unmittelbar nach dem Start bis kurz vor dem Ende. Und die Höhe dieser Spitze schwankt bis zu einem Faktor 7, siehe Teilbild links oben oder recht unten. Dies bei ein und derselben Gesamtdauer und ein und demselben Endzustand $F = 1$. Die logistische Funktion hingegen liefert davon nur einen Wert $(dF/dt)_{max} = 3.453$ bei $\tau_{max} = 0.5$, siehe Teilbild links oben, $a = b = 0$.

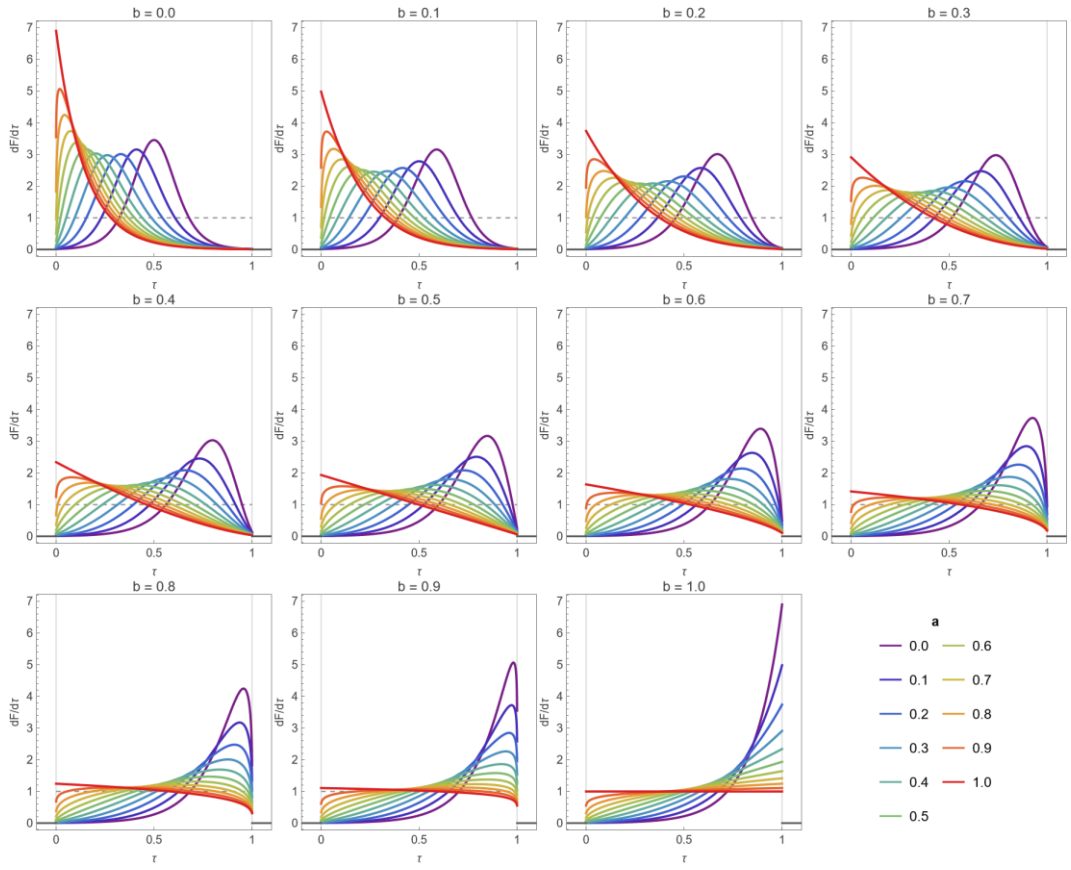


Abbildung A.1. 2: Formenvielfalt der zugehörigen Adoptionsraten $dF/d\tau$, Parameter und Normierung wie in Abbildung A.1.1. Die gestrichelte Waagerechte kennzeichnet die konstante Rate des linearen Falls. Bild: Löffler.