

Woher kommen die Zahlen auf den Karten? / Wissenschaftlicher Hintergrund

Für jede Spielzahl wurde für jede Kategorie ein passender Indikator/ein passendes Kriterium ausgewählt. Die Werte für die Indikatoren wurden recherchiert und anschließend auf die gewünschte Spielzahlen-Range gemappt.

In der Tabelle 1 sind die Indikatoren und eine Erklärung sowie die gewünschte Spielzahlen-Range angegeben. Die Formeln (1)-(10) zeigen das Mapping auf die Spielzahlen detailliert. In Tabelle 2-4 sind die recherchierten Werte samt Quelle und die Ergebnisse des Mappings zu sehen.

Indikatoren

Tabelle 1: Indikatoren für die Spielzahlen inklusive der dazugehörigen Erklärungen und des Wertebereichs der vier Spielzahlen.

Spielzahl		Energieeinheiten (E)	Geldeinheiten (G)	Ressourcen (R)	Fortschrittspunkte (F)
Range/Wertebereich der Spielzahlen		1-4	1-10	1-5	0-20
Erzeugung	Indikator	Spannungsebene; Für Wärme: Versorgung von Haushalt, Kleinstadt, Großstadt oder mehr Siehe Formel (1), (2)	LCOE multipliziert mit Energieeinheiten; Wärme: LCOH multipliziert mit Energieeinheiten Siehe Formel (3), (4)	Je Energieeinheiten: 1 R, Nicht-erneuerbar: +1 R	Emissionsvermeidungsfaktor und Energieeinheiten Siehe Formel (7) Für Systempunkte siehe Formel (9) und (10)
	Erklärung	Kraftwerke mit höherer Leistung speisen auf höherer Spannungsebene ins Netz ein	LCOE/H: Levelized cost of electricity/heat, also Kosten pro Energie; wird deshalb noch mit Energieeinheiten multipliziert	Kraftwerke mit höherer Leistung sind tendenziell größer, brauchen also mehr Ressourcen für die Errichtung; nicht erneuerbare Technologien brauchen fortlaufend Ressourcen, während erneuerbare diese nur einmal zu Beginn brauchen	Emissionsvermeidungsfaktoren geben an, wie viele Emissionen pro Energie vermieden werden im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken. Es wird also noch mit den Energieeinheiten multipliziert.
Verteilung	Indikator	Spannungsebene; Für Wärme: Versorgung von Haushalt, Kleinstadt, Großstadt oder mehr Siehe Formel (1), (2)	Preis pro km siehe Formel (5)	Lebensdauer: <50 Jahre: 3 R >50 Jahre: 2 R	-
	Erklärung	Leitungen höherer Spannungsebene können mehr Leistung transportieren und verteilen.	Da dieser Preis nicht pro Energie angegeben ist, wird er nicht mit den Energieeinheiten multipliziert; Die Preise werden pro km verwendet, da diese einfach auffindbar sind und so weniger Annahmen getroffen werden müssen	Je länger die Lebensdauer, desto seltener muss die Infrastruktur erneuert werden. Damit werden weniger Ressourcen benötigt. Auch dieser Wert ist bereits unabhängig von Energie und gibt die Ressourcen pro km an.	Ein stabiles Energienetz ist eine Grundvoraussetzung für das Energiesystem, vermeidet aber keine Emissionen.
Speicherung	Indikator	Spannungsebene; Für Wärme: Versorgung von Haushalt, Kleinstadt, Großstadt oder mehr Siehe Formel (1), (2)	LCOS multipliziert mit Energieeinheiten Siehe Formel (6)	Räumliche Größe: Speicher passt in... ... Raum: 1 R ... Haus: 2 R ... Halle: 3 R ... nichts davon: 4 R	Effizienz und Energieeinheiten siehe Formel (8) Für Systempunkte siehe Formel (10)
	Erklärung	Speicher mit höherer Leistung speisen auf höherer Spannungsebene ins Netz ein	LCOS: Levelized cost of storage, also Kosten pro Energie; wird deshalb noch mit Energieeinheiten multipliziert	Je größer ein Speicher im räumlichen Sinne ist, desto mehr Ressourcen werden für die Herstellung benötigt	Effiziente Speicher helfen dabei mehr Strom aus volatilen erneuerbaren Energien nutzen zu können. Dies vermeidet Emissionen.

Formeln zur Berechnung der Zahlenwerte:

Energieeinheiten:

- Niederspannung: 1 E, Mittelspannung: 2 E, Hochspannung: 3 E, Höchstspannung: 4 E (1)
- Versorgung von Haushalt: 1 E, von Kleinstadt: 2 E, von Großstadt: 3 E, von mehr: 4 E (2)

Geldeinheiten

- $G = \text{Abrunden}(2 * \sqrt{(\text{Energieeinheiten}^2 * \text{LCOE}/100)})$ (3)
- $G = \text{Abrunden}(2 * \sqrt{(\text{Energieeinheiten}^2 * \text{LCOH}/100)})$ (4)
- $G = \text{Min}(\text{Abrunden}(2 * \text{Kosten}), 10)$; Kosten in Mio €/km (5)
- $G = \text{Min}(\text{Abrunden}(2 * \sqrt{(\text{Energieeinheiten}^2 * \text{LCOS} * 20)}), 10)$ (6)

Fortschrittspunkte:

- $F = \text{Aufrunden}(\text{Energieeinheiten} * \sqrt{(\text{Emissionsvermeidungsfaktoren})} * 10)$ (7)
- $F = \text{Aufrunden}(\sqrt{(\text{Energieeinheiten}^2 * \text{Effizienz} * 2)})$ (8)
 - o Effizienzskala: 20 – 40%: 1, 40 – 60%: 2, 60 – 80%: 3, 80 – 100%: 4

Systempunkte:

- Falls es sich um eine Wärmetechnologie handelt, die Strom benötigt, also Strommix den größten Anteil am CO2-Vermeidungsfaktor ausmacht:
 - o $F2 = F * 5/2 + 1$ (9)
- Ansonsten:
 - o $F2 = F * 5/3 + 1$ (10)

Recherchewerte Erzeugung:

Tabelle 2: Recherchewerte, Quellen und Spielzahlen der Kategorie Erzeugung.

Name	LCOE €/MWh	Quelle	Erneuerbar	Spannungsebenen	Emissions- vermeidungs- faktor	Strommix größter Anteil an CO2 Faktor	Quelle	Kosten	Ressourcen	Energie einheiten	Basis Fortschritts- punkte	System Fortschritts- punkte
Kohlekraftwerk	100	[1]	Nein	Höchstspannung	0	nein	[8]	8	5	4	0	1
Photovoltaik auf dem Dach	90	[1]	Ja	Niederspannung	689.56	nein	[8]	1	1	1	2	5
Balkon-Photovoltaik	91	[2]	Ja	Niederspannung	689.56	nein	[8]	1	1	1	2	5
Solarthermie-Anlage auf Dach	86	[3]	Ja	Niederspannung	272.16	nein	[8]	1	1	1	1	3
Ölheizung	110	[4]	Nein	Niederspannung	0	nein	[8]	2	2	1	0	1
Erdwärmeheizung	200	[5]	Ja	Niederspannung	201.24	ja	[8]	2	1	1	1	4
Kleiner Windpark	35	[1]	Ja	Mittelspannung	758.05	nein	[8]	2	2	2	5	10
Großer Photovoltaik-Park	55	[1]	Ja	Mittelspannung	689.56	nein	[8]	2	2	2	5	10
Gaskraftwerk	110	[1]	Nein	Hochspannung	380	nein	geschätzt	6	4	3	6	11
Großer Windpark	35	[1]	Ja	Hochspannung	758.05	nein	[8]	3	3	3	8	15
Geothermieheizwerk	150	[1]	Ja	Mittelspannung	482.27	ja	[8]	4	2	2	4	11
Atomkraftwerk	180	[6]	Nein	Höchstspannung	600	nein	geschätzt	10	5	4	10	18
Laufwasserkraftwerk	52	[6]	Ja	Hochspannung	808	nein	[8]	4	3	3	9	16
Offshore Windpark	80	[1]	Ja	Höchstspannung	771.32	nein	[8]	7	4	4	11	20
Luft-Wärmepumpe	200	[5]	Ja	Niederspannung	190.33	ja	[8]	2	1	1	1	4
Eisenkraftwerk	139	[7]	Ja	Höchstspannung	600	nein	geschätzt	9	4	4	10	18

Recherchewerte Verteilung:

Tabelle 3: Recherchewerte, Quellen und Spielzahlen der Kategorie Verteilung.

Name	Kosten [Mio €/km]	Quelle	Lebens- dauer [Jahre]	Quelle	Spannungsebene	Kosten	Ressour- cen	Energie- einheiten
Erdkabel für kommunale Verteilung	0.08	[9], S.91	40-50	[12]	Niederspannung	1	3	1
Erdkabel für regionale Verteilung	0.13	[9], S.91	40-50	[12]	Mittelspannung	1	3	2
Freileitungen für überregionale Verteilung	0.52	[9], S.91	80	[12]	Hochspannung	2	2	3
Erdkabel für Stromübertragung auf weiten Strecken	11.5	[10]	40-50	[12]	Höchstspannung	10	3	4
oberirdische alternative zu Südlink: HGÜ Freileitung	2	[10]	80	[12]	Höchstspannung	4	2	4
Südlink: HGÜ Erdleitung	6.5	[10]	40-50	[12]	Höchstspannung	10	3	4
Nahwärmenetz	2	[11]	60	[13]	Niederspannung	4	2	1
Fernwärmenetz	3.5	[11]	60	[13]	Mittelspannung	7	2	2

Recherchewerte Speicherung:

Tabelle 4: Recherchewerte, Quellen und Spielzahlen der Kategorie Speicherung.

Name	LCOS [€/kWh]	Quelle	Spannungsebene	Räuml. Größe	Wirkung sgrad %	Wirkungsg rad Skala	Quelle	Kosten	Ressour- cen	Energie- einheiten	Basis Fortschritts- punkte	System Fortschritts- punkte
E-Autos als Speicher	0.17	[14]	Niederspannung	Raum	95	4	[23]	1	1	1	4	6
Wärmespeicher	0.15	[15]	Hochspannung	Größer	98	4	[21]	5	4	3	12	20
Batteriespeicher im Haus	0.33	[16]	Niederspannung	Raum	95	4	[23]	2	1	1	4	6
Wasserstoffspeicher	0.42	[17]	Hochspannung	Halle	40	1	[22]	8	3	3	6	10
Großer Wasserstoffspeicher	0.42	[17]	Höchstspannung	Größer	40	1	[22]	10	4	4	8	13
Schwungradspeicher	0.16	[18]	Mittelspannung	Halle	95	4	[23]	3	3	2	8	13
Fernwärmespeicher	0.14	[19]	Mittelspannung	Größer	98	4	[21]	3	4	2	8	13
Lithium-Ionen-Batterie Park	0.34	[14]	Hochspannung	Halle	95	4	[23]	7	3	3	12	20
Natrium-Ionen-Batterie Park	0.32	[20]	Hochspannung	Halle	95	4	[24]	7	3	3	12	20
Bleiakkumulator	0.21	[14]	Niederspannung	Haus	90	4	[25]	2	2	1	4	6
Redox-Flow-Batterie	0.38	[14]	Hochspannung	Halle	80	3	[23]	8	3	3	11	18
Pumpspeicherkraftwerk	0.11	[14]	Hochspannung	Größer	85	3	[23]	4	4	3	11	18
Methanspeicher	0.31	[14]	Höchstspannung	Größer	40	1	[22]	9	4	4	8	13
Ammoniakspeicher	0.58	[17]	Hochspannung	Halle	40	1	[22]	10	3	3	6	10
Druckluftspeicher	0.125	[14]	Höchstspannung	Größer	65	2	[26]	6	4	4	12	20

Quellenverzeichnis

Quellen Erzeugung

- [1]
M. Ram, M. Child, A. Aghahosseini, D. Bogdanov, A. Lohrmann, und C. Breyer, „A comparative analysis of electricity generation costs from renewable, fossil fuel and nuclear sources in G20 countries for the period 2015-2030“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 199, S. 687–704, Okt. 2018, doi: [10.1016/j.jclepro.2018.07.159](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.159).
- [2]
„Balkon-Photovoltaik in der Mietwohnung?“, www.kek-karlsruhe.de. Zugegriffen: 11. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kek-karlsruhe.de/mieter-innen/checks-und-wissenswertes/balkon-photovoltaik/>
- [3]
„Solrthermie: Preise, Kosten & Amortisation“. Zugegriffen: 11. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/solarthermie/solarthermie-preise-kosten-amortisation/>
- [4]
„Heating Oil Prices & Alternatives | EDF“. Zugegriffen: 11. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.edfenergy.com/heating/advice/heating-oil-prices-why-pay-more>
- [5]
EWI, Zieltechnologien der Wärmewende“, 2023. Verfügbar unter https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2023/10/Endbericht_Zieltechnologien-1.pdf
- [6]
Lazard, „Präsentation: LCOE“. Zugegriffen: 11. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lazard.com/media/20zoovyg/lazards-lcoeplus-april-2023.pdf>

E. Jansen, J. Schuler, A. Ardone, V. Slednev, W. Fichtner, und M. E. Pfetsch, „Global Logistics of an Iron-based Energy Network: A Case Study of Retrofitting German Coal Power Plants“. Zugegriffen: 7. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000158253> [7]

T. Lauf, M. Memmler, und S. Schneider, „Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger 2023“, 2025, Zugegriffen: 7. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://openumwelt.de/handle/123456789/10598> [8]

Quellen Verteilung

C. Rehtanz, „Verteilnetzstudie für das Land Baden-Württemberg“, Apr. 2017, [Online]. Verfügbar unter: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Versorgungssicherheit/170413_Verteilnetzstudie_BW.pdf [9]

„Netzentwicklungsplan 2035 (2021) | Netzentwicklungsplan“.Feb. 2022, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.netzentwicklungsplan.de/archiv/netzentwicklungsplan-2035-2021> [10]

L. Sánchez-García, H. Averfalk, E. Möllerström, und U. Persson, „Understanding effective width for district heating“, *Energy*, Bd. 277, S. 127427, Aug. 2023, doi: [10.1016/j.energy.2023.127427](https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127427). [11]

„Netztechnologien“. Zugegriffen: 7. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.swissgrid.ch/de/home/operation/power-grid/technologies.html> [12]

„Drohende Ölpest im Roten Meer: Die heikle Bergung des Pannen-Tankers“. Zugegriffen: 7. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.focus.de/earth/report/oeltanker-im-roten-meer-die-heikle-bergung-der-tickenden-zeitbombe-bei-50-grad-celsius_id_200099812.html [13]

Quellen Speicherung

- [14]
V. Jülch, „Comparison of electricity storage options using levelized cost of storage (LCOS) method“, *Applied Energy*, Bd. 183, S. 1594–1606, Dez. 2016, doi: [10.1016/j.apenergy.2016.08.165](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.165).
- [15]
„Techno-Economic Analysis of a Seasonal Thermal Energy Storage System with 3-Dimensional Horizontally Directed Boreholes“. Zugegriffen: 7. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2673-7264/2/4/30>
- [16]
J. Figgenger u. a., „The development of stationary battery storage systems in Germany – status 2020“, *Journal of Energy Storage*, Bd. 33, S. 101982, Jan. 2021, doi: [10.1016/j.est.2020.101982](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101982).
- [17]
DNV, „Securing Green Hydrogen for the German Power Sector“. Zugegriffen: 7. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://cdn.prod.website-files.com/68af390701127aba100886f2/68c02f49d2ce8534a1f89cb4_DNV-Securing-Green-Hydrogen-for-the-German-Power-Sector_final-report.pdf
- [18]
M. M. Rahman, E. Gemechu, A. O. Oni, und A. Kumar, „The development of a techno-economic model for the assessment of the cost of flywheel energy storage systems for utility-scale stationary applications“, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Bd. 47, S. 101382, Okt. 2021, doi: [10.1016/j.seta.2021.101382](https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101382).
- [19]
A. Dahash, F. Giordano, und A. Serageldin, „Enhancing Efficiency and Feasibility of Large-Scale Thermal Energy Storage In District Heating“, gehalten auf der BauSim Conference 2024, Sep. 2024. doi: [10.26868/29761662.2024.18](https://doi.org/10.26868/29761662.2024.18).
- [20]
S. Hameer und J. Van Niekerk, „A Novel Methodology for Comparing Thermal Energy Storage to Chemical and Mechanical Energy Storage Technologies of

[21]

M. Weigold, „Bewertung der thermischen Energiespeicher (Latentwärmespeicher) als eine Komponente industrieller Abwärmenutzung FuE-Bedarf, Marktpotentiale, Hemmnisse und Empfehlungen - ein Statuspapier -“. Zugegriffen: 7. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://irees.de/wp-content/uploads/2021/02/Status-Bericht-LWS_IREES-Final-002.pdf

[22]

A. Escamilla, D. Sánchez, und L. García-Rodríguez, „Assessment of power-to-power renewable energy storage based on the smart integration of hydrogen and micro gas turbine technologies“, *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 47, Nr. 40, S. 17505–17525, Mai 2022, doi: [10.1016/j.ijhydene.2022.03.238](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.238).

[23]

World Energy Council, „Five steps to energy storage“. Zugegriffen: 7. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Five_steps_to_energy_storage_v301.pdf

[24]

P. Voß u. a., „Benchmarking state-of-the-art sodium-ion battery cells – modeling energy density and carbon footprint at the gigafactory-scale“, *Energy Environ. Sci.*, Bd. 18, Nr. 17, S. 8104–8129, Aug. 2025, doi: [10.1039/D5EE00415B](https://doi.org/10.1039/D5EE00415B).

[25]

K. M. G. Leinfelden-Echterdingen, „Akkumulator (Elektrotechnik) aus dem Lexikon | wissen.de“. Zugegriffen: 7. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wissen.de/lexikon/akkumulator-elektrotechnik>

[26]

„Energiespeicher | Druckluftspeicher sind für Energiewende unwirtschaftlich | springerprofessional.de“. Zugegriffen: 7. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/energiespeicher/energie/druckluftspeicher-sind-fuer-energiewende-unwirtschaftlich/12275312>