



Quelle:

<https://pixabay.com/de/illustrations/erneuerbare-energie-umweltfreundlich-7143345/>

Abschlusspräsentation:

Systemsimulation von Speichern für Dunkelflauten in Deutschland

Gliederung

1. Motivation
2. Literatur-Recherche
3. Leitfragen
4. Simulationsaufbau
5. Simulationsergebnisse
6. Fazit

Klimawandel und dessen Folgen

- Extremere Wetterphänomene, wie z.B. Hitzephasen, Starkregenfälle
- Erhöhte Gefahr von Vertrocknung, Erdbeben oder Überflutungen



Studien zur Klimaneutralität Deutschlands

Betrachtete Studien	Energiebedarf / Beschreibung
V. Quaschnig (2016) – Sektorkopplung durch Energiewende	<ul style="list-style-type: none"> • 100 % E-Mobilität • Verbot fossiler Rohstoffe • prog. Energiebedarf (2040): 1.320 TWh
Fraunhofer ISE (2021) – Wege zu einem klima- neutralen Energiesystem	<ul style="list-style-type: none"> • Einfluss gesellschaftl. Trends • „Verbrenner“ Verbot im Verkehrssektor • prog. Energiebedarf (2040): 2.006 TWh
Wuppertaler Institut (2020) – CO2-neutral bis 2035	<ul style="list-style-type: none"> • Keine eigenen Analysen • Detaillierte Darstellung aktueller Energieverbräuche • CO2-neutral bis 2035: extrem anspruchsvoll, aber möglich
Solarförderverein (2023) – 100 % EE bis spätestens 2030	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigung von Verbräuchen für „nicht-energetische Zwecke“ • Referenzenergiebedarf (2016-18): 3.717 TWh (davon Strom: 500 TWh) • Dokumentation angenommener Einsparpotenziale • prog. Energiebedarf (2030): 1.911 TWh plus 150 TWh Reservekapazität

Leitfragen

- Wie hoch wird der zu erwartende Energiebedarf eines klimaneutralen Deutschlands sein?
- Wie viel installierte Leistung für Erneuerbare Erzeugeranlagen ist zu erwarten?
- Welche Speichertechnologien sind nötig und in welcher Größenordnung?
- Wie hoch sind die zu erwartenden Kosten für diese Energiewende?

Annahmen & Vorbereitung

- Nutzen von Pypsa-Network um Energiesystem abzubilden & zu optimieren
- Betrachtungszeitraum: 2019 – 2021 (Wetter- & EE-Erzeugungsdaten)
- Installierte Leistung und Kapazität (Stand: Mai 2023) [6]
 - 72,77 GW (PV) ; 59,04 GW (onshore) ; 8,38 GW (offshore) ; 4,94 GW (hydro)
 - Pumpspeicher: 6,79 GW ; 40,74 GWh
 - Batterien: 5,87 GW ; 8,67 GWh
- Referenzenergieverbrauch (Jahr: 2019) [7]
 - Referenzenergiebedarf: 3.557 TWh (primär) ; davon Strom: 500 TWh
- Erstellen, Bearbeiten und Skalieren von normierten Standardprofilen
[6][8][9]

```

Concurrent LP optimizer: primal simplex, dual simplex, and barrier
Showing barrier log only...

Ordering time: 0.20s

Barrier statistics:
Dense cols : 42
AA' NZ : 1.850e+06
Factor NZ : 1.000e+07 (roughly 500 MB of
Factor Ops : 3.449e+08 (less than 1 second)
Threads : 4

Iter   Objective
      Primal      Dual      Pr
0      6.59423253e+14 -1.10157567e+17 5.8
1      7.417784e+14  -8.25121585e+15 1.6
2      7.720793e+14  -8.25121585e+15 1.6
3      9.699594e+14  -8.25121585e+15 1.6
4      9.740678e+14  -8.25121585e+15 1.6
5      9.213901e+14  -8.25121585e+15 1.6
6      8.2906313e+14  -8.25121585e+15 1.6
7      6.851242e+14  -8.25121585e+15 1.6
8      4.698775e+14  -8.25121585e+15 1.6
9      3.795201e+14  -8.25121585e+15 1.6
10     2.897802e+14  -8.25121585e+15 1.6
11     2.556261e+14  -8.25121585e+15 1.6
12     1.711307e+14  -8.25121585e+15 1.6
13     1.143391e+14  -8.25121585e+15 1.6
14     5.572789e+13  -8.25121585e+15 1.6
15     1.916755e+13  -8.25121585e+15 1.6
16     8.099376e+12  -8.25121585e+15 1.6
17     3.450790e+12  -8.25121585e+15 1.6
18     2.322108e+12  -1.25177899e+12 1.6
19     1.39408638e+12 -7.57842121e+11 5.8
20     4.79224371e+11 -2.11851347e+11 1.6
21     1.28012871e+11 -9.17697428e+10 3.6

INFO:linopy.constants: Optimization successful:
Status: ok
Termination condition: optimal
Solution: 657062 primals, 1384169 duals
Objective: 4.65e+08
Solver model: available
Solver message: 2

INFO:pyosa.io:Exported network
    
```

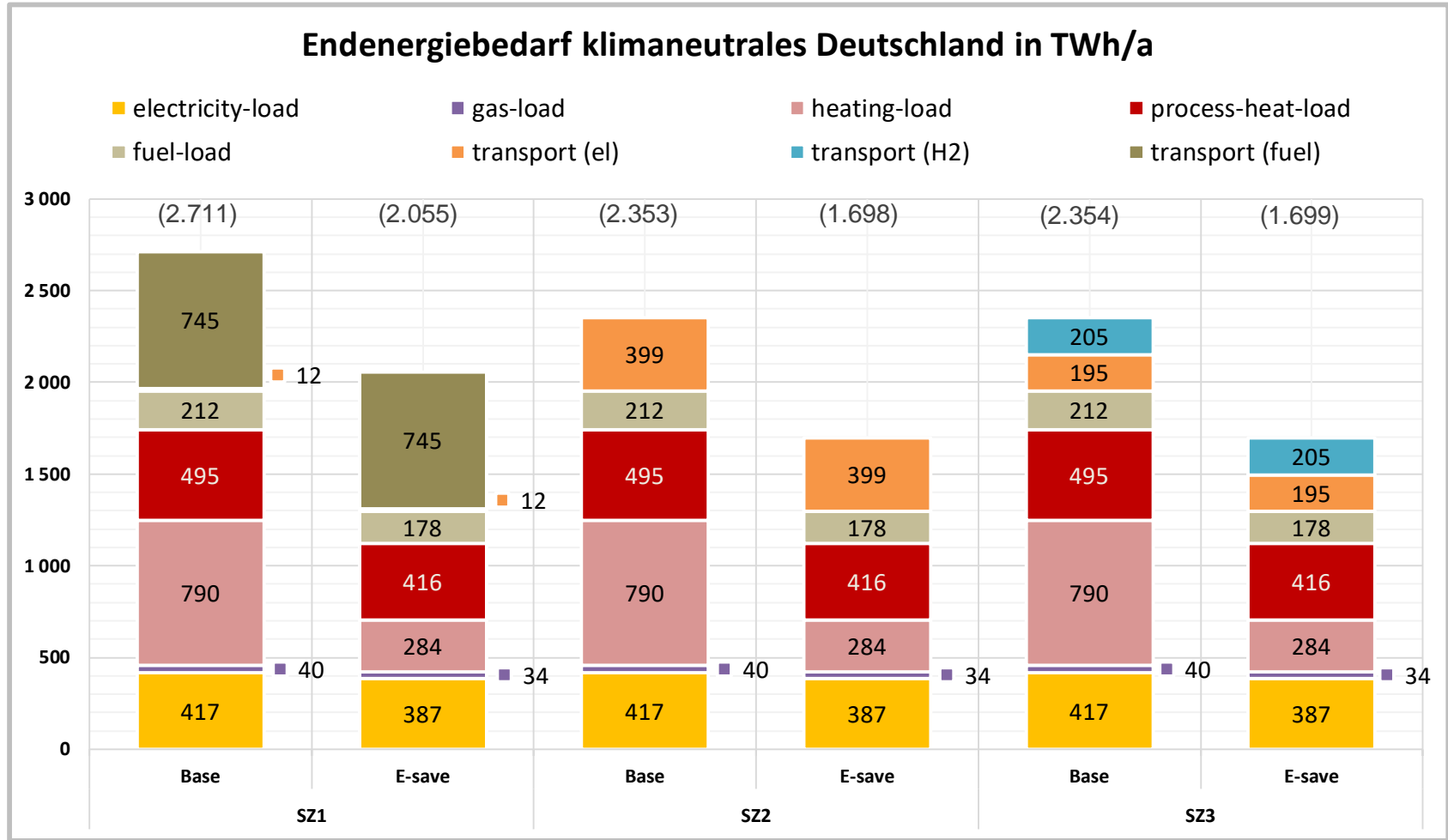
Simulationsergebnisse

Szenario 1: „Verkehr wie heute“

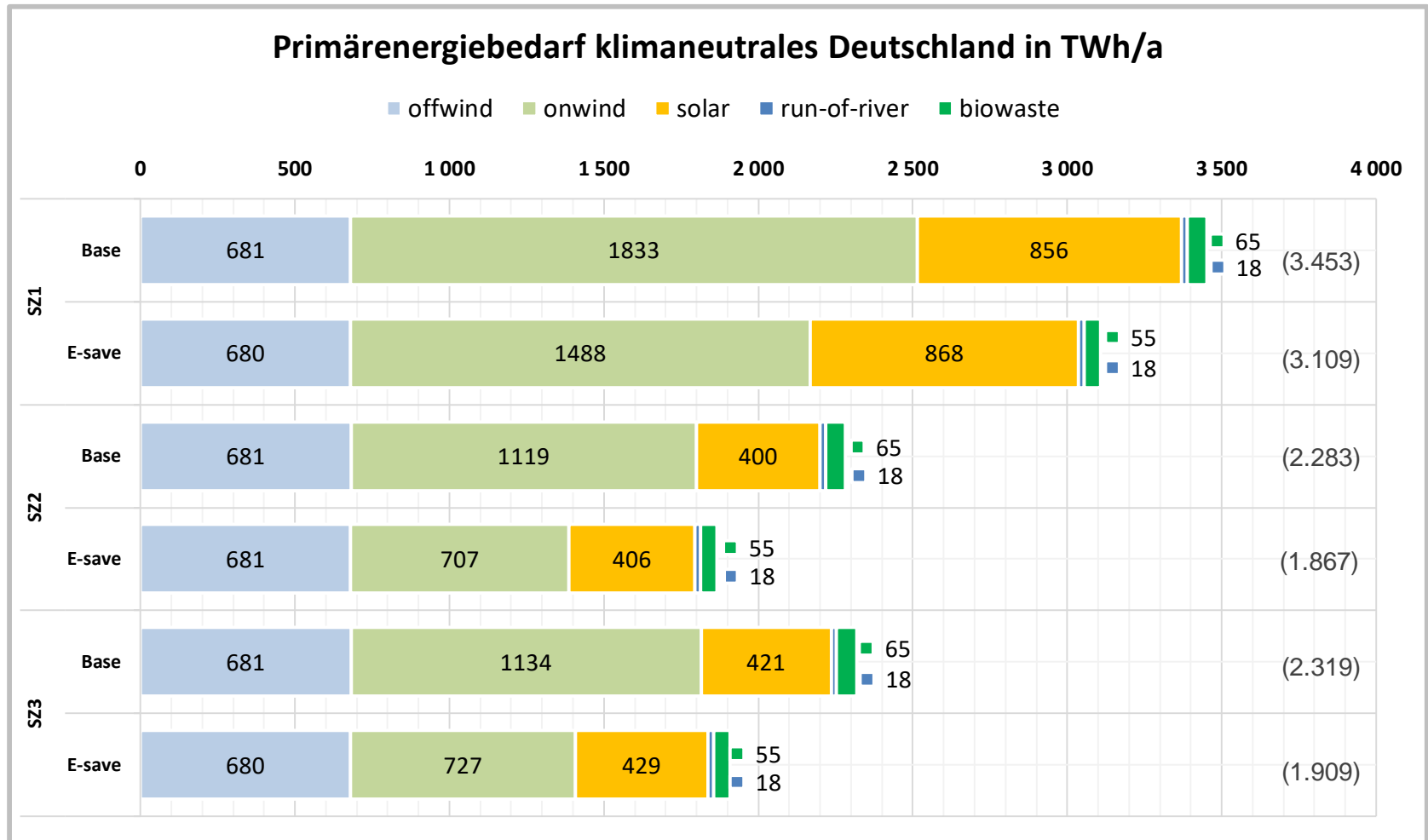
Szenario 2: „Verkehr voll elektrisch“

Szenario 3: „Verkehr mit Strom und H2“

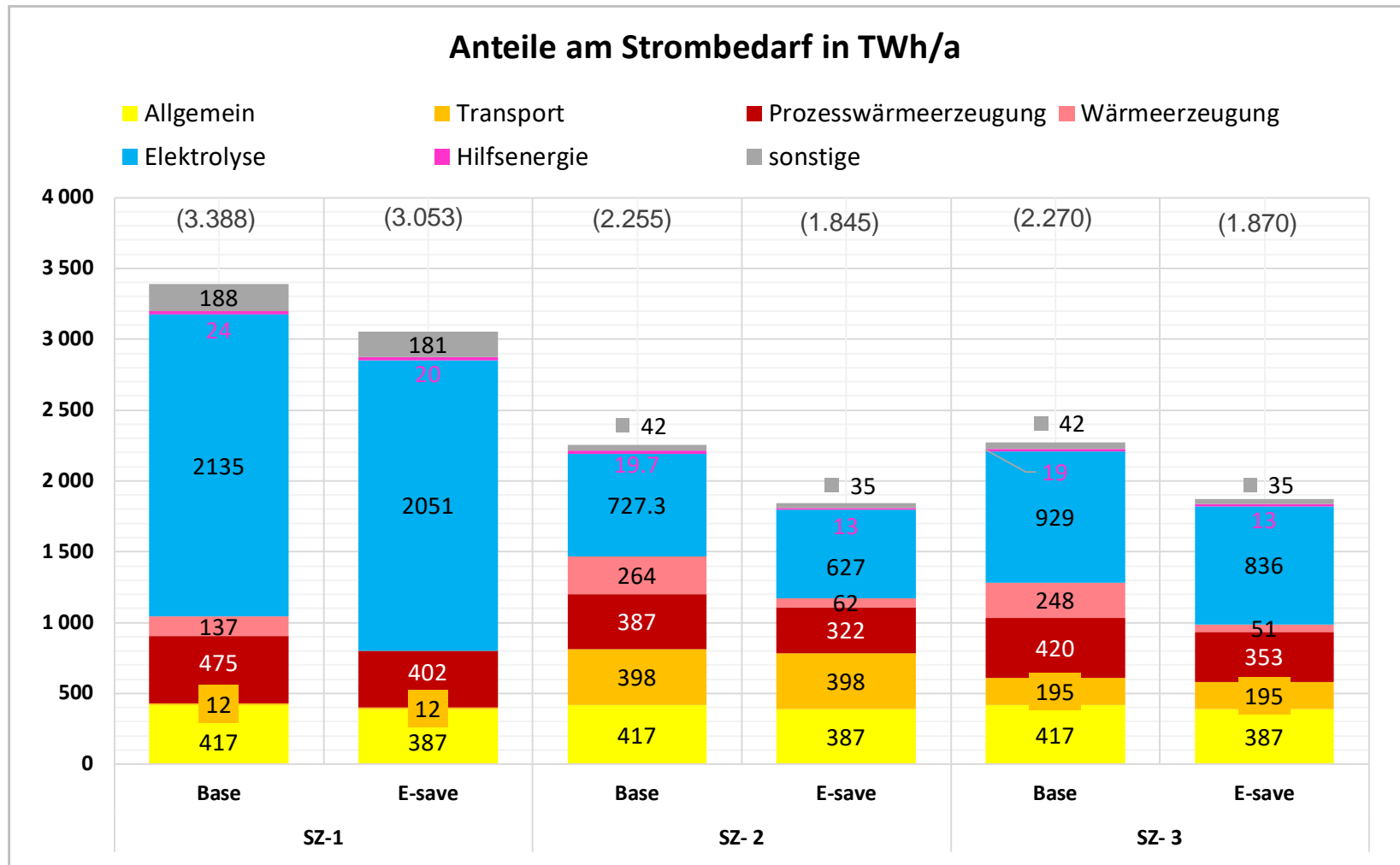
Prognostizierter Endenergiebedarf



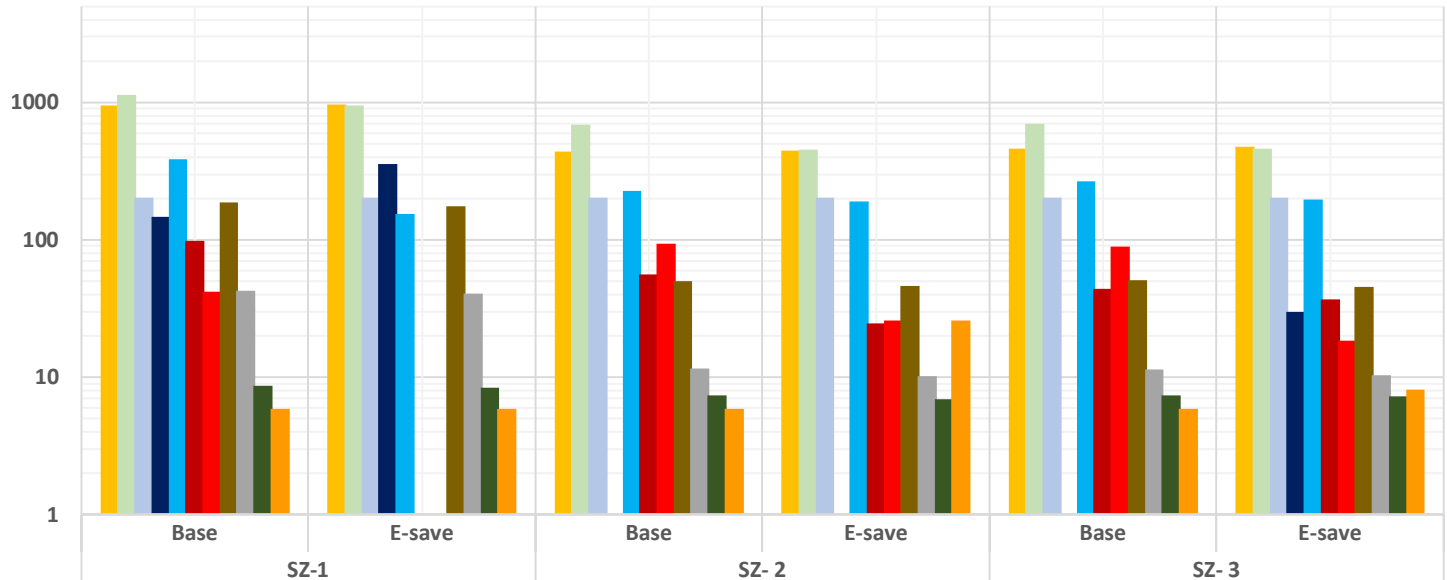
Prognostizierter Primärenergiebedarf



Prognostizierte Stromnutzung nach Anwendungsgebieten

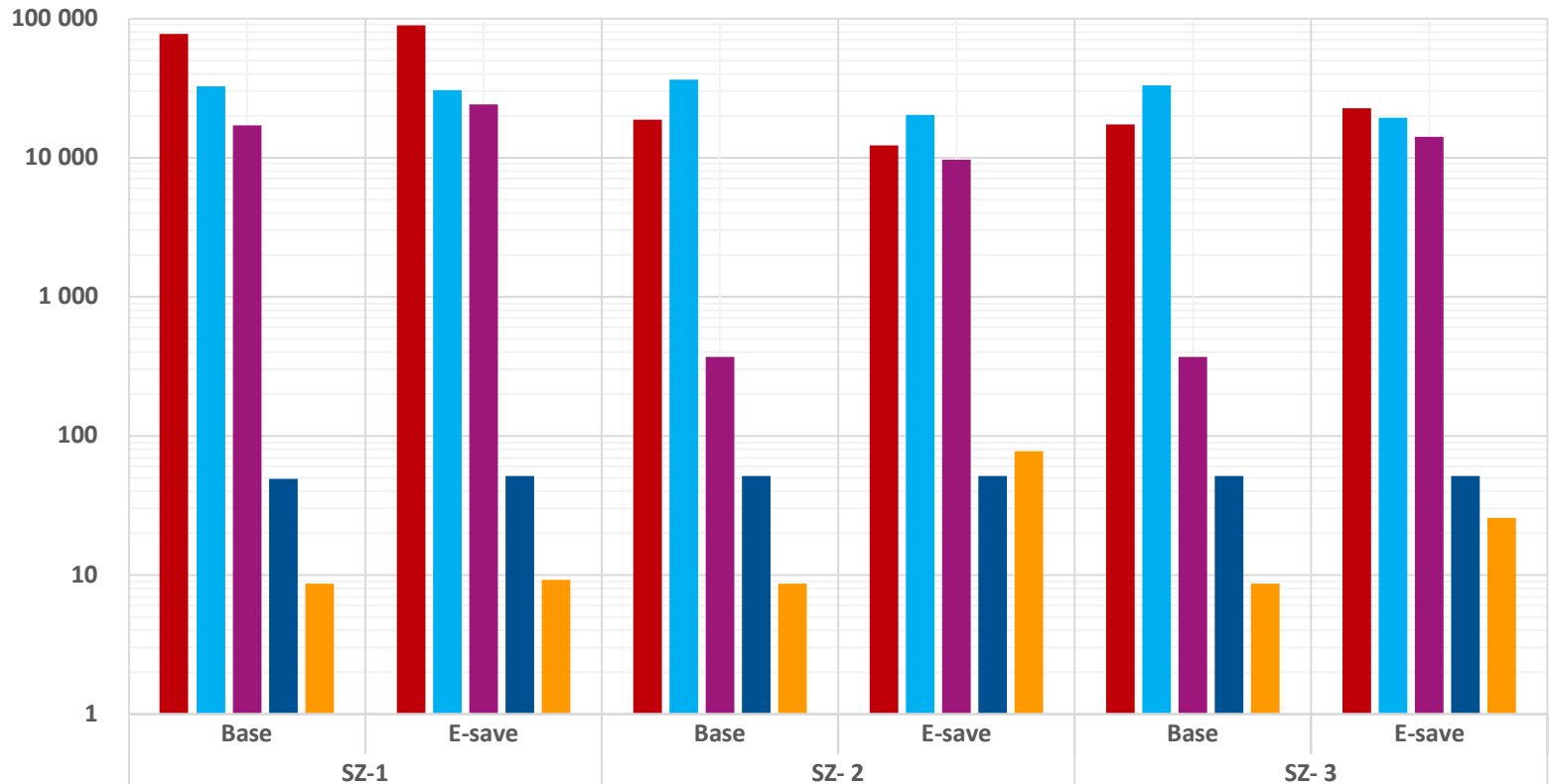


Zu installierende Leistungen in GW



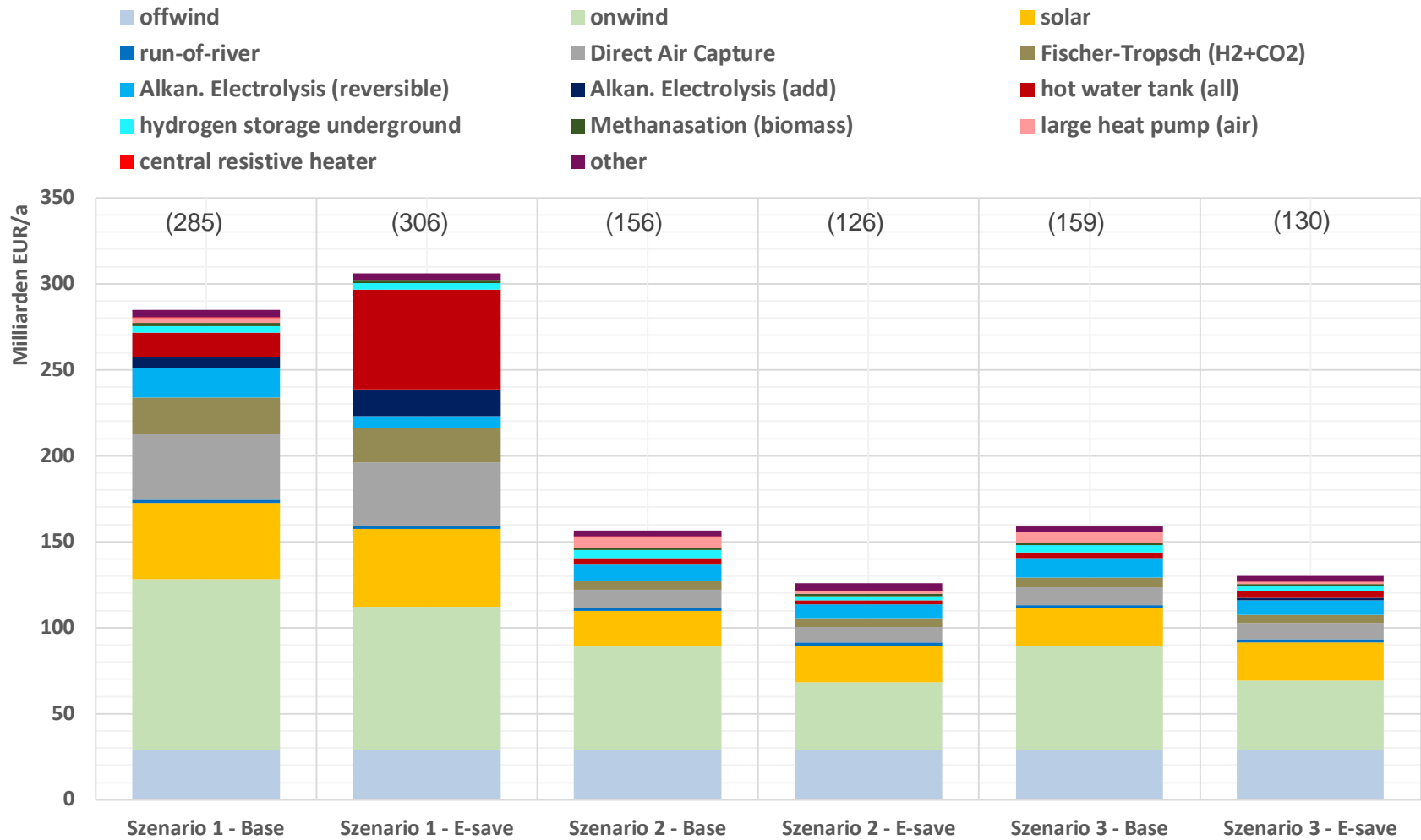
	SZ-1		SZ- 2		SZ- 3	
	Base	E-save	Base	E-save	Base	E-save
Solar	944	958	441	448	464	473
Onwind	1 137	955	687	452	694	463
Offwind	203	203	203	203	203	203
Alkal. Electrolysis (add)	147.38	358.4	0	0	0	29.7
Alkal. Electrolysis (reversible)	385.5	155.3	226.7	189.6	266.2	197.2
Resistive Heater	98.9	0	55.6	24.8	44.1	36.8
Heat Pump (air)	42	0	94.2	25.8	89.2	18.5
Fischer-Tropsch (H2+CO2)	186.7	175.5	50.2	46	50.6	45.1
Direct Air Capture	42.3	40.4	11.53	10.23	11.34	10.26
Methanasation (biomass)	8.65	8.4	7.4	6.9	7.4	7.26
Li-Ion Battery	5.87	5.87	5.87	25.82	5.87	8.06

Zu installierende Speicherkapazität in GWh



■ Hot-Water-Storage	77 000	89 690	18 600	12 300	17 200	22 500
■ H2-underground	32 700	30 500	36 100	20 200	33 200	19 400
■ Gas-underground	16 930	23 990	370	9 720	370	14 030
■ Pumped Hydro Store	48.89	51.60	51.60	51.60	51.60	51.60
■ Li-Ion Battery	8.67	9.21	8.67	78.12	8.67	25.55

Aufteilung der Gesamtsystemkosten in Mrd.€/a



Zusammenfassung

- *Eine unterbrechungsfreie, klimaneutrale Energieversorgung aller Sektoren in Deutschland ist möglich und wird fast ausschließlich durch Strom gestützt.*
- *Der Wärmesektor (Heizen+WW) bietet große Einsparpotenziale (10 bis 20 %)*
- *Der prognostizierte Primärenergiebedarf von 3.453 TWh/a lässt sich durch zunehmende Elektrifizierung des Verkehr-Sektors um bis zu ~1/3 senken.*
- *Die zu installierenden Leistungen von PV- und Windkraftanlagen reduzieren sich dadurch um bis zu 50 %.*
- *Im Vergleich zur heutigen Gasspeicherkapazität (~250 TWh) werden in Zukunft nur maximal 10 % (für Gas) bzw. 15 % (für H₂) dieser benötigt.*
- *Durch zunehmende Elektrifizierung des Verkehr-Sektors lassen sich die jährlichen Gesamtsystemkosten annähernd halbieren.*

Schlusswort

The diagram features three square icons at the top, each with a source attribution. The left icon shows an orange car at a gas station with the text "[Quelle: galileo.tv]". The middle icon shows a green car with a charging plug symbol and the text "[Quelle: galileo.tv]". The right icon shows a blue car with the chemical formula H_2 and the text "[Quelle: galileo.tv]". A large white arrow points upwards from the center of these three icons towards a central text box. The text box has a green border and contains pink text. At the bottom right of the text box, there is a source attribution "[Quelle: pxhere.com]".

Diese Arbeit gibt uns verschiedene Richtungen und Richtwerte für ein anzustrebendes Ziel innerhalb der Energiewende. Es liegt nun an allen uns auf eine Spur zu einigen, den Weg gemeinsam zu beschreiten und das übergeordnete Ziel der Klimaneutralität schnellstmöglich zu erreichen.

Quellenverzeichnis

- [1] V. Quaschnig, "Sektorkopplung durch die Energiewende," Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin, Jun. 2016. Accessed: Sep. 7 2023. [Online]. Available: <https://www.volker-quaschnig.de/publis/studien/sektorkopplung/index.php>
- [2] J. Brandes, M. Haun, D. Wrede, P. Jürgens, C. Kost, and H.-M. Henning, "WEGE ZU EINEM KLIMANEUTRALEN ENERGIESYSTEM: Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen," Update November 2021: Klimaneutralität 2045, Freiburg, Nov. 2021. Accessed: Sep. 7 2023. [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zueinem-klimaneutralen-energiesystem.html>
- [3] G. Kobiela et al., "CO2-neutral bis 2035 : Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze ; Diskussionsbeitrag für Fridays for Future Deutschland," 2020. [Online]. Available: <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/924/>
- [4] Prognos AG; Öko-Institut e.V.; Wuppertaler-Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, "Klimaneutrales Deutschland 2045: Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann," Jun. 2021. Accessed: Sep. 7 2023. [Online]. Available: <https://www.agora-energiewende.de>
- [5] U. Böke, "100% EE bis spätestens 2030: Präsentation und Bericht bei Runden Tisch Erneuerbarer Energien," Mar. 2021. [Online]. Available: <https://energiewende-2030.de/themen>
- [6] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Energy-Charts. [Online]. Available: <https://energycharts.info/index.html?l=de&c=DE>
- [7] AG Energiebilanzen e. V., Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2021. [Online]. Available: <https://agenergiebilanzen.de/daten-und-fakten/auswertungstabellen/> (accessed: Jun. 21 2023).
- [8] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., Normalized Industrial Electrical Load Profiles (Germany). [Online]. Available: <https://opendata.ffe.de/dataset/normalizedindustrial-electrical-load-profiles-germany/> (accessed: Jul. 31 2023).
- [9] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Standardlastprofile Strom. [Online]. Available: <https://www.bdew.de/energie/standardlastprofilestrom/> (accessed: Jul. 31 2023).

Danke für Ihre
Aufmerksamkeit