



**Vergleich der Wirtschaftlichkeit und der Ökobilanzen zwischen einem Elektroauto und einem Verbrenner der gleichen Kategorie und Untersuchung der Eignung von degradierten E-Autobatterien zur Netzstützung**

**Metastudie**

im Auftrag des  
**Ifed. Institut für Energiedienstleistungen GmbH**  
**Blücher Str. 20a**  
**79539 Lörrach**

Bearbeitet von  
Dipl.-Ing. Markus Palic  
Waldbronner Str. 23  
76228 Karlsruhe

[info@tagungsgesellschaft.de](mailto:info@tagungsgesellschaft.de)

Erstellt im Juni 2023

## Inhalt

1	Aufgabenstellung	3
2	Unterhaltskosten und Wertverlust	3
3	Gewicht und Energiedichte	4
4	Betriebskosten	4
5	Ökobilanz	5
6	Weitere Emissionen	6
7	Zweiter Batterie-Lebenszyklus	7
7.1	Netzstützungskapazität	8
7.2	Leistungsbereitstellung	9
8	Fazit	10
9	Literatur	12

## **1 Aufgabenstellung**

Unterschiedliche und zum Teil widersprüchliche Publikationen und Berichterstattungen zur Wirtschaftlichkeit und Ökobilanz von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren verunsichern die Interessenten und erschweren die Kaufentscheidungen. Die Spanne reicht von Aussagen renommierter Wissenschaftsjournalisten, wonach Elektro-SUVs zur Kompensation ihres beim Bau erworbenen CO<sub>2</sub>-Ruksacks eine weit höhere Laufleistung absolvieren müssten als sie im Fahrbetrieb erreichen können, bis hin zu Aussagen, wonach die Ökobilanz nach wenigen 10.000 km bereits ausgeglichen ist. Verschiedene Mess- und Beurteilungsmethoden dürften der Grund für die unterschiedlichen Schlussfolgerungen sein. Unbeachtet bleibt stets der zweite Lebenszyklus der Antriebsbatterien, den sie nach einer Degradation von 20-30% als Komponente zur Netzstützung bei zunehmender Integration volatiler Einspeisung im Stromnetz verbringen können.

In dieser Metastudie werden die technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Daten eines reinen Elektrofahrzeugs und eines Verbrenners derselben Kategorie gegenübergestellt und bewertet. SUV deshalb, weil sie wegen des hohen Batteriegewichts und dem dadurch verursachten großen Ressourcenverzehr besonders in der Kritik stehen. Kleinere und leichtere Elektrofahrzeuge schneiden hier zum Teil deutlich besser ab, sind aber für regelmäßige, längere Destinationen nicht gebrauchstauglich. Hybride Fahrzeuge sind nicht Gegenstand der Untersuchung, weil sie je nach Nutzungsart mehrheitlich als Verbrenner oder als Stromer genutzt werden können. Darüber hinaus wird untersucht, inwieweit Elektroauto-Batterien in ihrem zweiten Lebenszyklus zur Netzstützung eingesetzt werden können und welche netzdienliche Wirkung sie in dieser Funktion entfalten können.

Der Vergleich der Antriebssysteme basiert auf zwei annähernd baugleichen mittleren SUV eines Herstellers, der diese 2021 sowohl als Verbrenner als auch vollelektrisch anbietet. Dem wirtschaftlichen Betriebsvergleich und dem Vergleich der Ökobilanzen soll die Betrachtung der Unterhaltskosten und des Wertverlustes der Fahrzeugtypen während ihrer Nutzungsdauer vorausgehen, da diese einen entscheidenden Einfluss auf die wirtschaftliche Gesamtbilanzen nehmen könnten.

## **2 Unterhaltskosten und Wertverlust**

Die Unterhaltskosten der beiden Varianten unterscheiden sich im Wesentlichen in drei Punkten. Erstens: Elektrofahrzeuge, die bis 2025 angeschafft werden, bleiben für die ersten 10 Jahre steuerfrei, während beim Verbrenner des gleichen Baujahrs Kfz-Steuer in Höhe von rund 200 Euro pro Jahr anfällt [1]. Zweitens: bei Wartung und Instandhaltung punktet auch der Stromer. Ohne Ölwechsel und mit deutlich weniger Verschleißreparaturen kommen die Halter von Elektroautos günstiger weg. Drittens nehmen die Stromer an der sogenannten Treibhausgasminderungsquote (THG-Quote) teil und erhalten, weil sie emissionsfrei fahren, eine Gutschrift in Höhe von bis zu 350 € jährlich. Lediglich bei der Versicherung liegen beide Versionen in etwa gleichauf. Zwischenfazit: Die technischen Unterhaltskosten liegen beim Verbrenner höher als bei der Elektrovariante [2]. Eine seriöse Quantifizierung des Vorteils ist angesichts der unterschiedlichen Versicherungsprämien und Werkstattkosten nicht ohne weiteres möglich.

Bei der Neuanschaffung von Elektrofahrzeugen gewähren die Hersteller einen Bonus auf den Listenpreis. Darüber hinaus wird die Anschaffung auch in unterschiedlichen Höhen staatlich gefördert. Diese Vergünstigung kommt Verbrennern in der Regel nicht zugute. So erhielten die Käufer der elektrischen Variante des fraglichen SUV einen Gesamtbonus, der den Kaufpreis im Jahr 2021 um über 20% reduzierte. Bei der Betrachtung der Wertverluste beider SUV zeigt der Vergleich für Gebrauchtfahrzeuge ein gemischtes Bild. Während der ersten Betriebsjahre ist der Wertverlust des E-Fahrzeugs aufgrund der Förderungen deutlich geringer als der des Verbrenners. Danach gleichen sich die Wertverluste gegenüber den Anschaffungskosten allmählich einander an. Nach fünf Jahren sind sie in etwa gleich hoch [3,4]. So lässt

sich in dieser Hinsicht weder für die eine noch für die andere Fahrzeugvariante ein besonderer Vor- oder Nachteil erkennen (s. Tabelle 1).

Wertverluste			Wertentwicklung bei 15.000 km/a							
Listenpreise 2021	TYP	Boni	Tatsächlicher Kaufpreis	Nachlass %	2023	2024	2025	2026	2027	2028
73.500,00	IX3	16.688,00	56.812,00	23	43.360,00	39.630,00	36.610,00	32.480,00	29.810,00	26.760,00
<b>Wertminderung zum NP €</b>					<b>13.452,00</b>	<b>17.182,00</b>	<b>20.202,00</b>	<b>24.332,00</b>	<b>27.002,00</b>	<b>30.052,00</b>
Wertminderung %					23,68	30,24	35,56	42,83	47,53	52,90
Wertminderung € zum VJ						3.730,00	3.020,00	4.130,00	2.670,00	3.050,00
51.400,00	BMW X3 20i xDrive		51.400,00		32.880,00	30.290,00	27.680,00	25.580,00	22.690,00	20.830,00
<b>Wertminderung zum NP €</b>					<b>18.520,00</b>	<b>21.110,00</b>	<b>23.720,00</b>	<b>25.820,00</b>	<b>28.710,00</b>	<b>30.570,00</b>
Wertminderung %					36,03	41,07	46,15	50,23	55,86	59,47
Wertminderung € zum VJ						2.590,00	2.610,00	2.100,00	2.890,00	1.860,00

Tabelle 1 Wertverluste Elektroauto vs. Verbrenner der gleichen Kategorie nach [3,4]

### 3 Gewicht und Energiedichte

Nachfolgend sollen das Gewicht und der Energieinhalt des mitzuführenden Energiespeichers betrachtet werden. Die Verbrenner-Version verfügt über einen mittleren Tankinhalt von 60 l. Das entspricht bei einem Gewicht von rund 44 kg einer Speicherkapazität von ungefähr 530 kWh. Die Batterie des elektrischen Pendants verfügt über eine nutzbare Kapazität von 74 kWh bei einem Gewicht von 580 kg. Das bedeutet, dass die Energiedichte der Elektro-Batterie mit 0,14 kWh/kg rund 85-mal geringer ist als die des Inhalts des Verbrenner-Benzintanks. Bei der Energiedichte, also dem Verhältnis von Energieinhalt zu Gewicht des mitzuführenden Energiepakets schneidet das Elektrofahrzeug deutlich schlechter ab. Dieser Punkt geht eindeutig an den Verbrenner.

Im Folgenden werden die Wirtschaftlichkeitsdaten und die Ökobilanzen betrachtet. Unterstellt man bei beiden Fahrzeugarten eine Gesamtleistung von 150.000 km, die beide betriebsfähig überstehen müssten, ergeben sich die nachstehenden Verhältnisse.

### 4 Betriebskosten

Bei den Betriebskosten interessieren in erster Linie die Verbrauchsdaten. So benötigt der Elektro-SUV trotz seines höheren Gewichts auf 100 km laut Werksangaben lediglich rund 20 kWh. Das Laden und der Ladeservice im Fahrzeug verursachen maximal 10% Verluste [14]. Im Weiteren wird deshalb mit einem Verbrauch von 22 kWh/100 km gerechnet. Bei einem angegebenen Verbrauch von rund 8 l je 100 km und einem Energieinhalt von 8,8 kWh/l Super benötigt das Verbrenner-Pendant über 70 kWh für dieselbe Distanz. Dies ist im Wesentlichen dem Motorwirkungsgrad geschuldet, der trotz des hohen Entwicklungsstands von Ottomotoren nur rund ein Viertel des Energieinhalts in Vortriebskraft umwandeln kann. Der überwiegende Teil geht in Wärme über, die zu einem kleinen Teil für die Fahrzeugklimatisierung genutzt werden kann. Dem hingegen muss der Stromer die Energie für das Heizen und Kühlen beim Laden schon vor der Fahrt aufnehmen, was zu dem allseits bekannten Effekt führt, dass die Reichweite insbesondere im Winter gegenüber dem Sommerbetrieb je nach Klimatisierungsgewohnheiten der Nutzer zum Teil merklich zurückgeht.

Art	Tankinhalt l	Gewicht kg	Speicherkapazität kWh	Energiedichte kWh/kg	Energieinhalt kWh/l	Bedarf		Reichweite km	spez. Kosten €/l	spez. Kosten €/kWh	Gesamtkosten €/100 km
						l/100 km	kWh/100km				
Li-Ionen-Batterie											
Laden mit PV-Strom		518,00	74,00	0,14			22,00	0,22	336	0,11	2,42
Ladung aus öffentlichem Netz										0,51	11,22
Benzin/Super E10 BMW X3	60	44,40	532,80	12,00	8,80	8,00	70,40	0,70	757	1,80	14,40

Tabelle 2 Wirtschaftlicher Vergleich gleichartiger Fahrzeuge mit Elektroantrieb und Verbrennungsmotor

Bei der Betrachtung der Verbrauchskosten sollen im Folgenden drei Fälle unterschieden werden. Bei Fall 1 bezieht der Stromer seine Ladung ausschließlich aus einer PV-Anlage mit mittleren Stromgestehungskosten von 0,11 Euro/kWh [5]. Im Fall 2 lädt die Elektrovariante an öffentlichen Ladesäulen, hier bei ADAC e-

Charge für Mitglieder mit Ladekosten in Höhe von inzwischen 0,51 Euro/kWh [6]. Für den Verbrenner im Fall 3 kostet der Liter Super E10 derzeit im Mittel rund 1,80 Euro [7], was spezifischen Kosten von rund 0,2 Euro/kWh entspricht. Daraus ergeben sich, wie Tabelle 1 zeigt, Gesamtkosten im Fall 1, Laden mit PV-Strom, in Höhe von 2,42 Euro/100 km, im Fall 2, Laden an Ladestationen, von 11,22 Euro/100 km und im Fall 3, Verbrenner mit Super E10, von 14,40 Euro/100 km (s. Tabelle 2).

Zwischenfazit: Dieser wichtige Punkt geht trotz geringerer Reichweite eindeutig an den Stromer, selbst wenn er sich die Antriebsenergie an einer öffentlichen Ladesäule teuer beschaffen muss.

Obwohl Prognosen über Preisentwicklungen sehr problematisch sind, da sie, wie in den vergangenen Jahren zu sehen war, sehr stark von geopolitischen Entwicklungen abhängen, wird sich der Ölpreis auf mittlere Sicht durch die Einbeziehung des Verkehrssektors in den Emissionshandel ab 2027 spürbar nach oben entwickeln [23]. Dem gegenüber wird sich der Strompreis den Prognosen nach durch die stete Zunahme des regenerativ erzeugten Anteils und der Preisberuhigung auf den Primär-Energiemärkten zwischen 2024 und 2027 wieder dem Niveau von vor 2021 etwas annähern [24]. Somit dürfte sich die Schere zwischen den Preisen für Benzin und Ladestrom in den kommenden Jahren zugunsten der Stromer weiter öffnen.

## 5 Ökobilanz

Einer der wichtigsten Aspekte und inzwischen von zunehmender Bedeutung für die Kaufentscheidung für oder gegen ein Elektrofahrzeug sind neben den wirtschaftlichen Daten die Ökobilanzen der Fahrzeugalternativen. Die Betrachtung der Ökobilanzen ist an viele Prämissen geknüpft, sie ist vielschichtig und komplex. Deshalb bietet sie eine einfache Möglichkeit zu plausiblen, aber tendenziösen Schlussfolgerungen, sowohl für Befürworter als auch für Gegner beider Antriebsarten.

Nachfolgend wird eine ganzheitliche Betrachtung einschließlich der Wirkungsketten auf Basis der bisher betrachteten Fahrzeuge durchgeführt. Unabhängig vom nicht unerheblichen, aber in etwa vergleichbaren Energieaufwand zum Bau der Fahrzeuge selbst, benötigt der Bau von Antriebsbatterien einen weiteren Energieaufwand, der dazu führt, dass Stromer bereits zum Kilometerstand 0 einen zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Rucksack mitbringen, den sie im Laufe ihrer gebrauchstüblichen Nutzungsdauer ausgleichen müssen.

Ungeachtet dessen, dass die Antriebsbatterien nach ihrem Einsatz im Elektroauto ein weiterer Lebenszyklus zur Stabilisierung der Stromnetze erwartet, soll der Rucksack in dieser Betrachtung zunächst allein der Betriebszeit im Elektrofahrzeug angelastet werden.

Fahrzeugart	Batteriekapazität kWh	Vorbereitung g CO <sub>2</sub> e/kWh	Vorbereitung g CO <sub>2</sub> e	Laufleistung km	Bedarf kWh/km	Ausstoß	
						g CO <sub>2</sub> e/kWh	g CO <sub>2</sub> e/km
<b>E-PKW mit PV-Ladung</b>							
Automobilherstellung (Rucksack) [9]			8.000.000	150.000			53
Batterieherstellung (Rucksack) [8]	74	80.000	5.920.000	150.000			39
PV-Anlagenherstellung (Rucksack) [13]					0,22	50	11
<b>SUMME</b>							<b>104</b>
<b>E-PKW mit Strommix</b>							
Automobilherstellung (Rucksack) [9]			8.000.000	150.000			53
Batterieherstellung (Rucksack) [8]	74	80.000	5.920.000	150.000			39
Deutscher Strommix 2022 [12]					0,22	485	107
<b>SUMME</b>							<b>200</b>
<b>Verbrenner-PKW</b>							
Automobilherstellung (Rucksack) [9]			8.000.000	150.000			53
CO <sub>2</sub> -Ausstoß während der Fahrt [1,10]							166
Kraftstoffherstellung [11]							45
<b>SUMME</b>							<b>264</b>

Tabelle 3 Ökobilanzen gleichartiger SUV mit Elektroantrieb und Verbrennungsmotor bei einer Laufleistung von 150.000 km

Eine Studie von Wissenschaftlern des Umweltinstituts Swedish Environmental Research Institute kam vor einigen Jahren zu dem verstörenden Ergebnis, dass größere E-Fahrzeuge für die Kompensation ihres CO<sub>2</sub>-Rucksacks bis zu 8 Jahre benötigen. Inzwischen haben die Wissenschaftler die Ergebnisse überarbeitet und geben für die CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>e) Ausstoßmenge je kWh Batteriekapazität bei deren Produktion mit 61-106 kg deutlich geringere Werte an [8]. In der weiteren Betrachtung wird der Mittelwert, also 80 kg bzw. 80.000 g CO<sub>2</sub>e je kWh Batteriekapazität zugrunde gelegt. Die Produktion eines Mittelklassewagens verursacht nach [9] einen CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 8 Tonnen, also 8.000.000 g, der im Folgenden für beide Varianten als Basis dient. Bei einer Laufleistung von 150.000 km für beide Fahrzeugtypen soll auch bei der Ökobilanz, so wie zuvor, zwischen den drei Fällen unterschieden werden. So kommt der Stromer im Fall 1, Ladung über PV-Anlage, unter Berücksichtigung aller produktionsbedingten CO<sub>2</sub>-Rucksäcke auf einen Wert von insgesamt 104 g CO<sub>2</sub>e je gefahrenem Kilometer. Im Fall 2, Ladung über das öffentliche Netz, mit dem über das Jahr 2021 gemittelten CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Deutschen Stromerzeugungsmix von 485 g CO<sub>2</sub>e je erzeugter Kilowattstunde [12] ergibt sich ein Gesamtausstoß von 200 g CO<sub>2</sub>e/km. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Strommix schwankt, beeinflusst vom jährlichen Anteil der in das öffentliche Stromnetz eingespeisten regenerativen bzw. CO<sub>2</sub>-frei erzeugten Strommengen. Im Fall 3, zählen neben dem direkten aus dem Datenblatt des Herstellers stammenden, gemittelten CO<sub>2</sub>-Ausstoß während der Fahrt [1,10] die Rucksäcke aus der Herstellung des Fahrzeugs und der Kraftstoffherstellung [11]. Damit liegt beim Verbrenner der Gesamtausstoß mit 264 g CO<sub>2</sub>e/km am höchsten. Hier punktet der Stromer bei 100%iger PV-Ladung mit etwas mehr als einem Drittel des Ausstoßes gegenüber einem vergleichbaren Verbrenner. Selbst bei der Ladung aus dem Strommix schneidet der Stromer noch günstiger ab (Tabelle 3).

## 6 Weitere Emissionen

Zur Ökobilanz im weitesten Sinne zählen weitere Emissionen, die die Fahrzeuge während des Betriebs verursachen. Es sind in erster Linie die Feinstaubemissionen durch den Reifen-, Fahrbahn- und Bremsenabrieb sowie weitere Schadstoffe, die ein Verbrenner neben der CO<sub>2</sub>-Produktion im Fahrbetrieb ausstößt. Letztere werden beim Vergleich nicht berücksichtigt, da sich ihre Schädigungswirkung nicht ohne weiteres quantifizieren lässt.

Durch das höhere Gewicht der Stromspeicher liegen die Feinstaubemissionen der Mikroplastik-Kategorie beim Reifen- und Fahrbahnabrieb eines Stromers je nach Studie in einer weiten Spanne zwischen 16% mehr und dem rund Zweieinhalbfachen im Vergleich zu gleich großen Verbrennern [15,16]. Die große Spanne überrascht, ist aber auf unterschiedliche Fahrzeug- und Reifentypen sowie auf verschiedene Messmethoden zurückzuführen. Eines dürfte laut dem Reifenhersteller Michelin sicher sein: Die Lebensdauer von Reifen bei Elektroautos wird geringer sein als bei Verbrennern in der gleichen Kategorie [19]. Allerdings sind die Reifenabrieb-Partikel für Menschen nur bedingt gefährlich, da sie zu einem überwiegenden Teil auf der Fahrbahn und im nahen Straßenumfeld verbleiben und bei Niederschlag in die Kanalisation gespült werden oder im Nahbereich der Fahrbahn im Erdreich versickern [17]. Ob und welchen Schaden sie dort anrichten, wird derzeit in verschiedenen Studien weltweit untersucht.

Beim Bremsabrieb, also beim Abrubbeln der Bremsscheiben, die aus einer Vielzahl von mehr oder weniger umweltschädigender Substanzen bestehen, schneidet der Stromer trotz seines höheren Gewichts deutlich besser ab. Da dieser Fahrzeugtyp zuerst elektrisch bremst, indem er durch Rekuperation die Bewegungsenergie mit einem rund achtzigprozentigen Wirkungsgrad zum Aufladen der Batterien nutzt [25], kommt der Zangengriff gegen die Bremsscheiben erst auf den letzten Metern. Hier also auch wieder in etwa Gleichstand. Während der Reifen- und Fahrbahnabrieb des Stromers größer ist, hält er sich beim Bremsabrieb zurück.

Tabelle 3 zeigt eine zusammenfassende Bewertung aller hier betrachteten Aspekte eines Elektroautos und eines Verbrenners derselben SUV-Kategorie.

Aspekt	Elektrofahrzeug		Verbrenner
	PV-Ladung	Ladesäule	Super E10
Verbrauchskosten	●●●	●○○	○○○
Ökobilanz	●●○	●○○	○○○
Unterhaltskosten (o. Verbrauch)	●○○		○○○
Wertverlust	○○○		○○○
Energiedichte	○○○		●●●
Reifen- und Fahrbahnabrieb	○○○		●○○
Bremsabrieb	●○○		○○○

● positiv

Tabelle 4 Zusammenfassende Bewertung Elektroauto vs. Verbrenner

Interessantes zu dem Themenkomplex kommt inzwischen aus Brüssel. Die Euro-Norm 7 befasst sich nicht mehr allein mit den Schadstoffen aus dem Auspuff eines Verbrenners, die, in den verbleibenden Jahren ihrer zugelassenen Produktion rigide gesenkt werden, sondern auch mit Grenzwerten zu Reifen- und Bremsabrieb, was nun auch die Stromer miteinschließt. So sollen laut Entwurf beim Bremsabrieb ab 2025 noch sieben Milligramm und ab 2035 drei Milligramm pro km erlaubt sein. Für den Reifenabrieb wurden bisher noch keine Grenzwerte angegeben, sie dürften aber sehr ehrgeizig ausfallen und für die schwereren Batteriefahrzeuge eine größere Herausforderung darstellen als für die Verbrenner. Weiterhin enthält der Vorschlag auch Vorgaben zur Haltbarkeit bzw. Degradation von E-Autobatterien. So müssen diese nach fünf Jahren oder 100.000 km noch mindestens 80% und nach acht Jahren oder 160.000 km noch 70% ihrer ursprünglichen Speicherkapazität aufweisen [18].

## 7 Der zweite Batterie-Lebenszyklus

In modernen Lithium-Ionen-Batterien steckt nicht nur sehr viel Know-how, sondern auch eine Menge wertvoller und seltener Materialien. Nach einer acht- bis zehn-jährigen Nutzung im Mobilitätssektor degradiert die mit 40% Kostenanteil teuerste Einzelkomponente des Elektroautos aktuellen Prognosen zufolge auf ca. 80-70% ihrer Ladekapazität [27]. Wegen der damit verbundenen Verkürzung der Reichweite gestaltet sich ihr Einsatz im Mobilitätssektor danach als unwirtschaftlich. Das bedeutet aber nicht das Ende, sondern den Beginn ihres sogenannten „second-life-cycle“ als dringend benötigte netzdienliche Komponente im Stromnetz. Die von allen europäischen Regierungen mit Nachdruck betriebene Integration regenerativer und somit mehrheitlich volatiler Stromeinspeisungen mit erheblichen Einspeiseschwankungen lassen sich nur mit Mühe dem bedarfsorientierten Verlauf der Netzlast anpassen. Hierzu können die scherzhaft als „Oldie-Akkus“ bezeichneten Speicheraggregate einen essenziellen Beitrag leisten. So werden in mehreren Pilotprojekten, unter anderem in einem Gemeinschaftsprojekt zwischen EnBW und Audi in Heilbronn, ausgemusterte Elektroauto-Batterien in Containern (Speicherfarmen) zu Speichereinheiten zusammengefügt, die Netzschwankungen ausgleichen. Erst wenn die Ladekapazität nach diesem zweiten und für die Batterien wesentlich schonenderen Lebensabschnitt endgültig erschöpft ist, gehen sie zurück an den Autobauer und werden dem Recycling zugeführt [20]. Hier ist es heute schon möglich, über 95% der wertvollen Materialien zurückzugewinnen und in eine Kreislaufwirtschaft als Grundmaterialien für neue Batterien einzubringen [21].



## 7.1 Netzstützungskapazität

Aktuell befinden sich rund eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen [29]. Bei einer nutzbaren Batteriekapazität von durchschnittlich 62 kWh, die sich als ungewichtetes Mittel aus [28] ergibt (Tabelle 5) und der Anzahl der Fahrzeuge entsteht eine in den Fahrzeugen gebundene Speicherkapazität von insgesamt 62 GWh. Unterstellt man im zehnjährigen Fahrbetrieb eine mittlere Degradation auf 75%, könnte um das Jahr 2033 für Netzspeicher ein Volumen von 47 GWh zur Verfügung stehen. Voraussetzung hierfür ist, dass alle Batterien in irgendeiner Form zur Netzstützung eingesetzt werden. Die Gesamtkapazität aller Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland liegt aktuell mit 38 GWh darunter. Nahezu alle Planungen für dringend gebrauchte, neue Pumpspeicherkraftwerke wurden wegen des massiven Eingriffs in Natur und Landschaft auf Eis gelegt oder aufgegeben. Eine Reihe bestehender Kraftwerke sollen in den nächsten Jahren erneuert und ihre Speicherkapazität erweitert werden [30].

<b>Ungewichtete Durchschnittskapazität von E-Auto-Antriebsbatterien 2021</b>	<b>62 kWh</b>	
Anzahl Fahrzeuge 2023	1.000.000	Stück
Gesamtkapazität 2033	62	GWh
Degradiert auf 75 %	<b>47</b>	<b>GWh</b>
Anzahl Fahrzeuge 2030	15.000.000	Stück
Gesamtkapazität 2040	930	GWh
Degradiert auf 75 %	<b>698</b>	<b>GWh</b>

Tabelle 5 Durchschnittliche Kapazität von E-Auto-Antriebsbatterien [28] und Gesamtkapazität in den Jahren 2033 und 2040

Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, bis 2030 15 Millionen E-Fahrzeuge auf Deutschlands Straßen zu bringen [34]. Auch wenn die aktuellen Zulassungszahlen das Erreichen des ehrgeizigen Ziels nicht annähernd erwarten lassen, sollen sie im Folgenden die Basis zur Abschätzung der Effekte auf die öffentliche Stromversorgung bilden [33]. Unterstellt man auch hier die Durchschnittskapazität von 62 kWh je Batterie würde die E-Fahrzeugflotte 2030 zu einer fahrenden Kapazität von insgesamt rund 930 GWh anwachsen (Tabelle 5). Folglich ergibt sich unter Berücksichtigung der Degradation nach weiteren 8-10 Jahren also 2038 bis 2040 eine mögliche Netzstützungskapazität von rund 700 GWh. Die Batterien, die davor in den Speicherfarmen ihren Dienst geleistet haben, dürften dann an ihrem aktiven Lebensende angelangt und dem Recycling zugeführt worden sein. Wie hoch die gesamte, aus Speicherfarmen und E-Autos bestehende, batteriebasierte Netzstützungskapazität in der Zeit um 2040 und danach sein wird, ist nur mit großen Unsicherheiten voraussagbar. Insbesondere deshalb, weil aus heutiger Sicht nicht zuverlässig davon ausgegangen werden kann, dass alle E-Auto-Batterien ihren zweiten Lebenszyklus in Speicherfarmen zur Netzstützung antreten. Hier fehlen derzeit noch konkrete wirtschaftliche Anreize. Unterstellt man, dass diese noch gesetzt werden, und dass 50% der Batterien nach ihrem ersten Lebenszyklus im Fahrbetrieb dort landen, könnten sie mit ihrer Gesamtspeicherkapazität von rund 350 GWh, unabhängig von anderen Stromspeicherformen, an denen derzeit fieberhaft geforscht und gearbeitet wird, einen wichtigen Beitrag zum Ausgleich von Einspeiseschwankungen leisten. Zum Vergleich: Der mittlere Tagesstrombedarf beispielweise liegt beim derzeitigen Jahresbedarf von etwas mehr als 600 TWh (600.000 GWh) bei rund 1.600 GWh.

Durch die Zunahme der in den Fahrzeugen verbauten Batterien zur Netzstützung, dürfte die Speicherkapazität deutlich ansteigen, zumal davon auszugehen ist, dass sich der E-Fahrzeugbestand im Individualverkehr durch das absehbare Verbot von Verbrennern nicht nur zunehmen, sondern auch netzdienlich verhalten wird, wenn dafür wirtschaftliche Anreize geschaffen werden [26]. Diese sehr

wichtige Form der zusätzlichen Netzstützung durch Batterien in den Elektroautos erreicht ihre Marktreife aber erst nach der vollständigen Digitalisierung der Strom-Verteilnetze, an der in allen Spannungsebenen mit Hochdruck gearbeitet wird.

## 7.2 Leistungsbereitstellung

Weitere entscheidende Aspekte sind Höhe und Dynamik der Leistungsbereitstellung und der Leistungsaufnahme. Die konstruktiv auf Traktion getrimmten E-Auto-Batterien können einem enorm hohen Leistungsgradienten (Leistungsänderungsgeschwindigkeit) folgen, und so augenblicklich Regelenergie bereitstellen. Die Höhe der maximalen Ein- und Ausspeiseleistungen der Speicherfarmen soll überschläglich über die Antriebsleistungen von E-Fahrzeugen, die die Batterien liefern, hochgerechnet werden. Tabelle 6 enthält eine Zusammenstellung von Elektroauto-Batterien einer beispielhaften Fahrzeugauswahl von acht kleineren und größeren E-Fahrzeugtypen mit ihren jeweiligen Leistungs- und Kapazitätsdaten.

	Höchstleistung	Netto-Kapazität	Leistungsabgabe	Ladeleistung	Leistungsaufnahme
			maximal	maximal	maximal
	kW	kWh	kW/kWh	kW	kW/kWh
BMW ix3	210	74	2,8	150,0	2,0
Megane E-TECH EV 60	160	60	2,7	130,0	2,2
Mercedes EQC	300	80	3,8	110,0	1,4
Audi e-tron GT	350	83,7	4,2	270,0	3,2
Tesla Model Y	331	75	4,4	250,0	3,3
VW e-up	61	32	1,9	40,0	1,3
Opel Corsa-e BEV	100	50	2,0	100,0	2,0
Renault Zoe Z.E. 40	100	52	1,9	46,0	0,9
<b>Durchschnitt</b>			<b>3,0</b>		<b>2,0</b>

Tabelle 6 Leistungsbilanz von E-Autobatterien für die Netzstützung mit Daten aus [36]

Demnach beträgt die maximale Leistungsabgabe in das Netz im Mittel 3 kW je kWh Batteriekapazität. Die maximale Leistungsaufnahme liegt mit 2 kW je kWh etwas darunter. Unter der zuvor getroffenen Annahme, dass die Hälfte der aus dem Fahrbetrieb ausscheidenden Antriebsbatterien in Speicherfarmen integriert werden, läge die mögliche Leistungsabgabe unter Vernachlässigung von Lade- und-Entladewirkungsgraden um das Jahr 2030 mit einer Speicherkapazität von 23,5 GWh bei etwa 70 GW. Die Leistungsaufnahme würde bei knapp 50 GW liegen. Beides läge in der Nähe der Jahreshöchstlast in Deutschland, die in [37] mit 85-90 GW angegeben wird. Betrachtet man die Jahre um 2040, könnte die maximale Leistungsabgabe mit über 1000 GW bei mehr als dem Zehnfachen der Jahreshöchstlast liegen. Damit dürfte sowohl die Leistungsbereitstellung als auch die Leistungsaufnahme durch die Oldie-Akkus zur kurzfristigen Glättung der volatilen EE-Einspeisung in erheblichem Umfang beitragen (Abbildung 1).

Zur Netzstützung bei einer länger anhaltenden Dunkelflaute, während der die regenerative Erzeugung einen nur mäßigen oder gar keinen Beitrag zur Stromversorgung liefert, reicht das Stützungspotential aber bei weitem nicht aus. Allein bei einer zweiwöchige Dunkelflaute fehlen beim derzeitigen Strombedarf in Deutschland über 20 TWh (20.000 GWh), die aus Batterie- und Pumpspeichern mit einem Gesamtpotential von ca. 90 GWh in den Jahren um 2030 nicht einmal ansatzweise gedeckt werden könnten [31]. Selbst um das Jahr 2040 mit einem möglichen Gesamtspeicherpotential von über 700 GWh lässt sich einer länger anhaltenden Dunkelflaute nicht wirksam überbrücken. In diesen Ausnahmefällen werden, aller Voraussicht nach, variable Tarife den Bedarf drosseln und Gaskraftwerke die Erzeugungslücken schließen müssen.

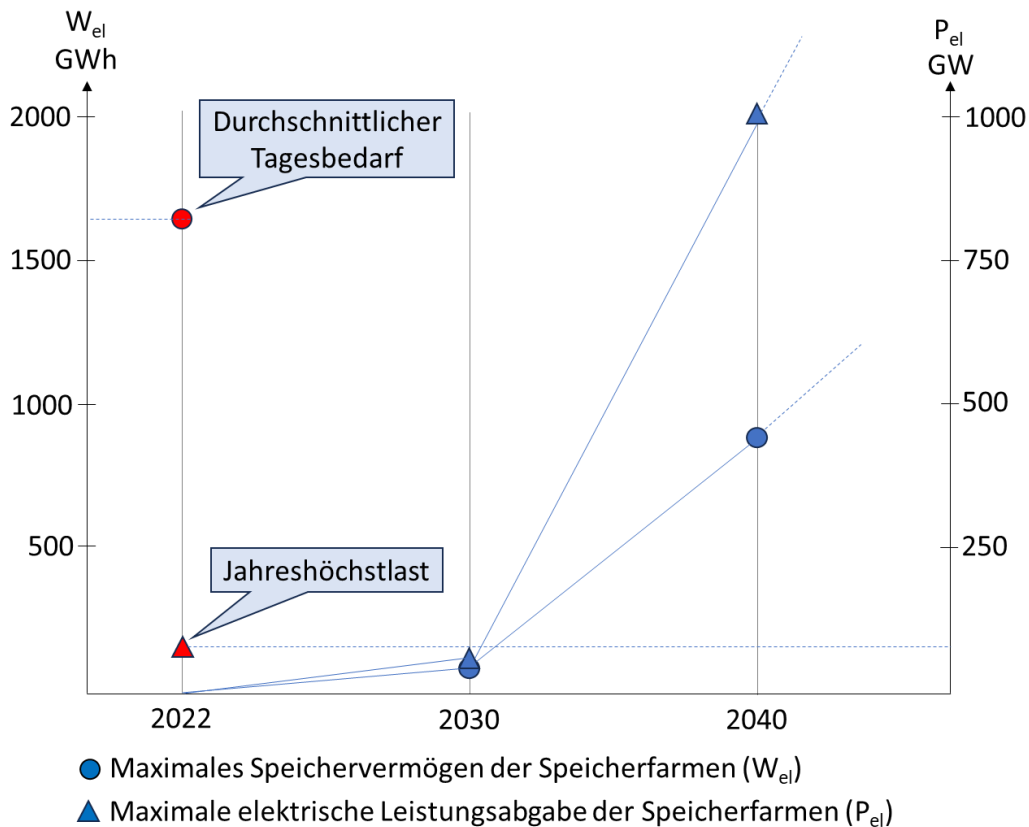


Abbildung 1 Entwicklung des Speichervermögens und Leistungsabgabe von „Speicherfarmen“ in Deutschland bis 2040

## 8 Fazit

Es macht sowohl bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung als auch bei der Ökobilanz einen großen Unterschied, ob ein E-Auto aus dem öffentlichen Netz oder durch Solarstrom vom eigenen Dach aufgeladen wird. In beiden Fällen hat der Stromer die Nase vorn. Auch wenn die Unterschiede in beiden Kategorien zwischen Verbrennern und an öffentlichen Ladeeinrichtungen aufgeladenen Stromern, die den Strommix nutzen, nicht um Welten auseinanderliegt, punktet der Stromer dennoch. Es dürfte allerdings unrealistisch sein, davon auszugehen, dass Elektroautos ausschließlich durch PV-Strom aufgeladen werden.

Wahrscheinlicher dürfte ein Mix aus dem Laden zuhause über die PV-Anlage und dem Laden an der öffentlichen Ladesäule sein. Stromer-Mobilisten, die über keine eigene regenerative Stromerzeugungsanlage verfügen, bleiben auf die öffentliche Stromversorgung angewiesen. Deren Ökobilanz wird sich durch die Zunahme der regenerativen Stromeinspeisung in das öffentliche Stromnetz von Jahr zu Jahr verbessern.

Der Bau von Batterien für Elektrofahrzeuge ist neben den zum Teil menschenunwürdigen und umweltschädlichen Bedingungen, unter denen die nötigen Materialien abgebaut und verarbeitet werden, sehr energieintensiv. Während die benötigte Energie zunehmend mehr aus regenerativen Quellen stammen wird, lassen sich die Abbaubedingungen lediglich über einschlägige Arbeits- und Umweltlabels verbessern. Was in der Nahrungsmittel- und Textil-Produktion möglich wurde, sollte bei der Batterie-Produktion auch und erst recht möglich sein. Die Interessenten könnten dann, statt fortwährend die Missstände zu beklagen, über ihre Kaufentscheidung darüber bestimmen, wie human- und umweltgerecht Batterien hergestellt werden sollen, bevor ihre Komponenten in eine umfassenden Kreislaufwirtschaft münden [21]. Über die katastrophalen Umweltauswirkungen der Ölförderung wird indessen kaum berichtet. Diese sind laut [37] enorm.

Es ist wenig hilfreich, in Talkshows Augenblickswerte zur CO<sub>2</sub>-Belastung des Strommixes zu nennen, die dem Verbrenner zum Vorteil gereichen. Genauso könnte ein Stromer-Fan den Augenblickswert bei flächendeckender Sonneneinstrahlung und starkem Wind veröffentlichen, die dem Stromer zu einem enormen Vorteil verhilft. Seriös ist beides nicht. Ebenso wenig hilfreich dürften Aussagen sein, welche Laufleistung ein Elektrofahrzeug hinter sich bringen muss, um den CO<sub>2</sub>-Rucksack aus der Batterieproduktion zu kompensieren. Lastet man diesen dem zweiten Lebenszyklus der Batterie an, in dem sie ihn mehr als wettmachen kann, hätte sie in ihrem ersten mobilen Lebenszyklus mit 0 g CO<sub>2</sub>e für die Batteriefertigung antreten dürfen, und sie hätte den Abstand zum Verbrenner in der Ökobilanz deutlich vergrößert.

Im Kern werden in dieser Metastudie zwei mittlere SUV der gleichen Größen-Kategorie, die als vollelektrische und als Verbrenner-Version von einem Hersteller im Jahr 2021 angeboten wurden verglichen. Der Vergleich kleinerer und leichter Fahrzeuge beider Fahrzeugkategorien führt zu einer deutlich besseren Ökobilanz und Wirtschaftlichkeit der Stromer gegenüber Verbrennern, unabhängig davon, ob die Elektrovariante aus regenerativen Stromquellen oder mit dem aktuellen Strommix aufgeladen wird [22]. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch eine Reihe von Veröffentlichungen des ADAC. Das Stützungspotential für den Ausgleich von Schwankungen der Netzlast und der zunehmend volatileren Einspeisung können die „Oldie-Batteriefarmen“ gemeinsam mit den Antriebsbatterien in den E-Fahrzeugen, die ans Netz angeschlossen sind, im Tagesverlauf dynamisch ausbalancieren. Das nötige Speicherpotential für eine zweiwöchige Dunkelflaute verfehlen sie allerdings deutlich.

Unterstellt man, dass die Oldie-Akkus in den Speicherfarmen vornehmlich Strom speichern werden, der zur Netz- bzw. Frequenzstabilisierung alternativ abgeregelt werden muss, dürften sich mit der Rückeinspeisung als Regelernergie ansehnliche Strompreise erzielen lassen. Dies wird voraussichtlich deutliche Auswirkungen auf den Marktwert der Batterien bei der Übernahme in die Speicherfarmen haben.

## 9 Literatur

1	N. N.	Kosten für die Kfz-Steuer des BMW X3 20i xDrive:	<a href="#">Kfz-Steuer BMW X3 20i xDrive (G3X) · EURO6D-ISC · ab 2021 · 184PS · 1998ccm (autokostencheck.de)</a>
2	N. N.	VW Golf Diesel gegen e-Golf und ID.3: Hier sparen E-Autos richtig Geld	<a href="#">Golf Diesel gegen e-Golf und ID.3: Hier sparen E-Autos richtig - AUTO BILD</a>
3	N. N.	Wertverluste für die Jahre 2023 bis 2028 X3	<a href="#">Wertverlust BMW X3 20i xDrive (G3X) · ab 2021 · 184PS/135kW (autokostencheck.de)</a>
4	N. N.	Wertverluste für die Jahre 2023 bis 2028 iX3	<a href="#">Wertverlust BMW iX3 sDrive 75 (G3xe) · ab 2020 · 286PS/210kW (autokostencheck.de)</a>
5	Kost, Ch.	Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien	Fraunhofer ISE, Juni 2021
6	N. N.	Ladestationen für Elektroautos: Das kostet der Strom	ADAC Broschüre 04.10.2022
7	N. N.	Aktuelle Preise und Tankstellen für Super E10 in Karlsruhe	<a href="#">Aktuelle Preise und Tankstellen für Super E10 in Karlsruhe (benzinpreis.de)</a>
8	N. N.	CO <sub>2</sub> -Abdruck der E-Auto-Produktion geringer als gedacht	<a href="https://www.mdr.de/wissen/faszination-technik/cozwei-abdruck-der-batterieproduktion-fuer-e-autos-geringer-als-gedacht-100.html">https://www.mdr.de/wissen/faszination-technik/cozwei-abdruck-der-batterieproduktion-fuer-e-autos-geringer-als-gedacht-100.html</a>
9	N. N.	Der CO <sub>2</sub> Fussabdruck eines neuen Autos	<a href="https://www.carbon-connect.ch/index.cfm/de/co2-emissionen-autoproduktion/">https://www.carbon-connect.ch/index.cfm/de/co2-emissionen-autoproduktion/</a>
10	N. N.	VERBRAUCHS- UND EMISSIONSWERTE X3	<a href="#">NEFZ und WLTP Verbrauchs- und Emissionswerte   BMW.de</a>
11	N. N.	CO <sub>2</sub> -Emissionen: die Bilanz verschiedener Autos	DA Deutsche Allgemeine Versicherung Aktiengesellschaft
12	N. N.	CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Kilowattstunde Strom steigen 2021 wieder an	<a href="#">CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kilowattstunde Strom steigen 2021 wieder an   Umweltbundesamt</a>
13	Kümpel, N.	DIE CO <sub>2</sub> -BILANZ VON PHOTOVOLTAIK	wegatech 27.12.2022
14	N. N.	Elektroauto und Ladeverluste: So können Sie Kosten vermeiden	<a href="#">Ladeverluste beim Elektroauto   ADAC</a>
15	Becker, J.; Ilg, P.	Achtung, Feinstaub!	<a href="#">Reifenabnutzung: Achtung, Feinstaub! - Auto &amp; Mobil - SZ.de (sueddeutsche.de)</a>
16	Becker, J.; Prengel, H.	Feinstaubalarm auch bei Elektroautos	<a href="#">Mikroplastik: Feinstaub durch Reifenabrieb auch bei E-Autos - Auto &amp; Mobil - SZ.de (sueddeutsche.de)</a>
17	N. N.	Dem Mikroplastik auf der Spur: Weniger Reifenabrieb ist möglich	<a href="#">Umweltproblem Mikroplastik: Fakten zum Reifenabrieb   ADAC</a>
18	Schaal, S.	Euro 7: Bremsabrieb und Mikroplastik-Vorgaben auch BEV-relevant	<a href="#">Euro 7: Bremsabrieb und Mikroplastik-Vorgaben auch BEV-relevant - electrive.net</a>
19	Schwichtenberg, L.	Reifenabrieb bei Autos im Vergleich: Selbst Markenreifen fallen hier durch	<a href="#">Reifenabrieb bei Autos im Vergleich: Selbst Markenreifen fallen hier durch - EFAHRER.com (chip.de)</a>
20	N. N.	Second-Life-Batterien: Stromspeicher aus gebrauchten E-Auto-Akkus	<a href="#">Second-Life-Batterien als Stromspeicher   EnBW</a>
21	Hadjebi, M.	Die zehn Rs der Batterie - von Refuse bis Recovery	ew, 7-8, 2022, S. 12-13
22	Wietschel, M.	Ein Update zur Klimabilanz von Elektrofahrzeugen	<a href="#">WP-01-2020 Ein Update zur Klimabilanz von Elektrofahrzeugen.pdf (fraunhofer.de)</a>

23	Wetzel, D.	Erheblicher Preissprung bei Benzin, Öl und Gas in Sicht	<a href="#">Emissionshandel: Erheblicher Preissprung bei Benzin, Öl und Gas in Sicht - WELT</a>
24	N. N.	Strompreisprognose vbw / Prognos AG 2022	<a href="#">Strompreisprognose (vbw-bayern.de)</a>
25	Marx, P.	Wirkungsgrad-Vergleich zwischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und Fahrzeugen mit Elektromotor	DER ELEKTRO-FACHMANN, 62. Jahrgang 2015, Nr. 1-2/15
26	N. N.	Intelligente Netze für Elektromobilität	BDEW Broschüre 2023
27	N. N.	Elektroauto-Batterie: Lebensdauer, Garantie, Reparatur	ADAC Broschüre 25.10.2022
28	N. N.	Elektroauto: Die ideale Batteriegröße	ADAC Broschüre 07.09.2021
29	N. N.	Anzahl der Elektroautos in Deutschland von 2006 bis April 2023	STATISTA 07.06.2023
30	N. N.	Liste von Pumpspeicherkraftwerken	Wikipedia
31	Palic, M.	Grundwissen Erneuerbare Energien	Seminarunterlagen Erfurt, 2015
32	N. N.	Anteil der Elektroautos am Bestand der Personenkraftwagen in Deutschland von 2018 bis 2020 und Prognose bis 2030	Statista 2023
33	Neißendorfer, M.	15 Millionen E-Autos bis 2030 erfordert 5000 Zulassungen pro Tag	Elektroauto News 09.03.2023
34	N. N.	Mehr Fortschritt wagen	Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/die Grünen und FDP
35	Meerwald, U.	Daten zur Energiewende	meerwald-engineering 01/2022
36	N. N.	Liste von Elektroautos in Serienproduktion	Wikipedia
37	N. N.	Umweltauswirkungen der Ölförderung	Umgebung Losl, 2022