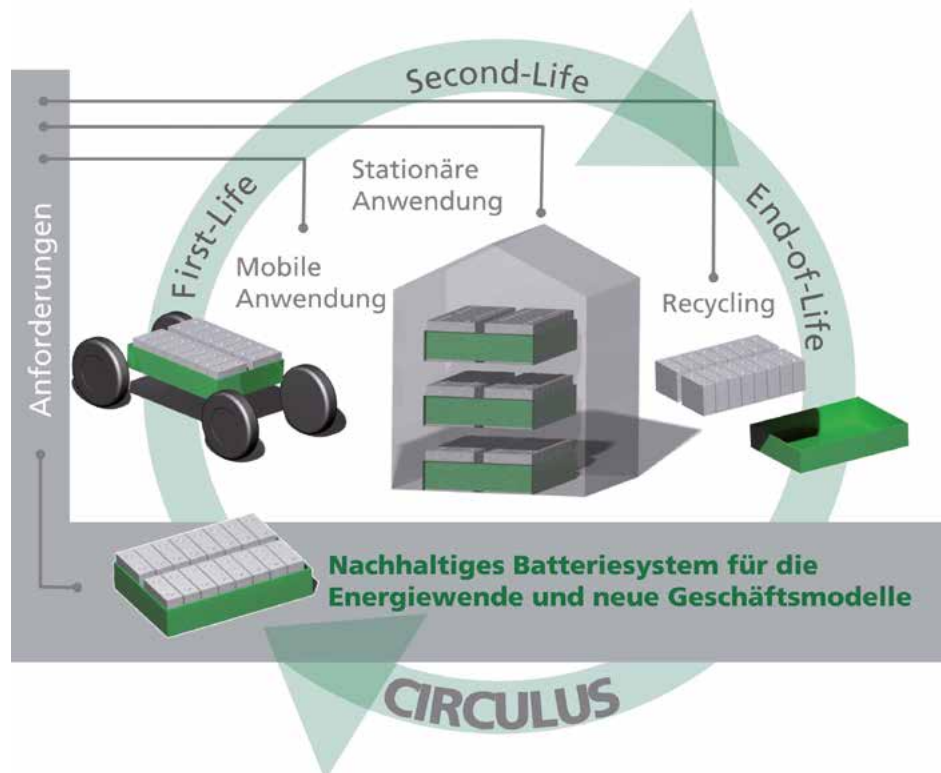


Forschungsprojekt Circulus

Die Ambivalenz von 2nd-Life-Speichern

Die Weiterverwendung gebrauchter Batteriespeicher als 2nd-Life-Speicher gilt als vielversprechender Ansatz für mehr Nachhaltigkeit in der Energiewende. Sorgfältig geprüfte und aufbereitete Batterien aus dem Mobilitätssektor dienen als stationäre Speicher für Netzstabilisierung und Eigenverbrauchsoptimierung und tragen so zur Schonung von Rohstoffen und zur Entlastung der Umwelt bei. Die Umsetzung bleibt jedoch ambivalent, da den ökologischen Vorteilen technische, wirtschaftliche und rechtliche Hürden gegenüberstehen, die eine breite Nutzung erschweren. Das zeigt das mittlerweile abgeschlossene Forschungsprojekt Circulus.

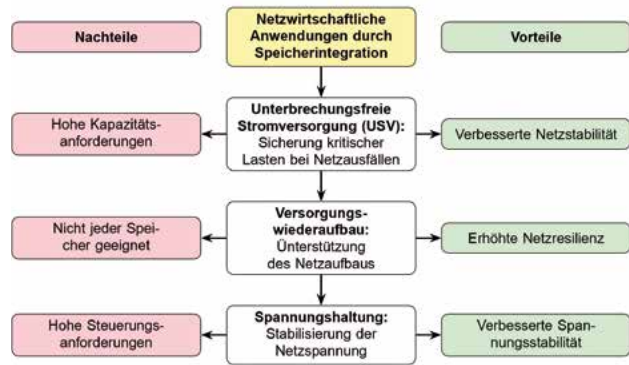
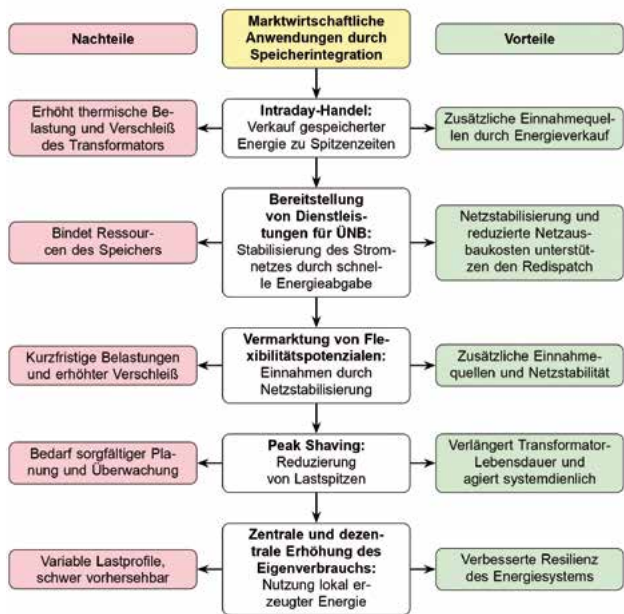


Bildquelle: [6]

In der Praxis wird eine Lithium-Ionen-Antriebsbatterie ab einem Verlust der Kapazität von rund einem Fünftel nicht mehr für mobile Anwendungen in Betracht gezogen. Die verbleibende Restkapazität ist jedoch für andere Einsatzbereiche ausreichend. Das abgeschlossene Forschungsprojekt Circulus zielte darauf ab, die interdisziplinäre Entwicklung und den realen Aufbau eines ganzheitlichen und recyclingfähigen Lithium-Ionen-Energiespeichers für den mobilen Einsatz und später auch für stationäre Anwendungen

voranzutreiben. Die Recyclingfähigkeit des nachhaltigen Batteriesystems geht über die bloße Rückgewinnung der Metalle hinaus und auch die wirtschaftliche und technologische Rückgewinnung der enthaltenen Kunststoffe wurde umfassend betrachtet [1].

Bei der Entwicklung eines nachhaltigen Batterie-Designs ist der gesamte Lebenszyklus des Systems zu berücksichtigen. Weder Zweitnutzung noch Recycling finden derzeit im Konstruktionsprozess von Batterie-



Die Anwendungsmöglichkeiten von 2nd-Life-Speichern im Netz sind vielseitig

Quelle: [3]

systemen ausreichend Berücksichtigung, sodass einerseits ein schneller wirtschaftlicher Einsatz als stationäre Energiespeicher ermöglicht wird und andererseits die Rückgewinnung der metallischen sowie der auf Kunststoff basierenden Rohstoffe wirtschaftlich realisierbar wird. Die CO₂-Bilanz der Systeme spricht sich eindeutig für eine Lebensverlängerung über eine Zweitnutzung und das Recycling bzw. den Wiedereinsatz von recycelten Materialien aus. Nur so kann zukünftig ein hohes Maß an Nachhaltigkeit in der Elektromobilität gewährleistet werden [3].

Viele Batteriesysteme auf dem Markt lassen sich nur mit erheblichem Aufwand und unter erhöhtem Sicherheitsrisiko demontieren. Eine einfache Trennung von Komponenten und Materialien ist häufig nicht möglich. Diese Umstände erschweren es Recyclern, eine ökonomische und ausreichend hohe Rückgewinnung der einzelnen Stoffe zu realisieren.

Die Batteriesysteme müssen für ein nachhaltiges Recyceln in ihre Hauptkomponenten zerlegt werden, einschließlich Gehäuse, Module und im Idealfall die einzelnen Zellen. Der Prozess ist wesentlich, um wertvolle Batteriematerialien von den weiteren Stoffströmen wie Leistungselektronik, Gehäusen und Kabeln zu trennen. Dadurch werden homogene und ökonomische Recyclingströme möglich, wodurch auch hohe Rücklaufquoten für den nachhaltigen Wiedereinsatz erzielt werden. Je nach Typ und Zustand der Batterie kann dieses Zerlegen manuell oder mit Unterstützung von halbautomatischer Ausrüstung erfolgen [3].

Einsatzmöglichkeiten und Herausforderungen im Energiesystem

Die Nutzung von 2nd-Life-Batteriespeichern eröffnet dem Energiesystem neue Perspektiven, insbesondere vor dem Hintergrund der Energiewende mit wachsen-

dem Anteil erneuerbarer Energien, zunehmender Elektromobilität und dem Ausbau von Wärmepumpen. Der Bedarf an flexiblen und dezentralen Speichern steigt kontinuierlich. 2nd-Life-Speicher können als Bindeglied zwischen nachhaltiger Ressourcennutzung und Systemstabilität dienen.

Ein zentrales Einsatzfeld ist die Integration in bestehende Infrastrukturen wie Umspannwerke oder Trafostationen, wo gebrauchte Batteriespeicher als dezentrale Puffer eingesetzt werden, um Lastspitzen abzufangen, die Einspeisung erneuerbarer Energien zu glätten und die Netzstabilität zu unterstützen. Auch für die Optimierung des Eigenverbrauchs in Gewerbe und Industrie sowie für Anwendungen wie Peak Shaving oder die Bereitstellung von Regelenergie bieten sich 2nd-Life-Speicher an.

Die Anforderungen an die Speicher variieren je nach Anwendung: Während für die Eigenverbrauchsoptimierung moderate Leistungen und eine hohe Zyklenfestigkeit ausreichen, sind für die Teilnahme an Märkten wie dem Intraday-Handel hohe Kapazitäten und schnelle Lade- und Entladeraten erforderlich. Für hochdynamische und sicherheitskritische Anwendungen, etwa die Primärregelleistung oder unterbrechungsfreie Stromversorgung, sind neue Speicher mit homogenem Systemaufbau und maximaler Leistungsfähigkeit meist die bessere Wahl [3].

Die technische Integration gebrauchter Batteriespeicher ist anspruchsvoll. Die Heterogenität der Zellen, unterschiedliche Restkapazitäten und das daraus resultierende variierende Degradationsverhalten einzelner Zellen erfordern ein angepasstes Batteriemanagementsystem, das individuelle Zellspannungen, Temperaturen und Ladezyklen präzise überwacht und steuert. Auch das Temperaturmanagement, der Brandschutz und die Leckageüberwachung müssen auf die spezifischen Eigenschaften gebrauchter Zellen

abgestimmt werden. Die notwendigen Änderungen, die im Zuge der Integration eines 2nd-Life-Speichers in einer Trafostation vonnöten sind, wurden exemplarisch im Projekt Circulus umgesetzt [3].

Die Auswahl und Konfiguration der Speicher erforderten daher sorgfältige Prüfungen und eine kontinuierliche Überwachung. Die Integration in unterschiedliche Netzstrukturen – von urbanen über ländliche bis hin zu gemischten Netzen – stellt jeweils spezifische Anforderungen an die Speichertechnologie. Während in städtischen Netzen schnelle Reaktionszeiten und hohe Leistungsdichte gefragt sind, stehen in ländlichen Gebieten häufig die Unterstützung der lokalen Erzeugung und die Spannungstabilisierung im Vordergrund [Stel25].

Wirtschaftlich betrachtet, können 2nd-Life-Speicher dazu beitragen, Netzausbaukosten zu senken, und neue Geschäftsmodelle zu erschließen. Die tatsächliche Wirtschaftlichkeit hängt jedoch stark von den jeweiligen Rahmenbedingungen, der Verfügbarkeit geeigneter Batterien und den Kosten für Aufbereitung, Transport und Integration ab.

Die Demontage, Prüfung und Rekonfiguration gebrauchter Zellen ist aufwendig und erfordert spezialisiertes Know-how, was die breite Nutzung bislang limitiert. Auch die rechtlichen Rahmenbedingungen stellen eine Hürde dar: In Deutschland ist zwischen netz- und marktwirtschaftlichen Anwendungen zu unterscheiden. Netzbetreiber dürfen Speicher ausschließlich für netzbezogene Aufgaben einsetzen, während marktorientierte Anwendungen anderen Akteuren vorbehalten sind. Diese Trennung erschwert die wirtschaftliche Nutzung und macht neue Marktmechanismen sowie Standards erforderlich, um Flexibilitätspotenziale effizient zu erschließen.

SoC(State-of-Charge)-Simulationen und Praxistests des Lade- und Entladeverhaltens zeigen, dass 2nd-Life-Speicher für ausgewählte Anwendungen technisch geeignet sind und einen Beitrag zur nachhaltigen Transformation des Energiesystems leisten können. Dennoch bleibt die Umsetzung mit erheblichen technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Herausforderungen verbunden. Eine breite Marktdurchdringung erfordert weitere Anstrengungen bei Standardisierung, Qualitätssicherung und Geschäftsmodellentwicklung. 2nd-Life-Speicher sind ein wichtiger Baustein für die Energiewende, ihr volles Potenzial kann jedoch nur durch die konsequente Bewältigung dieser Herausforderungen ausgeschöpft werden [3].

Grenzen der Aufbereitung und der Wiederverwendung

Die Demontage von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien ist mit hohem Arbeits- und Zeitaufwand verbunden,



Verklebte Zellen einer Tesla-Model-Y-Traktionsbatterie

Bildquelle: [5]

da die Systeme komplex aufgebaut sind und erhebliche elektrische Gefährdungen durch hohe Spannungen aufweisen. Beim Zerlegen von Hochvolt-Speichern bestehen zudem Risiken durch Brandereignisse und chemische Gefährdungen, was den Prozess weiter verteuert. Dennoch ermöglicht eine gezielte Trennung vor dem Recycling hohe Reinheitsgrade der einzelnen Batteriefractionen. Eine effiziente Demontage reduziert Energiebedarf, Prozessschritte und den Einsatz von Hilfsstoffen in nachgelagerten Recyclingstufen. Gleichzeitig steigt die Wirtschaftlichkeit, da sortenreine Materialien höhere Marktwerte erzielen [4].

In der Praxis stößt die Demontage jedoch an Grenzen. Eine zentrale Herausforderung ist die fehlende Standardisierung: Zellformate, Zellchemien, Modulfixierungen, Moduldesigns und mechanische Befestigungen unterscheiden sich stark zwischen den Packvarianten. Viele Module und Zellen sind verklebt, verschweißt oder mit Schäumen fixiert, sodass eine zerstörungsfreie Trennung – etwa bei Cell-to-Pack-Designs – kaum möglich ist. Hinzu kommen Gebrauchsspuren wie Korrosion, Verschmutzungen oder Verformungen, die nach dem Einsatz im Fahrzeug häufig auftreten und die Demontage weiter erschweren.

Automatisierte Prozesse sind daher kaum universell einsetzbar und wirtschaftlich schwer darstellbar. Aus diesem Grund erfolgt die Zerlegung überwiegend manuell, wobei unterschiedliche elektrische Verbindungen gelöst werden müssen. Dabei muss sichergestellt werden, dass Restladungen keine Kurzschlüsse oder thermischen Reaktionen verursachen, die Bauteile oder Personen gefährden könnten. Dies erfordert geschultes Personal, eine geeignete Sicherheitsinfrastruktur und führt zu hohen Prozesskosten [4].

Daher wird häufig die Zerlegung auf Modulebene – und nicht weiter – bevorzugt. Packs sind oft demontagefreundlicher gestaltet, beispielsweise durch Verschraubungen, während Zellen innerhalb der Mo-

dule teilweise verklebt oder verschweißt sind. Die Module werden dann als Ganzes wiederverwendet. Wenn eine Wiederverwendung nicht möglich ist, können die Module durch einen pyrohydrometallurgischen Prozess recycelt werden. Durch die Hochtemperaturpyrometallurgische Behandlung entstehen hochreine Produkte aus strategischen und kritischen Metallen wie Lithium, Nickel, Kobalt und Kupfer, die dann durch einen hydrometallurgischen Prozess zu batterietauglichen Materialien für neue Zellen weiterverarbeitet werden. Cell-to-Pack-Designs können nicht zerlegt werden, und stellen damit die wirtschaftliche Recyclingfähigkeit und vor allem die Wiederverwendbarkeit infrage [4].

Ohne konstruktive Standardisierung und Design-for-Recycling-Ansätze bleibt das Recycling von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien technisch anspruchsvoll, sicherheitskritisch und wirtschaftlich begrenzt [4].

Fazit

2nd-Life-Batteriespeicher stehen sinnbildlich für die Ambivalenz nachhaltiger Innovationen: Sie bieten große Chancen für Ressourcenschonung, CO₂-Einsparung und die Unterstützung der Energiewende. Gleichzeitig erschweren technische Komplexität, hohe Kosten und rechtliche Unsicherheiten ihre breite Nutzung. So bleibt der Weg vom vielversprechenden Konzept zur flächendeckenden Umsetzung anspruchsvoll – das Potenzial ist groß, die Hürden sind jedoch nicht zu unterschätzen.

Danksagung: Die Projektpartner danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Zuwendungen und dem Projektträger Jülich für die freundliche Unterstützung.

www.e-netz-suedhessen.de

www.lbf.fraunhofer.de

www.unicore.de

Literaturverzeichnis:

- [1] Eva-Maria Stelter, Dominik Spancken, Christin Hogrefe, Thomas Waldmann, Brendan Muscutt, und Andre Stegmann. Circulus nachhaltiges Batteriesystem – Handlungsleitfaden. Fraunhofer-Gesellschaft, 2024. <https://doi.org/10.24406/h-478323>.
- [3] Eva-Maria Stelter, und Dominik Spancken. Circulus – nachhaltiges Batteriesystem – Interdisziplinäre Entwicklung für die ganzheitliche Batteriesystemauslegung eines nachhaltigen Batteriesystems für die Energiewende und neue Geschäftsmodelle. Hannover: Technische Informationsbibliothek, 2025. <https://doi.org/10.34657/18308>.
- [3] Eva-Maria Stelter, Dominik Spancken, Thomas Waldmann, Christin Hogrefe, Christian Hein, Alexander Hepp, Jens Hack, Brendan Muscutt, Andre Stegmann, Mirko Gebauer, Gunnar Balkow, David Pe-

termann, Nicole Büchau, Christiane Schäfer, Riccardo Möller: Energy Technology 2026, 14, e202501329. <https://doi.org/10.1002/ente.202501329>

- [4] Jens Hack. Circulus – nachhaltiges Batteriesystem – Interdisziplinäre Entwicklung für die ganzheitliche Batteriesystemauslegung eines nachhaltigen Batteriesystems für die Energiewende und neue Geschäftsmodelle. Hannover: Technische Informationsbibliothek, 2025. <https://doi.org/10.34657/20858>.
- [5] <https://nextbigfuture.s3.amazonaws.com/uploads/2022/07/Screen-Shot-2022-07-27-at-11.20.48-AM-1024x740.jpg>
- [6] Eva-Maria Stelter; Dominik Spancken: Circulus – Nachhaltige Batteriesysteme für die Energiewende. Nachhaltigen Energiespeicher für den mobilen und anschließenden stationären Einsatz. Fraunhofer LBF, 2026.

Autoren



Alexander Hepp (Bild),

Projektmanager, e-netz Süd Hessen AG, Darmstadt
alexander.hepp@e-netz-suedhessen.de

Eva-Maria Stelter,

Senior Manager R&D Projects, Fraunhofer LBF, Darmstadt
eva-maria.stelter@lbf.fraunhofer.de

Jens Hack, Project Leader Pre-Metallurgy,

Umicore AG & Co. KG, Hanau-Wolfgang
jens.hack@eu.unicore.com

Christian Hein, Innovationsmanager,

e-netz Süd Hessen AG, Darmstadt
christian.hein@e-netz-suedhessen.de

Dominik Spancken, Senior Scientist,

Fraunhofer LBF, Darmstadt
dominik.spancken@lbf.fraunhofer.de