

Förderung zirkulärer Geschäftsmodelle

Voraussetzungen und Leistungsindikatoren
für Second-Life-Batterien

Stefanie Prenner, 15. September 2026

sp@brimatech.at

Klimaschutz erfordert Veränderungen im Mobilitätssektor

- 
- Verkehrsbedingte **THG-Emissionen** in der EU-27, 2023: 1,039 Mt CO₂eq. [1,2] (*~31% der Gesamtemissionen*)
 - **Green Deal**: Klimaneutralität bis 2050

Förderung E-Mobilität:

- **Neue Herausforderungen:**
 - **Steigende Anzahl an LIBs**
 - **Nachhaltigkeitsproblematik** von LIBs: Rohstoffgewinnung, Bedarf an kritischen Rohstoffen, Risiken in der Lieferkette, Sicherheitsrisiken, ungelöste Fragen am Ende der ersten Nutzungsphase
- Ende erste LIB-Nutzungsphase: **Restkapazität >70%** [15]
 - Möglichkeit von **Second-Life-Anwendungen**

Hintergrund der Dissertation

Forschungsrahmen

- **Universität für Bodenkultur**
- **Zielsetzung:** Analyse der Voraussetzungen und Barrieren für zirkuläre Geschäftsmodelle für Lithium-Ionen-Batterien (LIB) aus E-Autos mit Fokus auf Second-Life („repurposing“)
- **Zeitraum:** 09/2020 bis 06/2025
- **Gekoppeltes Forschungsprojekt:** SafeLiBatt (SAF€RA, nanoEHS 2019)
- **Hauptbetreuer:innen:** Univ.-Prof. Marion Huber-Humer, Priv.-Doz. Florian Part



Doctoral Dissertation

Promoting circular business models:
Framework conditions and performance indicators for
commercialising repurposed electric vehicle batteries

submitted by
DIⁱⁿ Stefanie PRENNER

In partial fulfilment of the requirements for the academic degree
Doktorin der Bodenkultur (Dr.nat.techn.)

Vienna, 17.03.2025

Supervisor

Univ.Prof.ⁱⁿ DIⁱⁿ Dr.ⁱⁿ Marion Huber-Humer
Institute of Waste Management & Circularity
Department of Landscape, Water and Infrastructure
BOKU University, Vienna

Co-supervisor

Priv.-Doz. DI Dr. Florian Part
Institute of Waste Management & Circularity
Department of Landscape, Water and Infrastructure
BOKU University, Vienna

Qualitative und quantitative Datenerhebung

Methodik

4



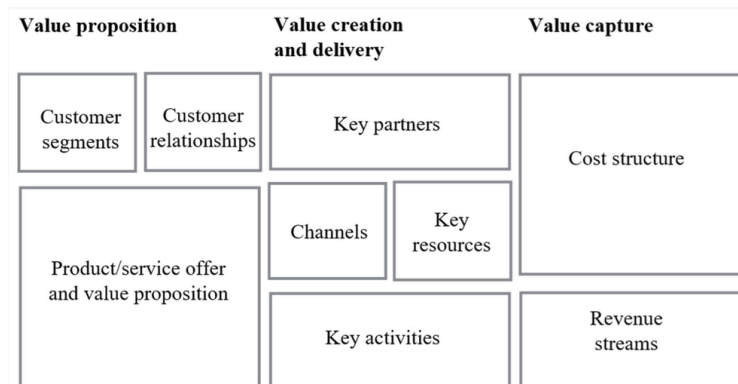
Veränderungen – aber WIE?

Wenn Geschäftsmodelle auf Kreislaufwirtschaft treffen

Geschäftsmodelle:

sind eine vereinfachte Darstellung des **Wertversprechens**, der **Wertschöpfung und Wertbereitstellung** sowie der **Werterfassung** und ihrer Wechselwirkungen und damit die grundlegende Logik wirtschaftlicher Tätigkeit

(Geissendorfer et al 2016)

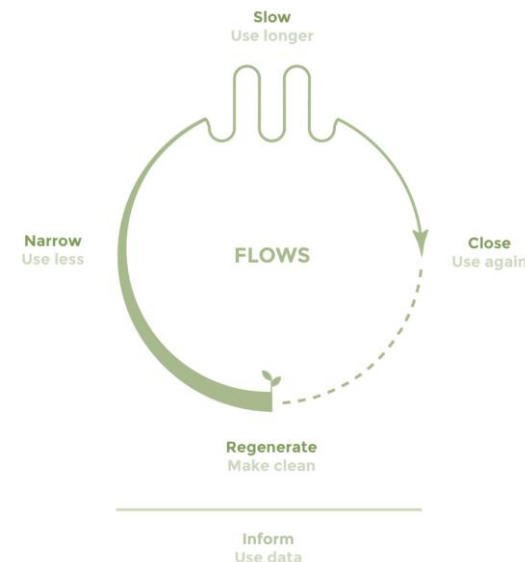


Nußholz (2017)

Kreislaufwirtschaft:

beschreibt einen systemischen Ansatz zur **Verengung**, **Verlangsamung und Schließung von Stoff- und Produktströmen**

(Konietzko et al., 2020)



Konietzko et al. (2020)

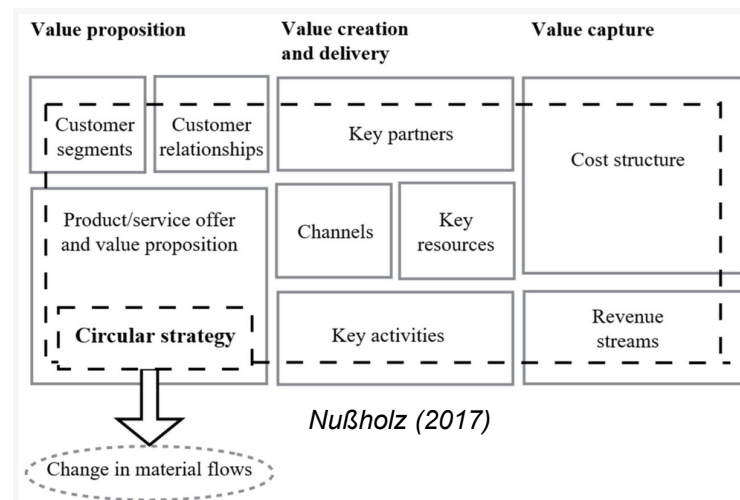
Zusammenführung zweier Ansätze

Zirkuläre Geschäftsmodelle als Schlüssel

Zirkuläre Geschäftsmodelle:

verbinden wirtschaftliche Wertschöpfung mit einer möglichst langen und effizienten Nutzung von Produkten, Komponenten und Materialien

(Geissendorfer et al 2016)



Kreislaufwirtschaft

Zunehmende Zirkularität

Faustregel:
Höheres Maß an Kreislaufwirtschaft
= weniger natürliche Ressourcen und weniger Umweltbelastung

Lineare Wirtschaft

Intelligendere Produktnutzung und -herstellung	0 - Refuse	Bewusster Verzicht auf Produkte oder Materialien
	1 - Rethink	Neu denken und zirkulär designen
	2 - Reduce	Reduzierung des Material- und Energieeinsatzes
Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und deren Teilen	3 - Reuse	Wiederverwendung eines ausrangierten Produkts in gutem Zustand mit ursprünglicher Funktion
	4 - Repair	Reparatur/Wartung eines defekten Produktes zur Weiternutzung
	5 - Refurbish	Verbesserung/Erneuerung eines ausrangierten Produktes
	6 - Remanufacture	Verwendung von Teilen eines ausrangierten Produkts für ein neues Produkt mit derselben Funktion
Material- und Energie-rückgewinnung	7 - Repurpose	Nutzung eines ausrangierten Produkts oder seiner Teile für ein Produkt mit einer anderen Funktion
	8 - Recycle	Aufbereitung und stoffliche Verwertung von Materialien zur Gewinnung sekundärer Rohstoffe
	9 - Recover	Thermische Verwertung von Materialien mit Energierückgewinnung

Restkapazität >70%

Innovation im Produkt Design

Geschäftsmodell Innovation

Prenner et al. (2025)

Vielfältige Anwendungsbereiche und Nachhaltigkeitsvorteile



Energiespeichersysteme für den **privaten** Gebrauch



Energiespeichersysteme im **Industriesektor**



Ladestation für Elektrofahrzeuge



Telekommunikations-Basisstation



Mobile Anwendungen wie Roller, Gabelstapler, Golfwagen usw.

Second-Life-LIBs können folgende Vorteile bieten:

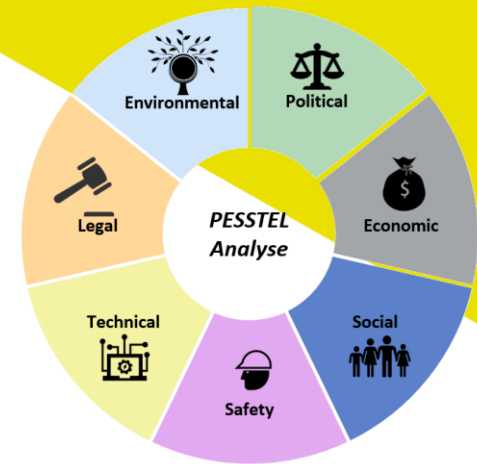
- **Ökologisch:** Verringerung des Klimawandelpotenzials (*bis zu 44 %*) und der Ressourcen- bzw. Metallverbrauch (*bis zu 61 %*) [18]
- **Ökonomisch:** geringere Lebenszykluskosten von E-Autos sowie eine Verringerung von Lieferkettenrisiken und Abhängigkeiten
- **Sozial:** Schaffung neuer Beschäftigungsmöglichkeiten

WARUM sind Second-Life LIB trotz ihrer Vorteile bislang kaum am Markt verfügbar?

Zentrale Barrieren für einen Markteintritt

PESSTEL Zuordnung

Political & Legal	Uneinheitliche, fehlende Rahmenbedingungen sowie Standardisierung · Zertifizierungsaufwand · Transportvorgaben (z.B. UN38.3) mit fehlenden Second-Life Vorgaben · Recyclingfokus der EU-BatterieVO
Economic	Kosten- und Leistungsdruck durch neue LIBs & Recycling · Garantie-/Haftungskosten · Geschäfts- und Eigentumsmodelle mit Fokus auf die Erstnutzung · fehlende KPIs · Verfügbarkeit von EoL LIBs · Fachkräftemangel
Social	Begrenzte Akzeptanz und Vertrauen · fehlendes Wissen/Kommunikation über soziale Auswirkungen · Sicherheitsbedenken
Safety	Mangel experimentelle Daten zu Alterungsprozessen · chemieabhängige Risiken · anwendungsspezifische Risiken · Tiefe des Repurposings (z.B. Pack/Modul vs. Zelle)
Technical	Batteriedesign · Tiefe des Repurposings · Bewertung von LIB am EoL hinsichtlich Second-Life Eignung

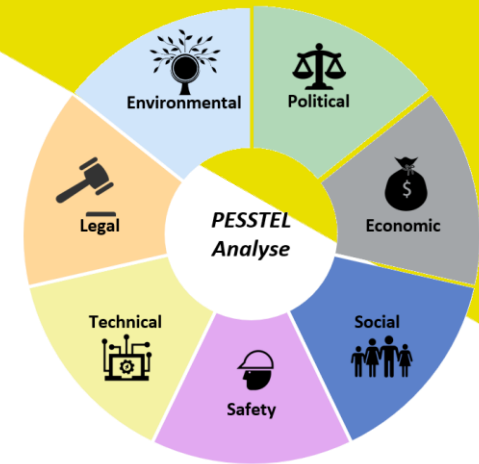


WAS braucht es, um diese Barrieren zu überwinden?

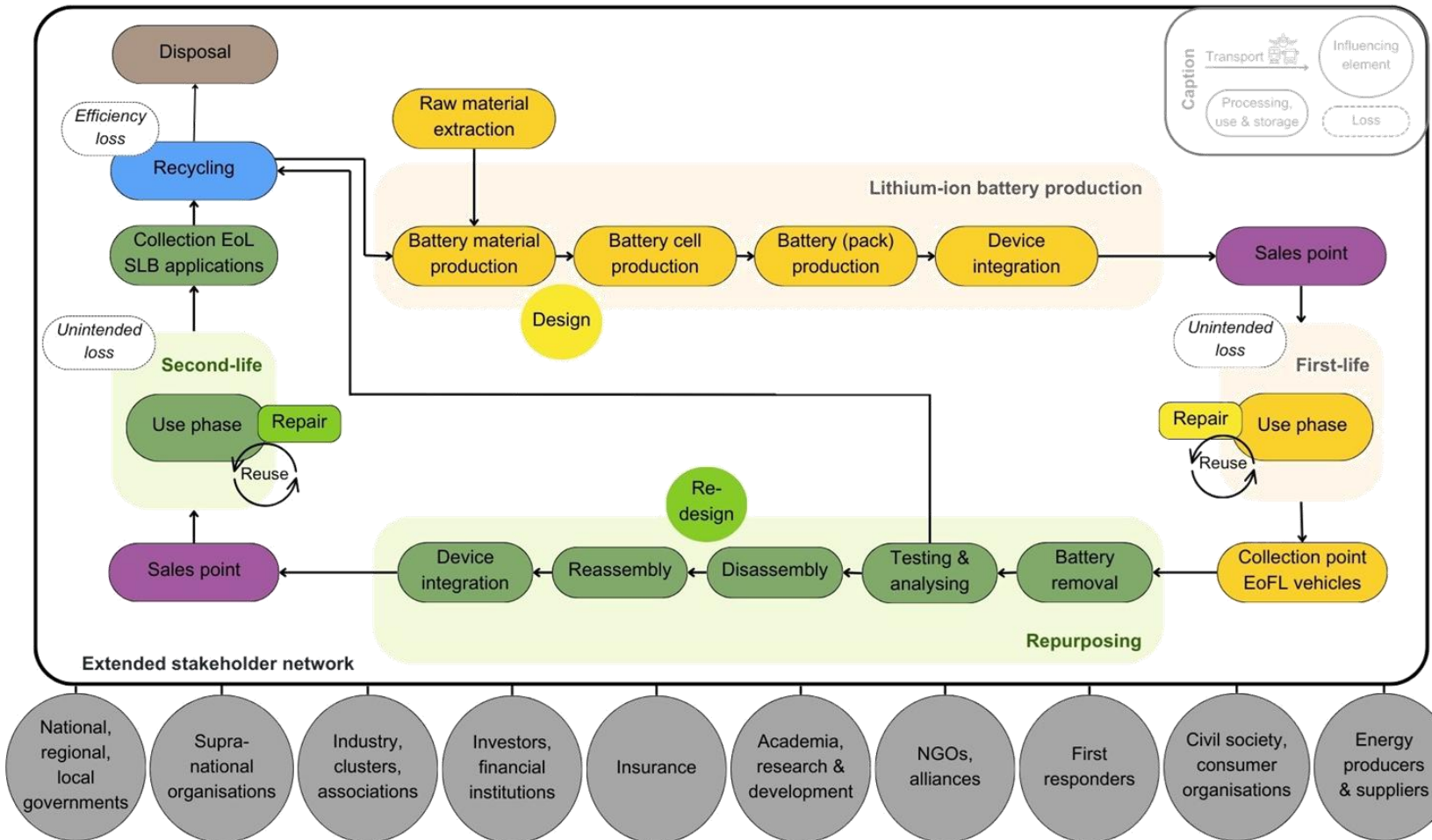
Zentrale Voraussetzungen für einen Markteintritt

PESSTEL Zuordnung

Political & Legal	Harmonisierung von Regulierung, Standards & Tests · Batteriepass und sicherer Datenzugang · Kennzeichnung · EPR · realistische Second-Life Quoten · Second-Life-Anreize · verpflichtende Nachhaltigkeitsbewertungen
Economic	Faire Wettbewerbsbedingungen (first-life vs. second-life) · gezielte politische Unterstützung (z.B. Förderungen) · Reverse Logistics Infrastruktur · Modelle für Haftung/Garantie · zirkuläre Geschäftsmodelle & KPIs · OEM-Kooperationen · stabile EoL-LIB-Versorgung · Zusammenarbeit im Wertschöpfungsnetzwerk
Social	Akzeptanz fördern · Wissen zu Sicherheit & Nachhaltigkeit vermitteln · Stakeholder einbinden · Regulierung verständlich kommunizieren · faire Arbeitsbedingungen
Safety	Harmonisierte Sicherheitsprüfungen und Testprotokolle · klare Verantwortlichkeiten · Brand-/Propagation-Schutz und Strategien · Schulungen (Arbeiter:innen, Behörden, Ersthelfer:innen) · Alterungs- & Sicherheitsbewertung · Frühwarn- und Schutzfunktionen
Technical	Design for Disassembly/Repurposing (modular) · integriertes Monitoringsystem für versch. Batterieparameter · SoH/SoS standardisieren · geeignete BMS-/Steuerungssysteme · digitale Eignungsbewertung



Akteursübergreifend, interdisziplinär und vertrauensbasiert



Prenner et al. (2024A)

Sicherheit als oberste Priorität

Tabelle: Identifizierte und priorisierte KPIs einschließlich Referenzwerten (Prenner et al., 2024B)

KPIs (n=56)	Median importance ¹	Median reference values
1. State of safety (SoS)	1.0	95.0%
2. Resource savings compared to first-life (R_{sav})	1.5	50.0%
3. Cost ratio second-life to first-life (CR2to1)	2.0	0.7
4. State of health (SoH)	2.0	75.0%
5. Recycling rate of Battery Regulation achieved (RR_{BR})	2.0	yes ³
6. CO ₂ -eq savings compared to first-life (CO_{2-sav})	2.0	41.5%
7. Cost ratio second-life to recycling (CR2toR)	2.0	0.7
8. Supply chain risks (SCR)	2.0	low ⁴
9. Remaining useful life (RUL)	2.0	1,000.0 cycles 5.0 years
10. Amortisation period (AMT)	2.0	4.0 years
11. Total cost of ownership (TCO ²)	N/A	N/A
12. Internal rate of return (IRR ²)	N/A	N/A

¹ The importance rating used a Likert scale: 1 = very important, 2 = important, 3 = moderately important, 4 = slightly important, 5 = not important.

² This KPI was suggested by a respondent to the online survey and has not yet been ranked in terms of importance.

³ The RR_{BR} is a qualitative 'yes' or 'no' indicator that must be answered with 'yes'.

⁴ The SCR is a qualitative indicator on a scale from 'low' to 'medium' to 'high' and must be low.

Colour code: technical and safety-related, environmental, economic.

Second-Life verlässt die Pilotphase, bleibt aber derzeit noch ein Nischenmarkt

2015-2020

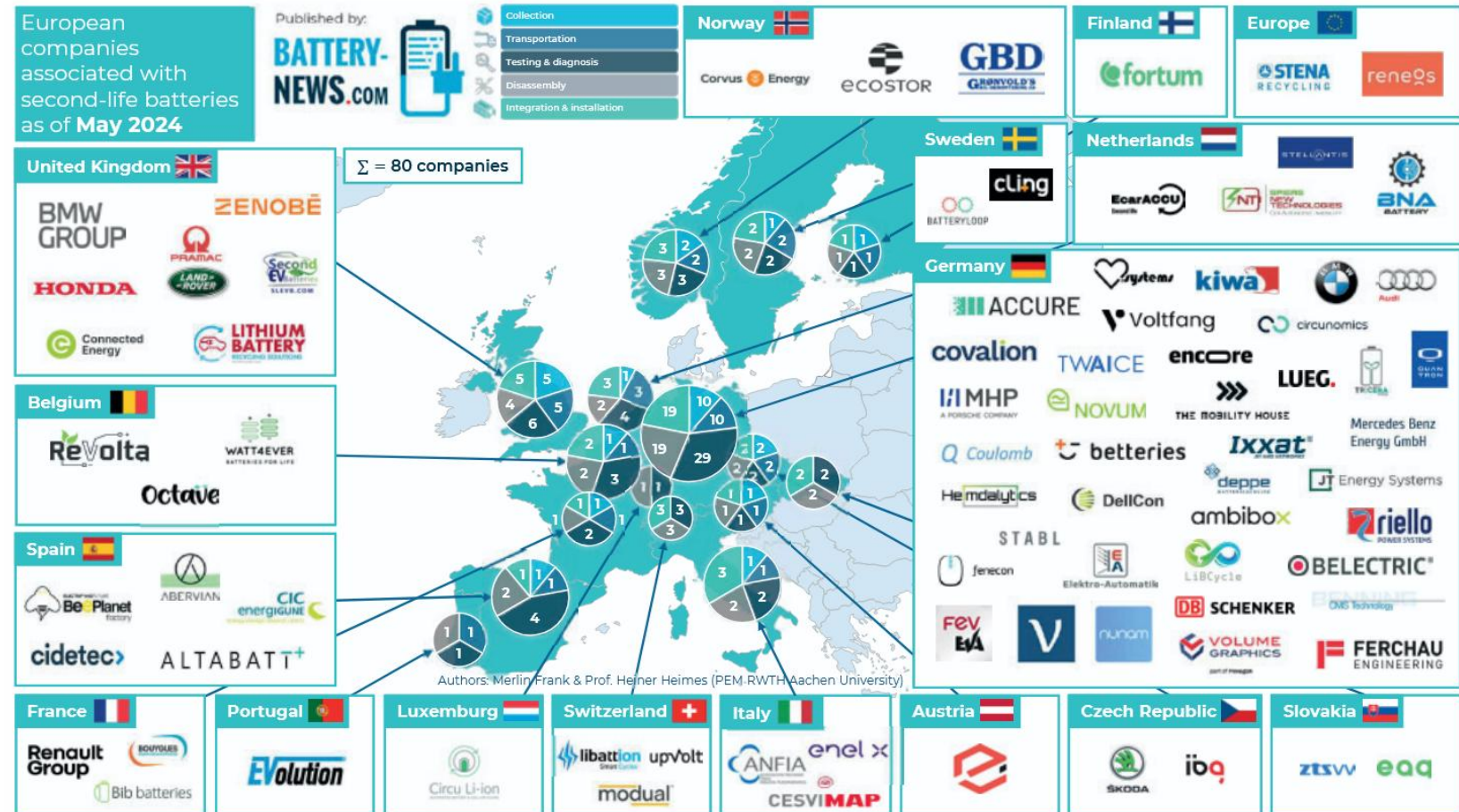


In Anlehnung an Martinez-Laserna et al. (2018)

Second-Life Batteriespeicher:

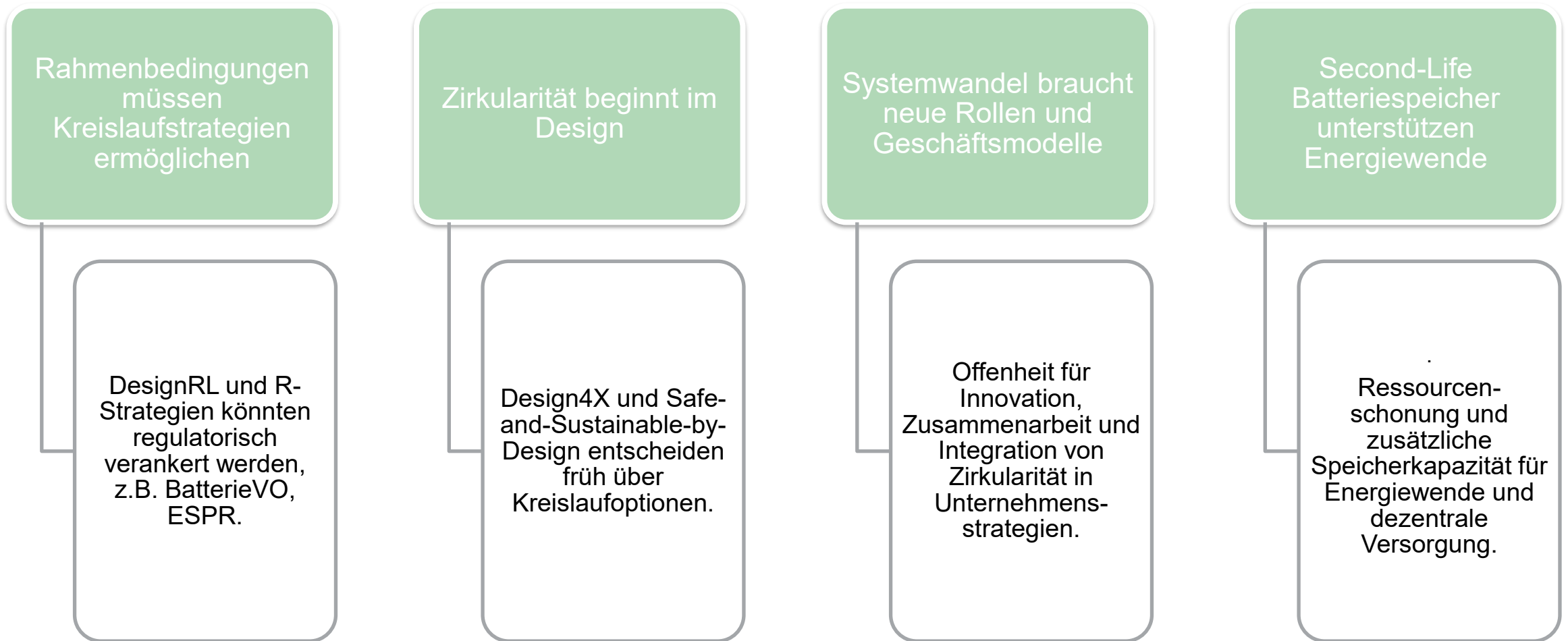
- 2015: BMW, Bosch & Vattenfall
- 2016: Nissan - The Mobility House Project
- 2017: Daimler
- 2020: Connected Energy & Renault Groupe

2024



https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaacmsamqz

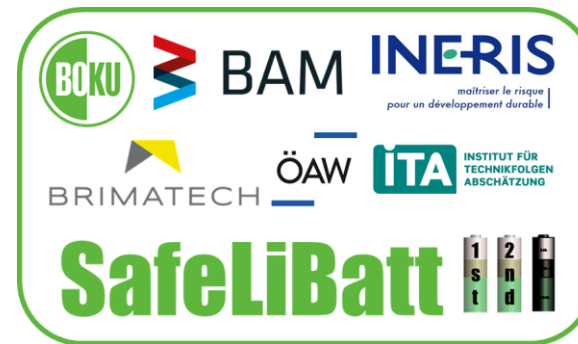
Zirkularität erfordert systemische Veränderung



Herzlichen Dank!

An alle Co-Autor:innen: Florian Part, Marion Huber-Humer, Aleksander Jandric, Sabine Jung-Waclik, Arnaud Bordes, Robert Leonhardt, Anita Schmidt

Allen SafeLiBatt Projektpartner:innen



Referenzen

1. European Environment Agency (2026) Sustainability of Europe's mobility systems 2025 – Climate. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/sustainability-of-europes-mobility-systems-2025/climate> (28.07.2026).
2. EUROSTAT (2025) EU greenhouse gas emissions reduced by 7% in 2023. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250113-1> (28.07.2026).
3. European Commission (2019) The European Green Deal. Communication from the Commission. COM(2019) 640 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640> (16.07.2024).
4. Prenner, S., Part, F., Jung-Waclik, S., Bordes, A., Leonhardt, R., Jandric, A., Schmidt, A., Huber-Humer, M. (2024A) Barriers and framework conditions for the market entry of second-life lithium-ion batteries from electric vehicles. *Heliyon*, 10 (18), e37423. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e37423.
5. Prenner, S., Part, F., Jandric, A., Bordes, A., Leonhardt, R., Jung-Waclik, S., Huber-Humer, M. (2024B) Enabling Circular Business Models: Preconditions and Key Performance Indicators for the Market Launch of Repurposed Second-Life Lithium-Ion Batteries From Electric Vehicles. *Int'l Jnl of Energy Research*, 2024 (1), 8331870. doi: 10.1155/er/8331870.
6. Geissdoerfer, M., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2016) Design thinking to enhance the sustainable business modelling process – A workshop based on a value mapping process. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1218–1232. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.020>.
7. Geissdoerfer, M., Vladimirova, D., & Evans, S. (2018) Sustainable business model innovation: A review. *Journal of Cleaner Production*, 198, 401–416. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.240>.
8. Konietzko, J., Bocken, N., & Hultink, E. J. (2020). A Tool to Analyze, Ideate and Develop Circular Innovation Ecosystems. *Sustainability*, 12(1), 417. <https://doi.org/10.3390/su12010417>.
9. Nußholz (2017) Circular Business Models: Defining a Concept and Framing an Emerging Research Field. *Sustainability* 2017, 9(10), 1810; <https://doi.org/10.3390/su9101810>.
10. Bordes, A., Marlair, G., Zantman, A., Herreyre, S., Papin, A., Desprez, P., Lecocq, A. (2022) New insight on the risk profile pertaining to lithium-ion batteries under thermal runaway as affected by system modularity and subsequent oxidation regime. *Journal of Energy Storage*, 52, 104790. doi: 10.1016/j.est.2022.104790.
11. Prenner, S., Bruchmann, T.W. & Jung-Waclik, S. (2025). Zirkuläre Geschäftsmodelle: Systemische Ansätze, Konzepte und Herausforderungen. *Österr Wasser- und Abfallw* 78, 39–52. <https://doi.org/10.1007/s00506-025-01190-4>.
12. European Commission (2020) A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2020) 98 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN> (11.01.2023).
13. European Parliament and European Council (2023) Regulation concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC: REGULATION 2023/1542.
14. Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., Hanemaaijer, A. (2017) Circular Economy: Measuring innovation in the product chain. Policy Report. BL Netherlands Environmental Assessment Agency. <https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf> (28.07.2026).
15. Gerold, E., Prenner, S., Rutrecht, B., Jandric, A., Nigl, T., Part, F. (2025) Energy, Environment, and Resources | Circular Economy, in *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* (Second Edition) (ed J. Garche), Elsevier, Oxford, pp. 57–67.
16. Zhao, Y., Pohl, O., Bhatt, A.I., Collis, G.E., Mahon, P.J., Rüther, T., Hollenkamp, A.F. (2021) A Review on Battery Market Trends, Second-Life Reuse, and Recycling. *Sustainable Chemistry*, 2 (1), 167–205. doi: 10.3390/suschem2010011.
17. Rudschies, W. Elektroauto-Batterie: Lebensdauer, Garantie, Reparatur (Electric car battery: service life, warranty, repair). <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-batterie/> (28.07.2026).
18. Spindlegger, A., Slotyuk, L., Jandric, A., Souza, R.G. de, Prenner, S., Part, F. (2025) Environmental performance of second-life lithium-ion batteries repurposed from electric vehicles for household storage systems. *Sustainable Production and Consumption*, 54, 227–240. doi: 10.1016/j.spc.2025.01.003.
19. Prenner, S., Bordes, A., Leonhardt, R., Spindlegger, A., Jandric, A., Udrea, T., Jung-Waclik, S., Schmidt, A., Gazsó, A., Part, F. (2024C) Safety and risk assessment of first- and second-life lithium-ion batteries (SafeLiBatt). Technical report on behalf of SAFERA: Coordination of European Research on Industrial Safety towards Smart and Sustainable Growth. https://www.safera.eu/_files/ugd/7bab55_dbded70e6c354d80bcb54a33f532d581.pdf (14.02.2025).
20. Martinez-Laserna, E., Gandiaga, I., Sarasketa-Zabala, E., Badedo, J., Stroe, D.-I., Swierczynski, M., Goikoetxea, A. (2018) Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 701–718. doi: 10.1016/j.rser.2018.04.035.
21. Part, F., Spindlegger, A., Prenner, S. (2026) Second-Life-Batterien: Vom Elektroauto zum Energiespeicher – Umweltvorteile und Marktbarrieren zirkulärer Geschäftsmodelle. BOKU-Energiecluster Factsheet, Nr. 02/2026, niversität für Bodenkultur Wien. https://boku.ac.at/fileadmin/data/themen/BOKU_Energiecluster/Energiecluster/EC-FS_06-02_SLB.pdf (07.09.2026).