

## A 1 Kurzzusammenfassung

In dem Projekt „LithoRec – Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ wurden mehrere Verfahrenswege zum Recycling von Traktionsbatterien evaluiert. Die Planung der Demontage der Batteriesysteme in LithoRec umfasste neben der reinen Systemplanung auch erste Untersuchungen der Automatisierbarkeit der Demontageschritte, u. a. mit der prototypischen Realisierung eines Greifersystems zur Entnahme von Batteriezellen. Prozesse für das Zerlegen der Zellen und das Abtrennen der Aktivmaterialien von den Metallfolien wurden im Labor sowie hinsichtlich des Shredderns der Zellen auch im Technikumsmaßstab etabliert und untersucht. Zur hydrometallurgischen Aufbereitung separierter Beschichtungspulver aus Lithium-Ionen-Batterien wurde in LithoRec eine Pilotanlage realisiert. Ökologische und ökonomische Bilanzen auf Basis der im Labor- oder Technikumsmaßstab durchgeführten Untersuchungen zeigten positive Ergebnisse. Zur Auftrennung der Batteriesysteme bis auf die Ebene des eingesetzten kathodischen Aktivmaterialpulvers wurde ein schlüssiges Konzept entwickelt, das in Laborapparaturen sehr gute Ergebnisse zeigte.

Die meisten konventionellen Verfahren zum Batterierecycling fokussieren auf die Rückgewinnung der Wertmetalle Kobalt und Nickel durch ein im Wesentlichen pyrometallurgisches Verfahren, das zur Rückgewinnung des Lithiums mit hydrometallurgischen Verfahren kombiniert werden muss. Die Rückgewinnung eines signifikanten Anteils an Lithium ist mit diesen Verfahren nur mit extrem hohem Aufwand möglich. In LithoRec konnte hingegen ein Verfahren entwickelt werden, in welchem auf mechanischem und hydrometallurgischem Wege je nach Aktivmaterial 85 bis über 95 %\* des Lithiums wiedergewonnen werden kann. Ein weiterer Vorteil des „LithoRec-Prozesses“ ist, dass die zurückgewonnenen Materialien bei mechanischer Aufbereitung im Labormaßstab nachgewiesenermaßen Batteriequalität aufweisen und somit ein geschlossener Kreislauf der strategisch wichtigen Batterierohstoffe erfolgt. So wurde aus Lithiumeisenphosphat Lithiumhydroxid gefällt und aus Lithiumnickelmangan-kobaltoxid (NCM) wieder neues NCM in Batteriequalität hergestellt.

Die Automatisierung der Demontage von Lithium-Ionen-Batteriesystemen wurde ebenfalls in LithoRec theoretisch untersucht. Es konnte hierbei gezeigt werden, dass einzelne dedizierte Demontageschritte wie z. B. die Entnahme der Batteriezellen ein ausgeprägtes Automatisierungspotenzial aufweisen. Ferner wurde beispielhaft ein Greifer zur Zellhandhabung mit integrierter Zustandsbestimmung (Spannungsmessung und Innenwiderstandsbestimmung) entwickelt. Eine durchgängige Automatisierung von Demontagesequenzen von Batteriesystemen ist jedoch aufgrund der Umgebungsbedingungen in Demontagefabriken, der Variantenvielfalt bzw. fehlender Standardisierung der Systeme und der Qualifikationsvoraussetzungen auch langfristig nur eingeschränkt realisierbar.

Bei der maschinellen Zerlegung, insbesondere der Zerkleinerung von Batteriesystemen, -zellen und -elektroden, treten - abhängig vom Aufbereitungsverfahren - Verunreinigungen in den zurückgewonnenen Aktivmaterialien auf, die Probleme bei der Synthese neuer Aktivmaterialien bereiten können. So zeigten sich in LithoRec bei der Synthese von LNCMO aus gezielt mit nennenswerten Mengen von Aluminium verunreinigten Lösungen Prozessschwierigkeiten: Das im hydrometallurgischen Prozess bei der Übergangsmetallabtrennung mitgefällte Aluminiumhydroxid führte zum Verkleben der sphärischen Übergangsmetallhydroxid-Partikel, die nach der Kalzination stark aggregiert vorlagen und ohne Zerstörung

---

\* bezogen auf separiertes Kathodenmaterial als Rohstoff für das hydrometallurgische Recycling



der vorher gezielt eingestellten Morphologie nicht mehr aufzumahlen waren. Zudem wurde eine verunreinigungsbedingte Veränderung der Partikelmorphologie nach der erneuten Ausfällung aus verunreinigten Übergangsmetallsalzlösungen registriert.

Des Weiteren wurden in LithoRec neue Ansätze zur Elektrolytrückgewinnung (Lösungsmittel und Leitsalz) identifiziert. Erste Erfolge zeigten sich auf den Wegen der Unterdruck-Kondensation und der Extraktion mittels überkritischem Kohlenstoffdioxid im kleinsten Labormaßstab.

Erste ökologische Bewertungen geben einen Überblick über die vollständige Prozesskette (Cradle-to-grave) mit Fokus auf Lithium-Ionen-Batterien. Im Rahmen der beiden gerade abgeschlossenen BMU-geförderten Projekte LIBRI und LithoRec wurden die Recyclingtechnologien für Lithium-Ionen-Batterien ökologisch bewertet. Des Weiteren konnte die potentielle Wirtschaftlichkeit des Recyclings großer Mengen Altbatterien in LithoRec nachgewiesen werden.

## A.1 Wesentliche Ergebnisse in den einzelnen Projektbereichen

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse aus den einzelnen Projektbereichen in stichpunktartigen Sätzen dargestellt. Eine detaillierte Diskussion erfolgt in den jeweiligen Arbeitsschritten.

### A.1.1 Projektbereich A

- Bei Realisation des vom Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität vorgegebenen Ziels eines deutschlandweiten Bestands von einer Million Elektrofahrzeuge bis 2020 sind im gleichen Jahr bereits 11.000 Tonnen Altbatterien zu behandeln (Szenario „Politisch“). Vorausgesetzt wird, dass die schnelle Marktdurchdringung zu nur minimalen Fortschritten in der Lebensdauer der Batterien führt. **(AP A.1)**
- Die wesentlichste recyclingrelevante Information ist die in Batteriesystemen und Zellen verwendete Zellchemie. Farbige gekennzeichnete Aufkleber auf Batteriesystemen, Modulen und Zellen sollen Aufschluss über die Zellchemie geben (z. B. „NCA“, „NMC“, „LFP“). Zudem sollte die BattG-Melderegisternummer nach UBA oder der Herstellername selbst angegeben werden, damit der Hersteller im Sinne des BattG eindeutig identifiziert werden kann. **(AP A.2)**
- Die Bereitstellung der für die Demontage benötigten Anweisungen kann über eine Erweiterung des bereits etablierten System IDIS erfolgen. **(AP A.2)**
- Da zunächst ein **zentrales einstufiges Sammelkonzept** anzustreben ist, sollte ein erstes Demontagewerk mit einer Verarbeitungskapazität in der Größenordnung bis 5.000 BEV-Äquivalente/Jahr in der unmittelbaren Nähe eines Zellaufbereitungswerks errichtet werden.
- Langfristig (ab ca. 2020) ist ein Übergang zur **dezentralen zweistufigen Sammlung und Demontage** empfehlenswert.

## A.1.2 Projektbereich B

- Batterieerkennungs- und Visualisierungssoftware für Mehrmarkenwerkstattdiagnosegerät programmiert und aufgespielt
- Maschinelles Aufschließen kompletter Zellverbände ist möglich → Inertisierung allerdings notwendig
- Mechanische Demontage von verschiedenen Batteriesystemen und Erstellung von Demontagerihenfolgen sowie –zeiten inkl. der notwendigen Demontagewerkzeuge
- Methodische Bewertung der Demontage hinsichtlich Demontagefreundlichkeit und Automatisierbarkeit
- Konzeptionierung von Automatisierungslösungen auf Basis der genannten Bewertungsmethodik (Handhabung der Batteriesysteme, -module und Zellen)
- Entwurf alternativer Layouts und Verkettungen von Demontagesystemen mit rein manuellen Demontagesystemen, sowie gemischt manuell und automatisierten Demontagesystemen
- Ausgestaltung eines Greifers für das automatisierte Handhaben von Batteriezellen mit integrierter Spannungs- und Innenwiderstandsbestimmung
- Erprobung durch Greifen und SPS-basierte Messdatenerfassung von drei verschiedenen Pouch-Batteriezellen
- Ableitung von Anforderungen an das Design von Batteriesystemen gemäß dem Design for Recycling und Design for Environment
- Aufschluss, Sortierung und Klassierung im industriellen Maßstab sind möglich
- Nasse, Lösungsmittelbasierte Separation von Stromsammlerfolie und Aktivmaterial ist möglich, aber aufwendig
- Trockene, Mechanische Separation ist großtechnisch in hoher Aktivmaterial-Reinheit und mit hohen Ausbeuten umsetzbar
- Prozess zur sortenreinen Trennung von Beschichtung und Stromsammlerfolie in Reinheit >99 % entwickelt
- Bedarf an Realisierung im Pilotmaßstab zur vollständigen Charakterisierung des Prozesses

## A.1.3 Projektbereich C

- Aus rekonditionierten Aktivmaterialien lassen sich grundsätzlich Elektroden und Zellen (Labormaßstab) mit ausreichend guter elektrochemischer Performance herstellen.
- Prozess zur direkten Wiederbeschichtung von Trägerfolien mit Material aus Produktionsausschuss entwickelt
- Direkt wiederbeschichtete Materialien aus Ausschuss haben gleiche elektrochemische Qualität wie Neumaterialien → keine Resynthese nötig



- Aktivmaterialsynthese aus schwach verunreinigter Übergangsmetallsalzlösung mit vergleichbarer elektrochemischen Performance erfolgreich
- Aktivmaterialsynthese aus verunreinigter Übergangsmetallsalzlösung erfolgreich, aber bei stärkerer Verunreinigung schlechtere elektrochemische Performance
- Bedarf an nachträglicher Aufreinigung – besonders hinsichtlich einer Abreicherung von Aluminium - oder hochreiner Separation (entwickelt in **PB B**)
- Bedarf an weiterer Aufklärung des Einflusses von Verunreinigungen auf die Qualität von Recycling-Elektroden
- Bedarf an Pilotanlage zur tatsächlichen Herstellung von Recyclingmaterialien (ohne Simulation der Verunreinigungen)

#### **A.1.4 Projektbereich D**

- Untersuchung der mechanischen Alterungsmechanismen (Haftkraft, Elastizität der Elektrodenschicht) an Standardmaterial
- Untersuchung an zwei unterschiedlich verunreinigten NMC-Aktivmaterialien.
- Schwach verunreinigtes NMC-Material zeigt ähnlich gute elektrochemische Performance wie Ursprungsmaterial
- Stark NMC-verunreinigtes Material zeigt deutlich geringere Performance als Standard
- Verunreinigungen in NMC-Aktivmaterial verursachen verstärkte Partikelbrüche nach Zyklisierung

#### **A.1.5 Projektbereich E**

- Die ökologische Auswertung des LithoRec-Prozesses im Rahmen der vom Öko-Institut durchgeführten Ökobilanz nach ISO 14040/14044 ergibt in den betrachteten ökologischen Wirkungskategorien teils deutliche Nettogutschriften in sämtlichen untersuchten Prozessschritten. Das Recycling der Batterien mit Hilfe des LithoRec-Prozesses ist somit als ökologisch sinnvoll zu betrachten.
- Die ökonomische Bewertung zeigt, dass der LithoRec-Recyclingprozess in Kombination mit einer mechanischen Aufbereitung ab einem jährlichen Aufkommen von ca. 4.500 t Systemen bzw. 15.000 Stück BEV-Systemen wirtschaftlich betrieben werden könnte. Ein solches Aufkommen wäre bei starker Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen und bei Erreichung der Ziele des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität – ein Bestand von einer Million Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 – zwischen 2018 und 2020 erreicht.
- Die ursprünglich angedachte manuelle Öffnung und Separation von Batteriezellen, die in Konkurrenz zu der mechanischen Aufbereitung steht, ist als unwirtschaftlich zu bezeichnen.
- Neben der Menge des Altbatterieaufkommens ist dessen Zusammensetzung wesentlicher Treiber eines sich finanziell selbst tragenden Recyclingprozesses. Werden zu-



künftig vorwiegend Lithiumeisenphosphatbatterien in Elektrofahrzeugen verwendet, wird die Gewinnschwelle des Gesamtprozesses erst bei ca. 6.800 t Systeme bzw. 21.000 BEV-Systeme erreicht.

- Die Wirtschaftlichkeit der Einzelprozesse kann dabei durch bestimmte Faktoren wesentlich beeinträchtigt werden. Größter Faktor sind sinkende Preise für die zurückgewonnenen Wertstoffe, aber auch zusätzlich benötigte Einsatzstoffe (z. B. Stickstoff).

### **A.1.6 Projektbereich F**

- Entwicklung eines ProdTect-Produktmodells für ein Lithium-Ionen-Batteriesystem
- Identifizierung von Anforderungen für die allgemeine Batteriegestaltung mit folgender Erarbeitung von Gestaltungsregeln für die demontagefreundliche Batteriegestaltung
- Aufstellen von Konstruktionskatalogen für Verbindungstechniken, Fügen von Körpern und den Formen der Wärmeübertragung
- Die Abhängigkeiten zwischen Batterie und Fahrzeug sind ohne Normung nicht genau präzisierbar bzw. zu stark von den jeweiligen Herstellern abhängig.
- Vordefinierte/genormte Bauräume erleichtern dem Batteriehersteller modulare Systeme zu erarbeiten.
- Mit wenigen Grundmodulen ist es möglich alle Elektrifizierungsgrade abzudecken
- Definition von Ansätzen die eine vollständige Umsetzung in CAD erfordern mit prototypischer CAD-Umsetzung.
- Erarbeitung eines Konzeptes zum sicheren Umgang mit Hochvoltkomponenten des Batteriesystems
- Identifizierung von schnell realisierbaren Sicherheitskonzepten für die Aspekte Transport und Demontage
- Zusammenstellung der Rechtsvorschriften für eine fachgerechte Demontage und das Recycling sowie Ableitung von Vorschlägen für die Dokumentation in IDIS sowie als Recyclingpass

### **A.1.7 Projektbereich G**

- Konzeptionierung einer möglichen Recycling-Pilotanlage aus den Einzelschritten der vorangegangenen Projektbereiche
- komplett neue Anlage auf der „grünen Wiese“
- Zusammenführung der Ergebnisse aus den anderen Projektbereichen
- Grundrisskonzept einer Anlage zur Verarbeitung von 700 kg Zellmaterial
- Ein Verfahrensfließbild wurde erstellt
- Einzelne Anlagenteile, Maschinen und Geräte wurden ausgelegt und mögliche Lieferanten bestimmt



## A.2 Veröffentlichungen

### Publikationen

- [Schmitt, 2011] Schmitt, J.; Haupt, H.; Kurrat, M.; Raatz, A.: Disassembly Automation for Lithium-Ion Battery Systems Using a Flexible Gripper. In: Proc. 15th IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Tallinn, Estland, 2011, ISBN 978-1-4577-1157-2
- [Hanisch, 2011] Hanisch, C., Haselrieder, W., Kwade, A.. (2011). Recovery of active materials from spent lithium-ion electrodes and electrode production rejects in: Hesselbach, J., Herrmann, C.(Hrsg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 85-89
- [Hanisch, 2012] Hanisch, C., Haselrieder, W., Kwade, A.. (2012). "Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – das Projekt LithoRec" in: Thomé-Kozmienski, K.J., Goldmann, D.(Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 5, ISBN 978-3-935317-81-8, TK Verlag, Neuruppin, S. 691-698
- [Herrmann, 2012] Herrmann, C.; Raatz, A.; Mennenga, M.; Schmitt, J.; Andrew, S.: Assessment of Automation Potentials for the Disassembly of Automotive Lithium Ion Battery Systems. In: Proc. 19th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Berkeley, USA, 2012
- [Hoyer, 2011a] Hoyer, C.; Kieckhäfer, K.; Spengler, T. (2011): Strategische Planung des Recyclings von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien, in: Sucky, E.; Asdecker, B.; Dobhan, A.; Haas, S.; Wiese, J. (Hrsg.): Logistikmanagement: Herausforderungen, Chancen und Lösungen, Band II, Tagungsband der Logistikmanagement 2011, University of Bamberg Press, Bamberg, S. 399–419.
- [Hoyer, 2011b] Hoyer, C.; Kieckhäfer, K.; Spengler, T. (2011): A Strategic Framework for the Design of Recycling Networks for Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles, in: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 79-84

### Vorträge und Präsentationen

- 12. Doktorandenworkshop Nordost (April 2010, Cottbus):  
„Netzwerk- und Prozessgestaltung für das Recycling von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien“ (Claas Hoyer)
- 5. Tagung der Autoverwerter (November 2010, Hohenroda):  
"LithoRec - Recycling von Lithium-Ionen-Batterien" (Gunnar Bärwaldt)



- Batterietag in Aachen, (Februar 2011, Aachen):  
„Recycling von Lithium-Ionen Batterien am Beispiel von LithoRec“ (Arno Kwade)
- Kraftwerk Batterie, (März 2011, Aachen):  
„LithoRec - Aufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien zur hydro-metallurgischen Rückgewinnung von Lithium und Übergangsmetallen“ (Arno Kwade)
- EUROFORUM-Konferenz “Rohstoffe für E-Mobilität” (Mai 2011, Stuttgart):  
„Das LithoRec - Projekt: Recycling von EV-Batterien“ (Arno Kwade)
- 6. Tagung der Autoverwerter (November 2011, Hohenroda):  
„LithoRec - Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – Die Ergebnisse“ (Stefan Andrew)
- Materialica – Materials for Batteries – Congress (November 2011, München):  
“Sustainability – Recycling of Lithium-Ion-Batteries” (Christian Hanisch)
- „Von Akku bis Zink-Kohle - Entwicklungen in der Batterieentsorgung“, (November 2011, Potsdam):  
„Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (Christian Hanisch)
- Advanced Battery Power, (März 2012, Münster):  
„Recycling of Lithium Ion Batteries“ (Christian Hanisch)

## Poster

B. Hoffmann, S. Krüger, H. C. Wagner, F. Schappacher, S. Nowak, S. Passerini, M. Winter „*Recycling von Lithium Ionen Batterien – Analyse und Methoden*“, Kraftwerk Batterie – Lösungen für Automobil und Energieversorgung, Aachen, 01. – 02.03.2011.

S. Krüger, C. Hanisch, W. Haselrieder, S. Nowak, S. Passerini, A. Kwade, M. Winter „*Recycling Of Lithium-Ion Batteries*“, 118<sup>th</sup> International Conference on Solid State Ionics, Warschau, Polen, 03. – 08.07.2011.

H. Haupt, D. Wedler, „*Ansätze zur demontagefreundlichen Batteriegestaltung*“, Kraftwerk Batterie – Lösungen für Automobil und Energieversorgung, Aachen, 01. – 02.03.2011.

## Presseartikel

- „Lithium – Ein Spannungsmacher auf Kreislaufkurs“, Artikel VDI nachrichten, 07.01.2011 basierend auf Interview mit Professor Kwade.
- „Wiederverwertung Recycling im Elektro-Zeitalter“, Süddeutsche Zeitung, 27.04.2011, basierend auf Interview mit Christian Hanisch



- „Nachweislich grün“, Recyclingmagazin, Ausgabe 05/12 basierend auf Ökobilanz und Interview Christian Hanisch

### A.3 Begriffsbestimmungen

**Hybridfahrzeuge** (Hybrid Electric Vehicles, HEV) sind Personenkraftwagen, die sowohl durch einen konventionellen Verbrennungsmotor als auch durch einen Elektromotor angetrieben werden können. Die Versorgung mit elektrischer Energie erfolgt aus einem Akkumulator, der beispielsweise durch Rekuperation (Bremskraftrückgewinnung) geladen wird. Ein rein elektrischer Antriebsmodus ist keine Bedingung.

**Plug-In-Hybridfahrzeuge** (Plug-In Hybrid Electric Vehicles, PHEV) sind *→Hybridfahrzeuge*, deren Akkumulatoren unabhängig von dem eingebauten Verbrennungsmotor durch Anschluss an stationäre Ladevorrichtungen geladen werden können. Die Möglichkeit eines rein elektrischen Betriebs für kurze bis mittlere Strecken (~ 40 km) ist Bedingung.

**Reine Elektrofahrzeuge** (Battery Electric Vehicles, BEV) sind Personenkraftwagen, die ausschließlich über einen elektrischen Antrieb verfügen. Die Versorgung mit elektrischer Energie erfolgt aus einem Akkumulator, der durch Anschluss an stationäre Ladevorrichtungen geladen werden kann.

Unter dem Begriff **Elektrofahrzeug** werden PHEV und BEV zusammengefasst.

**Batterie-Management-Systeme** (BMS) sind elektronische Systeme die die funktionale Sicherheit eines Batteriesystems gewährleisten. Zusätzliche Funktionen können eine Betriebsdatenerfassung und Verarbeitung umfassen. Die Ausgestaltung ist herstellerabhängig.

Als **Package** bezeichnet man in der Fahrzeugtechnik die geometrische Anordnung von Bauteilen eines Gesamtsystems zueinander. Die Positionen können durch sogenannte Packagemaße beschrieben werden.

Die **Modularisierung** beschreibt die Möglichkeit, unterschiedliche Gesamtsysteme aus der Variation kleiner Grundkörper aufzubauen. Die Grundkörper benötigen dafür definierte Schnittstellen

**Templates** sind im CAD-System eine Vorlage für einen geometrischen Körper, in dem modellierungsschritte hinterlegt sein können. Anhand von Eingabeparametern kann auf diese Weise schnell eine bekannte Geometrie erzeugt werden.





# A Analyse und Entwicklung logistischer Sammel- und Rückführungsprozesse

## A.1 Analyse des Altbatterieaufkommens

Zielsetzung des **AP A.1** ist es, das Aufkommen von Lithium-Ionen-Altbatterien aus Elektrofahrzeugen über die Zeit zu analysieren und abzuschätzen, um eine Planungsgrundlage für nachfolgende Untersuchungen in den einzelnen Projektbereichen zu schaffen. Aufgrund der hohen Unsicherheiten werden drei Szenarien entwickelt, die das erwartete Spektrum der Markt- und Technologieentwicklung in ihrer Breite wiedergeben. Diese Szenarien, die unter anderem den Elektrofahrzeugmarktbestand für zukünftige Zeitpunkte sowie die durchschnittliche Nutzungsdauer von Traktionsbatterien vorgeben, werden anschließend genutzt, um mit Hilfe eines neu entwickelten systemdynamischen Simulationsmodells das Altbatterieaufkommen über die Zeit abzuschätzen.

### A.1.1 Identifikation und Analyse der für den Rückfluss von Lithium-Ionen Altbatterien relevanten Einflussgrößen

Ziel des Arbeitsschritts ist die Identifikation und Untersuchung derjenigen Einflussfaktoren, die das Altbatterieaufkommen bestimmen. Diese Arbeiten wurden von AIP-TUBS in Zusammenarbeit mit AUDI durchgeführt. Die identifizierten Faktoren können in exogene und endogene unterteilt werden. Wesentliche exogene Faktoren sind (vgl. Anhang 1): Die Marktentwicklung für Kraftfahrzeuge, die eine Lithium-Ionen-Traktionsbatterie verwenden (A1 – A4), die Lebensdauer dieser Fahrzeuge (A5), die Lebensdauer der Batterien im mobilen Betrieb (C3) und die Weiterverwendung gebrauchter Batterien außerhalb des Systems (D1, D2).

Die Einflussfaktoren sind für die im Projekt untersuchten Batterievarianten und Antriebskonzepte getrennt zu betrachten, da das Altbatterieaufkommen maßgeblich hiervon abhängt. Des Weiteren ist im Bereich des Marktpotenzials zu beachten, dass das mittelfristige und langfristige Marktpotenzial eines Antriebskonzepts differieren kann. Die weiteren Faktoren B1 bis B4 sowie C1 und C2 (im Folgenden *Behelfsfaktoren*) haben zwar keinen unmittelbaren Einfluss auf das gesamte Batterieaufkommen, tragen jedoch dem Sachverhalt Rechnung, dass dieses aufgrund unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen der Batterievarianten nicht als homogene Masse behandelt werden kann. Vielmehr unterscheiden sich die Batterievarianten beispielsweise hinsichtlich ihrer Energie- und/oder Leistungsdichte, ihrer Zyklenfestigkeit und kalendarischen Alterung und damit ihrer Lebensdauer sowie der Reife der Technologie.

Je nach Fragestellung kann mithilfe der Behelfsfaktoren das Altbatterieaufkommen unterschiedlich spezifiziert werden. So sind für den Transport der Batterien eher die Masse und das Volumen bezogen auf das Batteriesystem relevant, während für die Bestimmung von Kapazitäten im Verwertungsprozess eher die Masse bezogen auf die Zellen entscheidend ist. Im Rahmen der Untersuchungen in **AS A.1.4** wurden nur die Anzahl der Systemeinheiten und die Masse des Altbatterieaufkommens erhoben.



## A.1.2 Entwicklung eines Simulationsmodells zur Abschätzung des Rückflusses von Li-Ionen Altbatterien

Zur Simulation, Beschreibung und Analyse des Altbatterieaufkommens wurde von AIP-TUBS ein szenariobasiertes systemdynamisches Modell in der Entwicklungs- und Simulationsumgebung „VENSIM“ entwickelt.<sup>1</sup> Das Modell ist konzeptionell in vier Module gegliedert (siehe Abbildung A-1). Im **Fahrzeugabsatzmodul** wird der Absatz von Neufahrzeugen verschiedener Antriebskonzepte über die Zeit simuliert. Die abgesetzten Neufahrzeuge finden Eingang in das **Fahrzeugbestandmodul**, in dem der Bestand der Fahrzeuge modelliert ist. Der Bestand der Fahrzeuge ist die Summe aus kumulierten Neuzulassungen abzüglich kumulierter Verschrottungen. Die Anzahl der Verschrottungen über die Zeit wird in dem Modul durch die Simulation der Fahrzeugalterung ermittelt. Die in den Fahrzeugen verbauten Batterien unterschiedlicher Varianten werden im **Batteriebestandmodul** erfasst, in dem die Alterung und die anschließende Deinstallation und der Ersatz von Batterien der Fahrzeuge im Fahrzeugbestand simuliert werden. Die Summe aus Fahrzeugverschrottungen und Batterieersatz ist das Aufkommen deinstallierter Batterien. Das für das Recycling zur Verfügung stehende Altbatterieaufkommen wird mit Berücksichtigung der Verzögerung durch mögliche Weiterverwendung im **Altbatterieaufkommenmodul** abgebildet. Das Modell wird mithilfe von Szenarien parametrisiert. Exogen vorgegeben werden dabei Antriebskonzeptdefinitionen, Batterievariantendefinitionen und Weiterverwendung.

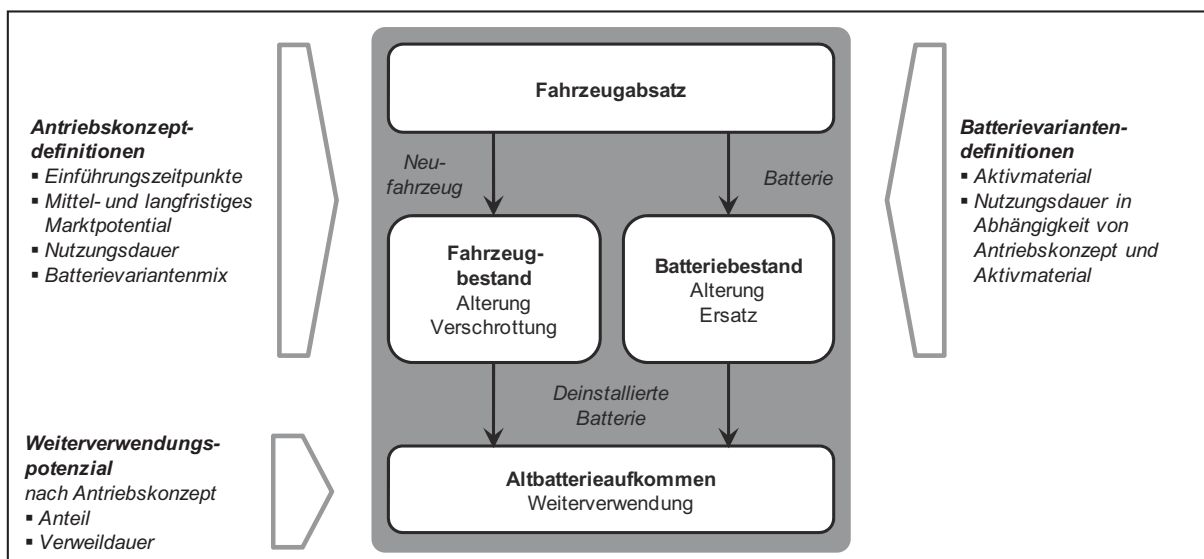


Abbildung A-1: Konzept des Modells zur Abschätzung des Altbatterieaufkommens

### A.1.2.1 Beschreibung der Module

Grundidee des **Fahrzeugabsatzmoduls** ist es, auf Basis exogener Szenariovorgaben den Fahrzeugabsatz über die Zeit endogen zu berechnen. Der Gesamtabsatz für die einzelnen Antriebskonzepte ergibt sich dabei annahmegemäß aus der Summe der Erstkäufe und der Ersatzbeschaffungen. Während die Erstkäufe mit Hilfe eines diffusionstheoretischen Modells

<sup>1</sup> Für eine wissenschaftliche Einordnung und Vorstellung einer Erweiterung dieses Modells siehe Hoyer et al. (2011).



in Anlehnung an Bass (1969) ermittelt werden, ergeben sich die Ersatzkäufe aus den Fahrzeugverschrottungen nach Ende der Nutzungsdauer.

Grundlage für die Ermittlung des Fahrzeugabsatzes auf Basis von Erstkäufen über die Zeit stellt im Modell eine logistische Wachstumsfunktion dar. Der Fahrzeugabsatz entspricht dabei dem Bestandswachstum der logistischen Funktion. Allgemein hängt dieses Wachstum vom aktuellen Bestand, einer Bestandsobergrenze und einer Wachstumskonstanten ab. Die Bestandsobergrenze ist im vorliegenden Fall durch das Marktpotential bestimmt. Die Wachstumskonstante wird im Modell unter Zuhilfenahme exogener Szenariovorgaben berechnet. Hierzu zählen der Einführungszeitpunkt eines Antriebskonzepts sowie die erwarteten Fahrzeugbestände zweier zukünftiger Zeitpunkte: dem initialen und dem langfristigen Marktpotential. Das initiale Marktpotential erlaubt die Vorgabe eines in näherer Zukunft (5 bis 15 Jahre) erwarteten Fahrzeugbestands. Über diesen Zeitraum hinausgehende Erwartungen bezüglich des Fahrzeugbestands in einem gesättigten Markt können mit dem langfristigen Marktpotential berücksichtigt werden. Darüber hinaus erlaubt das Modell die Abbildung von Übergangstechnologien und damit der Degenerationsphase eines Antriebkonzepts. Ist das langfristige Marktpotential niedriger als das initiale Marktpotential, wird die Anzahl der Ersatzbeschaffungen begrenzt, bis auch der Bestand der Fahrzeuge auf das langfristige Marktpotential gesunken ist.

Die im Fahrzeugabsatzmodul berechneten abgesetzten Fahrzeuge finden Eingang in das **Fahrzeugbestandmodul**, in dem die Alterung der Fahrzeuge bis zu ihrer Verschrottung simuliert wird. Der Alterungsprozess der Fahrzeuge ist in sogenannten Alterskohorten modelliert.<sup>2</sup> Damit lässt sich der Gesamtfahrzeugbestand in verschiedene Altersgruppen klassifizieren und Fahrzeugverschrottungen können auf Basis der erwarteten mittleren Nutzungsdauer und der nach Fahrzeugalter differenzierten Ausfallraten bestimmt werden. Fahrzeugverschrottungen führen im Modell zu Ersatzkäufen, die im Falle negativen Marktwachstums begrenzt sind.

Im **Batteriebestandmodul** wird die Anzahl der aufgrund von Fahrzeugverschrottung oder Alterung aus den Fahrzeugen deinstallierten Batterien berechnet. Der Batteriebestand erhöht sich um den Neufahrzeugbatteriebedarf und den Ersatzbatteriebedarf. Der Neufahrzeugbatteriebedarf wird aus dem Gesamtabatz der jeweiligen Antriebskonzepte unter Berücksichtigung der exogenen Vorgabe von antriebskonzeptspezifischen Batterievariantenanteilen ermittelt. Verschrottungen von Fahrzeugen verringern den Bestand. Gealterte Batterien führen zu Ersatzbatteriebedarf, so dass der Bestand installierter Batterien konstant bleibt. Die Alterung der Batterien ist dabei vereinfacht modelliert, die Batterien werden frühestens durch die Verschrottung des Fahrzeugs und spätestens bei Erreichen der Batterienutzungsdauer deinstalliert. Die nach Antriebskonzept und Batterievariante differenzierte Batterienutzungsdauer wird exogen vorgegeben.

Das **Altbatterieaufkommenmodul** dient der Ermittlung der dem Recycling zur Verfügung stehenden Altbatterien über die Zeit. Eingangsgröße ist die Anzahl deinstallierter Batterien aus dem Batteriebestandmodul. Aus exogenen Szenariovorgaben bezüglich des Anteils der Batterien in Weiterverwendung und der Dauer der Weiterverwendung wird die Stückzahl der Altbatterien berechnet, die dem Recycling zur Verfügung stehen. Dabei wird nach dem Antriebskonzept differenziert, in dem die Batterie ursprünglich installiert war. Mithilfe der vorge-

---

<sup>2</sup> Vgl. Sterman (2000).



gebenen antriebskonzept- und batterievariantenspezifischen Massen wird daraus die Gesamtmasse der Altbatterien über die Zeit ermittelt.

### A.1.3 Erarbeitung von Szenarien zur langfristigen Absatzentwicklung und zur Nutzung von Elektrofahrzeugen im Zeitverlauf

Zunächst war eine Beteiligung des AIP-TUBS in diesem Arbeitsschritt nicht vorgesehen. Im Projektverlauf erschien dies jedoch eine wertvolle Ergänzung zu den Ergebnissen der Projektpartner, so dass hier die Ergebnisse der AIP-TUBS zu diesem Arbeitsschritt vorgestellt werden. In Zusammenarbeit mit Experten von AUDI konnten drei Szenarien zur langfristigen Absatzentwicklung und zur Nutzung von Elektrofahrzeugen im Zeitverlauf erarbeitet werden. Nach einer Auflistung der grundlegenden Annahmen werden die Annahmen der einzelnen Szenarien erläutert und die daraus folgende Parametrierung dargelegt.

#### A.1.3.1 Grundlegende Annahmen

**Betrachtungsgegenstand** ist das zu erwartende Aufkommen von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien in Deutschland, die nach ihrer Nutzung in Hybrid-, Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeugen aufgrund Fahrzeugverschrottung, Defekts oder Erreichung der maximalen Nutzungsdauer als Abfall einer Entsorgung zugeführt werden müssen. Aufgrund der ungewissen Entwicklung des Markts für die Fahrzeuge und der Batterietechnik wird die Analyse in einer szenariobasierten Simulation durchgeführt.

Die **Zielgröße** der Simulation ist das Altbatterieaufkommen. Es wird in den Einheiten Menge in Stück/a, Masse in t/a und Nennkapazität in kWh/a, jeweils gegliedert nach Antriebskonzept, erhoben. Die Berechnung erfolgt auf Grundlage der Referenzwerte aus Anhang 2.

Die Analyse findet für einen **langfristigen Zeitraum** von 2010 bis 2030 statt. Für die Überprüfung von Systemverhalten im Gleichgewicht wurden auch weitreichendere Zeiträume simuliert, diese sind jedoch nicht Gegenstand der Auswertung in **AS A.1.4. Verkaufsstart** für Hybridfahrzeuge mit serienmäßiger Lithium-Ionen-Batterie ist 2010, Plug-In-Hybrid- und reine Elektrofahrzeuge werden ab 2012 auf dem deutschen Markt angeboten. Als Grundlage zur Berechnung der Marktanteile der Elektromobilität wird von einem **langfristigen jährlichen PKW-Absatzvolumen** auf dem deutschen Markt von 3,3 Mio. Fahrzeugen ausgegangen.<sup>3</sup>

#### A.1.3.2 Annahmen der Szenarien

Als Treiber des Altbatterieaufkommens wurden die Ölpreis-, Markt- und Technikentwicklung sowie das Wieder- und Weiterverwendungspotenzial der Traktionsbatterien identifiziert. Tabelle A-1 beschreibt die Annahmen der Szenarien zur Markt- und Technologieentwicklung. Aus den beschriebenen Annahmen der Szenarien wurde entsprechend der in **AS A.1.2** ermittelten Einflussfaktoren eine Parametrierung vorgenommen, welche Tabelle A-2 bis Tabelle A-5 zu entnehmen ist.

---

<sup>3</sup> Geschätzt auf Basis der PKW-Zulassungszahlen, vgl. Statistisches Bundesamt (2009).



Tabelle A-1: Beschreibung der Annahmen der Szenarien zur Markt- und Technologieentwicklung

Treiber	Pessimistisches Szenario	Politisches Szenario	Realistisches Szenario
Ölpreis	Unwesentlich steigend	Stark steigend	Extrem steigend
Markt	Keine oder nicht zielführende Anreizprogramme Hohe Aufpreise, keine Kompensation durch Betriebskosten	Erfolgreiche Marktaktivierung, Subventionen an Hersteller mindern deren Risiko, Aufpreise werden durch niedrige Betriebskosten und Vergünstigungen kompensiert	Zielgerichtete Anreizprogramme Moderate Aufpreise werden durch vergleichsweise niedrige Betriebskosten kompensiert
Technik	Viele herstellereigenspezifische Lösungen, internationale Ladung kompliziert Kaum Fortschritte in der Batterietechnik, niedrige Reichweite und Lebensdauer der Batterien	Späte Standardisierungen in Bezug auf Batterien und deren Ladung sowie Elektroantrieb; Fortschritte in Bezug auf Effizienz, Reichweite und Zuverlässigkeit der Batterien	Weitreichende Standardisierungen in Bezug auf Batterien, deren Ladung sowie den Elektroantrieb Technologiesprünge führen zu hoher Reichweite und langer Batterie-Lebensdauer
Wieder-/Weiterverwendung	Niedrige Eignung und kaum Nachfrage für stationäre Verwendung	Hohe Eignung, jedoch wenig Nachfrage für stationäre Verwendung	Hohe Eignung und Nachfrage für stationäre Verwendung, hoher finanzieller Restwert
Konsequenzen	<b>Alternative Kraftstoffe und optimierte konventionelle Verbrennungsmotoren setzen sich durch, Hybrid- und Elektrofahrzeuge bleiben Randscheinung</b>	<b>Beschleunigtes Marktwachstum für PHEV und BEV, langfristig sehr hohe Marktanteile (ca. 60 Prozent) Bestand 2020: 1 Mio. Elektrofahrzeuge (PHEV + BEV)</b>	<b>Natürliches Marktwachstum für PHEV und BEV, aufgrund der hohen Reichweiten werden vergleichsweise hohe Anteile BEV abgesetzt</b>



Tabelle A-2: Szenarioparametrierung, Marktentwicklung Antriebskonzept (A1 – A5)

Szenario	Pessimistisch			Politisch			Realistisch		
	Antriebskonzept			Antriebskonzept			Antriebskonzept		
Parameter	HEV	PHEV	BEV	HEV	PHEV	BEV	HEV	PHEV	BEV
Initiales Marktpotenzial (A1) [1.000 Fahrzeuge]	100	200	50	200	800	200	50	200	50
Zeitpunkt der Erreichung (A2) [Datum]	2020	2020	2025	2030	2020	2020	2020	2020	2020
Langfristiges Marktpotenzial (A3) [1.000 Fahrzeuge]	250	300	250	150	15.000	5.000	150	12.000	8.000
Zeitpunkt der Erreichung (A4) [Datum]	2030	2030	2035	2040	2050	2050	2040	2050	2050
Durchschn. Lebensdauer des Fahrzeugs (A5) [Jahre]	11	9	9	12	10	10	14	12	12

Tabelle A-3: Szenarioparametrierung, Verhältnis der verwendeten Batterievarianten (C1)

Szenario	Pessimistisch	Politisch	Realistisch
Verhältnis LFP [v.H.]	20	20	60
Verhältnis NMC [v.H.]	70	70	30
Verhältnis LCA [v.H.]	10	10	10

Tabelle A-4: Szenarioparametrierung, Nutzungsdauer der Batterien nach Antriebskonzept (C3)

Szenario	Pessimistisch	Politisch	Realistisch
Nutzungsdauer HEV [Monate]	50	72	180
Nutzungsdauer PHEV [Monate]	42	60	96
Nutzungsdauer BEV [Monate]	36	48	60



Tabelle A-5: Szenarioparametrierung, Wieder-/Weiterverwendung außerhalb des Systems (D1 und D2)

Szenario	Pessimistisch			Politisch			Realistisch		
	Antriebskonzept			Antriebskonzept			Antriebskonzept		
Parameter	HEV	PHEV	BEV	HEV	PHEV	BEV	HEV	PHEV	BEV
Rücklaufverzögerung (D1) [Jahre]	–	–	2,0	–	1,0	2,0	–	2,0	4,0
Anteil der verzögerten Rückläufer (D2) [v. H.]	–	–	8	–	2	15	–	15	50

### A.1.4 Durchführung einer Simulationsstudie zum Altbatterierücklauf mit expliziter Berücksichtigung unsicherer Einflüsse

Die Simulationsstudie wurde mit Hilfe des in **AS A.1.2** entwickelten Modells von AIP-TUBS in Kooperation mit AUDI durchgeführt. Im Folgenden werden zunächst jeweils die Ergebnisse für die Parametrierung des Modells mit den drei Szenarien „Pessimistisch“, „Politisch“ und „Realistisch“ aus **AS A.1.3** dargelegt und die Szenarien untereinander verglichen. Aufgrund der erheblichen Unsicherheiten im Rahmen des Altbatterieaufkommens werden abschließend die Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse ausgewertet.

#### A.1.4.1 Szenario „Pessimistisch“

Das Szenario „Pessimistisch“ kann bezüglich der Marktentwicklung für Elektrofahrzeuge als Minimalszenario betrachtet werden. Die Annahmen vorausgesetzt, entspricht der gemeinsame Marktanteil der Elektrofahrzeuge (PHEV und BEV) 2020 unter 1 Prozent. Er steigt nur unwesentlich bis zum Jahr 2040 auf knapp 2 Prozent. Insbesondere reine Elektrofahrzeuge werden erst ab 2020 in nennenswerter Menge abgesetzt.

Im Jahr 2015 beträgt das Altbatterieaufkommen rund 450 Hybrid- und 700 Plug-In-Hybrid-Batterien (Batterien aus Elektrofahrzeugen sind vernachlässigbar) mit einer Gesamtmasse von etwa 120 Tonnen. Dazu zählen neben Batterien aus verschrotteten Fahrzeugen bereits erste ausgetauschte Altbatterien. 2020 sind es knapp 4.300 Tonnen, im Jahr 2030 ergibt sich ein Aufkommen von ca. 22.500 Tonnen. Langfristig wird ab 2035 ein Aufkommen von ungefähr 30.000 t/a erreicht.

Dieses Ergebnis ist neben dem Marktwachstum auf niedrigem Niveau auch in der sehr kurzen Lebensdauer der Fahrzeuge (11 Jahre für Hybridfahrzeuge, 9 für Plug-In-Hybrid- und reine Elektrofahrzeuge) sowie der Batterien (ca. 4,2 / 3,5 / 3 Jahre) begründet, was zu einer hohen Frequenz von Fahrzeugverschrottungen und Batterieaustauschen führt. Da lediglich acht Prozent der Batterien aus vollelektrischen Fahrzeugen im Durchschnitt nur zwei Jahre wieder- oder weiterverwendet werden, stehen sie zum größten Teil sofort nach dem Ausbau aus den Fahrzeugen dem Recycling zur Verfügung.



### A.1.4.2 Szenario „Politisch“

Im Szenario „Politisch“ wird im Jahr 2020 die mit dem Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität angestrebte Menge von einer Million Elektrofahrzeugen auf Deutschlands Straßen erreicht. Diese Menge setzt sich aus 200.000 reinen Elektrofahrzeugen und 800.000 Plug-In-Hybriden zusammen. Der gemeinsame Marktanteil der Elektrofahrzeuge entspricht 2020 etwa 8 Prozent und wächst bis zum Jahr 2040 auf ca. 60 Prozent.<sup>4</sup>

Aufgrund des frühen und schnellen Marktwachstums von Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeugen in Verbindung mit vergleichsweise kurzen Nutzungsdauern der Fahrzeuge und Batterien und der nur mittelmäßigen Bedeutung der Wieder-/Weiterverwendung der Batterien führt das Szenario „Politisch“ zu einem sehr hohen Altbatterieaufkommen. So führen im Jahr 2015 Verschrottungen zu einem Aufkommen von 26 Hybrid- und gut 1.900 Plug-In-Hybrid-Batterien sowie ca. 420 Batterien aus reinen Elektrofahrzeugen mit einer Gesamtmasse von ca. 380 Tonnen. 2020 sind es ca. 11.500 Tonnen, hierunter fallen bereits die ersten ausgetauschten Altbatterien. Für das Jahr 2030 ergibt sich ein weiterhin stark wachsendes Aufkommen von ca. 150.000 Tonnen.

### A.1.4.3 Szenario „Realistisch“

Im Szenario „Realistisch“ wird im Gegensatz zum „politischen Szenario“ von einem natürlichem, das heißt, nicht künstlich beschleunigtem, Marktwachstum ausgegangen. Langfristig wird der Elektromobilität in diesem Szenario zwar ein ähnlich hoher Erfolg beigemessen. Hohe Marktanteile und Bestände werden jedoch deutlich später erreicht. Der gemeinsame Marktanteil der Elektrofahrzeuge (PHEV und BEV) beträgt 2020 ca. 2,5 Prozent, steigt jedoch im Jahr 2030 auf 32 Prozent und erreicht bereits 2036 ungefähr 60 Prozent.

Im Jahr 2015 führen ausschließlich Verschrottungen zu einem Aufkommen von gut 150 Hybrid- und 300 Plug-In-Hybrid-Batterien sowie ca. 50 Batterien aus reinen Elektrofahrzeugen mit einer Gesamtmasse von etwa 60 Tonnen. 2020 sind es knapp 1.000 Tonnen, im Jahr 2030 ergibt sich ein stark wachsendes Aufkommen von knapp 29.000 Tonnen. Das zunächst sehr langsam steigende Aufkommen von Altbatterien ist der langen Lebensdauer sowohl der als auch der Batterien sowie der hohen Weiterverwendungsquote zuzuschreiben.

### A.1.4.4 Vergleich der Szenarien

Die jährlichen Abfallmengen von Altbatterien sind im Vergleich der Szenarien stark abweichend und unterschiedlich schnell wachsend. In Abbildung A-2 ist der Altbatterieaufkommensverlauf im Vergleich der Szenarien dargestellt. Bezüglich der Entwicklung der **Zusammensetzung des Altbatterieaufkommens** im Zeitverlauf sind im Vergleich der Szenarien große Unterschiede festzustellen.

Das gesamte Altbatterieaufkommen liegt 2015 zwischen 70 und 400 Tonnen. Vorwiegend stammen diese aus Plug-In-Hybridfahrzeugen (50 bis 270 Tonnen). Die Masse der anfallenden Altbatterien aus Hybridfahrzeugen ist unbedeutend gering (unter 20 Tonnen), Batterien aus reinen Elektrofahrzeugen sind nur im politischen Szenario in nennenswerter Menge zu erwarten (100 Tonnen).

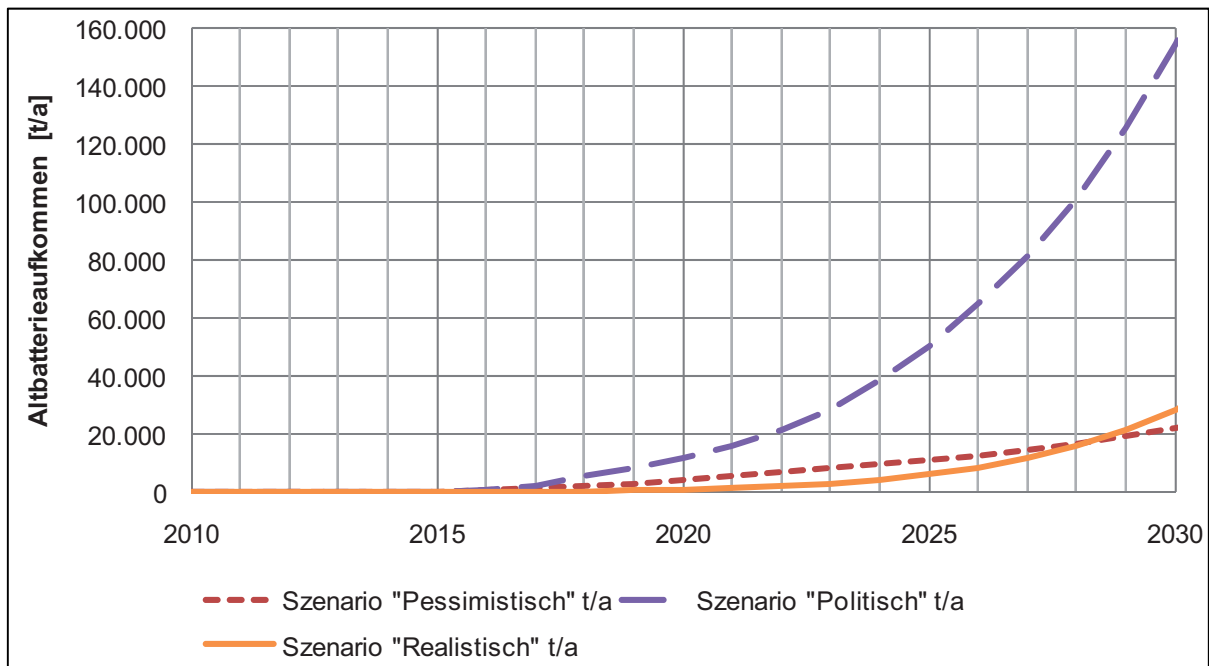
---

<sup>4</sup> Absoluter Marktanteil als Verhältnis der jährlich abgesetzten Menge eines oder mehrerer Antriebskonzepts/-konzepte zum gesamten PKW-Absatz.



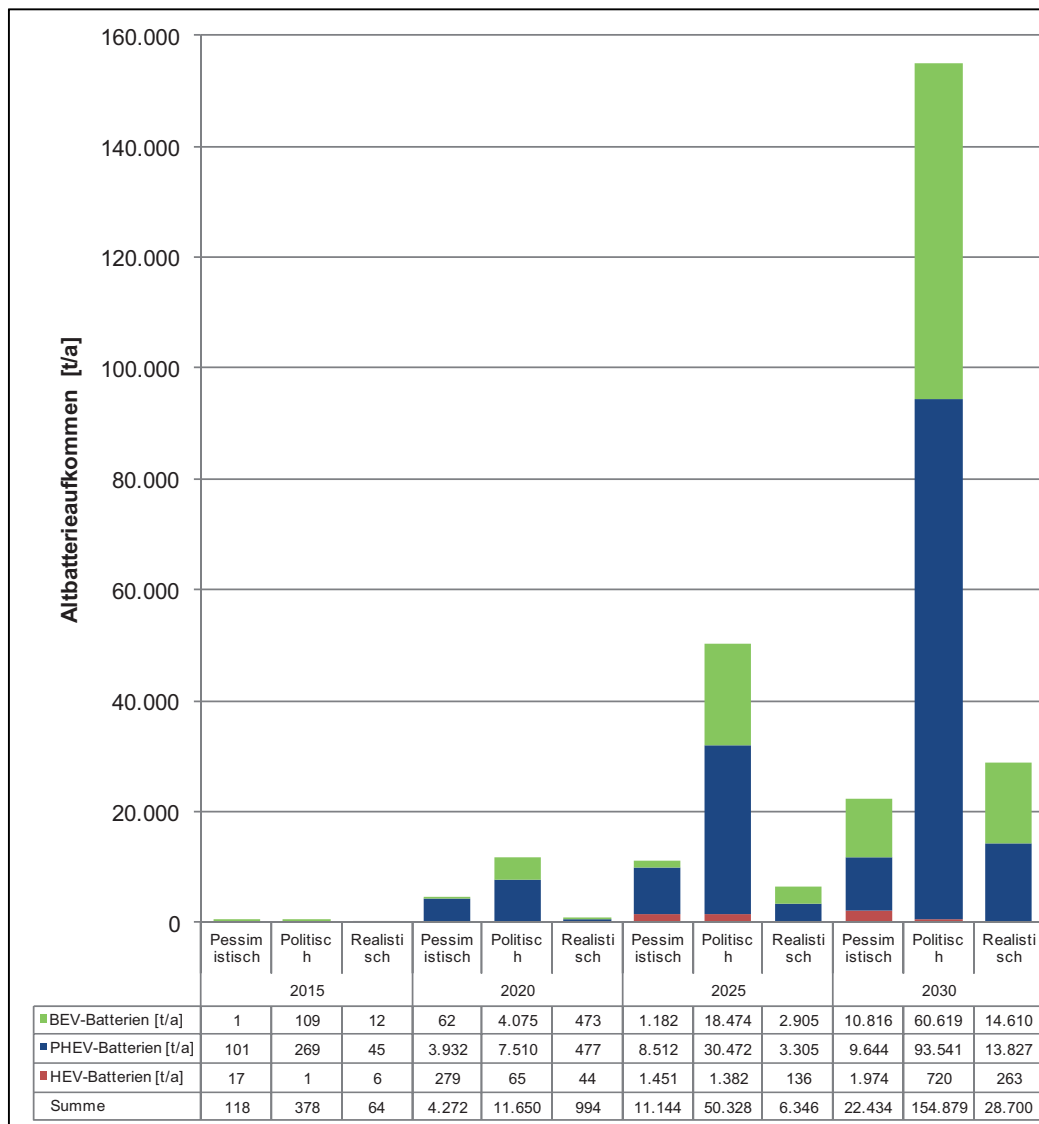


Im Jahr 2020 ist mit einem Aufkommen von Altbatterien von 1.000 Tonnen im realistischen Szenario über 4.000 im pessimistischen Szenario bis hin zu 11.500 Tonnen im politischen Szenario zu rechnen. Vorwiegend stammen die Batterien weiterhin aus Plug-In-Hybridfahrzeugen. Der Anteil der Hybridfahrzeugbatterien bleibt gering. Batterien aus reinen Elektrofahrzeugen sind im pessimistischen Szenario weiterhin unbedeutend, in den anderen Szenarien erreichen sie jedoch erhebliche Anteile von ungefähr einem Drittel im politischen Szenario (gut 4.000 Tonnen) bis zur Hälfte des gesamten Altbatterieaufkommens im realistischen Szenario (knapp 500 Tonnen).



**Abbildung A-2: Vergleich des Altbatterieaufkommensverlauf (Masse) der drei Szenarien**

Im weiteren Verlauf bis 2030 wächst das jährliche Altbatterieaufkommen durchschnittlich zwischen ca. 20°Prozent (pessimistisches Szenario) und 40°Prozent (realistisches Szenario) pro Jahr. Die Masse der im realistischen Szenario jährlich anfallenden Altbatterien übersteigt erst ab ungefähr 2029 die des pessimistischen Szenarios. Für das Jahr 2030 ergibt sich in den pessimistischen und realistischen Szenarien ein Altbatterieaufkommen von unter 22.000 respektive 29.000 Tonnen. Der vergleichsweise früh und stark wachsende Elektrofahrzeugmarkt im politischen Szenario führt zum mit Abstand stärksten Altbatterieaufkommen von ca. 150.000 Tonnen. Hybridfahrzeugbatterien erreichen nur im pessimistischen Szenario einen deutlichen Anteil von 9 Prozent (ca. 2.000 Tonnen). Batterien aus Plug-In-Hybridfahrzeuge tragen szenarienübergreifend weiterhin zu einem großen Teil des Aufkommens bei, jedoch gewinnen die Batterien aus reinen Elektrofahrzeugen zunehmend an Bedeutung und übertreffen deren Anteil im pessimistischen und realistischen Szenario sogar.



**Abbildung A-3: Vergleich des Altbatterieaufkommens (Masse) nach Batterievarianten der drei Szenarien**

Abbildung A-3 verdeutlicht die Entwicklung der Zusammensetzung des Altbatterieaufkommens der drei Szenarien für ausgewählte Zeitpunkte.

Bei einem Vergleich der Zeitpunkte der Erreichung von **Schwellenwerten kumulierter Altbatterien** von 1.000, 10.000 und 100.000 Tonnen werden die Unterschiede zwischen den Szenarien besonders deutlich. Sie werden innerhalb des Projektionszeitraums jeweils im politischen Szenario zuerst und im realistischen Szenario zuletzt erreicht.

Die ersten 1.000 Tonnen Altbatterien stehen dem Recycling im politischen Szenario 2015 zur Verfügung, ein Jahr später im pessimistischen Szenario und erst 2018 im realistischen Szenario. Für die ersten 10.000 Tonnen ergibt sich ein ähnliches Bild, auch hier beträgt der zeitliche Abstand zwischen politischem und pessimistischem Szenario nur ein Jahr (2018 respektive 2019). Im realistischen Szenario wird dieser Schwellwert erst 2023 erreicht. Die stark wachsenden Bestände der Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien führen im politischen Szenario bereits 2023 zu einem kumulierten Aufkommen von 100.000 Tonnen Altbatterien. Diese Menge wird beinahe zeitgleich erst fünf Jahre später im pessimistischen und realistischen Szenario erreicht.