



Recyclingpotenziale von Antriebsbatterien in Thüringen

Eine Potenzial- und Akteursstudie im Auftrag des
Thüringer Ministeriums für Umwelt, Energie
und Naturschutz (TMUEN)

IMPRESSUM

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS
Winterbergstraße 28
01277 Dresden

www.ikts.fraunhofer.de

Koordination: Dr. Mareike Wolter, Martin Kunath

Autoren:
Stephanie Anderseck
Dr. Manuel Glied
Dr. Dietrich Goers
Alexander Nickol

Datenstand: 2020
Titelbild: Eigene Collage; Bild © Duesenfeld

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	5
Executive Summary	6
1 Einleitung	10
2 Rahmenbedingungen im Freistaat Thüringen	12
2.1 Elektromobilität und Energiespeicherlandschaft	12
2.2 Wirtschaft und Fachkräftepotenzial	15
2.3 Forschungslandschaft	18
3 Technischer Entwicklungsstand Antriebsbatterien	21
3.1 Aufbau und Funktion von Antriebsbatterien	21
3.2 Überblick Energiespeicher und -wandler	23
3.3 Energie- und Leistungsdichten von Energiespeichern	24
3.4 Li-Ionen-Zellen als Antriebsbatterie	25
3.5 Traktions-Energieträger im Vergleich	29
3.6 Wertschöpfung in der Antriebsbatteriefertigung	31
3.7 Akteure national / international / Fertigungskapazitäten	34
4 Rohstoffe und Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien	37
4.1 Rohstoffquellen und Marktsituation für die Zellherstellung	37
4.2 Herstellungsprozess von Aktivmaterialien und Lithium-Ionen-Zellen	41
4.3 Recyclingverfahren und Szenarien der Rohstoffrückgewinnung	43
4.4 Potenzielle Recyclingvolumina und Batterie-Rücknahmekquoten	47
5 Industrielle und rechtliche Strukturen im Batterierecycling	51
5.1 Akteure im Recyclingprozess	51
5.2 Rechtlicher Rahmen	51
5.3 Rollenverteilung und rechtliche Pflichten von Akteuren	52
5.4 Transportsicherheit bei Antriebsbatterien	54
5.5 Zweitnutzung	55
6 Marktentstehung und Recyclingstrategien international	56
7 Akteursstudie	62
7.1 Aufbau und Methodik	62
7.2 Ergebnisse aus der Akteursbefragung	63
7.3 Bedarfsfelder	69
7.4 Kompetenzfelder	77
8 Potenziale und Handlungsempfehlungen	83
8.1 Einschätzung des Status	83
8.2 Szenarien und Potenziale	84
8.3 Handlungsempfehlungen	91

9	Literaturverzeichnis	93
10	Anhang	98
10.1	Expertengespräche	98
10.2	Forschungseinrichtungen	101

Abkürzungsverzeichnis

Ah	Amperestunde
Al	Aluminium
ASSB	All-Solid-State-Battery, deutsch: Festkörperbatterie
bg	Battery Grade, deutsch: Batteriequalität
BEV	Battery Electric Vehicle, deutsch: Elektrofahrzeug
BMS	Batterie-Management-System
C	Kohlenstoff (eine Form davon ist Grafit)
CCS	Combined Charging System, deutsch: kombiniertes Ladesystem
Co	Kobalt
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EoL	End-of-Life, deutsch: Lebensende
Fe	Eisen
HEV	Hybrid electric Vehicle, deutsch: Hybridelektrofahrzeug
ICV	Internal Combustion Vehicle, deutsch: Fahrzeug mit Verbrennungsmotor
JARC	Japan Automobile Recycling Promotion Center
KMU	Kleine- und mittelständische Unternehmen
LCO	Lithiumkobaltoxid
LFP	Lithium-Eisenphosphat
Li	Lithium
Li ⁺	Lithium-Ion
Li ₂ CO ₃	Lithiumcarbonat
LiPF ₆	Lithiumhexafluorophosphat
LMO	Lithium-Manganoxid
LMNO	Lithium-Nickel-Manganoxid
LTO	Lithiumtitanat
Mn	Mangan
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid
NCM oder auch NMC	Lithium-Nickel-Kobalt-Manganoxid
NEV	New Energy Vehicle, deutsch: Neue Energie-Fahrzeuge
Ni	Nickel
NiMH	Nickelmetalhydrid
NMP	N-Methyl-2-pyrrolidon
µm	Mikrometer (1/1000 mm)
OEM	Original Equipment Manufacturer, Deutsch: Erstausrüster
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle, deutsch: Plug-In-Hybrid-Fahrzeug
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
RL	Reverse Logistics
SEI	Solid Electrolyte Interface
SHE	Standard-Wasserstoffelektrode

Executive Summary

Bis 2030 wird der Energiespeicherbedarf basierend auf der Lithium-Ionen-Technologie um fast das Siebenfache gegenüber 2020 steigen, insbesondere der Automobilssektor wird durch seinen hohen Bedarf an mobilen Energiespeichern daran einen wesentlichen Anteil haben. Die steigende Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien führt dazu, dass aktuell 115 „Giga-Fabriken“ mit mehreren Gigawattstunden Produktionskapazität aufgebaut werden.

Wenn diese Antriebsbatterien ihr Lebensende erreicht haben, weil sich ihre Kapazität verringert hat oder sie fehlerhaft sind, werden sie ausgewechselt. Sofern möglich, erhalten sie danach ein zweites Leben mit einem Einsatz für andere Zwecke, z.B. als stationäre Energiespeicherung. Sofern dies nicht möglich ist, werden Sie entsorgt und idealer Weise recycelt. Die typische Nutzungsdauer von Antriebsbatteriesystemen ist abhängig vom Einsatzbereich und liegt heute zwischen acht und zehn Jahren.

Für die Produktion von Lithium-Ionen-Zellen bzw. Batteriesystemen werden unterschiedliche Rohstoffe benötigt. Aus Lithium, Grafit, Kupfer, Kobalt, Nickel, Aluminium und Mangan werden Elektroden (Kathoden und Anoden) hergestellt, die mit Separatoren, Elektrolyten und Zellkomponenten aus weiteren Materialien wie Kunststoffen und Stahl oder Aluminium zu Zellen zusammengesetzt werden. Es existiert keine einheitliche Zellzusammensetzung, jedoch haben sich bestimmte Kombinationen von Elektrodenmaterialien durchgesetzt.

Mit dem entstehenden Markt für mobile Energiespeicher wächst auch der Marktwert der Rohstoffe bis 2025 voraussichtlich um 25 % jährlich. Rohstoffpreise haben den größten Einfluss auf den Herstellungspreis von Zellen. Die Preise für Rohstoffe wie bspw. Kobalt werden durch mehrere Faktoren beeinflusst: sie müssen aufwendig hergestellt werden, kommen lokal konzentriert in politisch instabilen Regionen und sind generell eine knappe Ressource. Insbesondere Lithium und Nickel können in aktuellen Zellzusammensetzungen nicht substituiert werden. Deswegen ist bei erhöhter Produktion von Energiespeichern mit einer weiteren Verknappung und Verteuerung beider Rohstoffe zu rechnen. Ein Recycling dieser Stoffe wird daher auf lange Sicht ökologisch als auch ökonomisch absolut notwendig.

In den letzten Jahren wurden einige Verfahren für das Recycling von Antriebsbatterien entwickelt, die in mehreren Schritten eine Rückgewinnung des Großteils des Rohstoffumfangs ermöglichen. Dabei sind mit Verfahrenskombinationen aus mechanischen und pyro- oder hydrometallurgischen Prozessen auch für Bestandteile der Batterie wie Lithium Ausbeuten von über 90 % möglich.

Die Prozesse befinden sich aktuell allerdings noch im Technikums- oder Pilotmaßstab. Ein großtechnisches Verfahren mit hohen Rückgewinnungsquoten hat sich in Europa noch nicht am Markt etabliert. Auch stellt die Rückgewinnung von Elektrolytbestandteilen und Grafit derzeit eine große Herausforderung dar. Letzteres wird trotz hoher Rohstoffkosten von keinem derzeit industriell betriebenen Verfahren adressiert. Fokus wissenschaftlicher Arbeiten ist es daher, Recyclingverfahren noch effizienter zu gestalten, damit sich Batterierecycling wirtschaftlich lohnt.

Stand 2020 findet über 90 % des Lithium-Ionen-Batterierecyclings im asiatischen Markt statt. In China bestehen aufgrund politischer Vorgaben bereits zentral organisierte Recyclingnetzwerke für Altbatterien, hauptverantwortlich organisiert durch Automobil-OEMs. Es wird erwartet, dass der relative Anteil Europas am Batterierecycling bis 2025 steigen wird.

Gesetzliche Vorgaben in Europa haben bisher einen Fokus auf Gerätebatterien. Antriebsbatterien fallen zwar als Batterie unter die Regelung der europäischen Batterierichtlinie und damit auch des deutschen Batteriegesetzes, allerdings ist die Rücknahme und das Recycling von Antriebsbatterien aus Elektrofahrzeugen noch nicht im Einzelnen geregelt. Spätestens 2021 werden aber für Antriebsbatterien konkretere Regeln erwartet.

Die Pflichten der involvierten Akteure können in Deutschland momentan vor allem aus dem Kreislaufwirtschaftsgesetz und dem Batteriegesetz abgeleitet werden. Danach haben Hersteller die Verantwortung für ihre Produkte bis zum Lebensende. Hersteller, die Batterien an Endnutzer vertreiben, müssen deswegen nach Batteriegesetz § 5 Altbatterien zurücknehmen und Endnutzer sollen Altbatterien an geeigneten Rücknahmestellen kostenlos und separat abgeben dürfen. Die Rückgabe erfolgt u.a. bei Händlern, die als Vertreter stellvertretend für Hersteller Altbatterien zurücknehmen. Die Organisation kann zukünftig, wie bei Gerätebatterien, über sogenannte Rücknahmesysteme erfolgen. Diese organisieren und verantworten stellvertretend die Koordination der Sammlung, des ADR-konformen Transports und der rechtskonformen Verwertung, die Erfüllung von Rücknahme- und Verwertungsquoten sowie die Dokumentation dieser Prozesse gegenüber den zuständigen Behörden. Zertifizierte Entsorgungs- und Logistikunternehmen können entsorgte Antriebsbatterien konform mit der ADR und der Gefahrgutverordnung zur weiteren Behandlung oder für abschließendes Recycling zu Recyclingunternehmen oder Rohstoffunternehmen transportieren.

Obwohl die gesetzliche Verantwortung zur Entsorgung beim Automobilhersteller als Inverkehrbringer liegt, ist in Deutschland aktuell keine herstellerübergreifende Initiative zum Recycling von Antriebsbatterien wahrnehmbar, an der sich Unternehmen orientieren können. Es fehlen Branchenstandards zu Aufbau und Zusammensetzung von Batteriezellen und -systemen sowie definierte Anforderungen an mögliche Recyclate, die in der Batterieherstellung wieder genutzt werden können. Nur durch politische und gesetzliche Rahmenbedingungen können für Unternehmen Anreize und eine langfristige Planungssicherheit geschaffen werden, die ein Recycling von Batteriematerialien auch wirtschaftlich attraktiv machen.

Die meisten Faktoren und Entwicklungen der gesamten Recyclingkette können von Thüringen nur begrenzt beeinflusst werden. Es gibt jedoch Stufen, welche in den kommenden Jahren zunehmend auf den Anfall von Antriebsbatterien reagieren werden müssen – sogenannte Bedarfsfelder. Diese beschreiben Unternehmen, die im Zusammenhang mit Batterierecycling bestimmte Bedarfe haben. Batterie- und Zellhersteller benötigen eine Entsorgungsstrategie für ihre Produktionsabfälle, Kfz-Werkstätten und -händler werden Batterien entgegennehmen müssen und Logistik- und Recyclingunternehmen müssen Transport und Verwertung von Antriebsbatterien unter hohen Sicherheitsanforderungen sicherstellen. Darüber hinaus gibt es Kompetenzfelder, die technologische Lösungen vorhalten, die für den Aufbau einer Recyclingstruktur auch über Thüringen hinaus zur Wertschöpfung beitragen können. Sie verfügen beispielsweise über Kompetenzen in der Maschinen- und Anlagentechnik, Messtechnik und Sensorik, Umwelt- und Verfahrenstechnik sowie Logistik. Diese können hochautomatisierte und sensorgestützte Prozesse und Verfahren für die Demontage/Zerlegung, Sortierung und mechanische Aufbereitung aber auch weitere Recyclingschritte und chemische Verfahren (mit-)entwickeln.

Für die Gestaltung des Recyclingprozesses werden vier Akteure eine herausragende Rolle spielen: Inverkehrbringer der Antriebsbatterien, Zellhersteller sowie Rohstoffhersteller und Recyclingunternehmen. Die vier Akteure kommen an unterschiedlichen Punkten in Berührung mit Recyclingströmen, z.B. in Form von Produktionsabfällen, zurückgenommenen Antriebsbatterien oder Schwarzmasse, als Zwischenprodukt aus der mechanischen Aufbereitung. Sie haben unterschiedliche Motivationen und Interessen im Recyclingprozess. Als Inverkehrbringer sind die Automobil-OEMs hauptsächlich getrieben von der gesetzlichen Verpflichtung, Altbatterien zu entsorgen. Zellhersteller motiviert vor allem, dass sie mit Recycling die Entsorgungskosten ihrer Produktionsabfälle senken können. Rohstoffunternehmen möchten Rohstoffe möglichst ökologisch und kosteneffizient gewinnen. Recyclingunternehmen suchen nach Umsatzmöglichkeiten durch wirtschaftliche Recyclingprozesse.

Darauf basierend erscheinen drei Szenarien für Recyclingstrukturen von Antriebsbatterien relevant. Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich Organisationsform, Struktur, Logistik, treibender Akteure, involvierter deutscher und thüringischer Unternehmen sowie Wertschöpfungstiefe an zentralen und dezentralen Standorten. Aufgrund der noch unklaren rechtlichen und wirtschaftlichen Entwicklung, insbesondere hinsichtlich der EU-Gesetzgebung, besitzen alle drei Szenarien hypothetischen Charakter.

	Charakterisierung
Zentrales Rücknahmesystem	Herstellerübergreifendes, zentralisiertes Rücknahmesystem
Recyclingcluster	Automobil-OEM-getriebene, unternehmensspezifische Recycling-Cluster
Lokale Recyclinganlagen	Aufbau lokaler Recyclingstrukturen

In Szenario 1 wird der Auf- und Ausbau von Recyclingketten durch eine herstellerübergreifende Allianz der Automobil-OEMs vorangetrieben. Als verantwortliche Inverkehrbringer mit steigender Produktion etablieren die Automobilhersteller, getrieben durch gesetzliche Anforderungen, so eine sichere Entsorgung und in-neroeuropäische Kreislaufwirtschaft. Dieses zentrale Rücknahmesystem organisiert Sammlung, Recycling, Dokumentation und Finanzierung. Mit der Sammlung, Sortierung und Demontage vor Ort werden Dritte, wie Händler und Werkstätten, beauftragt. Die Batterien werden zu ausgewählten Recycling- und Rohstoffunternehmen in Europa transportiert und dort hydro- oder pyrometallurgisch aufbereitet und als Sekundärrohstoffe einer Wiedernutzung zugeführt. Die übergeordnete Organisation würde durch ein qualifiziertes Dokumentationssystem die entstehenden Kosten erfassen und mit den beim Autokauf gebildeten Rückstellungen decken. Die Kosten dafür wären durch die Hersteller zu tragen.

In Szenario 2 entstehen, beispielsweise in Deutschland oder Europa, von Einzelakteuren getriebene Cluster, in denen Automobil-OEMs ggf. in Kooperation mit Recycling- und Rohstoffunternehmen geschlossene Wertstoffkreisläufe für ihre Produkte organisieren. Durch solche Recycling-Cluster könnten auch unterschiedliche Bedürfnisse und Batteriezusammensetzungen adressiert werden. Die Rücknahme und Demontage werden dabei von den Marken-Händlern und -werkstätten vorgenommen. Die weitere Verarbeitung der Batteriesysteme erfolgt entweder im Konzern oder über Partnerschaften mit Recycling- und Rohstoffunternehmen. Szenario 2 bildet im Wesentlichen den bereits heute erkennbaren Trend ab, dass konzernspezifische Lösungen für die Entsorgung von Batteriesystemen gesucht werden. Dadurch können angepasste, effiziente Prozesse aufgebaut werden, die den OEMs weiterhin Zugriff auf Rohstoffe und Lebensdauerdaten der Batterien ermöglichen. Eine umfassende Standardisierung ist hier nicht erforderlich. Die Finanzierung über Rückstellungen beim Verkauf und die Dokumentation würde durch die jeweiligen Cluster selbst organisiert und wäre auf die spezifischen Batterietypen der Automobilhersteller fokussiert.

In Szenario 3 entstehen lokale Recyclinganlagen, die frei am Markt agieren und beispielsweise relevante Mengen von Produktionsausschüssen und -abfall von Zellherstellern, Altbatterien von Inverkehrbringern (auch aus anderen Branchen) oder in der kommunalen Entsorgung anfallende Gerätebatterien recyceln. Diese Strukturen sind nicht notwendiger Weise an zentrale Rücknahmesysteme gebunden. Gerade für Zellhersteller, die unverbrauchte Materialien aus der Produktion kostengünstig entsorgen müssen, kann eine separate Aufbereitung sinnvoll sein, weil die wenig kontaminierten Stoffströme spezifischere und damit effizientere Prozesse erlauben. Allerdings ergeben sich hierbei verglichen mit Szenarien 1 und 2 durch den Fokus auf Produktionsausschüsse und -abfälle lokal geringe Stoffströme. Die Wirtschaftlichkeit dieses Szenario hängt wesentlich davon ab, ob in diesen Maßstab Recyclinganlagen profitabel betrieben werden können. Dieses Szenario kann einzeln oder neben den beiden anderen Szenarien existieren.

In Szenario 1 kann Thüringen die Bildung der Recyclingstrukturen nach Maßgabe des zentralen Rücknahmesystems abwarten und die Bedarfswelder vorbereiten. Thüringer Akteure in Sammlung, Transport und Recycling bzw. Entsorgung können Aufträge als Auftragnehmer ausführen und sich auf zentrale Ausschreibungen bewerben.

Gründen Automobil-OEMs wie in Szenario 2 spezifische Recyclingcluster, kann Thüringen als politischer Akteur deren Ausbildung forcieren und mitgestalten. Außerdem können regionale Kompetenzträger strategisch unterstützen und tätig werden bzw. sich durch Ausbildung und Förderung beteiligen. Sowohl in Szenario 1 und 2 demontieren Werkstätten bzw. Händler mit Werkstätten die Antriebsbatterien der Endnutzer und lagern diese bis zu einer mehr oder weniger zentral organisierten Sammlung. Der Aufbau von

regionalen Recyclinganlagen ist in den Szenarien 1 und 2 möglich, im Recyclingcluster aber wahrscheinlicher.

In Szenario 3 werden lokale Strukturen für die dezentrale Entsorgung von Produktionsabfällen und Altbatterien genutzt. Dieses Szenario kann für Thüringen im Zusammenhang mit der bereits ansässigen EAS und der Ansiedlung von CATL interessant sein, da auf dieser Basis Produktionsabfälle und -ausschuss lokal behandelt werden können, sofern die Unternehmen dies im Rahmen der Verpflichtung zur Entsorgung der Produktionsabfälle wünschen. Prinzipiell stehen den Unternehmen aber auch alle anderen bekannten Wege, lokal oder international, offen. In welcher Konfiguration lokale Recyclingstrukturen spezifisch für Produktionsabfälle für Zellhersteller wirtschaftlich sinnvoll sind, muss immer anhand der jeweiligen Stoffströme ermittelt werden.

Aus den dargestellten Szenarien ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

Sensibilisierung der Wirtschaft und Qualifizierung: Im ersten Schritt können betroffene Unternehmen z.B. durch Fachdialoge, Roadshows oder Broschüren zu gesetzlichen Verpflichtungen aufgeklärt und sensibilisiert werden. Insbesondere Händler und Werkstätten müssen für den Umgang mit Gefahrgütern qualifiziert und bei nötigen Investitionen unterstützt werden.

Politische Maßnahmen: Über einen interministeriellen Dialog gilt es ressortübergreifend eine Position des Freistaat Thüringens zu erarbeiten und unter Mitwirkung aller wichtigen Ministerien und Experten aus Industrie und Forschung eine Strategie festzulegen. Mithilfe einer mitteldeutschen Initiative können Kompetenzen gebündelt und Standortvorteile gegenüber anderen Bundesländern positioniert werden.

Ausbau Know-how: Die Kompetenzen Thüringer Unternehmen und Forschungseinrichtungen sollten gebündelt und gezielt ausgebaut werden, um an der Wertschöpfung im Batterierecycling teilhaben zu können.

1 Einleitung

Mit dem wachsenden Anteil von erneuerbaren Energien und dem steigenden Bewusstsein für die Notwendigkeit zu CO₂-Einsparung bei Politik, Verbrauchern und Unternehmern kommt der Elektromobilität eine entscheidende Bedeutung im Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung¹ zu. Durch zahlreiche Maßnahmen wie der Anpassung der EEG-Umlage, einer verlängerten Innovationsprämie für Elektro- und Hybridautos und einer Steuererleichterung für den Kauf von elektrisch betriebenen Dienstfahrzeugen steigt die Anzahl neu zugelassener Pkw mit alternativen Antriebsarten deutlich an und erreicht teils dreistellige Zuwachsraten in Deutschland². Auch Automobilhersteller haben durch einen Umbau ihrer Produktportfolios reagiert. Es ist damit offensichtlich, dass eine Trendwende hin zu einer klimafreundlichen Mobilität stattfindet. Auch der Freistaat Thüringen folgt diesem Trend. In Thüringen nimmt die Zahl der E-Fahrzeuge rasant zu. Die Ladeinfrastruktur entwickelt sich schrittweise zu einem flächendeckenden und damit alltagstauglichen Netz. Getragen von einer langfristigen Strategie im „Masterplan Elektromobilität für Thüringen“³ werden in den nächsten zehn Jahren je nach zugrunde liegendem Szenario 50.000 bis 200.000 E-Fahrzeuge in Thüringen angemeldet sein.

Mit der Ankündigung von Contemporary Amperex Technology Ltd. (CATL), eine eigene Produktionsstätte für Lithium-Ionen-Batterien nahe Arnstadt zu eröffnen, ist der Freistaat Thüringen zum relevanten Standort für E-Mobilitäts-Akteure geworden. Mit Blick auf weitere ansässige Zell- und Batteriehersteller sowie zahlreiche weiteren Produktionsstätten in Nachbar(bundes)ländern wird deutlich, dass sich damit für den Freistaat Thüringen ein neuer Handlungsspielraum ergibt, um nicht nur nachhaltige Mobilität, sondern auch die Wertschöpfungskette ganzheitlich und proaktiv zu gestalten und vom Megatrend klimafreundlicher Mobilität zu profitieren.

Dies ist von besonderer Bedeutung, da die Energie- und CO₂-Bilanz der Elektromobilität neben der Nutzung erneuerbarer Energien im Betrieb der Fahrzeuge ganz wesentlich von der klimafreundlichen Produktion und der Wiederverwendung der eingesetzten Rohstoffe abhängt. Wesentlicher Baustein ist daher, bereits heute die Anforderungen zukünftig anfallender Antriebsbatterien zu betrachten. Mit Blick auf die Kritikalität ausgewählter Rohstoffe wie Nickel oder Kobalt, die wirtschaftspolitische Abhängigkeit von anderen Staaten und die steigenden gesetzlichen Anforderungen auf EU- und nationaler Ebene stellt sich die Frage, wie ausgediente Antriebsbatterien und Produktionsabfälle zukünftig aus technischer, rechtlicher und betriebswirtschaftlicher Perspektive behandelt werden können und müssen. Während sich in Asien bereits erste Ansätze für eine „Circular Economy“ im Sinne eines geschlossenen Rohstoffkreislaufs für Lithium-Ionen-Batterien etablieren, sind europäische Ansätze zum Batterierecycling aktuell noch unterkritisch.

Zu diesem Zeitpunkt können die Weichen gestellt werden, damit das Recycling von Antriebsbatterien nicht nur notwendige Entsorgung ist, sondern zum Schlüssel für eine tiefere Wertschöpfung, Innovationen in der Verfahrenstechnik und eine klimafreundliche Mobilität wird.

Die vorliegende Studie hat sich zum Ziel gesetzt, das Potenzial des Batterierecyclings aus einer Thüringer Perspektive zu betrachten. Im Fokus stehen dabei das Nötige und das Mögliche gleichermaßen. Neben einer fundierten Recherche und Darstellung der technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Voraussetzungen wurde eine möglichst breite Beteiligung aktuell und zukünftig relevanter Stakeholder berücksichtigt. Um potenzielle Akteure umfassend zu identifizieren, wurde eine breit angelegte Onlinebefragung durchgeführt,

¹ Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (08.10.2019).

² Kraftfahrtbundesamt. Fahrzeugneuzulassungen im Oktober 2020. Anstieg der Zulassungen alternativer Antriebe im Monatsvergleich.

³ Plank-Wiedenbeck u. a. (Juni 2018).

durch fokussierte Expertengespräche vertieft und im Rahmen eines Experten-Roundtable validiert. Im Ergebnis ist ein klares Bild entstanden, an welcher Stelle der Freistaat Thüringen gegenwärtig steht, welche Chancen für die Thüringer Wirtschaft und Gesellschaft bestehen, und welche Herausforderungen dafür adressiert werden müssen.

Die vorliegende Studie gliedert sich in unterschiedliche Teile, in denen die verschiedenen Aspekte der Recyclingpotenziale betrachtet werden. Ausgehend von einer prägnanten Darstellung der Rahmenbedingungen Thüringens hinsichtlich Elektromobilität, erneuerbarer Energien, Energiespeichern, Wirtschaftsstruktur und Fachkräftepotenzial sowie der relevanten Forschungslandschaft (Abschnitt 2) werden die technologischen Voraussetzungen der Antriebsbatterien (Abschnitt 3) und die zur Verfügung stehenden Recyclingverfahren (Abschnitt 4) beleuchtet. Anschließend werden die industriellen Strukturen im Recycling aus rechtlicher Sicht (Abschnitt 5) sowie in ausgewählten internationalen Vergleichsländern (Abschnitt 6) betrachtet. Nach einer kurzen Darstellung der Methodik und der wichtigsten Ergebnisse der Unternehmensbefragung (Abschnitte 7.1 und 7.2) werden diese Betrachtungen dann mit den vorhandenen Bedarfen (Abschnitt 7.3) und Kompetenzen (Abschnitt 7.4) in Thüringen gespiegelt, um konkrete Potenziale, Szenarien und Handlungsempfehlungen (Abschnitt 8) zu geben.

2 Rahmenbedingungen im Freistaat Thüringen

2.1 Elektromobilität und Energiespeicherlandschaft

Elektromobilität nimmt in den nächsten zehn Jahren in Thüringen Fahrt auf. Im Januar 2020 spielten Elektroautos und Plug-In-Hybride mit einer Anzahl von 3714⁴ und einem Anteil von 0,2 %⁵ am Gesamtfahrzeugbestand in Thüringen noch eine kleine Rolle. Bei der Förderung von Elektromobilität jedoch stand Thüringen im gleichen Jahr auf dem zweiten Platz.⁶ Mit dem Masterplan für Elektromobilität für Thüringen 2030 wurden 30 weitere Maßnahmen vorgeschlagen, um Elektromobilität zu etablieren. Das konservative Referenzszenario mit 50.000 Elektro-Pkw nimmt an, dass sich die bisherige Entwicklung fortsetzt, Hindernisse aber bestehen bleiben und den Markthochlauf von Elektroautos verlangsamen. Anhand der klimapolitischen Ziele in Thüringen ist eine progressivere Entwicklung eher wahrscheinlich. So werden für 2030 im aktiven Szenario anhand der beschlossenen Klimamaßnahmen ca. 77.000 Elektrofahrzeuge in Thüringen erwartet. Im proaktiven Szenario – hier werden verbliebene fossile Brennstoffe durch regenerativ gewonnene Treibstoffe ersetzt – erreicht die Marktdurchdringung 2050 100 % und es wird geschätzt, dass 2030 bis zu 212.000 Pkws und Lkws elektrisch angetrieben sind (siehe Tabelle 1).⁷ Demzufolge werden auch in Thüringen binnen der nächsten zehn Jahre deutlich mehr Elektrofahrzeuge die Straßen befahren.

Tabelle 1 Szenarien des Markthochlaufes der Elektromobilität in Thüringen⁸

Szenarien	E-Pkws	E-Lkws
Referenzszenario	50.000	1.600
Aktives Szenario	70.000	7.200
Proaktives Szenario	200.000	12.000

Neben der gezielten Förderung von Elektromobilität wird auch der landesweite Aufbau von Ladesäulen für E-Fahrzeuge durch die Thüringer Ladeinfrastrukturstrategie für Elektrofahrzeuge⁹ sowie die Ladesäulenverordnung des Bundes und den Masterplan Ladeinfrastruktur¹⁰ strategisch vorangetrieben. Stand Juni 2020 stehen in ganz Thüringen ca. 700 Ladepunkte bereit. Damit verfügt Thüringen über ein nahezu flächendeckendes Netz an öffentlicher Ladeinfrastruktur und liegt mit der Gesamtanzahl der Ladepunkte deutlich über dem proaktiven Szenario der Ladeinfrastrukturstrategie mit Ziel 550 Ladepunkten.¹¹

⁴ Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur GmbH (Juni 2020).

⁵ Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur GmbH (2020) <https://www.thega.de>.

⁶ Diekmann u. a. (November 2019) und Agentur für Erneuerbare Energien (20.12.2019).

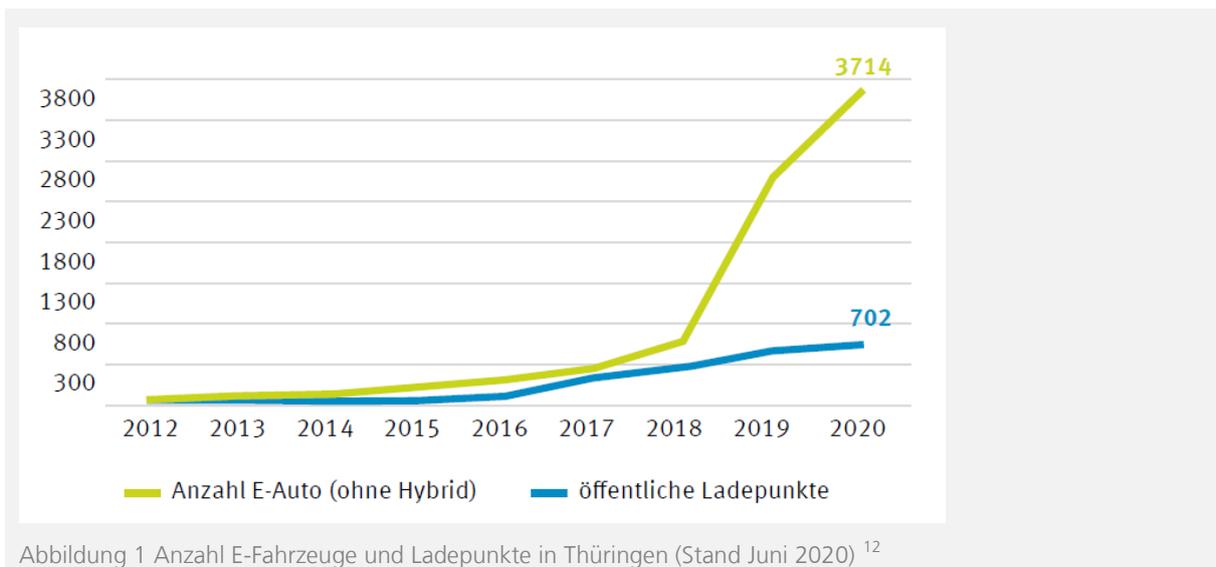
⁷ Plank-Wiedenbeck u. a. (Juni 2018), S. 9 ff.

⁸ Plank-Wiedenbeck u. a. (Juni 2018).

⁹ Plank-Wiedenbeck u. a. (August 2016).

¹⁰ Die Bundesregierung (Juni 2020).

¹¹ Plank-Wiedenbeck u. a. (August 2016).



Standortfaktor erneuerbare Energien

Da Batterien im gesamten Lebenszyklus – Herstellung, Nutzung und Entsorgung – einen großen Energiebedarf haben und CO₂-Emissionen verursachen, wird die Einbindung von Erneuerbaren Energien in alle Prozesse notwendig sein. Somit hat auch der Entwicklungsstand im Bereich Erneuerbare Energien und Energiespeicher einen großen Einfluss auf mögliche Standortentwicklungen im Feld des Batterierecyclings. Im Gesamtranking des Bundesländervergleichs zu Anstrengungen und Erfolgen in der Nutzung erneuerbarer Energien sowie zum technologischen und wirtschaftlichen Wandel steht Thüringen seit 2014 auf Platz 4 und liegt damit deutlich über dem Bundesdurchschnitt. Im Bundesländervergleich des Jahres 2019 beträgt der Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch 24,5 % (siehe Abbildung 2) und an der Bruttostromerzeugung 59,0 %.¹³ Erneuerbare Energieanlagen sind über den Freistaat in relevanter Größenordnung dezentral verteilt. Durch den bereits sehr hohen Anteil Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung, können Recyclingprozesse umweltfreundlicher gestaltet werden. Herstellern ermöglicht der Zugriff auf Erneuerbare Energien eine möglichst klimaneutrale Herstellung von Batterien – ein Aspekt, der zunehmend an Bedeutung gewinnt.

2013 wurden im Rahmen der Potenzialanalyse „Umweltfreundliche Energien und Energiespeicherung“ in Thüringen 17 Unternehmen in der Energiespeicherbranche identifiziert. 2019 identifizierte die Energiespeicherstudie Thüringen schon 56 Thüringer Unternehmen in den Wertschöpfungsstufen Hersteller, Produkte, Großhandel, Planung und Installation.¹⁴ Die Kustan Umwelttechnik GmbH baut zum Beispiel Anlagen für die Herstellung von Antriebsbatterien. Über Erfahrung in der Gewinnung von (Lithium-)Salzen verfügen die Sondershausener K-UJEC AG SALT TECHNOLOGIES und die Erfurter Ercosplan.¹⁵ In Nordhausen fertigen zwei Hersteller Zellen und Batteriesysteme. EAS Batteries GmbH stellt Zellen und Batterielösungen für die Raumfahrt, Schifffahrt und Automobile her.¹⁶ EnviTes Energy - Gesellschaft für Umwelttechnik und Energiesysteme mbH hat einen Prozess zur Massenfertigung von Lithium-Ionen-Zellen patentiert und vertreibt

¹² Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur GmbH (Juni 2020).

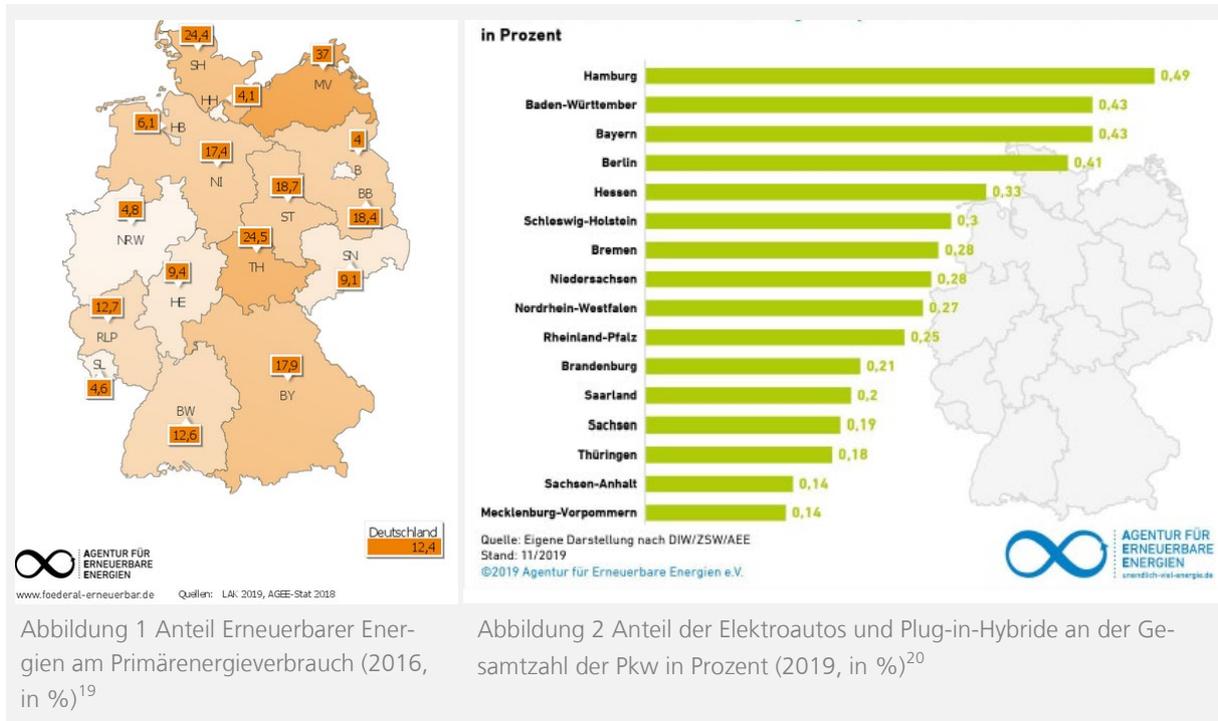
¹³ Diekmann u. a. (Oktober 2014) und Diekmann u. a. (November 2019).

¹⁴ Stolze u. a. (August 2019) und Ammon u. a. (2013).

¹⁵ Jentsch/Grosser (30.04.2015) und Jentsch (04.11.2019). Beide bewarben sich 2015 für den Bau einer Anlage zur Gewinnung von Lithium in Bolivien, wobei K-UJEC die Ausschreibung für sich gewann.

¹⁶ EAS Batteries (27.11.2020) <https://eas-batteries.com>.

einen Brandschutzcontainer für beschädigte Lithium-Ionen-Batterien.¹⁷ Weitere Hersteller wie UST Umweltsensor-Technik GmbH, Apparatebau Nordhausen GmbH und ASBIT Service & Produkte GmbH stellen Sensoren, Behälter und Salze her.¹⁸ Die Stärken der Thüringer Energiespeicherbranche liegen in den Wertschöpfungsstufen Zellen, Maschinen- und Anlagenbau, Assemblierung und Systemlieferant sowie Planung und Installation von Energiespeichern.



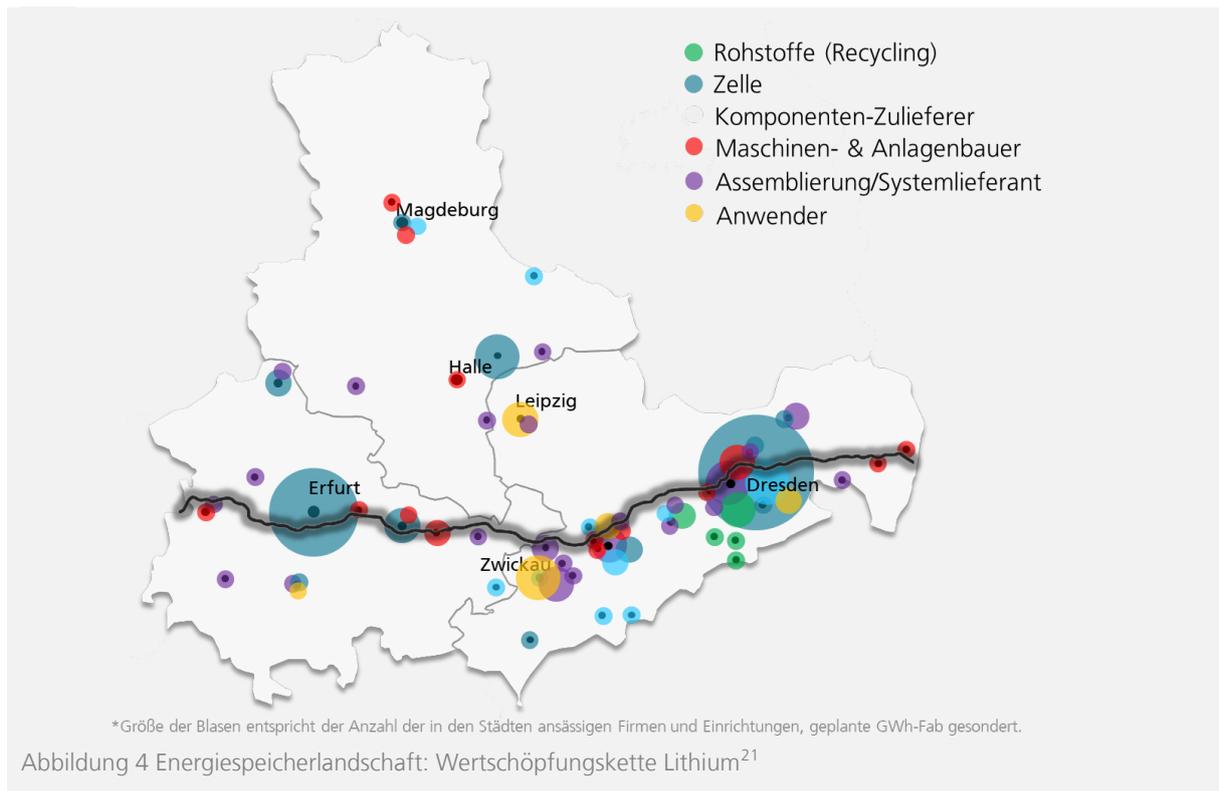
Wird die Autobahn A4 als Achse der Energieregion Mitteldeutschland betrachtet, ist Thüringen ideal an weitere Teile der „Wertschöpfungskette Lithium“ in Sachsen und Sachsen-Anhalt angebunden. So entwerfen, entwickeln und/oder produzieren Unternehmen wie die Belectric GmbH in Dresden, Deutsche ACCUMOTIVE GmbH & Co. KG (Daimler AG) sowie Liacon GmbH in Ottendorf-Okrilla Batteriezellen beziehungsweise Batteriespeichersysteme. Andere wie FAE Elektrotechnik GmbH & Co. KG haben den Fokus auf der Speicherung erneuerbarer Energie in Batteriespeichern oder wie HOPPECKE Advanced Battery Technology GmbH in Zwickau auf emissionsfreien Antrieben. Nicht weit von Thüringen stehen demzufolge Zellhersteller und Anwender sowie Maschinen- und Anlagenbauer, Lieferanten und in den sächsischen Bergbauregionen Rohstoffspezialisten für Austausch und Kooperationen zur Verfügung.

¹⁷ Envites Energy - Gesellschaft für Umwelttechnik u. Energiesysteme mbH (27.11.2020) <https://www.envites.de>.

¹⁸ Stolze u. a. (August 2019).

¹⁹ Agentur für Erneuerbare Energien (2016) https://www.foederal-erneuerbar.de/uebersicht/bundeslaender/BW|BY|BB|HB|HH|HE|MV|NI|NRW|RLP|SL|SN|ST|SH|TH|D/kategorie/energiemix/auswahl/289-anteil_erneuerbarer_jahr/2016/#goto_289.

²⁰ Agentur für Erneuerbare Energien (20.12.2019), S. 7.



2.2 Wirtschaft und Fachkräftepotenzial

In der Gesamtperspektive verfügt Thüringen über eine ausgewogene Wirtschaftsstruktur, getragen von einer breit gefächerten Industrie. Mit 83 Industriearbeitsplätzen je 1000 Einwohnern liegt Thüringen dabei deutlich über dem Bundesdurchschnitt. Die Industrie erarbeitet ein Viertel der Bruttowertschöpfung des Landes. Wie auch in anderen ostdeutschen Ländern überwiegen kleine Betriebe und mittelständische Unternehmen. Im Vergleich mit Westdeutschland (16,9 %) hat Thüringen mit einem Anteil von fast 40 % mehr als doppelt so viele Unternehmen mit einem Jahresumsatz unter 5 Millionen Euro. Nur ein Viertel der Unternehmen hat einen Jahresumsatz über 50 Mio. Euro.²² Aber die kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) in Thüringen sind „hoch spezialisiert, innovativ und erfolgreich in technologischen Nischen“²³.

²¹ Eigene Darstellung Fraunhofer IKTS

²² Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und digitale Gesellschaft (2019).

²³ Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2015), S. 1.

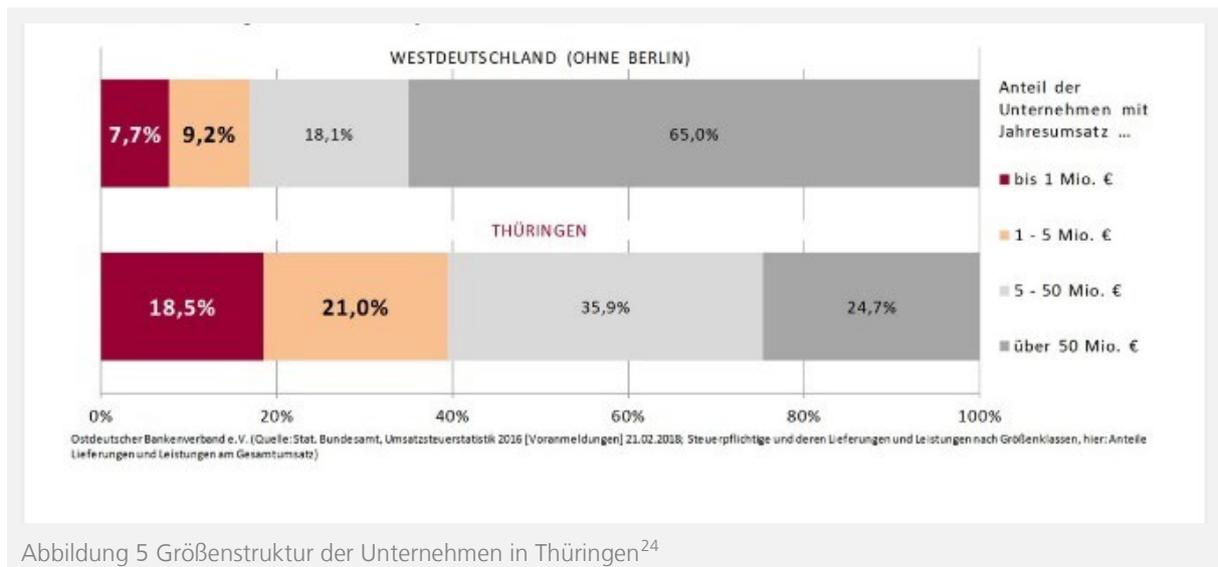


Abbildung 5 Größenstruktur der Unternehmen in Thüringen²⁴

Bei den 100 größten Unternehmen, gemessen an der Beschäftigtenzahl, dominierten 2011 im industriellen Sektor zu jeweils 25 % die Branchen Fahrzeug(-teile)bau und Elektrotechnik/Optik²⁵. Weitere große Unternehmen gemessen an ihren Beschäftigten kommen aus den Branchen Logistik, Handel, Elektrotechnik, Maschinenbau und Metallerzeugung.

Wirtschaftliche Entwicklung

Die Thüringer Wirtschaft ist seit 2010 stetig gewachsen. Im Vergleich mit den anderen ostdeutschen Bundesländern sind die Zuwachsraten des Bruttoinlandsprodukts in Thüringen seit 2010 am stärksten gestiegen. In den letzten Jahren fünf Jahren hat sich die Wirtschaft weniger dynamisch entwickelt. Dieser Rückgang wird aktuell durch Covid-19-Auswirkungen verstärkt.²⁶ Das Bruttoinlandsprodukt Thüringens entsprach 2017 69,3 % des BIP/Einwohner der westdeutschen Bundesländer.

Bis 2035 und wahrscheinlich auch darüber hinaus ist eine Angleichung der Wirtschaftsverhältnisse an westdeutsche Länder eher unrealistisch, weil die dafür notwendigen Investitionssteigerungen und technologischen Entwicklungen nicht erwartbar sind. Dennoch wird sich Thüringen laut ifo-Institut bis 2035 im Vergleich zu den anderen ostdeutschen Bundesländern am besten entwickeln. Laut Projektionen des ifo-Instituts wird das BIP/Erwerbstätigen-Verhältnis von aktuell 78 % auf 85 % und das BIP/Einwohner-Verhältnis von 69 % auf 71 % steigen.²⁷

²⁴ Bundesverband ostdeutscher Banken e.V. (2018) <https://ostbv.de>.

²⁵ Traud (September 2011).

²⁶ Ragnitz (14. November 2018); Ostdeutscher Bankenverband e.V. (o.J.) <https://ostbv.de>.

²⁷ Ragnitz (14. November 2018).

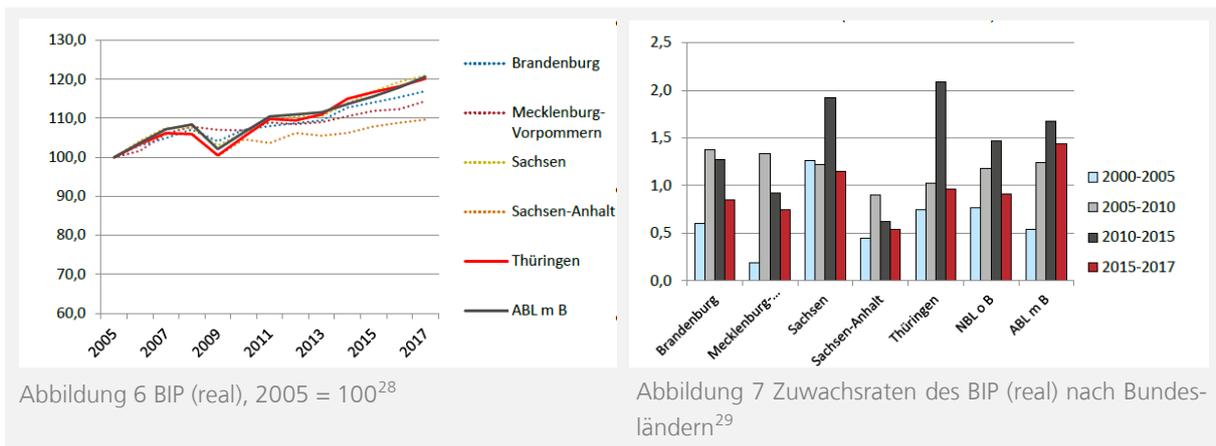


Abbildung 6 BIP (real), 2005 = 100²⁸

Abbildung 7 Zuwachsraten des BIP (real) nach Bundesländern²⁹

Bevölkerungsentwicklung und Fachkräftepotenzial

In Thüringen wohnen etwas über zwei Millionen Menschen. Die Einwohnerzahl ist insgesamt jedoch mit minus 18,4 % seit 1990 stark rückläufig. Das liegt vor allem daran, dass Thüringens Bevölkerung bundesweit am zweitstärksten altert, wenig positive Zuwanderungseffekte (aus anderen Bundesländern oder anderen Ländern) zu verzeichnen hat, und die Sterbefälle nicht von der Anzahl der Geburten ausgeglichen werden. 2014 betrug das Durchschnittsalter in Thüringen 46,9 Jahre, im Jahr 2035 wird die Bevölkerung durchschnittlich 49,9 Jahre alt sein.

Dabei ist wie auch in anderen Regionen Deutschlands die Bevölkerungsentwicklung regional unterschiedlich. Die eher städtisch geprägten Regionen beziehungsweise Großstädte Thüringens – Weimar, Jena und Erfurt – profitieren vom Trend zur Urbanisierung und verzeichnen seit 1990 ein Bevölkerungswachstum von bis zu 3 %. Dagegen wird in den eher peripheren und ländlichen Regionen wie dem Kyffhäuserkreis, dem Altenburger Land oder dem Saale-Orla-Kreis in den nächsten Jahren zwischen einem Fünftel und einem Viertel der Bevölkerung abwandern. Insgesamt wird erwartet, dass die Abwanderung weiter sinkt. Der Bevölkerungsverlust durch Binnenwanderung in andere Bundesländer kann durch Wanderungsgewinne gegenüber dem Ausland nur teilweise ausgeglichen werden.

Die Alterung und Abwanderung der Bevölkerung wirken sich direkt auf die Anzahl der Erwerbstätigen und Fachkräfte aus. „Allein im Zeitraum zwischen 2000 bis 2008 ist das Erwerbspersonenpotenzial in Thüringen insgesamt um 11,3 % zurückgegangen“³⁰. Insbesondere Menschen im Alter zwischen 20 und 40 Jahren wandern aus Thüringen ab. Die Hauptgründe für die Abwanderung von Erwerbstätigen sind die Erwerbs- und Einkommensmöglichkeiten. Zusätzlich sorgt die starke Überalterung dafür, dass ein größerer Teil der Bevölkerung dem Arbeitsmarkt nicht zur Verfügung steht. Während

»Die Zahl der Erwerbspersonen in Thüringen sinkt voraussichtlich bis 2040 um ein Viertel.«

Thüringer Landesamt für Statistik,
Pressemitteilung vom 20. Februar 2020

die Arbeitsnachfrage, also Zahl der Stellenangebote, leicht zugenommen hat, ist das Arbeitsangebot von Erwerbstätigen deutlich eingebrochen und wird voraussichtlich weiter sinken.³¹ Das mündet in einem zunehmenden Arbeitskräftemangel und einem starken Rückgang der Arbeitslosenquote. Das Wachstum des

²⁸ Ragnitz (14. November 2018).

²⁹ Ragnitz (14. November 2018).

³⁰ Ammermann u. a. (März 2011), S. 55.

³¹ Thüringer Landesamt für Statistik (Hrsg.) (o.J.).

Bruttoinlandsprodukts beruht also vor allem auf einer höheren Produktivität je Arbeitnehmer, weniger auf der Schaffung zusätzlicher Arbeitsplätze („Jobless Growth“)³².

Neue Arbeitsfelder und Unternehmen profitieren in Thüringen einerseits von noch geringen Lohnausgaben, andererseits müssen Arbeitnehmer zunehmend aktiv umworben werden. Attraktive Arbeitsplätze, zum Beispiel in der Batterierecyclingkette, können dazu beitragen, dass junge Thüringer in ihrem Bundesland bleiben.

2.3 Forschungslandschaft

Innovationskraft

Die Innovationskraft bestimmt die Entwicklungs- und Wachstumspotenziale eines Landes. Sie bemisst sich an sogenannten Innovationsindikatoren. Im Umfang dieser Studie wird die Innovationskraft nur grob eingeschätzt, zum einen anhand der Stärke beziehungsweise der Anzahl der Beschäftigten im Bereich FuE und zum anderen anhand der Anzahl von Patentanmeldungen.³³ Durch die eher kleinteilige Unternehmensstruktur mangelt es in Thüringen und den anderen ostdeutschen Bundesländern an großen Unternehmen, die mit einem großen Budget strategisch forschen und entwickeln können.³⁴

Trotzdem sind Thüringer Unternehmen und Forscher im bundesdeutschen Vergleich sehr innovativ. Quantitativ betrachtet liegt Thüringen bei der absoluten Anzahl angemeldeter Patente hinter Sachsen im Mittelfeld. Im Jahr 2019 wurden in Thüringen 598 Patente angemeldet, in Gesamtdeutschland 67.437 Patente. Dem entgegengesetzt liegt Thüringen mit 28 Patentanmeldungen pro 100.000 Einwohnern auf dem 6. Platz im bundesweiten Vergleich und damit vor allen ostdeutschen Ländern. Innovationen konzentrieren sich insbesondere auf die Felder Optik, Medizintechnik sowie elektrische Maschinen und Geräte. Allerdings hat die Innovationsdynamik in den letzten Jahren eher nachgelassen (siehe Abbildung 8).³⁵

Die Anzahl der Beschäftigten im Bereich Forschung und Entwicklung steigt in Thüringen stetig.³⁶ Die Thüringer Forschungslandschaft besteht aus fünf Hochschulen, vier staatlichen Fachhochschulen und einer dualen Hochschule sowie 28 außeruniversitären Forschungsinstituten, darunter Institute der Fraunhofer-Gesellschaft, Max-Planck-Institute, Institute der Leibniz Gemeinschaft sowie Landes- und wirtschaftsnahe Institute. Die Forschungseinrichtungen sind dabei sowohl als Träger von Know-how als auch als Ressource für die Aus- und Weiterbildung zukünftiger Fachkräfte entscheidend.

»Woran es in den Neuen Ländern mangelt, sind große Unternehmen mit strategischen Unternehmensfunktionen, also vor allem mit Forschung und Entwicklung, [...].«

Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung Halle (IWH), Vereintes Land – drei Jahrzehnte nach dem Mauerfall, 2019

³² Ragnitz (14. November 2018).

³³ Schubert u. a. (October 2011).

³⁴ Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung Halle (Hrsg.) (2019), S. 9.

³⁵ Deutsches Patent- und Markenamt (26.02.2020) <https://www.dpma.de>.

³⁶ Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (o.J.) <https://wirtschaft.thueringen.de>.

PATENTANMELDUNGEN THÜRINGEN (2013 BIS Q2 2020 - 15 GRÖßTE PATENTKLASSEN)

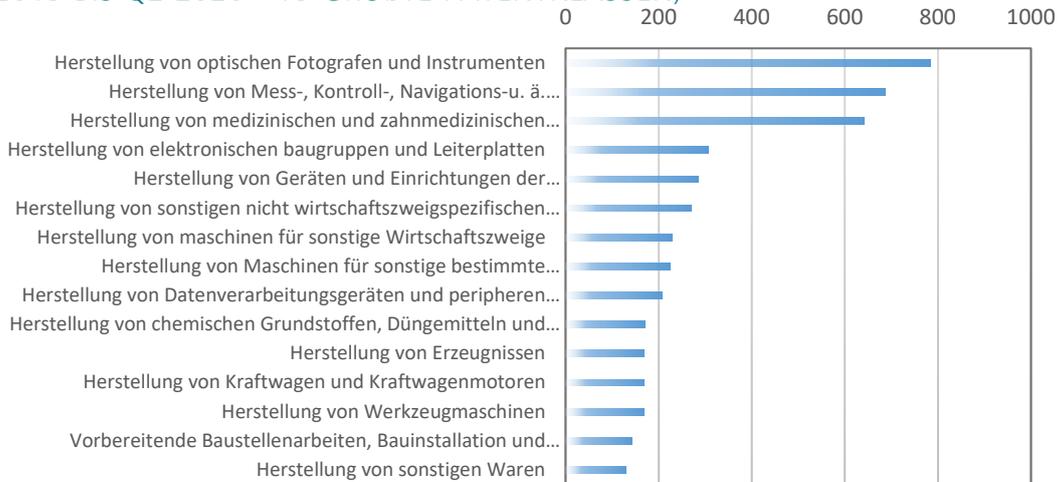


Abbildung 8 Patentanmeldungen Thüringen

Forschung und Entwicklung im Bereich Umweltwirtschaft haben in Thüringen einen hohen Stellenwert. Die wichtigsten Forschungsschwerpunkte für das Batterierecycling liegen in der Recyclingtechnik, Energietechnik, Werkstoffe, Materialien, Chemie, Sensorik und Logistik. Tabelle 2 fasst die vorhandenen Kompetenzen und Chancen derjenigen Forschungsakteure in Thüringen zusammen, die bereits relevante Projekte im Bereich Recycling bearbeitet haben oder über übertragbare Kompetenzen für das Batterierecycling verfügen (ausführliches Profil der Forschungsakteure im Anhang, Kapitel 10.2). Die Grundlage für diese Kompetenzübersicht sind eine Internetrecherche und punktuelle Experteninterviews.

Tabelle 2 Tabellarische Übersicht der Forschungsfelder universitärer und außeruniversitärer Einrichtungen

	Recycling	Anlagen	Sammlung, Lagerung	Logistik	Werkstoffe	Sensorik	Energiespeicher
Universitäre Einrichtungen							
AUGUST-KRAMER-INSTITUT, HS Nordhausen	●	●					
Thüringer Innovationszentrum für Wertstoffe (ThiWert)	●	●	●				
Bauhaus-Institut für zukunftsweisende Infrastruktursysteme (b.is), Bauhaus-Universität Weimar	●						
Institut für Werkstofftechnik, TU Ilmenau	●						●
Thüringer Energieforschungsinstitut (ThEFI), TU Ilmenau							●
Institut für Produktion, Transport, Umschlag und Lagern (proTUL), FH Erfurt			●	●			
Zentrum für Energie und Umweltchemie (CEEC Jena)							●
Forschungsschwerpunkt Technologien und Werkstoffe, Ernst-Abbe-Hochschule Jena		●			●		
Thüringer Zentrum für Maschinenbau (ThZM)		●				●	
Außeruniversitäre Einrichtungen							
Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH (IAB Weimar gGmbH)	●						
Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS	●				●	●	●
GFE - Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden e.V.		●					
Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF					●	●	

Wenn der Recyclingprozess für Antriebsbatterien im weiteren Umfeld betrachtet wird, gehören dazu auch Themen wie Klassifizierung, Analyse, Transport und Energiespeicher. So haben beispielsweise auch Institute im Bereich Logistik wie in Erfurt, Energieforschung in Ilmenau und anorganischer Materialwissenschaften sowie die historische Optikkompetenz und Umweltchemie in Jena eine gute Ausgangslage, um Teilaspekte des Batterierecyclings zu erforschen.

In Thüringen befindet sich Recycling als Forschungsfeld im Vergleich mit anderen Forschungsakteuren in Deutschland noch im Aufbau. Politisch wurde 2019 mit der Gründung eines Innovationszentrums ein Zeichen für das Recycling gesetzt. Das vom Freistaat geförderte „Thüringer Innovationszentrum für Wertstoffe“ (ThiWert) in Nordhausen, als Kooperationseinrichtung der HS Nordhausen, der Bauhaus-Universität Weimar und des Instituts für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH, will Entsorgungswissen und Technologien bündeln. Eine Analyse der Forschungsprojekte ergibt Schwerpunkte in den Bereichen Gipsrecycling, Sammlung/Separierung von Elektroschrott, Anlagenkomponenten für die Sortierung des „Gelben Sackes“, sensorgestützte Sortierung von Bau- und Abbruchabfällen sowie Separierung biologischer Abfallströme und Trennung seltener Metalle. Batterierecycling ist bisher kein Fokus.



Abbildung 9 Übersicht deutsche Forschungslandschaft mit Bezug zu Lithium-Ionen-Batterien und/oder -recycling³⁷

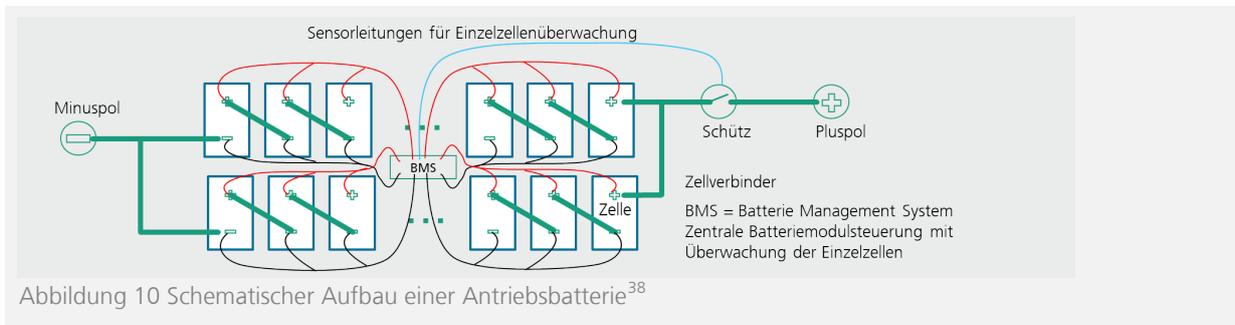
Auch wenn bisher kein starker Fokus auf dem Recycling als Forschungsthema liegt, haben die (außer)universitären Akteure Thüringens Potenzial für eine Erforschung von Lösungen im Bereich Batterierecycling. Darüber hinaus sind Kooperationen mit der Recycling- und Batterieforschungslandschaft Gesamtdeutschlands denkbar (siehe Abbildung 9). Niedersachsen mit der TU Clausthal und Braunschweig, Westfalen mit der Universität Münster sowie Karlsruher Institut für Technologie in Süddeutschland, das Fraunhofer ISI, die TU München sowie das Helmholtz-Institut Ulm haben Kompetenzen im Bereich Batteriespeicher und Batterierecycling. Als regional nächstliegender Akteur sticht die TU Freiberg und der dortige Standort des Fraunhofer IKTS mit Stärken in der Grundlagen- und der angewandten Forschung heraus. Neben gemeinsamen Verbundprojekten arbeitet die TU Freiberg auch im Batterie-Kompetenzcluster greenbatt für Recycling und grüne Technologien mit vielen deutschen Forschungsakteuren zusammen. Mit der Gründung des „Batterie Innovations- und Technologie-Center“ (BITC) im Jahr 2020 verfügt Thüringen zudem über einen herstellernahen „Innovationscampus“, der Technologien für eine möglichst energieeffiziente und ressourcenschonende Batterieproduktion in Deutschland entwickelt.

³⁷ Eigene Darstellung Fraunhofer IKTS, Hintergrundgrafik erstellt von Freepik.com

3 Technischer Entwicklungsstand Antriebsbatterien

3.1 Aufbau und Funktion von Antriebsbatterien

Antriebsbatterien, auch Traktionsbatterien genannt, sind aus technischer Sicht Reihen- und Parallelschaltungen einzelner elektrochemischer Zellen, die auch als „galvanische Elemente“ bezeichnet werden.



Die Reihenschaltung ist erforderlich, um die niedrigen Zellspannungen der einzelnen galvanischen Elemente von zum Beispiel nur 3.6 V auf technisch erforderliche Batteriespannungen von 48 V bis zu 800 V (je nach Anwendungsszenario) für elektrische Antriebe zu erhöhen.

Für eine besonders leistungsgetriebene Anwendung der Antriebsbatterie kann es zusätzlich notwendig werden, die Leistungsaufnahme beziehungsweise -abgabe der Batterie durch Parallelverschaltung der galvanischen Elemente zu erhöhen (angedeutet in Abbildung 10 untere Zellreihe).

Das galvanische Element – die Zelle – bestimmt maßgeblich die Eigenschaften der gesamten Batterie. Deshalb wird im Folgenden noch detaillierter auf die Zelle eingegangen. Wichtig bei der elektrischen Verschaltung mittels Zellverbinder sind Zellen mit weitgehend identischen elektrischen Kennwerten wie Kapazität (= gespeicherte Ladungsmenge) und Zellspannung. Jede einzelne Zelle muss durch die zentrale Batteriemodulsteuerung, dem BMS (Batterie-Management-System), bezüglich ihrer aktuellen Parameter überwacht werden. Die zentrale Steuerung überwacht weiterhin die Umgebungsbedingungen und kann im Fehlerfall die Zellen galvanisch durch einen Schutz abtrennen.

Zu einem Batteriemodul gehören darüber hinaus periphere Komponenten wie elektrische Kontaktierungen, Halterungen, weitere Überwachungs- und Sicherheitstechnik, ein Gehäuse und vielfach ein Kühlsystem.³⁹ Die Zellen selbst können in verschiedenen Bauformen vorliegen. Wichtig für eine spätere Zweitnutzung des Batteriemoduls und das Recycling sind die verwendeten Verbindungstechniken, die entscheidend die Möglichkeiten einer späteren Montage bestimmen.

Elektrochemie

Zum technischen Verständnis von Antriebsbatterien ist ein kleiner Exkurs in die Elektrochemie erforderlich. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich allerdings auf Grundlageninformationen, da an dieser Stelle nur eine kurze Zusammenfassung erfolgen kann. Auf Überblicksinformationen wird jedoch verwiesen.⁴⁰

³⁸ Fraunhofer IKTS.

³⁹ Vgl. Schlick u. a. (2011).

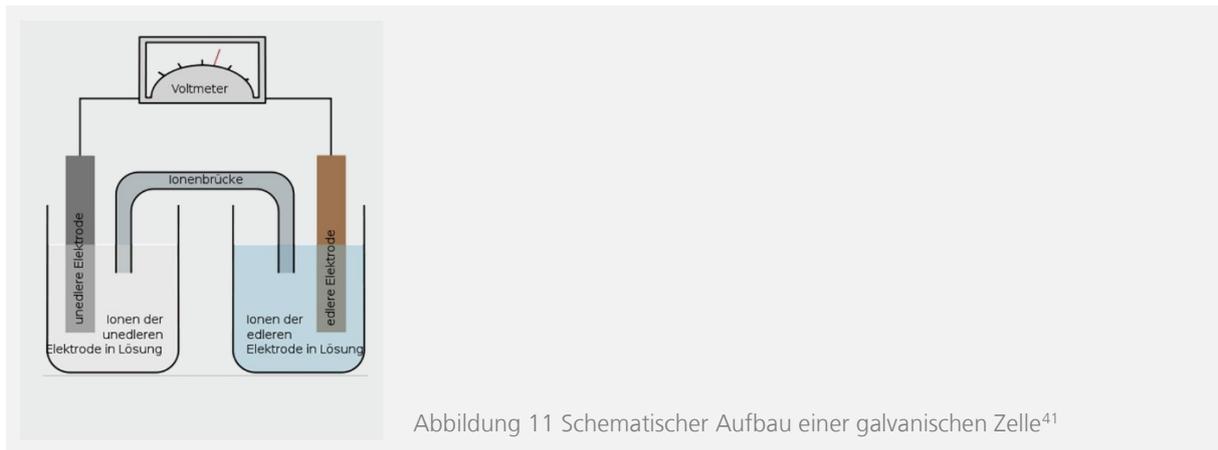
⁴⁰ Vgl. Hamann/Vielstich (1998), S. 65ff.

Durch den Kontakt bestimmter elektronenleitender Materialien, beispielsweise Metalle, mit einer Lösung eines ihrer Metallsalze entsteht ein Gleichgewicht aus Metall und in Lösung gegangenen Metall-Ionen. Beim Auflösen des Metalls verbleiben die Elektronen im Metall, während die Metall-Ionen durch die Grenzfläche in die umgebende Lösung treten. Es entsteht ein Potenzialgefälle zwischen der festen Elektrode und der umgebenden Salzlösung, „Elektrolyt“ genannt. Dem Bestreben, unter Elektronenabgabe als positiv geladenes Ion in Lösung zu gehen, wirkt die sich an der Grenzfläche ausbildende elektrochemische Doppelschicht aus gegensätzlich geladenen Teilchen entgegen – es entsteht ein Gleichgewicht. Durch die Ladungstrennung liegt auch ein Potenzialunterschied zwischen der Elektrode (im Beispiel dem Metall) und dem umgebenden Elektrolyten vor.

Verschiedene Metalle zeigen ein stark unterschiedliches Bestreben, als Metall-Ion in Lösung zu gehen, das heißt das Potenzialgefälle zum umgebenden Elektrolyten, die „Galvani-Spannung“, unterscheidet sich für die einzelnen Redoxpaare. Die Galvani-Spannung selbst kann nicht direkt bestimmt werden. Für die Messung im Elektrolyten müsste eine weitere Messelektrode eingeführt werden, die ihrerseits wieder ein Potenzialgefälle zum Elektrolyten aufweist. Deshalb werden die Potentiale zwischen einem Redoxpaar und einer definierten Referenzelektrode verglichen und meist auf die Standard-Wasserstoffelektrode (SHE) bezogen. Damit ergibt sich eine messbare Potenzialdifferenz: Ist diese < 0 V gegen die SHE, hat das Redoxpaar einen größeren Lösungsdruck als Wasserstoff, das heißt das Metall löst sich potenziell in verdünnten Säuren auf, Wasserstoff entsteht. Man spricht von „unedlen“ Metallen. Umgekehrt lösen sich die Redoxpaare mit einer gemessenen Differenz von > 0 V nicht auf. Hier ist von „Edelmetallen“ die Rede.

Die gegen die SHE messbaren Potentiale werden in der elektrochemischen Spannungsreihe aufgetragen. Diese hat neben der Korrosion von Metallen eine entscheidende Bedeutung für elektrochemische Energiespeicher, weil sich aus den Potenzialdifferenzen der Redoxpaare die Zellspannung einer galvanischen Zelle abschätzen lässt.

Mit Hilfe galvanischer Zellen kann chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt werden. Dazu nutzt man die sich unterschiedlich ausbildenden Potentiale geeigneter Redoxpaare aus. Beide Redoxpaare werden räumlich voneinander getrennt gehalten, wie in Abbildung 11 beispielhaft mit zwei Bechergläsern gezeigt ist. Beide Elektroden entwickeln dann ein für sie jeweils charakteristisches Potenzial zum umgebenden Elektrolyten und damit zueinander eine Potenzialdifferenz. Zum Elektronenfluss als Möglichkeit zum Abbau der Potenzialdifferenz zwischen den Elektroden kommt es aber erst dann, wenn der externe Stromkreis geschlossen wird. Die Elektrode mit dem niedrigeren Potenzial hat das größere Bestreben, „freiwillig“ zum Beispiel als Metall-Ion in Lösung zu gehen, das heißt das größere Oxidationsbestreben. Sie heißt deshalb Anode. Oxidation ist der Prozess, der unter Elektronenabgabe zu höheren Oxidationszahlen hin abläuft. Die Elektrode mit dem höheren Potenzial hingegen hat, verglichen mit der Anode, ein niedrigeres Bestreben, „freiwillig“ als Ion in Lösung zu gehen. Deshalb nimmt diese Elektrode in Kombination mit der Anode Elektronen auf, das heißt es läuft eine Reduktion ab. Diese Elektrode ist die Kathode. Man bezieht sich bei den Begriffen „Anode“ und „Kathode“ bei wiederaufladbaren Zellen immer auf den freiwilligen Prozess, den Entladevorgang. Beim Laden tauschen sich Oxidation und Reduktion an den Elektroden um.



Das Verbinden der beiden Elektroden mit einem elektrischen Leiter ist Voraussetzung für einen Elektronenfluss (elektrischer Strom) zwischen den Elektroden. Damit können Ladungsträger von einer Halbzelle in die andere fließen. Dieser Ladungstransport zwischen den beiden Halbzellen muss ausgeglichen werden, deshalb ist eine Ionen-leitende, aber nicht Elektronen-leitende Verbindung zwischen den Halbzellen in Form einer Ionenbrücke beziehungsweise eines Separators erforderlich. Als Separator dienen meist dünne poröse Kunststofffolien oder (keramikbeschichtete) Vliese.

3.2 Überblick Energiespeicher und -wandler

Galvanische Zellen, wie eben beschrieben, speichern chemische Energie in ihrem Inneren und können diese in elektrische Energie umwandeln. Energiespeicher und -wandler lassen sich nach verschiedenen Kriterien einteilen.

Nach Zellart

Primärzellen werden im geladenen Zustand hergestellt und verkauft. Der Anwender kann die Zellen nur einmal entladen. Danach müssen diese recycelt werden. Ein Wiederaufladen dieser Zellen ist nicht möglich, meist weil einzelne Elektrodenvorgänge nicht umgekehrt ablaufen können, das heißt nicht reversibel sind. Primärzellen eignen sich aus ökologischen und ökonomischen Gründen nicht für elektromobile Anwendungen. Der Recyclingaufwand steht in keinem Verhältnis zur gespeicherten Energiemenge.

Sekundärzellen können mehrfach wieder aufgeladen werden. Aufladen und Entladen bilden zusammen einen „Zyklus“. Die Anzahl der Lade- und Entladeschritte bis zum Erreichen von nur noch 80 % der ursprünglichen Zellkapazität wird als Maß für die Zyklenstabilität verwendet. Zellen für Antriebsbatterien müssen ausreichend viele Lade- und Entladezyklen abbilden, eine Nutzungszeit von mindestens acht Jahren (als Erstnutzung im Fahrzeug) ist für Antriebsbatterien häufig vorgesehen. Zellen dieses Typs stehen derzeit im Fokus als elektrische Antriebsenergiespeicher.

Tertiärzellen speichern die in elektrische Energie umzuwandelnde chemische Energie nicht im Inneren der Zelle, sondern extern in Tanks. Zu den Tertiärzellen gehören Brennstoffzellen und Redox-Flow-Batterien. Einige Varianten sind als Energiespeicher für die Elektromobilität interessant.

⁴¹ Henry Mühlpfordt / *File:Galvanic Cell.svg: Gringer (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Galvanische_Zelle_2009-02-08.svg), „Galvanische Zelle 2009-02-08“, Bearbeitung von Fraunhofer IKTS, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>.

Nach Elektrolyt

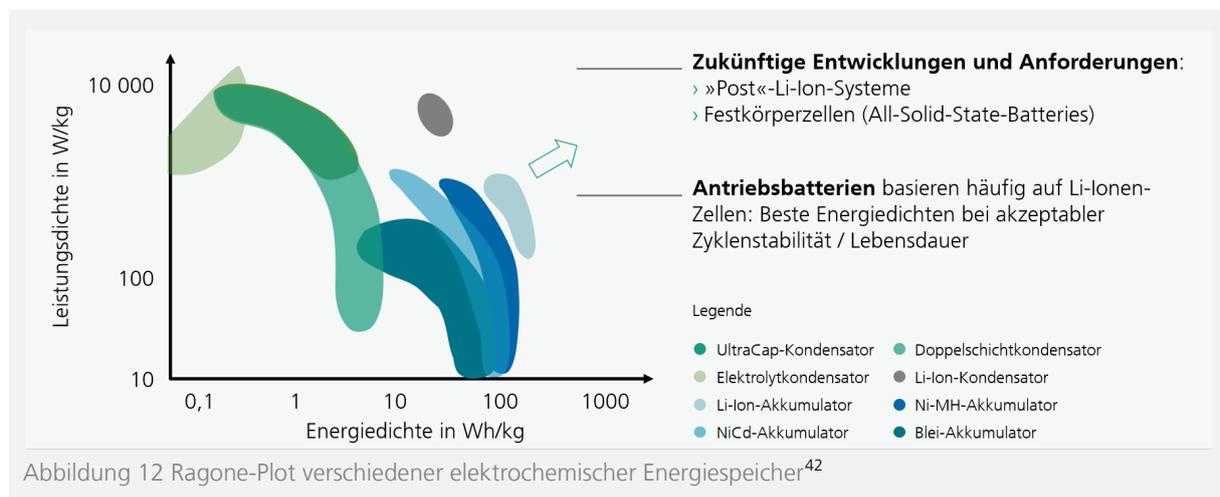
Elektrochemische Energiespeicher und -wandler verwenden sehr unterschiedliche Elektrolyte. Ein Elektrolyt ist ein Material, das Ionen transportieren kann, aber keine Elektronen („Leiter 2. Klasse“). Der Elektrolyt trennt die Elektroden. Zusammen mit einem meist erforderlichen Separator wird dadurch die räumliche Abgrenzung der Elektroden erreicht, so dass diese ausschließlich durch transportierbare Ionen verbunden sind. Bei flüssigen Elektrolyten unterscheidet man zwischen wässrigen Elektrolyten (Elektrolyt ist Wasser mit gelöstem Salz) und nicht-wässrigen Elektrolyten. Bei nicht-wässrigen Flüssigelektrolyten werden Salze in organischen Lösungsmitteln aufgelöst. Die Lösungsmittel können brennbar, giftig oder/und leicht flüchtig sein. Bei einigen Zelltypen werden die flüssigen Elektrolyte beispielweise als Gel fixiert, andere Zellen verwenden ionenleitfähige Polymere. Auch ionenleitende Festkörper sind bekannt. Sie bilden die Gruppe der Festkörperbatterien und stehen aktuell im Fokus vielfältiger Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten weltweit, u. a. weil Zellen mit Festkörperelektrolyt das Problem der Brennbarkeit sowie sonstige Sicherheitsprobleme wie Austritt giftiger Flüssigkeiten unter Extrembedingungen lösen sollen.

Nach Art der Energiespeicherung

Eine Batterie nutzt die Umwandlung von chemischer in elektrische Energie und umgekehrt. Dazu ist ein Phasendurchtritt geladener Teilchen, mit Blick auf Geschwindigkeit und Langzeitstabilität, durch die Phasengrenze zwischen Elektrode und Elektrolyt erforderlich. Die ablaufenden Redoxreaktionen werden Faraday'sche Prozesse genannt. Ein Kondensator hingegen speichert Energie ausschließlich elektrostatisch in Form von Ladungstrennung, indem die Bildung der elektrochemischen Doppelschicht genutzt wird.

3.3 Energie- und Leistungsdichten von Energiespeichern

Energiespeicher werden häufig nach ihrer Energie- und Leistungsdichte beziehungsweise ihrer spezifischen Energie/spezifischen Leistung (spezifische Energie = Energiemenge/Masse) bewertet. Eine gängige Darstellung ist der Ragone-Plot.



Der Ragone-Plot trägt die Leistungsdaten gegen die Energiedaten der Energiespeicher auf (Abbildung 12). Höhere Energiedichten, beziehungsweise wie dargestellt spezifische Energien, werden von z. B. Kraftstoffen oder auch von der Wasserstoff-Brennstoffzelle erreicht. Kondensatoren und Superkondensatoren haben für elektromobile Anwendungen meist zu niedrige Energiedichten. Die Energie- und Leistungsdichten typischer

⁴² MovGPO. (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Energiespeicher3.svg>), „Energiespeicher3“, Bearbeitung von Fraunhofer IKTS, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/legalcode>.

Antriebsbatterien liegen bei $> 100 \text{ Wh/kg}$ und $> 1000 \text{ W/kg}$. Sie werden vorzugsweise und je nach Anwendung aus den Zellen mit bester Energiedichte/Leistungsdichte am Markt hergestellt.

Grundsätzlich sind hohe Leistungs- und Energiedichten besonders vorteilhaft, lassen sich aber häufig nicht gleichzeitig steigern. Es gibt Energiespeicher mit Fokus auf eine hohe Energiedichte und andere mit Fokus auf eine hohe Leistung (Hochenergie- vs. Hochleistungszelle). Deshalb fokussiert sich die Entwicklung der Energiespeicher auf die jeweils geforderten Anwendungsparameter, und es entstehen verschiedene, jeweils für ihre Anwendung optimierte Energiespeicher.

Aktuell sind Li-Ionen-Zellen die besten Kandidaten für Antriebsbatterien. Sie vereinen höchste spezifische Energien im Vergleich zu anderen Zellen und weisen eine akzeptable Zyklenstabilität und Langlebigkeit auf.

Zukünftige Entwicklungen streben überwiegend weiter steigende Energiedichten an. Aktuell werden zukunftsorientierte „Post-Li-Ionen“-Systeme und auch Festkörperzellen intensiv beforscht. Neben Energie- und Leistungsdichte spielen für die Entwicklung von Energiespeichern aber auch ökonomische, umweltbezogene Eigenschaften, Langlebigkeit (kalendarische Alterung, erreichbare Lade- und Entladezyklen) und vor allem Sicherheit eine wichtige Rolle. Diese Eigenschaften sind im Ragone-Plot nicht ablesbar. Im automobilen Umfeld werden deshalb häufig Netzdarstellungen der Energiespeicher vergleichend abgebildet (vgl. Abbildung 16).

Für Li-Ionen-Zellen haben sich verschiedene Bauformen etabliert. Die Zellen unterscheidet man je nach Gehäuse in feste Hard-Case-Zellen aus Aluminium oder Stahl und in Pouch-Zellen, die eine Einhausung aus versiegelter Aluminiumfolie besitzen. Bei den Hard-Case-Zellen gibt es zahlreiche zylindrische Formen, gruppiert nach dem Zylinder-Durchmesser und der Gehäuselänge. Auch quaderförmige Hard-Case-Zellen werden für elektromobile Anwendungen eingesetzt. Diese werden als prismatische Zellen bezeichnet.

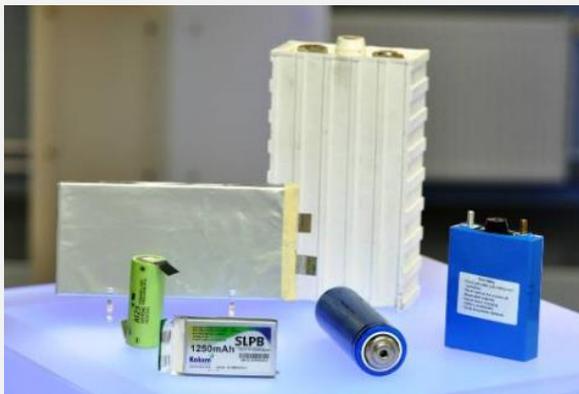


Abbildung 13 Bauformen Li-Ionen-Zellen⁴³

3.4 Li-Ionen-Zellen als Antriebsbatterie

Li-Ionen-Zellen zeichnen sich durch ihre hohe Energiedichte aus und eignen sich deshalb gut für Antriebsbatterien. Es soll an dieser Stelle kurz aufgezeigt werden, worauf sich die durch die in Medien, Forschung und Politik bekannte Fokussierung auf Lithium begründet.

Lithium ist das Metall mit dem niedrigsten Standardpotenzial von $-3,04 \text{ V vs. SHE}$, das heißt, Lithium ist das unedelste aller Metalle. Damit lassen sich in Kombination mit anderen Redoxpaaren (Elektrodenmaterialien) sehr hohe Zellspannungen erzielen. Die hohe Zellspannung führt zusammen mit der sehr niedrigen Dichte von Li von nur $0,534 \text{ g/cm}^3$ zu hohen spezifischen Energien.

⁴³ Fraunhofer IKTS.

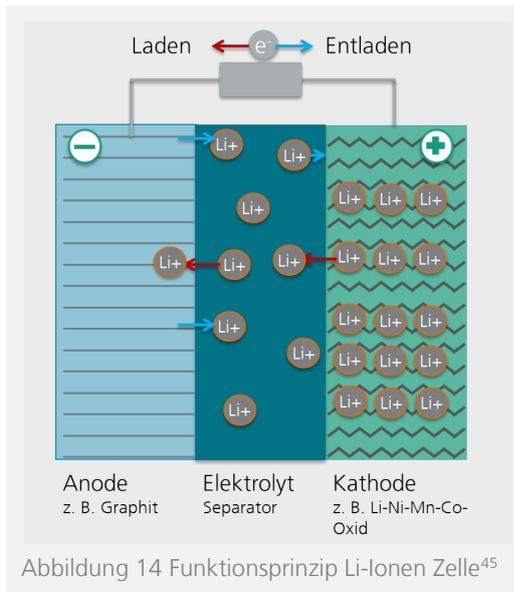
Diese Eigenschaften wurden bereits vor vielen Jahrzehnten entdeckt. Seit den 1970er Jahren gibt es zahlreiche Varianten von Li-Metall-Batteriezellen, den „Lithium-Batterien“. Die Verarbeitung von Lithium ist von folgenden Herausforderungen geprägt: Bei Kontakt von Li-Metall mit einem flüssigen Elektrolyten kommt es zu Zersetzungsreaktionen, da der Elektrolyt gegen das Li-Metall nicht stabil ist. Aufgrund dieser Zersetzungsreaktionen sind wässrige Elektrolyte meist nicht geeignet und man muss auf organische Lösungsmittel ausweichen, von denen viele allerdings giftig und brennbar sind. Auch diese zersetzen sich in der Regel auf der Li-Metalloberfläche, aber diese Prozesse können durch eine geschickte Materialauswahl gesteuert werden. Bis heute sind Lithium-Batterien im Einsatz, z. B. als Knopfzelle für mobile Geräte.

Eine zweite Herausforderung in der Nutzung des Lithium-Metalls für Antriebsbatteriezellen sind Li-Dendriten. Dabei handelt es sich um ungleichmäßige, stark verästelte Li-Metallabscheidungen, die sich beim Laden von Lithiumzellen immer wieder unerwünscht bilden. Lithium bildet beim Abscheiden selten einen ebenmäßigen Film, sondern fast immer nur diese dendritischen Strukturen.⁴⁴ Die Dendriten stellen dabei ein Sicherheitsproblem dar, weil sie durch oder um den Separator, der die beiden Elektroden voneinander trennt, wachsen können und so möglicherweise lokale Kurzschlüsse mit schwerwiegenden Folgen verursachen. Das immer wieder neu abgeschiedene Lithium hat außerdem eine große Oberfläche, die sich immer wieder neu mit Zersetzungsprodukten des Elektrolyten überzieht, so dass die Zelle allmählich austrocknet. Diese Probleme führen dazu, dass sich Li-Metall nicht ohne Weiteres in Zellen für wiederaufladbare Antriebsbatterien mit flüssigen Elektrolyten einsetzen lässt. Anfang der 1990er Jahre wurde durch die Verwendung von Interkalations- beziehungsweise Insertionsmaterialien eine Lösung für das Dendritenproblem gefunden. Diese Materialien begründen die Lithium-Ionen-Batterie.

Eine Li-Ionen-Zelle enthält kein metallisches Lithium, sondern das Lithium befindet sich zum Herstellungszeitpunkt in einem der eingesetzten Elektrodenmaterialien, üblicherweise in der Kathode. Das Lithium ist in die Struktur des Festkörpers eingebaut. Diese Li-Verbindungen sind stabil und finden sich zum Teil auch in der Natur. Wenn das Lithium aus der Struktur des Kathodenmaterials entfernt werden soll, muss man deshalb Energie aufwenden. Das Elektrodenmaterial der anderen Elektrode, der Anode, enthält zunächst kein Lithium, das heißt, es ist im Li-freien Zustand stabil. Das sich in der Kathode befindliche Lithium kann aber unter Aufbringung von Energie in die Struktur des Anodenmaterials eingebaut werden – das passiert beim Laden. Beim Entladen der Zelle geht das in der Anode eingebrachte Lithium wieder in den umgebenden Elektrolyten, in gleichem Maße baut sich das Lithium (in Form von Li-Ionen Li^+) aus dem Elektrolyten wieder in das (im geladenen Zustand nahezu leere) Kathodenmaterial ein. Die Unterschiede in der Triebkraft für den Ein- und Ausbau von Lithium in die Strukturen der Elektrodenmaterialien führt zu einer nutzbaren Potenzialdifferenz – es entsteht die galvanische Zelle (Abbildung 14).

Die Ein- und Auslagerungsprozesse von Lithium sind für geeignete Elektrodenmaterialien weitgehend reversibel, dadurch ist eine mehrfache Wiederaufladbarkeit der Zellen gegeben. Als Elektrodenmaterialien kommen vielfältige Materialien zum Einsatz, die jeweils durch ihre Struktur die reversible Ein- und Auslagerung von Lithium ermöglichen. Die Lithium-Ionen-Zelle ist somit nicht auf konkrete Elektrodenmaterialien beschränkt, es ist vielmehr ein Konzept beziehungsweise Funktionsprinzip. Das ist bei einer Zweitverwendung der Zellen, aber ganz besonders beim Recycling zu berücksichtigen. Je nachdem, wie stabil die Li-freie/Li-haltige Struktur ist – das heißt je nach Redoxpotenzial des Materials – unterscheidet man zwischen gängigen Anoden- und Kathodenmaterialien.

⁴⁴ Vgl. EL-Cell GmbH (12. Oktober 2017) <https://el-cell.com>.



»Es existiert also nicht die Lithium-Ionen-Zelle, vielmehr haben sich bestimmte Kombinationen aus Elektrodenmaterialien durchgesetzt.«

Dietrich Goers

Beispiele für Anodenmaterialien sind verschiedene Kohlenstoffe, besonders Graphit (C), Silizium (Si) und auch Li-Titanat (LTO). Diese Materialien fungieren als Anode, mit der gängige Kathodenmaterialien wie Lithium-Nickel-Kobalt-Manganoxid (NMC), Lithium-Nickel-Aluminiumoxid (NCA), Lithium-Nickel-Manganoxid (LMNO), Li-Eisen-Phosphat (LFP) und viele andere Kandidaten zu einer Li-Ionen-Zelle kombiniert werden. Dabei entsteht eine charakteristische Zellspannung in Abhängigkeit der verwendeten Materialien als Differenz der beiden Potenziale von Kathode und Anode zueinander (Abbildung 15). Wie bei den Lithium-Metall-Zellen wird auch hier mit in der Regel nicht-wässrigen Elektrolyten gearbeitet.

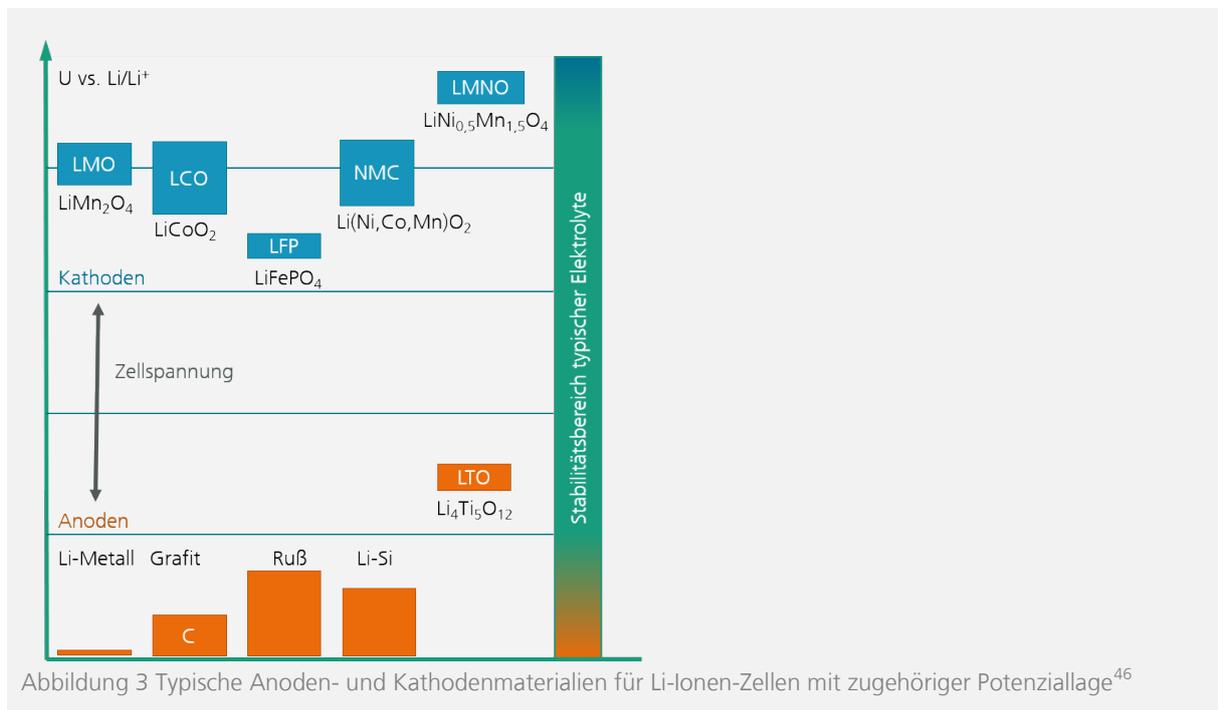
Es existiert also nicht die Lithium-Ionen-Zelle, vielmehr haben sich bestimmte Kombinationen aus Elektrodenmaterialien, „Zellchemie“ genannt, durchgesetzt:

Die Anode besteht heute überwiegend aus Graphit. Mit seiner Schichtstruktur kann Graphit sehr gut Lithium ein- und auslagern. Dabei hat Graphit ein niedriges Potenzial: Eine Zelle, die Graphit statt Li-Metall verwendet, hat nur ca. 0,1 V weniger Zellspannung. Das ist akzeptabel, wird doch durch die Verwendung von Graphit im Gegensatz zu Li-Metall eine Wiederaufladbarkeit der Zelle ermöglicht. Verwendet werden meist abgerundete Partikel mit einigen μm Durchmesser. Da die Grafitielektrode seit ungefähr 25 Jahren weiterentwickelt wurde und nun kaum noch Verbesserungen erzielt werden, besteht ein Trend zur Beimischung verschiedener Si-Materialien, die noch mehr Lithium pro Gramm Material aufnehmen und abgeben können und damit zu höheren spezifischen Energien führen. Grafitfreie Anoden aus Si sind ebenfalls Gegenstand von FuE-Aktivitäten.

Auf der Kathodenseite werden heute, zumindest für elektromobile Anwendungen, überwiegend Co-haltige Materialien eingesetzt, wie NMC und NCA. Reines Kobaltoxid wird nicht mehr verwendet, da seine Gewinnung (siehe Folgekapitel) und sein hoher Preis (Vorkommen) nachteilig sind. Beim NMC mischen sich die Elemente Ni, Mn, Co in einem Festkörper und verleihen dem Elektrodenmaterial spezielle Eigenschaften. Als besonders erstrebenswert gelten heute ein niedriger Co-Anteil und dafür ein hoher Ni-Anteil. Das führt zu höheren Energiedichten und niedrigeren Preisen, aber die Zyklenstabilität, Verarbeitung und teilweise

⁴⁵ Fraunhofer IKTS.

auch die Sicherheit werden davon beeinflusst. Vor zehn Jahren wurde vielfach ein „Drittmix“ Ni-Mn-Co (NMC 111) eingesetzt. Momentan ist NMC 622 Standard, NMC 811 (und noch mehr Ni) liegen im Trend.

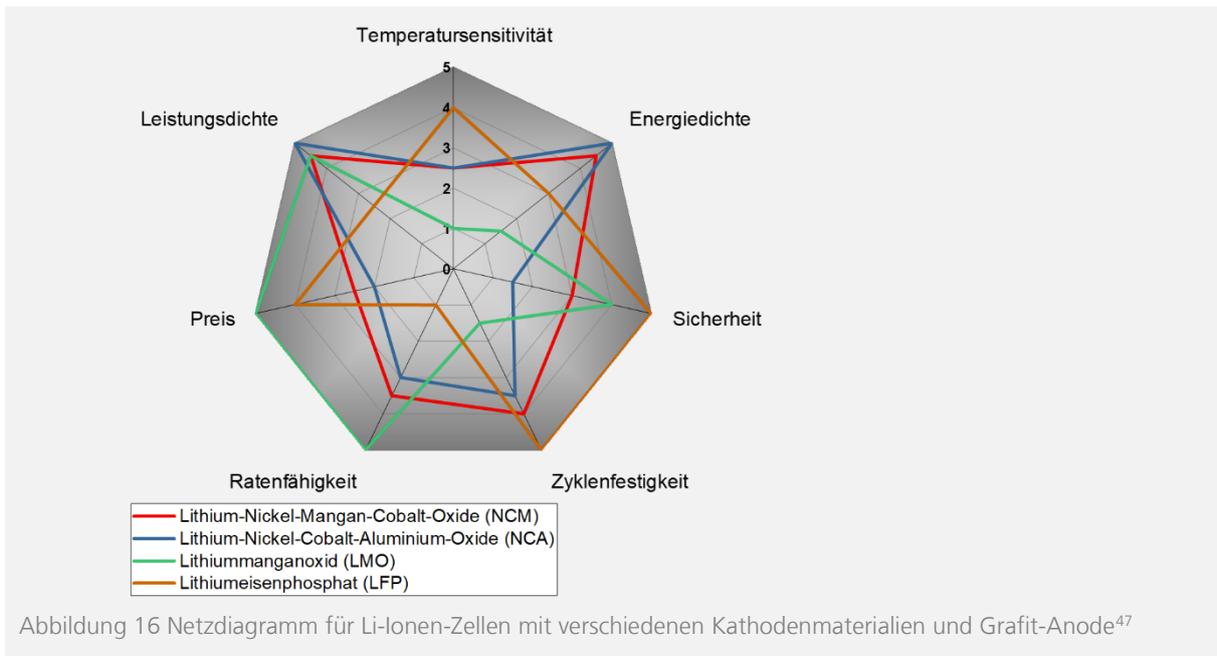


Bewährt für elektromobile Anwendungen hat sich die Verwendung von Grafit (C) als Anode kombiniert mit dem Kathodenmaterial NMC (Li-Ni-Mn-Co-Oxid). Zunehmend wird Silizium zur Anode zugesetzt, was in Grenzen die Energiedichte der Zellen erhöht. LFP in Kombination mit Grafit wurde für elektromobile Anwendungen zum Antrieb von Bussen usw. ebenfalls genutzt. Allerdings geht der niedrigere Preis des Co-freien LFP mit einer niedrigeren Zellspannung und damit geringeren Energiedichte einher, so dass für elektromobile Anwendungen LFP zunehmend verdrängt wird.

Es existieren zahlreiche weitere relevante Zellchemien für Li-Ionen-Zellen, aber an dieser Stelle kann nicht auf alle im Detail eingegangen werden. Abschließend soll hier noch kurz erwähnt werden, dass auch bei den Li-Ionen-Zellen an der Anode, gegebenenfalls auch an der Kathode, eine Elektrolytzersetzung stattfindet, weil sich die Potentiale der Elektrodenmaterialien außerhalb der Stabilitätsgrenzen typischer Elektrolyte befinden (vgl. schematische Darstellung in Abbildung 14). Durch die Auswahl geeigneter Elektrolytkomponenten sind die Prozesse aber steuerbar.

Neben der Energiedichte/spezifischen Energie spielen auch andere Eigenschaften für die Antriebsbatteriezellen eine große Rolle. Diese Eigenschaften werden maßgeblich durch die ausgewählten Anoden- und Kathodenmaterialien bestimmt. Die Eigenschaften werden mittels anschaulichen Netzdiagrammen bewertet. Wie hier im Beispiel gezeigt, treffen die positiven Eigenschaften in einer Zelle nicht immer aufeinander – deswegen sind Kompromisse nötig. Dabei ist die Entwicklung keinesfalls schon am Ende angekommen.

⁴⁶ Fraunhofer IKTS.



Die wichtigste Schlüsselgröße für die Bewertung ist die Sicherheit, gefolgt vom Preis. Das Ranking weiterer Eigenschaften hängt auch von der avisierten Anwendung ab.

3.5 Traktions-Energieträger im Vergleich

Wie bei den Li-Ionen-Zellen, gibt es auch nicht die eine Antriebsbatterie. Vielmehr muss man die unterschiedliche Energiemenge in den Batterien bezogen auf die jeweilige elektromobile Anwendung betrachten (Abbildung 17 mit Darstellung der Energiemengen, die in den Fahrzeugen mitgeführt werden).

Fahrzeug	HEV (Hybrid Electric Vehicle) [verschiedene Varianten]	PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)	BEV (Battery Electric Vehicle)	ICV (Internal Combustion Vehicle)
Energie/kWh	0,8–2 kWh	4–35 kWh	20–100 kWh	450–600 kWh (Tankgröße 50l) Lkw, Bus, Bahn deutlich mehr
Reichweite km (elektrisch)	Kein ausschließlich elektrischer Antrieb bzw. nur kurzzeitig: › Start-Stopp › z. T. Rückgewinnung Bremsenergie	20–50 km (elektrisch, danach typische Reichweite wie ICV)	100–600 km (elektrisch mit Batterie) Optional Range Extender	800–1200 km (mit Verbrennungsmotor)
Batterie*	Hochleistungszellen z.B. Prius IV** (NiMH): 1,3 kWh, 202V, 40kg (Li-Ion): 0,75 kWh, 207 V, 24,5 kg	Leistungszellen z.B. PHEV-Battery DA* 13,8k Wh, 420 V, 110 kg	Hochenergiezellen z. B. Mercedes Benz* Smart Gen IV: 17.6 kWh ,403 V, 178 kg EQC: 80 kWh, 650 kg	--
Ladezeit*** @3.6 kW	Nicht möglich	~ 1 ... 10h	~ 5 ... 28h	Nicht möglich

Im Fahrzeug mitgeführte Energiemenge: Elektrische Energie (elektrochemische Energiespeicher) → Chem. Energie (Kraftstoff)

HEV PHEV BEV ICV: Diesel / Benzin

FCEV (Brennstoffzelle): Wasserstoff

* Beispielangaben von Deutsche Akkumotive, www.accumotive.de;
 ** Beispieldaten für Toyota Prius IV (HEV-Variante) von priuswiki.de;
 *** Ladezeit für angenommene vollständige Ladung bei 3,6 kW («Notladung» an Haushaltssteckdose)

Abbildung 17 Energiemengen verschiedener Energiespeicher für Fahrzeuge

⁴⁷ Alexander Nickol, Fraunhofer IKTS.

Bei den HEV (Hybrid Electric Vehicle) sind nur sehr kleine Batterien verbaut. Für einen rein elektrischen Antrieb reicht die Batterie nicht aus, beziehungsweise ermöglicht sie nur sehr kurze, rein elektrisch zurücklegbare Distanzen. Die Batterien unterstützen den klassischen Verbrennungsmotor und können auch Bremsenergie speichern. Dementsprechend werden im Fahrzyklus sehr viele (Teil-)Lade- und Entladeschritte durchgeführt, was eine hohe Zyklenfestigkeit der Zellen erfordert. Die Leistungsaufnahme/-abgabe der HEV-Zellen ist sehr hoch – ein Vielfaches der Batteriekapazität wird pro Stunde umgesetzt. Am Beispiel der Prius IV HEV-Batterien (NiMH / Li-Ion) ist der Gewichtsvorteil der Li-Ionen-Zellen im Vergleich zum Ni-System sichtbar.

Die PHEV sind mit einer deutlich größeren Batterie ausgestattet, die kurze Fahrstrecken bis zu 50 km rein elektrisch ermöglicht. Das führt bei rein elektrischem Betrieb zu reduziertem Kraftstoffverbrauch, jedoch muss permanent eine vergleichsweise schwere PHEV-Batterie mit zugehörigen Komponenten mitgeführt werden.

Rein batteriebetriebene Fahrzeuge (BEV) verzichten komplett auf den Verbrennungsmotor und müssen über entsprechende Ladestationen geladen werden. Die Energiemengen der sehr großen Batterien reichen aktuell bis 100 kWh (Tesla Model S). Die Ladezeiten dafür sind sehr stark von der verfügbaren Ladeinfrastruktur abhängig. An haushaltsüblichen Steckdosen mit max. 3,6 kW können diese Batterien auch über Nacht (je nach Ladezustand) nicht mehr vollständig geladen werden. Hier sind entsprechende Schnellladestationen erforderlich. Beispielsweise beträgt das Gewicht einer 80 kWh Batterie für den MB EQC ungefähr 650 kg, die Reichweite liegt bei 500 km. Kleinere BEV wie der Smart kommt mit seiner ca. 180 kg schweren Antriebsbatterie auf 17,6 kWh, ausreichend für fast 150 km Reichweite. Die Anforderungen bzgl. der Leistungsaufnahme /-abgabe sind bei BEV-Batterien viel niedriger als bei PHEV und HEV-Batterien. Die Leistungselektronik der Schnellladung und der Elektromotoren wirkt vielfach leistungsbegrenzend.

Zur Speicherung sehr großer Energiemengen, benötigt für große Reichweiten, kommen neben den klassischen Energieträgern Diesel und Benzin auch Brennstoffzellen in Betracht. Das betrifft Pkw, Lkw, Busse und Lokomotiven. Die Herstellung der Energieträger Diesel, Benzin und Wasserstoff und damit die Ökobilanz wird maßgeblich von der Herstellungsmethode der Energieträger beeinflusst.

Ladetechnik

Prinzipiell wird zwischen Wechselstrom- und Gleichstromladung unterschieden. Beim Wechselstromladen wird ein im Fahrzeug eingebautes Ladegerät verwendet. Für schnelleres Laden benötigt man möglichst mehr als eine Stromphase. Bis 43 kW sind damit theoretisch möglich. In der Praxis sind 22 kW oder weniger üblich, weil Begrenzungen durch das vorhandene Ladegerät beziehungsweise die externen Wall Boxen oder Kabeladapter vorliegen können. Per Standard-/Notladung mit Strom aus einer einfachen Haushaltssteckdose erreicht man nur ~3,6 kW.

Aus technischer Sicht ist das Laden mit Gleichstrom die beste Methode. Der Gleichstrom wird durch die Ladesäule aus dem Nieder-/Mittelspannungsstromnetz gleichgerichtet oder stammt aus solar-gespeisten Batteriepuffern. Üblicherweise liegt die Ladeleistung mit Gleichstrom bei 50 kW mit Tendenz zu höheren Leistungen. Beispielsweise arbeitet der Tesla-Supercharger mit 135 kW. Hochleistungsanlagen mit 350 kW sind bereits in Einzelfällen realisiert und zunehmend als Ultra-Schnellladesäule in Planung. Zur Übertragung derart hoher Ladeleistungen ist die Kommunikation der Antriebsbatterie mit dem Ladegerät sehr wichtig. Die Antriebsbatterie gibt vor, wieviel Leistung sie aufnehmen kann. Die Stromübertragung erfolgt in Europa über CCS-Stecker.⁴⁸

⁴⁸ Graf u. a. (2019) <https://www.e-mobilbw.de>, S. 5f.

Elektrofahrzeuge werden normalerweise nur bis max. 80 % der Batteriekapazität geladen. Das Nachladen der verbleibenden 20 % dauert mit mehreren Stunden unverhältnismäßig lange, weil die Ladeleistung aus Lebensdauergründen der Antriebsbatterie bei hohem Ladestand stark reduziert werden muss. Mit einer Wandladestation (Wallbox) können die meisten Batterien bei 11 bis 22 kW in ca. fünf Stunden geladen werden.⁴⁹

Bei einer Induktionsladung wird der Ladevorgang kontaktlos durchgeführt, ohne ein Ladekabel anstecken zu müssen. Möglichst kleine Abstände der beiden Spulen, über die die Energie übertragen wird, sollen die immer auftretenden Übertragungsverluste verringern. Die Induktionsladung ist Gegenstand der aktuellen Forschung und Entwicklung.⁵⁰

Verfahren zur Vermeidung des Ladevorganges, indem man die leeren Antriebsbatteriemodule austauscht, werden aktuell nicht realisiert. Der Batterietausch wäre deutlich attraktiver, wenn im Antriebsbatteriebereich eine Standardisierung/Normung vorgenommen würde. Dies könnte zu einer stark steigenden Nachfrage und sinkenden Kosten führen, wie es bei haushaltsüblichen AA, AAA-(Alkaline)-Zellen der Fall war. Diese Vereinheitlichung würde auch eine Zweitnutzung und das Recycling vereinfachen.⁵¹

3.6 Wertschöpfung in der Antriebsbatteriefertigung

Die Wertschöpfung für Antriebsbatterien beginnt bei der Herstellung der Elektrodenfolien. Üblicherweise stellen Zellhersteller ihre eigenen Elektrodenfolien her, indem sie Metallfolien (sogenannte Stromsammel­folien mit wenigen µm Dicke) mittels speziellen Rezepturen beschichten und verdichten. Es sind kaum Beispiele bekannt, bei denen Zellhersteller ihre benötigten Elektrodenfolien in vollständig unabhängigen Unternehmen produzieren lassen. Im Gegensatz dazu werden die Elektrolyte meist fertig gemischt am Markt zugekauft, ebenso Separatoren, Gehäuseteile, Zellverbinder und Elektronik. Vom Weltmarkt bezogen werden außerdem die für die Elektrodenfertigung benötigten Rohstoffe wie Graphit, Oxidmaterial, Binder, Leit­fähigkeitsadditive und Metallfolien.

Aus den Elektroden und weiteren Zellkomponenten fertigt der Zellhersteller Zellen und verkauft diese an den Systemhersteller. Der Systemhersteller assembliert die einzelnen Zellen zu Batteriemodulen und fügt die erforderliche herstellerspezifische Überwachungselektronik, Kühlung, Gehäuse, Kontaktanschlüsse und weiteren Komponenten der Antriebsbatterie hinzu. Ein Beispiel ist die Deutsche Akkumotive in Kamenz, die Zellen zukauf und daraus die für die Muttergesellschaft Daimler AG benötigten Antriebsbatterien fertigt.

Durch den hohen Preisdruck auf die Zellhersteller gibt es Tendenzen, dass die Zellhersteller ihre Wertschöpfungskette verlängern und selbst fertige Batteriemodule – nach Kundenspezifikation – fertigen wollen. Das erhöht für die Zellhersteller die Gewinnspanne deutlich.

Elektrodenherstellung

Die Elektroden sind für die Zelleigenschaften von zentraler Bedeutung. Beide in der Zelle verbauten Elektroden, Anode und Kathode, unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung (Rezeptur) und in der Stromableiterfolie, auf die die elektrochemisch funktionalen Schichten aufgebracht sind. Als Stromableiterfolie kom-

⁴⁹ Smarter Fahren (2020a) <https://www.smarter-fahren.de>.

⁵⁰ Trurnit GmbH (2020) <https://www.smarter-fahren.de>.

⁵¹ Smarter Fahren (2020b) <https://www.smarter-fahren.de>.

men dünne Kupfer- und Aluminiumfolien zum Einsatz. Stand der Technik sind Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsverfahren für Elektrodenpasten. Neue Entwicklungen versuchen die für die Elektrodenpastenherstellung erforderlichen Lösungsmittel auszutauschen, zu reduzieren oder ganz auf die Pastenherstellung zu verzichten.

In den ersten Verarbeitungsschritten werden die pulverförmigen Materialien und die Binder, die für die Haftung des Pulvers auf der zu beschichtenden Metallfolie notwendig sind, dosiert, anschließend gemischt und meist mit einem Lösungsmittel, Wasser oder organisches Lösungsmittel wie N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP), versetzt. Diese Elektrodenpaste wird anschließend sehr dünn und gleichmäßig ein- und beidseitig auf die Stromsammelrolle aufgebracht. Die Anforderungen an die Gleichmäßigkeit und Maßhaltigkeit der Beschichtung sind sehr hoch. Bei bis zu 80 m/min werden bis zu 1,4 m breite Metallfolien zum Teil simultan beidseitig mit sehr dünnen, 50 bis 100 µm dicken und sehr gleichmäßigen Filmen versehen. Die beschichteten Bahnen laufen durch teilweise über 100 m lange Trocknerstrecken, um vorhandenes Lösungsmittel aus den beschichteten Elektrodenpasten vollständig zu entfernen. Die Elektrodenfolien müssen anschließend noch verdichtet (kalandriert), in entsprechend schmalere Bahnen geschnitten und aufgewickelt werden. Im Ergebnis liegen große Elektrodenrollen vor, die für die nachfolgende Zellenassemblierung benötigt werden.

Zellherstellung

Die Assemblierung der Zellen unterscheidet sich je nach der Bauform der Zelle. Pouch-Zellen werden überwiegend auf Grundlage von Elektrodenstapeln gefertigt. Dazu werden zunächst einzelne Elektrodenblätter (Anode und Kathode) aus dem zuvor gefertigten Elektrodenbändern ausgeschnitten beziehungsweise ausgestanzt. Bei einer Einzelblattstapelung schneidet man auch das angelieferte Separatorband aus den Separatorrollen in die gewünschte Größe und stapelt die Einzelblätter, immer abwechselnd Anode und Kathode, jeweils getrennt durch ein Separatorblatt, zu einem Stapel zusammen. Die Stapelung ist erforderlich, um eine praxistaugliche Zellkapazität, das heißt gewünschte Energiemenge, in der Zelle speichern zu können. Dazu reichen Einzelblätter in der Grundfläche der Zelle nicht aus – es müssen entsprechend mehrere Einheiten (> 20, bestehend aus Anode, Kathode und Separatoren) gestapelt werden. Eine alternative Methode zur Stapelherstellung ist das Z-Folding. Dabei werden die Anoden- und Kathodeneinzelblätter seitlich in ein durchgehendes Separatorband eingeschoben.

Nach der Stapelbildung werden die einzelnen Anoden- und Kathodenblätter mit einem Ableiterföhnchen zusammen verschweißt, so dass die Zelle einen gemeinsamen Plus- und Minuspol hat. Der Stapel mit Ableitern wird jetzt in das Foliengehäuse eingelegt und versiegelt. Nach der Befüllung mit Elektrolyt kann die Zelle dann verschlossen werden. Sie wird gekennzeichnet, umfassend geprüft und anschließend, wie alle Li-Ionen-Zellen, „formiert“⁵², bevor sie gelagert beziehungsweise verkauft werden kann. Der gesamte Zellenassemblierungsprozess wird begleitet durch lückenlose und umfassende Qualitätskontrollen. Ausschuss muss möglichst frühzeitig in der Prozesskette entdeckt werden. Nur so ist eine rentable Fertigung von Li-Ionen-Zellen überhaupt vorstellbar. Unentdeckte Qualitätsdefizite einzelner Zellen können auch ein erhebliches Sicherheitsrisiko darstellen. Gelangen Zellen mit mangelnder Sicherheit zum Anwender, droht erheblicher Finanz- und Imageschaden. Deshalb werden jedes einzelne Halbzeug und jede einzelne Zelle umfassend geprüft.

Vergleichbar, aber im Detail anders, läuft die Fertigung von prismatischen Zellen und zylindrischer Zellen ab, die hier nur kurz beschrieben werden soll. Prismatische Zellen werden entweder aus Stapeln (wie für die Pouch-Zelle beschrieben) oder auch aus Flachwickeln assembliert. Der prinzipielle Ablauf ist gleich, das Einbringen in das Hard Case und der Gehäuseverschluss sind für das feste Gehäuse prismatischer Zellen aber

⁵² Vgl. nachfolgender Abschnitt zu Formation

abweichend. Bei zylindrischen Zellen werden Anoden-, Kathoden- und Separatorbänder zusammen auf einen Dorn gewickelt. Der Wickel wird in die Zellbecher eingeführt, die Ableiter kontaktiert, Elektrolyt befüllt und der Becher verschlossen. Auch für prismatische oder zylindrische Zellen gilt die Notwendigkeit der vollständigen Prozessüberwachung.

Formation

Alle bisher beschriebenen Li-Ionen-Zellen erfordern zum Abschluss des Herstellungsprozesses eine Formation. Darunter versteht man das mindestens einmalige Laden von Li-Ionen-Zellen nach ihrer Herstellung und einer vorgegebenen „Benetzung“ aller Zellkomponenten mit dem Elektrolyten. Dieser Schritt führt in der frisch assemblierten Zelle zur erstmaligen Zersetzung von Elektrolytkomponenten, vornehmlich an der Anode. Diese Zersetzung findet statt, weil, wie in Abbildung 15 dargestellt, das Stabilitätsfenster eingesetzter Elektrolyte kleiner ist als die Potenziallage typischer Anodenmaterialien, speziell auf Grafitbasis. Ein derartiger Zersetzungsschritt oder Formierschritt muss unter streng kontrollierten Bedingungen ablaufen, um die Qualität der durch die Zersetzung gebildeten sehr dünnen Schicht auf der Anode, der SEI, zu gewährleisten. Teilweise geht die Zersetzung von Elektrolytkomponenten mit einer Gasentwicklung einher, so dass anschließend noch entstandenes Gas entfernt werden muss.

Mit dem ersten Laden ist die SEI-Bildung größtenteils abgeschlossen. Die Formation umfasst trotzdem noch weitere Entlade- und Ladeschritte, um zum einen eine Qualitätskontrolle durchzuführen, und Kapazitätswerte der Zelle zwecks Kategorisierung zu erhalten, zum anderen um einen lagerfähigen Zustand der Zellen zu erzielen. Insgesamt ist die Formation komplex, und sie verbraucht für die durchgeführten Ladeschritte deutlich mehr Energie als durch die Entladungsschritte wieder rückgewonnen werden kann.

Wertschöpfungskette Zellen

Die Li-Ionen-Zellfertigung ist eine High-Tech-Industrie. Die Automobilhersteller haben höchste Anforderungen bezüglich Qualität und vor allem Sicherheit, erzeugen aber einen sehr hohen Preisdruck. In den letzten Jahren sind deswegen die Zellpreise erheblich gefallen: 2010 lagen die Preise pro kWh gespeicherter Energie noch bei über 500 €, inzwischen liegen die Preise bei 100 bis 250 €. ⁵³

Für die Zellhersteller bedeutet die große Nachfrage milliardenschwere Investitionen in Fertigungsanlagen. Die Kapazität einer Fertigungsfabrik wird in GWh pro Jahr entsprechend der in den Zellen speicherbaren Energiemenge angegeben. Investitionen lohnen sich erst ab weit über 1 GWh jährlicher Produktionsleistung (bei einer sehr großen Antriebsbatterie von 100 kWh bedeuten 1 GWh pro Jahr lediglich 10.000 Einheiten, bezogen auf die Zellen geht es um Jahresproduktionskapazitäten im Millionenbereich). Zudem sind die Investitionen riskant, weil eine Fabrik möglichst schnell verkaufbare Zellen produzieren muss, aber im großen Maßstab in Vorleistungen gehen muss. Diese Umstände führen dazu, dass es derzeit nur wenige große Marktteilnehmer gibt, meist asiatische Konzerne.

Verbunden mit der Zellproduktion gibt es weitläufige Wertschöpfungsketten für die Zellkomponenten. Die Rohmaterialien für die Anode, überwiegend Grafitmaterialien, werden fast ausschließlich im asiatischen Raum hergestellt (Japan, China). 2016 lag der Verbrauch bei > 100.000 Tonnen Grafit im Jahr, zukünftig werden große Steigerungen erwartet. ⁵⁴ Bei Grafiten kann es sich um Naturgraphite handeln, die in Minen

⁵³ Thielmann u. a. (Dezember 2017), S. 15.

⁵⁴ Takeshita (2016), S. 13.

abgebaut, gereinigt und veredelt werden oder um synthetisch hergestellte Grafite. Bei Kohlenstoff-basierten Leitfähigkeitsadditiven wie Leitgrafiten und Ruß, die für Anoden und Kathodenherstellung eingesetzt werden, ist der Bedarf deutlich niedriger und die Dominanz der asiatischen Hersteller weniger ausgeprägt.

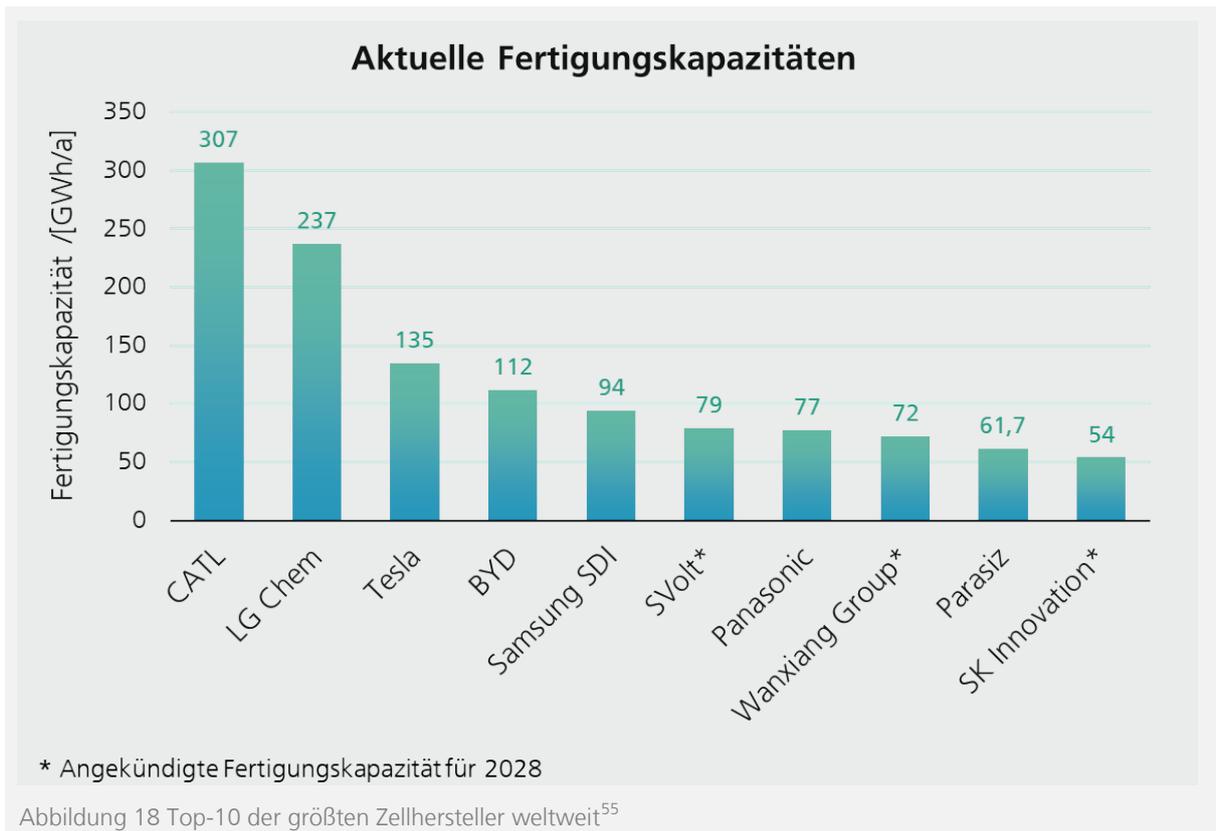
Bei den Kathodenmaterialherstellern sind mit Umicore und BASF auch europäische Marktteilnehmer vertreten. Trotzdem erfolgt der Großteil der Wertschöpfungskette in Asien. Mehr als 200.000 Tonnen Kathodenmaterial wurden 2016 verbraucht. Kathodenmaterialien enthalten wie oben bereits beschriebenen häufig Kobalt (Co). Daraus ergibt sich eine große Wichtigkeit für einen verlässlichen Marktzugang zu Kobaltmaterialien, der den europäischen Ansprüchen an die Herstellungsbedingungen (Stichwort Kinderarbeit, Kobaltminen im Kongo) gerecht wird. Auch Automobilhersteller haben die Rohstoffproblematik erkannt und gehen Verträge zur Gewährleistung akzeptabler Gewinnungsbedingungen für erforderliche Rohstoffe ein.

Bei Separatoren ergibt sich eine ähnliche geographische Lieferantensituation wie bei den Elektrodenmaterialien. Eingesetzt werden poröse Kunststofffolien oder Vliese, die häufig ein- oder beidseitig mit einer sehr dünnen Keramikbeschichtung versehen sind. Diese Beschichtung verbessert das Sicherheitsverhalten der Zellen. Auch hier, wie bei allen Zellkomponenten, gibt es verschiedenste Materialien und -kombinationen, so dass insbesondere das spätere Recycling eine Herausforderung darstellt.

Das gilt auch für die Elektrolyte: Die Elektrolyte sind komplexe Mischungen verschiedener organischer Lösungsmittel und einem Li-Salz, meist dem giftigen LiPF₆. Zusätzlich werden verschiedene Additive in kleineren Anteilen dem Elektrolyten zugefügt, um Sicherheit, Formationsverhalten, Gasbildung, Schnellladefähigkeit usw. zu verbessern. Jeder Zellhersteller hat für seine Zellen eigene, genau abgestimmte und geheime Elektrolytkompositionen, um sich in punkto Ladeverhalten, Temperaturbereich, Leistungsfähigkeit und Langlebigkeit von der Konkurrenz abzuheben.

3.7 Akteure national / international / Fertigungskapazitäten

Abbildung 18 zeigt aktuelle und angekündigte Fertigungskapazitäten der Top 10 Zellhersteller. Hier gibt es überwiegend außereuropäische Marktteilnehmer. CATL (Contemporary Amperex Technology) ist aktuell der größte Hersteller weltweit. LG Chem und Samsung stammen aus Südkorea und sind auch durch ein breites Spektrum anderer Produkte bekannt. BYD ist ein seit Jahren etablierter Automobil- und Zellhersteller aus China. Tesla ist bekannt durch seine Elektrofahrzeuge. Zusammen mit Panasonic produzierte Tesla zylindrische Zellen für seine Antriebsbatterien.



Ende 2019 lag die weltweit produzierte Menge an Li-Ionen-Zellen umgerechnet bei mehr als 380 GWh. Die aktuell hohe und zukünftig weiter steigende Nachfrage nach Li-Ionen-Zellen wird besonders durch elektromobile Anwendungen angeheizt und führt dazu, dass aktuell 115 neue Fertigungsanlagen mit Jahreskapazitäten über einer GWh geplant werden, 88 davon in China. Mit Northvolt ist auch ein schwedischer Hersteller dabei. Ansonsten handelt es sich weitgehend um nicht-europäische Marktteilnehmer.⁵⁶

In Deutschland finden sich gleich mehrere ambitionierte Vorhaben im Bereich der Zellfertigung. CATL wird in Thüringen mit 14 GWh eine der größten Fabriken in Deutschland aufbauen. Auch Tesla und Northvolt engagieren sich in Deutschland. Zu den Vorhaben von Blackstone und Farasis gibt es im November 2020 keinen aktuellen Stand der Entwicklungen, möglicherweise bedingt durch Covid-19.

Das Fraunhofer ISI hat aus mehreren Studien zur zukünftigen Marktentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien verschiedene Szenarien der Nachfrage und der Fertigungskapazitäten abgeleitet (Abbildung 19). In den kommenden Jahren kann mit 12 bis 26 % jährlichen Wachstumsraten gerechnet werden. Die Nachfrage wird 2030 etwa zu 80 % durch elektromobile Anwendungen entstehen, die Gesamtkapazität könnte dann bis zu 2000 GWh betragen.⁵⁷ Die Preise für die Zellen sinken bis 2030 auf ein bauf orm-unabhängiges Preisniveau von 60 bis 100 €/kWh.⁵⁸

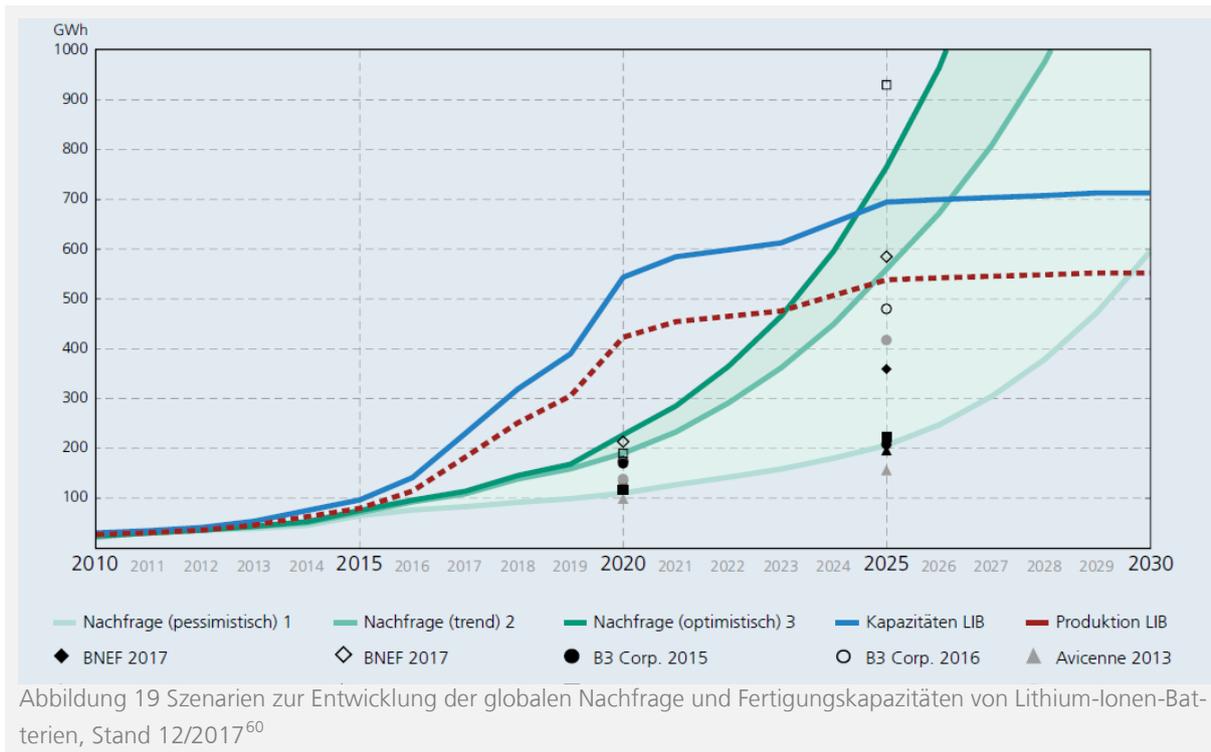
⁵⁵ Neitzel (3.6.2020) <https://www.technik-einkauf.de>.

⁵⁶ Argus Media group (28.03.2020) <https://www.argusmedia.com>.

⁵⁷ Energy Central (2020) <https://energycentral.com>.

⁵⁸ Thielmann u. a. (Dezember 2017).

Auch die deutsche Bundesregierung unterstützt aktuell Projekte zur Batteriezellenfertigung und Aktivitäten in Forschung und Entwicklung mit mehr als 1,5 Mrd. €. ⁵⁹



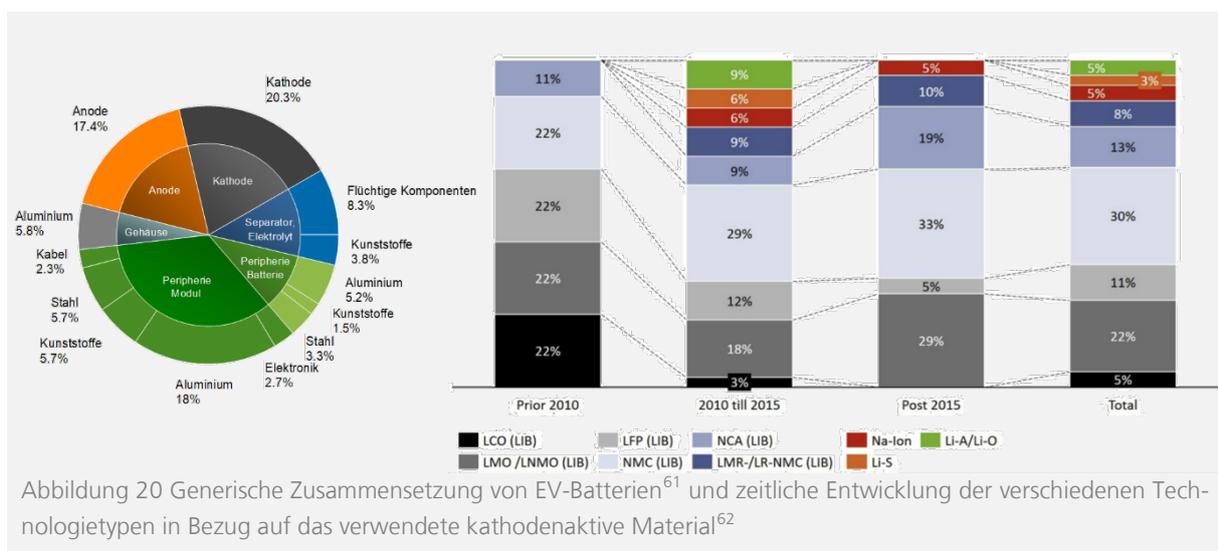
⁵⁹ Wirtschaft und Energie, Bundesministerium für (27.11.2020) <https://www.bmwi.de>.

⁶⁰ Thielmann u. a. (Dezember 2017), S. 9.

4 Rohstoffe und Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien

4.1 Rohstoffquellen und Marktsituation für die Zellherstellung

Der Massenanteil der eigentlichen elektrochemischen Zelle ist mit rund 50 % an der Gesamtmodulmasse einer Antriebsbatterie vergleichsweise gering. Bezogen auf die reinen Materialkosten betragen diese allerdings ca. drei Viertel der Kosten eines Moduls. Das liegt zum einen an günstigen Materialien für Gehäuse und Peripherie, wie Stahl, Aluminium oder Kunststoff. Zum anderen bedarf die Herstellung der elektrochemischen Zelle und deren Ausgangsmaterialien eines hohen Arbeitsaufwandes und benötigt preisintensive Ausgangsstoffe. Stand 2020 tragen die Materialkosten zu einem Anteil von 71 % an den Gesamtkosten einer Batteriezelle für Automotivanwendungen aus Lithium-Nickel-Kobalt-Manganoxid (NCM811) bei. Ziel aktueller Forschung ist daher, neben einer Verbesserung der spezifischen Energie- und Leistungsdichte, den Anteil kostenintensiver Materialien zu reduzieren. Am Markt finden sich derzeit Kathodenmaterialien unterschiedlicher Strukturtypen mit individuellen Vor- und Nachteilen. So weisen Lithium-Nickel-Kobalt-Manganoxid (NCM)- und Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA)- Materialien hohe Energie- und Leistungsdichten auf, sind aber vergleichsweise teuer und wenig stabil. Im Gegensatz besitzt Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) eine hohe Zyklenfestigkeit, Stabilität und einen günstigen Preis, jedoch auf ein gewöhnliches Elektrodendesign bezogen, nur mittelmäßige Leistungsparameter.



⁶¹ Zeng et al. (2019), p. 8.

⁶² Duffner u. a. (2020).

Basierend auf den Forschungsaktivitäten, die einzelne Aktivmaterialien betreffen, kann deren zukünftige Bedeutung für kommerzielle Batterien abgeschätzt werden. So zeigt sich, dass das Interesse an Lithium-Kobaltoxid aufgrund hoher Rohstoffkosten und materialspezifischer Nachteile stark abgenommen hat und nickelreiche Aktivmaterialien aus NCM und NCA sowohl wissenschaftlich als auch kommerziell in den Fokus gerückt sind. Mit einer kurz- oder mittelfristigen Verbreitung alternativer Technologien, wie Lithium-Schwefel oder Lithium-Luft, ist aus technischer Sicht nicht zu rechnen. Auch preiswerte Aktivmaterialien wie Lithium-Manganoxid (LMO) erfahren aufgrund breiter Verfügbarkeit der Rohstoffe und geringer ökologischer Kritikalität eine wissenschaftliche Renaissance. Aus diesem Grund soll im Folgenden eine Übersicht aller relevanten, in einer Lithium-Ionen-Batterie vorkommenden Stoffe gegeben werden, um deren wirtschaftliche, ökologische und technische Bedeutung darzustellen. Basierend auf einer Übersicht derzeitiger Recyclingverfahren sollen daraus Potenziale für die stoffliche Wiederverwertung abgeschätzt werden.

»Derzeit betragen die Materialkosten 71 % der Gesamtkosten einer Batteriezelle für Automotivanwendungen aus NCM.«

Alexander Nickol

Lithium

In Lithium-Ionen-Batterien fungieren Lithiumionen als Ladungsträger und sind initialer Bestandteil des Aktivmaterials auf Kathodenseite sowie des Leitsatzes im Elektrolyten. Lithium kommt in der Natur nicht elementar vor, sondern mineralisch als Salz, vor allem als Lithiumchlorid oder Lithiumcarbonat. Es besitzt dabei die geringste Dichte aller festen Elemente. Lithium findet heutzutage hauptsächlich Anwendung in Batterietechnik und der Keramik- und Glasindustrie. Daneben wird Lithium auch in technischen Pasten, als Lötzusatz, zur Luftbehandlung oder in der Pharmaindustrie eingesetzt.⁶³ Die Gewinnung erfolgt vorwiegend aus salzhaltigen Grundwässern der sekundären Lagerstätten. Diese werden über mehrere Monate in mehrstufigen Verdunstungsketten zu Lithiumchlorid aufkonzentriert. Anschließend erfolgt die Entfernung von unerwünschten Begleitstoffen wie Calcium, Bor oder Magnesium und eine Fällung von Lithiumcarbonat mit Natriumcarbonat. Für diese Prozessführung sind enorme Mengen an Wasser und Chemikalien notwendig. Abhängig von der Lithiumkonzentration in der Salzlösung sind für die Herstellung eines Kilogramms Lithium zwischen 500 und 3000 Litern Wasser nötig.⁶⁴ Zwar verwendet man für die Lithium Gewinnung selbst kein Trinkwasser, durch die Salzwasserentnahme kommt es jedoch zu einem erheblichen Absinken des Grundwasserspiegels am Rand der Salare. Dies hat weitreichenden Folgen für die Umwelt und die dort lebende Bevölkerung. Es existieren bekannte Verfahren, Lithiumionen mittels Nanopartikeln gezielt aus den Salzlösungen zu extrahieren, und so den Chemikalienverbrauch zu senken, und den Verdunstungsprozess zu vermeiden. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht sind diese unökonomisch und werden daher industriell nicht eingesetzt. Der Abbau im offenen Tagebau aus erzhaltigem Gestein, wie er derzeit in Australien erfolgt, wird aus wirtschaftlicher Sicht immer weniger lohnend. Australien trägt derzeit zwar mit 42.000 Tonnen zu zirka einem Drittel der Weltjahresproduktion bei, die Förderzahlen dort sind jedoch rückläufig und die größten Lagerstätten liegen mit über 70 % in Südamerika in Ländern wie Argentinien, Chile und Bolivien. Der globale Lithiumhandel ist hinsichtlich der Rohstoffe, Grundchemikalien und Endprodukte unterschiedlich gelagert. Die Verarbeitung der Rohstoffe zu Ausgangschemikalien, wie bspw. Lithiumcarbonat, erfolgt in den Förderländern selbst. Diese exportieren anschließend Grundchemikalien in Industriestaaten wie China, Japan oder Südkorea, in denen die Weiterverwendung in der Batterie- und Keramikindustrie erfolgt.⁶⁵ Am Weltmarkt kann es dabei aufgrund der lokal konzentrierten Lagerstätten und großer Abhängigkeit von

⁶³ National Minerals Information Center (2017).

⁶⁴ JOGMEC (2010) und PureEnergy Materials (2017).

⁶⁵ Sun u. a. (2017).

einzelnen Absatzmärkten zu starken Preisfluktuationen kommen. Stand heute (Ende 2020) kostet eine Tonne Lithium ca. 40.000 USD. Expertenschätzungen gehen von einem zukünftig enormen Preisanstieg aufgrund steigender Nachfrage aus.⁶⁶

Grafit

Bei Grafit handelt es sich um eine Erscheinungsform des Kohlenstoffes in hexagonaler Kristallstruktur. Weitere Formen sind als Diamant oder Carbon-Nanotubes bekannt. Grafit eignet sich aufgrund seiner Struktur und seines niedrigen Potentials gegen Lithium hervorragend als anodenseitiges Interkallationsmaterial für Lithium-Ionen-Batterien. Die Gewinnung erfolgt industriell derzeit über zwei verschiedene Routen: zum einen über die Gewinnung aus natürlichen Lagerstätten und zum anderen über die Herstellung synthetischen Grafits. Beide Gewinnungsverfahren konkurrieren derzeit miteinander, wobei der Anteil synthetisch hergestellten Grafits ca. 60 % beträgt. In die Batterieproduktion fließen derzeit allerdings nur jeweils 10 % der Produktion. Der Großteil findet Verwendung in der Metallurgie als Elektrodenmaterial, der Gießereitechnik, dem Flammenschutz und als Entkohlungsmittel.⁶⁷ Der Bedarf an Grafit für Batterien wird sich schätzungsweise bis 2030 verzehnfachen. Allein dies würde zu einer Verdopplung des globalen Grafitbedarfs führen, wobei aufgrund der breiten Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe die Versorgung gewährleistet ist. Die Grafittierung als thermische Behandlung synthetischer oder natürlicher Ausgangsstoffe stellt dabei den Kernprozess für die Grafitherstellung dar. Unter Sauerstoffabschluss und bei Temperaturen von über 2400 °C erfolgt die Ausbildung einer geordneten Schichtstruktur, in die sich anschließend Lithium-Ionen sicher einlagern lassen.⁶⁸ Dieser Schritt ist nicht nur aus prozesstechnischer, sondern auch energetischer Sicht sehr aufwendig. Für Batterieanwendungen ist zudem eine sehr hohe Reinheit (> 99,9 %) erforderlich. Daher belaufen sich die Preise für eine Tonne Grafit in Battery Grade (bg) derzeit auf 10.000 bis 20.000 USD.

Kupfer

Kupfer als Halbbedelmetall aus der Gruppe der Münzmetalle wird anodenseitig als Stromsammelnerfolie mit Dicken von 8 bis 15 µm verwendet. Grund dafür ist die elektrochemische Stabilität in niedrigen Potentialbereichen und die Tatsache, dass es zu keiner Legierungsbildung mit Lithium kommt. Kupfer trägt dabei aufgrund seiner vergleichsweise hohen Dichte einen großen Teil zur inaktiven Masse in einer Lithium-Ionen-Zelle bei. Neben Vorkommen als gediegenes Metall in basaltischem Gestein existiert eine umfangreiche Anzahl sekundärer Kupfermineralien. Die Gewinnung erfolgt dabei in einer Kombination pyrometallurgischer Aufbereitung und elektrochemischer Gewinnungselektrolyse. Vor allem in der elektrochemischen Prozessführung ist der Elektrizitätsbedarf hoch. Kupfer wird hauptsächlich als elektronischer Leiter in der Elektroindustrie und als Legierungsbestandteil in der Metallurgie angewendet. Der Anteil für die Batterieproduktion ist verglichen an der Weltjahresproduktion verschwindend gering. Hauptförderländer sind derzeit Chile und Australien, die neben Peru auch die größten Lagerstätten besitzen. Mit derzeit rund 6000 USD pro Tonne ist Kupfer, gemessen am Preis für Kobalt oder Grafit, ein kostengünstiger Rohstoff.⁶⁹

Kobalt

Bei Kobalt handelt es sich um ein ferromagnetisches Halbmetall der 9. Nebengruppe. Kobalt ist an Luft bedingt stabil, da die Reaktion mit Luftsauerstoff zur Bildung einer passivierenden Oxidschicht führt. Als siderophiles Element tritt es zusammen mit Nickel, Kupfer oder Silber in Eisenverbindungen auf. Die Hauptvorkommen sind dabei Kobaltit (Kobaltglanz) oder Linneit (Kobaltnickelkies). Weltweit ist Kobalt sehr ungleichmäßig verteilt, denn über 70 % der weltgrößten Lagerstätten befinden sich im Kongo und in Sambia.

⁶⁶ Fastmarkets (04.12.2020) <https://www.fastmarkets.com>.

⁶⁷ Allied Market Research (04.12.2020) <https://www.alliedmarketresearch.com>.

⁶⁸ Marsh (1991).

⁶⁹ Nakajima u. a. (2018) und Mudd/Jowitt (2018).

Die Gewinnung erfolgt oft unter ökologisch und sozialökonomisch fragwürdigen Bedingungen. Die Bundesanstalt für Geowissenschaft und Rohstoffe schätzt, dass nur ca. 80 % des Kobalts im Kongo unter Einhaltung derzeit gültiger Standards industriell abgebaut wird. Der Rest entfällt auf den Kleinstbergbau oder illegales Schürfen. Die menschenunwürdigen Verhältnisse sowie die Umweltverschmutzung um die Abbaugebiete mit steigender Schwermetallbelastung in Boden und Grundwasser sind Gründe für die notwendige Einführung weiterer Standards und einer verbesserten Nachverfolgbarkeit der Rohstoffe.⁷⁰ Da derzeit über 60 % der Weltproduktion aus dem Kongo kommen, ist ein vollständiges Ausweichen auf andere Förderländer nicht möglich. Die Gewinnung kobalthaltiger Erze erfolgt oft parallel als Nebenprodukt des Nickel- und Kupferabbaus. Die Aufbereitung dieser Erze findet vorrangig in Industrie- oder Schwellenländern wie China, Japan oder den USA statt.⁷¹ Die Darstellung erfolgt größtenteils pyrometallurgisch oder mittels Schaumflotation und anschließendem hydrometallurgischem Aufschluss. Lithium-Kobalt(III)-oxid war 1980 das erste Material, dessen Eignung als kathodenseitiges Aktivmaterial für Lithium-Ionen-Batterien nachgewiesen wurde. Derzeit findet Kobalt vorrangig Verwendung in NCM- und NCA-basierten Interkallationsmaterialien. Aufgrund seiner positiven Auswirkungen auf die Kinetik der in einer Batterie ablaufenden Vorgänge, ist es auch zukünftig unverzichtbar für die Herstellung von Energiespeichern mit hoher Leistungs- und Energiedichte. Knapp 50 % des weltweiten Kobaltbedarfs entfielen 2019 auf Batteriechemikalien. Daneben findet es vor allem als Legierungsbestandteil, Katalysatormaterial und für Herstellung von Hartmetallen Verwendung. Obwohl der stoffmengenspezifische Kobaltgehalt in Lithium-Ionen-Batterien immer weiter absinkt, steigt die globale Nachfrage nach Kobalt weiter an.⁷² Für 2030 gehen Schätzungen von 80 % des gesamt geförderten Kobalts aus, welcher in die Batterieproduktion fließen wird. Vor dem Hintergrund der derzeitigen Versorgungslage ist es daher sehr wahrscheinlich, dass die Nachfrage kurz- bis mittelfristig das Fördervolumen übersteigt. Kobalt stellt daher von allen derzeitigen Batteriematerialien das Element mit dem größten Recyclingpotenzial dar.

Nickel

Nickel ist ein Übergangsmetall der 10. Nebengruppe und wird in der Batterieindustrie vorrangig für Hochenergiezellen mit Aktivmaterialien wie NCM und NCA verwendet. Der relative Anteil am weltweiten Nickelverbrauch für Batterieanwendungen lag 2015 allerdings nur bei knapp 3 %. Mit knapp 90 % wird der größte Teil in der Metallherstellung für die Erzeugung rostfreier Stähle (67 %), Legierungen, Beschichtungen oder Spezialstähle eingesetzt.⁷³ Aufgrund der steigenden Nachfrage in diesen Bereichen wächst der Nickelmarkt mit ca. 5 % pro Jahr weltweit. Größter Verbraucher mit über 50 % ist China. Genau wie bei Kobalt erfolgt dabei die Aufarbeitung der Erze in den Industriestaaten selbst, da dazu eine technologisch und energetisch hoch anspruchsvolle Prozessführung benötigt wird. Hauptförderland im Jahr 2020 ist Indonesien gefolgt von den Philippinen und Russland. Sowohl Indonesien als auch Australien besitzen weltweit die größten Reserven an nickelhaltigen Erzen.⁷⁴ Dabei handelt es sich zum einen um lateritische zum anderen um sulfidische Nickelerze. Erstere sind vor allem in tropischen Gebieten oberflächennah, durch langanhaltende Verwitterung und Erosion der zugrundeliegenden Gesteinsschichten, zu finden. Darin finden sich Limonit und Sapolit mit Nickelgehalten von 1,3 bzw. 1,8 %. Die traditionellen Gewinnungsprozesse wie Lichtbogenöfen oder Reduktionsprozesse werden aufgrund ihres hohen Energiebedarfs durch neue Gewinnungskonzepte verdrängt. Beispiele dafür sind Haufen- oder Aggitationslaugung, an deren Ende die Gewinnungselektrolyse steht. Sulfidische Erze vulkanischen Ursprungs werden über mehrstufige Röstprozesse aufgeschlossen. Durch die konstante Zufuhr von Sauerstoff werden Eisen und Nickel aus der sulfidischen

⁷⁰ Farjana u. a. (2019).

⁷¹ Olivetti u. a. (2017).

⁷² Alves Dias et al. (2018).

⁷³ NORILSK NICKEL (2015).

⁷⁴ BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (o.J.).

Form in ein Oxid überführt. Beinhalteter Schwefel wird als Schwefeldioxid abgeführt, weshalb der Rauchgasreinigung bei diesen Prozessen eine besondere Bedeutung zukommen muss. Auch deshalb ist die Gewinnung in aufstrebenden Industriestaaten ökologisch nur begrenzt nachhaltig. In Deutschland verarbeitetes Nickel wird vorrangig aus der Russischen Föderation importiert. Der derzeitige Weltmarktpreis beträgt rund 12.000 USD pro Tonne und unterliegt, verglichen mit Lithium oder Kobalt, deutlich geringeren Schwankungen. Aufgrund der breiten Verfügbarkeit und des nur geringen Anteils der Batterieproduktion am globalen Nickelverbrauch ist ein absehbarer Engpass in der Nickelversorgung trotz steigender Nachfrage sehr unwahrscheinlich.⁷⁵

Mangan

Dieses Element der 7. Nebengruppe ist nach Eisen und Titan das dritthäufigste Übergangsmetall in der Erdkruste. Es kommt überwiegend oxidisch als Braunstein, Manganit oder Hausmannit vor und wird industriell hauptsächlich als Legierungsbestandteil hochfester Stähle eingesetzt. Weit über 90 % fallen in den Bereich der Stahlindustrie und nur knapp 1 % wird für Batterien verwendet. Es handelt sich mit derzeit 3000 USD pro Tonne um einen eher preiswerten Rohstoff, der zudem eine hohe Verfügbarkeit besitzt.⁷⁶ Abbauwürdig sind aktuell Erze mit Mangangehalten von mehr als 35 %, für Batterieanwendungen wird allerdings auf Erze mit Mangangehalten von über 45 % und geringeren Verunreinigungen von Nickel, Kobalt und Kupfer zurückgegriffen. Südafrika, Australien und Gabun sind heutige Hauptproduzenten mit zusammen über 11 Mio. Tonnen im Jahr 2019.⁷⁷ Verglichen mit der gesamten Nickel- oder Kobaltförderung entspricht dies der ca. 10- bzw. 100-fachen Menge. Dementsprechend sind das Recyclingpotenzial und Anstrengungen, die für dieses Element unternommen werden, sehr gering. Der Schlackeabfall aus der Stahlindustrie besitzt bereits jetzt ein Volumen von über 500 Mio. Tonnen mit Mangangehalten von 2,6 %. Allerdings ist dessen Recycling unwirtschaftlich.⁷⁸

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Rohstoffpreise der Ausgangsmaterialien für die Fertigung von Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien die größten Preistreiber für Produkte in diesem Bereich darstellen. Dies liegt an aufwendigen Herstellungsprozessen, lokal konzentrierter Verfügbarkeit in politisch instabilen Regionen, knappen Ressourcen an sich oder einer Kombination der genannten Punkte. Vor allem Kobalt und Lithium zeigen am Markt die stärksten Preisschwankungen. Da die hauptsächliche Verwendung beider Rohstoffe im Bereich der Herstellung von Energiespeichern liegt, ist bei steigendem Bedarf sowohl mit einer Verknappung als auch einer Verteuerung zu rechnen. Eine Substitution dieser Materialien ist beim Festhalten an derzeitigen Batteriechemien nur sehr bedingt möglich. Ein Recycling dieser Stoffe wird daher auf lange Sicht sowohl ökologisch als auch ökonomisch absolut notwendig. Besonders Lithium-Ionen-Batterien der ersten Generation enthalten überwiegend LCO als Kathodenmaterial und damit besonders wertehaltige Elektroden, weshalb ein Recycling dieser Energiespeicher besonders sinnvoll erscheint.

4.2 Herstellungsprozess von Aktivmaterialien und Lithium-Ionen-Zellen

Neben den Materialkosten stellen die Fertigungskosten mit 19 % einen nennenswerten Kostenpunkt bei der Fertigung von Lithium-Ionen-Batterien dar. Am Beispiel von NCM wird der dreistufige Herstellungsprozess für Aktivmaterialien beschrieben. Ausgehend von einer Vorstufe, dem sogenannten Präkursor, erfolgt mittels basischer Zusätze eine stöchiometrische kontrollierte Fällungsreaktion. Der Feststoff dieser Copräzipitation wird filtriert, gewaschen und getrocknet. Nach dem Trocknen und Mischen mit Lithiumhydroxid

⁷⁵ Institut für Seltene Erden und strategische Metalle e.V. (04.12.2020) <https://institut-seltene-erden.de>.

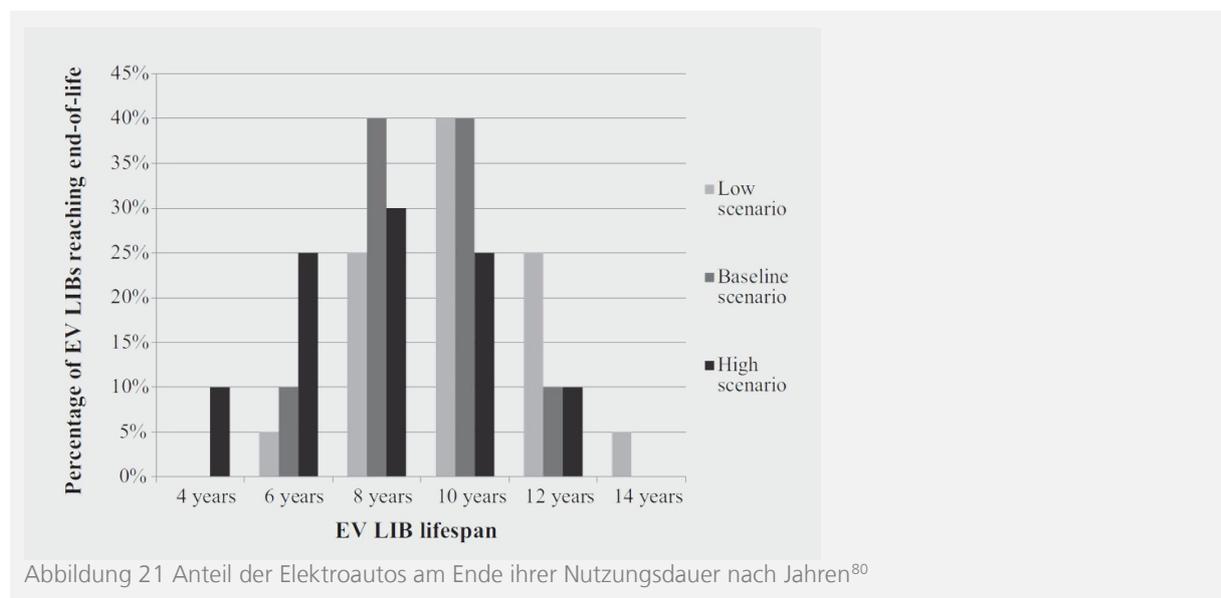
⁷⁶ Sun u. a. (2020).

⁷⁷ U.S. Geological Survey (04.12.2020) <https://www.usgs.gov>.

⁷⁸ Meyring (04.12.2020) <https://www.technik-einkauf.de>.

oder Lithiumcarbonat, bei dem eine große spezifische Oberfläche benötigt wird, erfolgt die Kalzinierung in zylindrischen Durchlauföfen im Gegenstromprinzip. Danach schließt sich eine Mahlung und Klassierung der Pulver an. Die Aktivmaterialien können durch Beschichtung oder Dotierung zur Verbesserung der Stabilität oder elektronischen Leitfähigkeit nachbehandelt werden. Anodenseitig eingesetztes Grafit entsteht durch Grafitierung von Koks oder Pech im Acheson-Ofen unter großer Hitze und ebenfalls nachgeschalteter Aufmahlungs- und Klassierprozessen. Neben den Aktivmaterialien werden gewalzte Stromsammelfolien aus Aluminium oder Kupfer, Leitadditive, Bindemittel, Elektrolyte und Separatormaterialien benötigt.

Die anschließende Herstellung einer Lithium-Ionen-Batteriezelle umfasst erneut drei Hauptprozessschritte: die Elektrodenfertigung, Zellassemblierung sowie Formierung (siehe auch Kap. 3.6). Während die Fertigung der Elektroden und die abschließende Formierung unabhängig vom Zelltyp durchgeführt werden, ist die Assemblierung ein zelltypspezifischer Schritt. Die Herstellung der Elektroden bedarf fast immer einer Slurry, für die Aktivmaterial, Binder und Leitruß unter Zugabe eines Lösemittels homogen vermischt werden. In einem Beschichtungsprozess erfolgt die gleichmäßige Auftragung dieses Gemisches auf eine Stromsammelfolie. Abschließend wird die Elektrodenfolie getrocknet und kalandriert, das heißt mit Hilfe von Walzen gezielt verdichtet und geglättet. Die Assemblierung wird technisch, abhängig vom Zelltyp, auf verschiedene Weisen realisiert. Besonders aufwändig und langwierig ist dabei das Befüllen der Zelle mit Elektrolytlösung. Während der Formierung erfolgen die ersten Lade- und Entladevorgänge zur Bildung eines stabilen chemischen Systems. Einzelne Zellen werden zu Modulen verschaltet und beispielsweise in Antriebsbatterien für Fahrzeuge integriert. Die Lebensdauer von Lithium-Ionen-Batterien ist dabei stark vom Einsatzbereich und dem Nutzungsverhalten des Anwenders abhängig. Ebenfalls hat die Zellchemie einen großen Einfluss auf die Lebensdauer einer Batterie. In mobilen Endgeräten ist die Nutzungsdauer durch häufige Lade-/Entladevorgänge mit typischerweise zwei bis fünf Jahren gering, während für Energiespeicher von BEV oder Heimspeichern von einer längeren Nutzungsdauer ausgegangen werden kann. Abhängig von den zugrundeliegenden Parametern wird beispielsweise für Antriebsbatterien eine Nutzungsdauer zwischen acht und zehn Jahren prognostiziert, bevor diese als defekt gelten (siehe Abbildung 21).⁷⁹ Von einer gealterten Zelle ist dann die Rede, wenn die noch nutzbare Kapazität unter 80 % der initialen Kapazität gefallen ist. An diesem Punkt besteht die Möglichkeit der Weiterverwendung in einem Second-Use- Szenario oder die Überführung in einen Recyclingkreislauf.

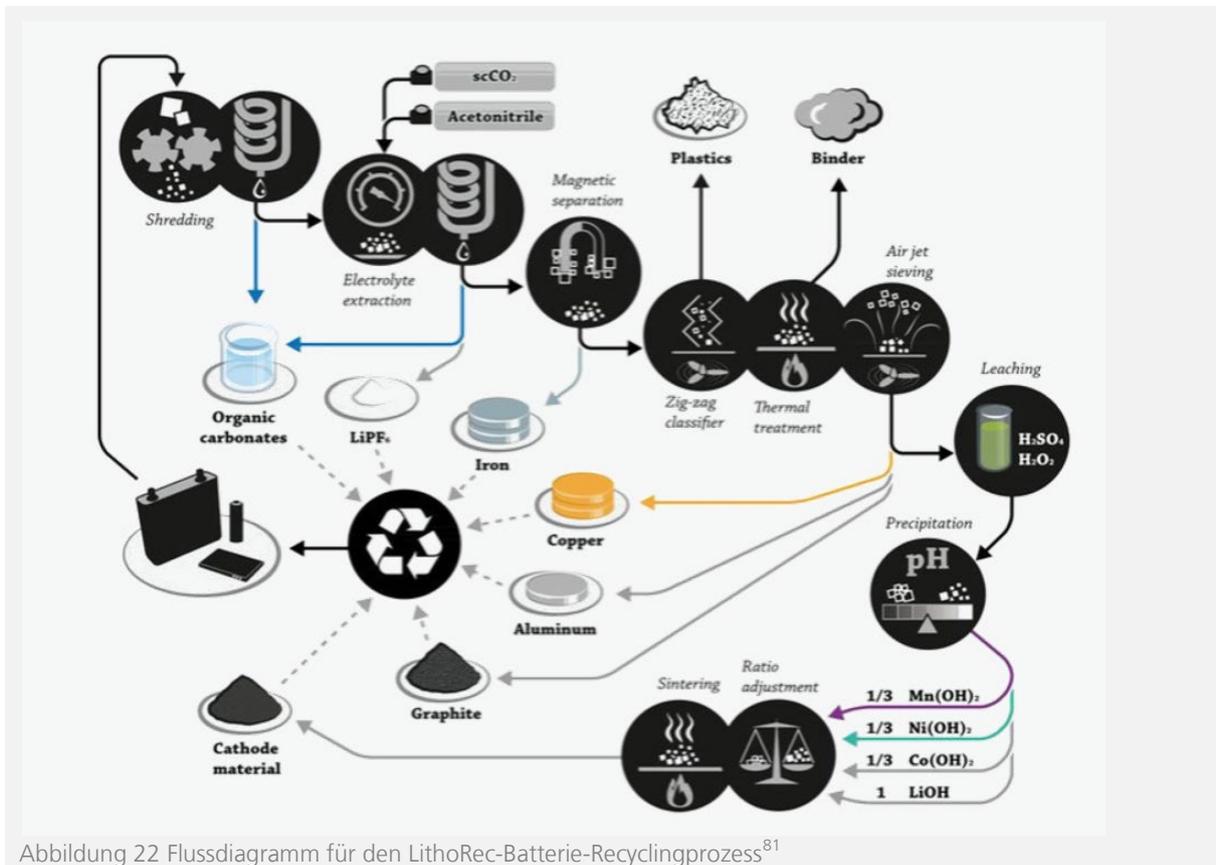


⁷⁹ Richa u. a. (2014).

⁸⁰ Richa u. a. (2014).

4.3 Recyclingverfahren und Szenarien der Rohstoffrückgewinnung

Für den Fall, dass eine Weiterverwendung im Second Use der Batterie nicht gewünscht oder wirtschaftlich ist, ermöglicht das Batterierecycling die Rückgewinnung der beinhalteten Rohstoffe. Das Recycling kann dabei sowohl pyrometallurgisch (durch thermische Zerlegung), hydrometallurgisch (in Lösung bringen) oder einer Kombination aus beidem erfolgen.



Vorausgehend erfolgt fast immer eine mechanische Vorbehandlung. Die Verfahren sind mannigfaltig und werden abhängig von der Prozessführung kombiniert. Es kann beispielsweise die aufwendige Trennung nach Zelltyp und/oder Aktivmaterial erfolgen, dies ist sowohl spektroskopisch (röntgenographisch) oder elektromagnetisch (induktiv) möglich. Das Ziel dabei besteht in der Schaffung sortenreiner Abfälle für ein effizientes und ökologisches Recycling. Eine Zerlegung auf Modulebene ist nur für große und standardisierte Batterien realistisch. Auch ist eine vorgeschaltete Tiefenentladung denkbar, um die Reaktivität und damit das Gefahrenpotenzial der Zellen zu minimieren. Eine Zerkleinerung der Zellen in großen Schreddern mit anschließender Separation einzelner Materialfraktionen durch Sichter, Zentrifuge oder Magnet erzeugt werthaltige Schwarzmasse, mit der weiter prozessiert werden kann. Beim pyrometallurgischen Recycling wird diese Masse bei hohen Temperaturen in Drehrohröfen stufenweise zerlegt. Organische Bestandteile, aber auch Grafit sowie Lithium gehen dabei im Abgasstrom oder der Schlacke verloren. Dieses Verfahren ist zwar sehr robust gegenüber verschiedenen Zellchemien und Verunreinigungen, jedoch werden hierbei fast ausschließlich werthaltige Metalle wie Kobalt, Nickel oder Kupfer zurückgewonnen. Potenziell höhere Ausbeuten sind durch hydrometallurgisches Recycling zu erzielen. Dabei erfolgt die Überführung der wertvollen Stoffe durch saure oder basische Laugung in gelöste Form. Verglichen mit dem pyrometallurgischen

⁸¹ Zeng et al. (2019), p. 8.

Recycling ist der technische Aufwand höher und bedarf eines großen Chemikalieneinsatzes. Auch die Empfindlichkeit gegenüber Fremdstoffen ist höher. Abhängig von der durchgeführten Nachbehandlung (Gewinnungselektrolyse oder Fällung) ist eine hohe Reinheit der Produkte möglich. Aufgrund der prozessspezifischen Vor- und Nachteile der jeweiligen Recyclingmethode ist eine Kombination beider Verfahren für eine nahezu vollständige Rückgewinnung aller Stoffe zielführend und auch wirtschaftlich sinnvoll.

Im Laufe der letzten Jahre sind eine ganze Reihe von Verfahrensvorschlägen und -entwicklungen für das Recycling von Li-Batterien bzw. Batterien erarbeitet worden (Tabelle 3):

Tabelle 3 Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien⁸²

Anwender	Land	Prozesscharakteristik	Rückgewinnung von
Accurec	Deutschland	Thermische Behandlung, Mechanische Aufbereitung zur weiteren hydrometallurgischen Verarbeitung	Al, Cu, Fe-Schrott, Ni/Co, ggf. Li ₂ CO ₃
AkkuSer	Finnland	Mechanische Vorbehandlung, Hydrometallurgie	Ni, Co, Mn, Cu, Al, Fe
Batrec	Schweiz	Pyrolyse, Pyrometallurgie	Ferromangan, Zn
Duesenfeld (LithoRec)	Deutschland	Umfangreiche mechanische Vorbehandlung, Hydrometallurgie, Pyrometallurgie	Kunststoffe, Ni, Co, Mn, Cu, Al, Fe, Li-Salze (Grafit)
Eurodieuze	Frankreich	Hydrometallurgie	Ni
INMETCO	USA	Pyrometallurgie	Ni, Co, Cu
Nippon Mining and Metals	Japan	Pyrometallurgie, Hydrometallurgie	Co, Ni, Cu
Pilagest	Spanien	Cryogene Zerlegung, mechanische Separation, Hydrometallurgie	Metalle, MnO ₂ , Grafit
Recupyl	Frankreich	Mechanische Aufbereitung und Hydrometallurgie	Al, Edelstahl, Co, Li-Salze
Retriev (Toxco)	USA	Cryogene Zerlegung, Laugung, Fällung	Kunststoffe, Al, Fe, Metallsalze, Li-Salze
SNAM	Frankreich	Pyrolyse, Destillation, Pyrometallurgie, Hydrometallurgie (geplant)	Ferronickel, Ferrokobalt
Sony-Sumitomo	Japan	Pyrometallurgie	Co, Ni, Cu
Umicore Valéas	Belgien	Pyrometallurgie, Hydrometallurgie	Co, Ni

⁸² JX Nippon Mining & Metals (27.11.2020) <https://www.nmm.jx-group.co.jp>, Sumitomo Metal Mining Co., Ltd (27.11.2020) <https://www.smm.co.jp> und Kushnir (Dezember 2015).

Im Folgenden werden einzelne Verfahren und deren technischer Ablauf erklärt:

Accurec

Das in Deutschland entwickelte Verfahren war ursprünglich für das Recycling von Nickel-Cadmium-Batterien gedacht. Batterieabfälle werden in einem Batch-Prozess mit einer Kapazität von jährlich 4000 Tonnen verarbeitet.⁸³ Durch die Kombination von mechanischen, pyrometallurgischen und hydrometallurgischen Verfahren wird Lithium als Präkursor für die Herstellung von Kathodenmaterialien sowie Kobalt-Nickel-Mangan-Legierungen zurückgewonnen.

Nach manueller Selektion und Demontage erfolgt eine thermische Behandlung unter Vakuum, um Elektrolyte, Lösemittel und flüchtige Kohlenwasserstoffe zu entfernen. Die Separierung findet mittels Rüttelsichter, Magnetschalter und Klassierer nach vorheriger Aufmahlung statt. Die einzelnen Fraktionen können in Aluminium, Kupfer und Eisen-Nickel angereicherte Fraktionen unterschieden werden. Die eisen- und nickelreiche Phase wird bei 800 °C thermisch behandelt und so vor allem Kobalt und Nickel zurückgewonnen. Lithium verbleibt hierbei in der Schlacke oder auftretendem Flugstaub. Durch die hohe Konzentration bietet sich eine weitere hydrometallurgische Aufarbeitung dieser Phasen an, um Lithiumcarbonat als Präkursor für die Kathodenherstellung zu gewinnen. Für Lithium wird dabei von Recyclingquoten zwischen 85 und 90 % berichtet. Diese Bilanzierungen beruhen jedoch auf von großtechnischen Prozessen losgelöste Einzelversuche im Pilotmaßstab.

AkkuSer

Bei diesem Verfahren handelt es sich im eigentlichen Sinne nur um eine rein mechanische Abfallvorbehandlung, da das Zielprodukt eine mit Wertmetall angereicherte Schwarzmasse für Folgerecyclingprozesse ist. Ausgegangen wird von einer Kapazität von 4000 Tonnen pro Jahr, die sich vorrangig auf Lithium-Ionen-Batterien fokussiert.⁸⁴ In einem zweistufigen Zerkleinerungsprozess erfolgt die Abtrennung leicht flüchtiger Stoffe und Plastikteilchen bei niedrigen Temperaturen. Das Eisen wird anschließend durch einen Magnetscheider abgetrennt. Durch den Partikelradius der ausgebrachten Schwarzmasse von weniger als drei Millimetern würde sich ein hydrometallurgischer Aufschluss anbieten.

Duesenfeld

Das deutsche Unternehmen Duesenfeld wendet das in den Projekten LithoRec I und II entwickelte, gleichnamige Verfahren an, welches speziell auf das Recycling von Antriebsbatterien abzielt (siehe Abbildung 22).⁸⁵ Im Fokus steht die Rückgewinnung reiner Kathodenmaterialien mit einer geschätzten Kapazität von 2000 t/a.⁸⁶ Da Antriebsbatterien aufgrund der schwingungsdämpfenden Eigenschaften von Kunststoffen einen hohen Anteil eben dieser aufweisen (bis zu 11 wt-%), ist das initiale Sortierverfahren besonders aufwendig. Der Prozess beinhaltet daher eine umfangreiche mechanische Aufbereitung kombiniert mit hydrometallurgischer Prozessführung.⁸⁷ In einem Shredder werden die Zellen der entladenen und zerlegten Module unter Schutzgasatmosphäre zerkleinert. Al, Fe, Cu und Kunststoffe werden im Rüttelsichter voneinander separiert. Die Fraktion <500 µm der Siebung, die hauptsächlich die Aktivmaterialien enthält, wird hydrometallurgisch aufbereitet und final Kathodenmaterial von Lithiumcarbonat und Grafit durch Kalzinierung getrennt.

⁸³ Accurec Recycling GmbH (04.12.2020) <https://accurec.de>.

⁸⁴ Wang u. a. (2014).

⁸⁵ Diekmann u. a. (2016).

⁸⁶ Lv u. a. (2018).

⁸⁷ Duesenfeld (2020) <https://www.duesenfeld.com>.

Recupyl

Explizit für das Niedertemperaturrecycling von Lithium-Ionen-Batterien wurde dieses Verfahren mit einer Kapazität von derzeit 110 Tonnen pro Jahr entwickelt.⁸⁸ Die mechanische Vorbehandlung erfolgt unter Schutzgasatmosphäre (Argon oder CO₂), damit eine sichere Zerkleinerung potenziell geladener Batteriezellen gewährleistet ist. Gleichzeitig passiviert CO₂ metallisches Lithium. Durch Dichteunterschiede kann in groben Partikelgrößenfraktionen Kupfer und Aluminium sowie Kunststoff separiert werden. Eine weitere Siebung von Partikeln kleiner 3 Millimeter entfernt Kupferbestandteile nahezu vollständig. Die aktivmaterialreiche Fraktion kleiner 500 Mikrometer wird zuerst in einer wässrigen Lösung bei basischem pH-Wert aufgeschlossen, um Lithium als Carbonat zu entfernen. Der Aufschluss der Metalloxide erfolgt anschließend in stark saurem Milieu bei mindestens 80 °C. Die Gewinnung der werthaltigen Metalle wie Nickel oder Kobalt wird mittels Gewinnungselektrolyse durchgeführt.

Retriev

Das ursprünglich für primäre, d. h. nicht wiederaufladbare, Lithium-Ionen-Batteriezellen entwickelte und auch als Toxco bekannte Verfahren besitzt eine Kapazität von 4500 Tonnen pro Jahr. Nach einer Tiefenentladung in verdünnter Salzlösung werden die Zellen mechanisch zerkleinert.⁸⁹ Abhängig vom Stoffeingangstrom werden verschiedene Atmosphären verwendet. Metallische Gehäuseteile können nach der Verarbeitung in der Hammermühle entfernt werden. Aus der kupfer- und kobaltreichen Masse werden durch einen Rüttelsichter Aluminium und Kunststoffpartikel entfernt. Aus der aktivmaterialreichen Phase wird anschließend Lithium ausgewaschen. Die Weiterverarbeitung des metalloxidreichen Filterkuchens erfolgt in der Metallindustrie als Legierungszusatz und ist damit als unvollständig anzusehen.

Umicore Valéas

Dieser Prozess fokussiert sich auf die Rückgewinnung von Kobalt und Nickel. Mit 7000 Tonnen pro Jahr stellt er den Prozess mit der größten Kapazität außerhalb Asiens dar.⁹⁰ Es handelt sich um eine Kombination aus pyro- und hydrometallurgischen Schritten. In einem Drehrohrofen werden zuerst Elektrolytbestandteile verdampft, anschließend Kunststoffbestandteile pyrolysiert und bei Temperaturen bis 1450 °C Metallverbindungen aufgeschmolzen und reduziert. Typischerweise ist dabei die Zugabe von Natrium, Kalzium oder Zinkoxid notwendig, um Halogene und leicht flüchtige Bestandteile zu binden. Die gewonnene Legierung enthält Kupfer, Kobalt, Nickel und geringe Mengen Lithium während Aluminium, Eisen, Mangan und ein Großteil des Lithiums in der Schlacke verbleiben. Die metallische Legierung wird anschließend hydrometallurgisch aufgeschlossen. Besonderes Augenmerk legt dieser Prozess auf die energetisch effiziente Prozessführung der Abgase und die Vermeidung von giftigen Gasen (Dioxine).

COOL-Prozess

Gegenstand aktueller Forschung an der TUBAF und dem Fraunhofer IKTS ist die frühzeitige Entfernung allen Lithiums mit Hilfe von überkritischem CO₂. Lithium wird als Carbonat und damit als Ausgangsstoff für folgende Aktivmaterialsynthesen gewonnen. Dieses als COOL-Prozess bezeichnete Verfahren ermöglicht Lithium-Recyclingquoten von über 95 % und erleichtert die anschließende Kombination aus hydro- und pyrometallurgischem Verfahren. Gleichzeitig muss die Aufbereitung der lithiumarmen Schwarzmaße nicht aufwendig unter Schutzgasatmosphäre erfolgen.⁹¹

⁸⁸ Velázquez-Martínez u. a. (2019).

⁸⁹ Fraser (2015).

⁹⁰ Lv u. a. (2018).

⁹¹ Bertau/Martin (2019).

Mit einer Kombination aus mechanischen, pyrometallurgischen und hydrometallurgischen Verfahren können derzeit alle werthaltigen Metalle zu über 99 % zurückgewonnen werden.⁹² Während durch rein pyro- oder hydrometallurgische Verfahren Lithium nicht beziehungsweise nur in geringem Umfang recycelt werden kann, sind durch eine Kombination beider Verfahren auch für dieses Element Ausbeuten von über 90 % möglich, dies allerdings ausschließlich bei Prozessen im Technikums- oder Pilotmaßstab.⁹³ Ein großtechnisches Verfahren mit o.g. Rückgewinnungsquoten hat sich derzeit am Markt noch nicht etabliert. Auch stellt die Rückgewinnung von Elektrolytbestandteilen und Grafit derzeit noch eine große Herausforderung dar. Letzteres wird trotz hoher Rohstoffkosten von keinem derzeit industriell betriebenen Verfahren adressiert. Insgesamt müssten die Recyclingverfahren effizienter gestaltet werden, damit sich Batterierecycling wirtschaftlich lohnt.

4.4 Potenzielle Recyclingvolumina und Batterie-Rücknahmequoten

Im Jahr 2019 erfüllte Deutschland erstmals die EU-Vorgabe von 2016 mit einer Batterie-Rücknahmequote von über 50 % für alle Gerätebatterien (siehe Abbildung 23). Die Rücknahmequote von Lithium-Ionen-Batterien in europäischen Ländern lag zwischen 2 und 11 %.⁹⁴ Die Gründe dafür sind beispielsweise in der häufigen Entsorgung entsprechenden Abfalls über den Hausmüll, dem „hoarding“, das heißt privates Sammeln, ohne weiter genutzt zu werden oder über den Export von Elektroschrott aus der EU, zu suchen. Besonders die Energiespeicher in Kleingeräten, wie Smartphones, Tablets oder Notebooks, können vom Endkunden oft nicht vom Gerät separiert und fachgerecht entsorgt werden.

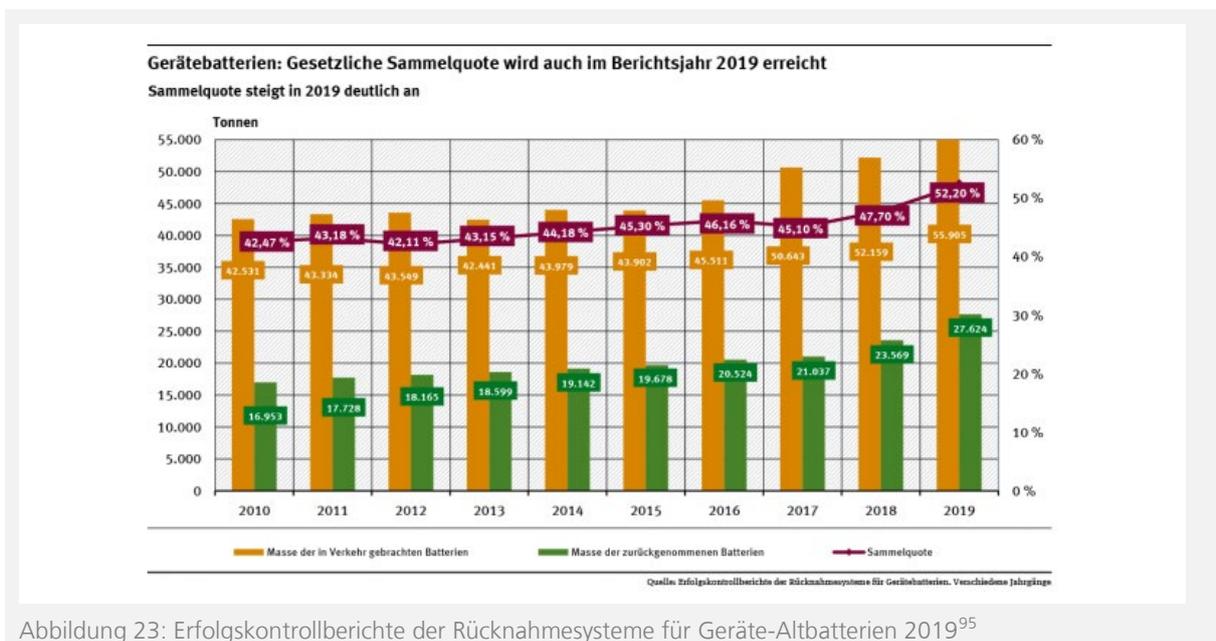


Abbildung 23: Erfolgskontrollberichte der Rücknahmesysteme für Geräte-Altzellen 2019⁹⁵

⁹² Larouche et al. (2020).

⁹³ Velázquez-Martínez u. a. (2019).

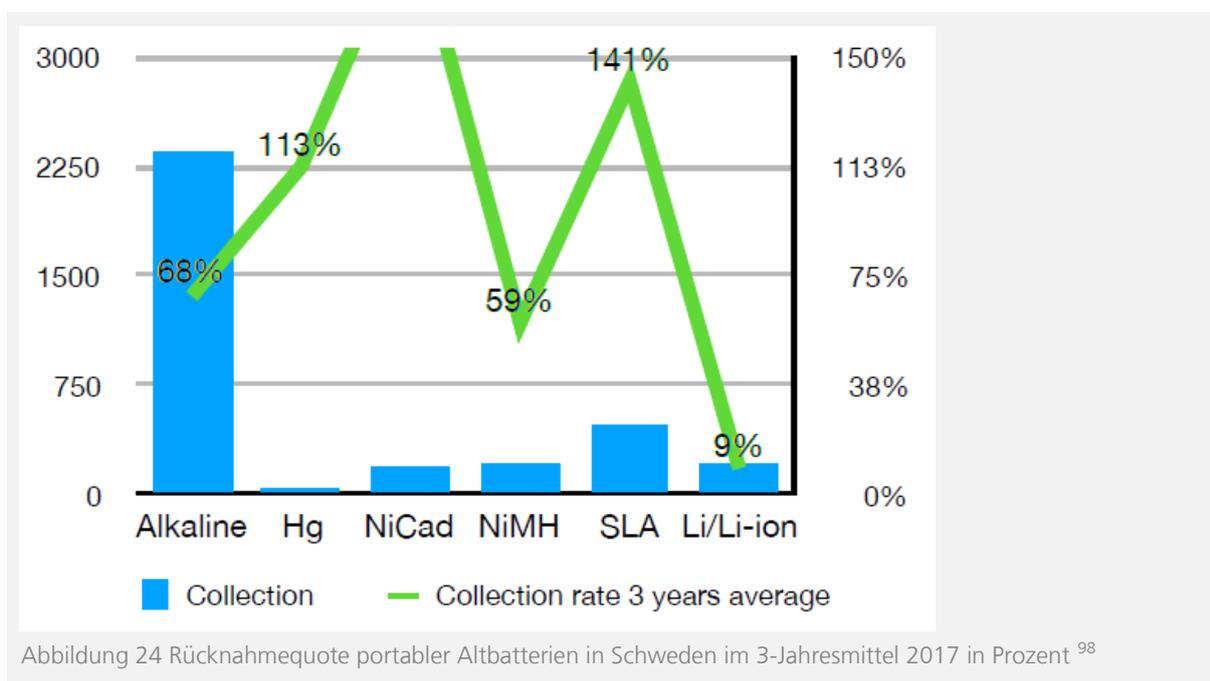
⁹⁴ Melin (2019), S. 12.

⁹⁵ Umweltbundesamt (27.10.2020) <https://www.umweltbundesamt.de#geratebatteriemarkt-masse-der-lithium-sekundar-batterien-stieg-wie-im-jahr-zuvor-starker-als-jedes-andere-batteriesystem-an>.

Die Batterierücknahmequote der einzelnen Batterietypen in Deutschland ist vergleichbar mit der in Schweden. In Schweden liegt der Anteil zurückgenommener Alkaline-, Blei-Säure- oder Nickel-Cadmium-Batterien im 3-Jahresdurchschnitt mit 59 % bis 141 % viel höher als der von Lithium-Ionen-Batterien mit neun Prozent (siehe Abbildung 24). Insbesondere bei Nickel-Cadmium-Batterien übersteigt die Sammlung 100 %, weil diese kaum mehr in Verkehr gebracht, zeitgleich aber vermehrt zurückgegeben werden. Der geringe Anteil zurückgenommener Lithium-Ionen-Batterien wird durch die höheren Rücknahmequoten anderer Batterietypen ausgeglichen.⁹⁶ Es wird erwartet, dass die Rücknahmequote für Antriebsbatterien aufgrund anderer Sammelmechanismen zukünftig deutlich höher liegen werden. Der Anteil der Gerätebatterien wie in Abbildung 23 dargestellt, wird sich im Zuge steigender Verbreitung von Antriebsbatterien verringern.

Schätzungen gehen davon aus, dass im Jahr 2030 die Nachfrage nach Energiespeichern die von 2020 um das Acht- bis Zehnfache übersteigt. Bei gleichbleibender Entwicklung entfallen 2030 über 85 % aller Batterien in diesen Bereich. Der mit Abstand größte Zuwachs fällt auf die Elektromobilität zurück. Basierend auf der Lebensdaueranalyse für Energiespeicher aus BEV läuft die Menge anfallender Altbatterien den Produktionszahlen ca. acht bis zehn Jahre hinterher. Die erwartete Menge anfallender Altbatterien ist somit bei bekannten Verkaufszahlen der Vorjahre sehr genau bestimmbar.

Weltweit sind im Jahr 2017 ca. 100.000 Tonnen Lithium-Ionen-Batterien recycelt worden. Mit ca. 90 % findet dabei der Großteil des Recyclings in China oder Südkorea statt, 2025 werden es schätzungsweise noch 80 bis 85 % sein.⁹⁷ Es ist also davon auszugehen, dass insbesondere der europäische und nordamerikanische Markt ein größeres Wachstumspotenzial aufzeigen wird. Die aktuelle Recycling-Kapazität der beiden Märkte ist mit rund 30.000 Tonnen pro Jahr noch größer als die tatsächlich gesammelte und recycelte Menge an Altbatterien. Für das Recycling der tatsächlich hergestellten Batteriemenge, muss festgestellt werden, dass für eine zukünftig angestrebte vollständige Verwertung von Altbatterien sowohl in Nordamerika als auch in Europa ein deutlicher Zubau an Recyclingkapazitäten erforderlich sein wird.

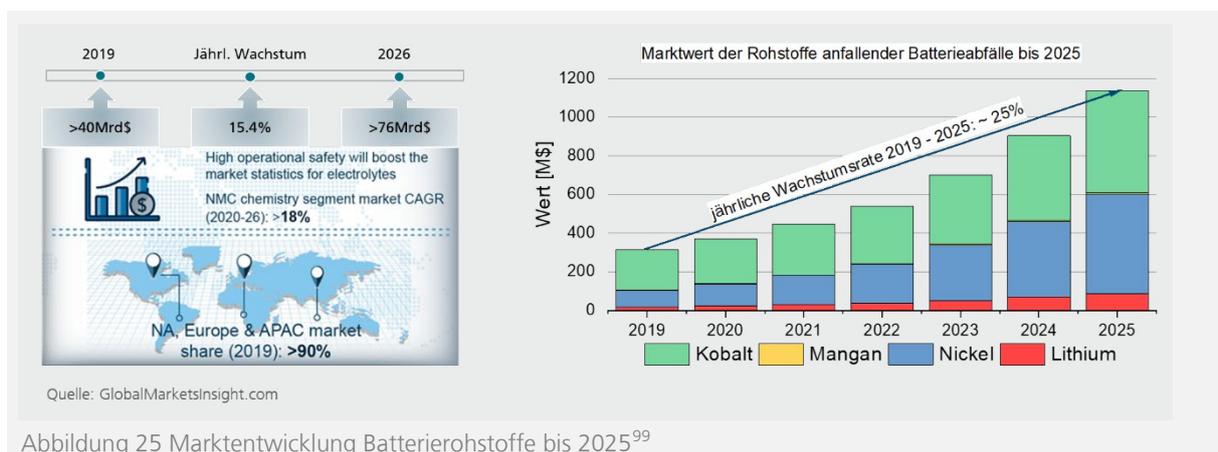


⁹⁶ Melin (2019), S. 12.

⁹⁷ Melin (2019), S. 13.

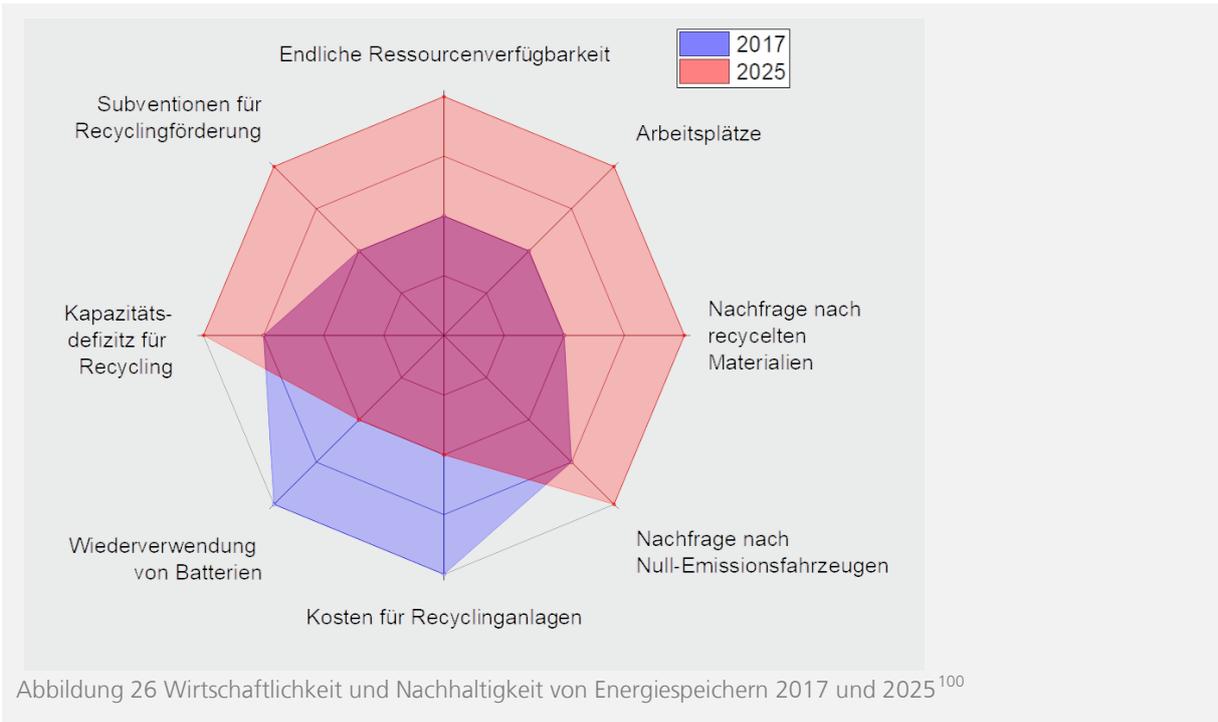
⁹⁸ Melin (2019).

Diese Tatsache spiegelt sich auch in der wissenschaftlichen Situation wider. Während in Europa und den USA der Forschungsschwerpunkt auf Second-Life-Verwendungsmöglichkeiten liegt, kommen fast drei Viertel der wissenschaftlichen Studien zum stofflichen Recycling aus dem asiatischen Raum. Zudem werden Studien, die Weiterverwendung von Altbatterien betreffend, hauptsächlich aus akademischem Interesse durchgeführt, während Publikationen zu Recyclingprozessen eher eine wirtschaftliche Orientierung besitzen. Dabei besitzt gerade der Markt für Batterierecycling aus wirtschaftlicher Sicht für Deutschland und Europa ein aussichtsreiches Wachstumspotenzial, da die anfallenden Mengen an recyclingfähigen Batterien hier besonders groß sein werden (siehe Abbildung 25). Wie angesprochen läuft der Recyclingmarkt der Produktion zwar um Jahre hinterher, wird aber aufgrund von verschärften rechtlichen Vorschriften in den nächsten Jahren schnell wachsen. Der Marktwert der Rohstoffe aus anfallenden Batterieabfällen verzeichnet jährliche Zuwachsraten von rund 25 %, entspricht in Prognosen für das Jahr 2025 mit 1 Milliarde USD allerdings nur einem Bruchteil des Batteriemarktes (2025 über 76 Milliarden USD). In Bezug auf die Rohstoffkosten sind Kobalt, aufgrund geringer Verfügbarkeit und hoher Rohstoffpreise, sowie Nickel, aufgrund des hohen massenspezifischen Anteils, für die Batterieherstellung am bedeutendsten. Wegen der sich verschiebenden Anteile von Kobalt und Nickel wird der Anteil von Kobalt in Antriebsbatterien stetig abnehmen und schätzungsweise 2025 dem Anteil von Nickel entsprechen. Da durch die steigende Produktion von Energiespeichern jedoch der absolute Bedarf an Kobalt ansteigt, muss Kobalt zukünftig auch weiterhin die höchste Kritikalität zugeordnet werden.



Vergleicht man den Markt für Energiespeicher von heute mit zukünftigen Potentialen, ist die steigende Nachfrage nach recycelten Materialien abzusehen (Abbildung 25 und 26). Aufgrund der zunehmenden Produktionszahlen wird die Endlichkeit der Ressourcenverfügbarkeit und ein wachsender Bedarf dringend benötigter Recyclingkapazität deutlich werden. Allerdings mangelt es derzeit noch an Technologien, um Altbatterien effizient zu recyceln, weshalb eine Intensivierung der Forschungsarbeit auf diesem Bereich essenziell ist. Ein vollständiges Recycling ist die Grundvoraussetzung für das Schließen von Stoffkreisläufen beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien und damit von immer größerer werdender Bedeutung für Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit dieser Energiespeicher. Verstärkend kommt hinzu, dass die initiale Gewinnung einzelner, zur Herstellung benötigter, primärer Rohstoffe mit erheblichen Umwelt- und sozialökonomischen Problemen in den Förderländern verbunden ist, was dem Nachhaltigkeitsaspekt diametral entgegensteht.

⁹⁹ Global Market Insights, Inc. (Mai 2020) <https://www.gminsights.com>.



¹⁰⁰ Fraunhofer IKTS, Daten aus: Premium Market Insights (März 2019).

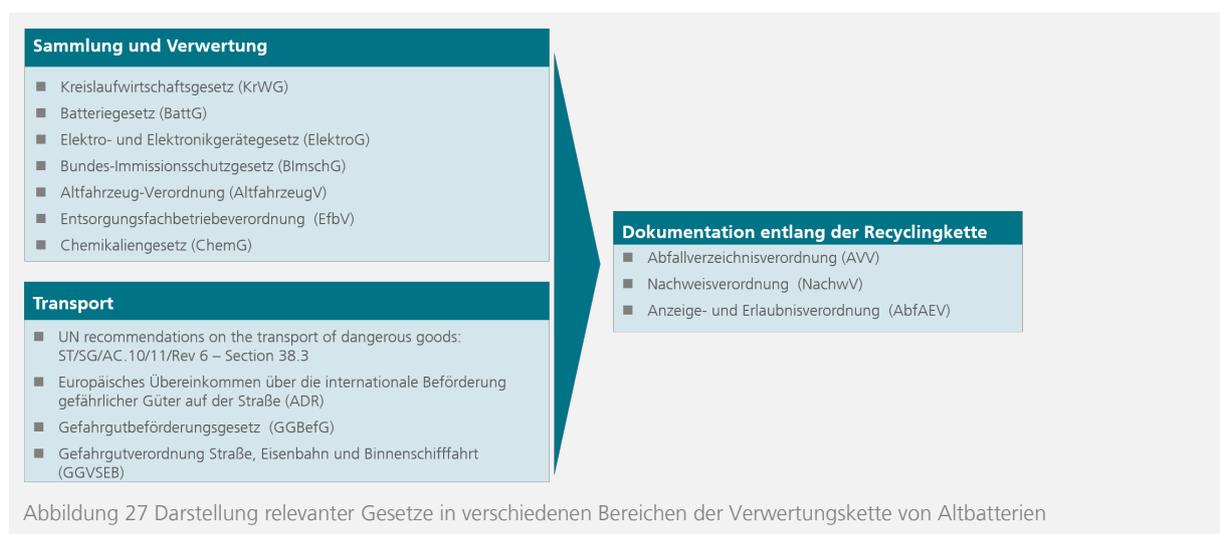
5 Industrielle und rechtliche Strukturen im Batterierecycling

5.1 Akteure im Recyclingprozess

Zu verwertende Antriebsbatterien und deren Bestandteile (in Form von Altbatterien oder Produktionsabfällen) fallen bei verschiedenen Akteuren und in unterschiedlichen Zuständen an: bei Endverbrauchern, OEMs wie Automobilherstellern und deren Händlern oder bei Zellherstellern. Diese werden im Recyclingprozess von Antriebsbatterien wiederum von Akteuren weiterverarbeitet, die sich in vier Kategorien einordnen lassen: Die erste Kategorie bilden die **Sammler**. Zu ihnen zählen die Händler und Vertrieber von Batterien aber auch weitere Annahmestellen wie regionale Wertstoffhöfe. Sie stellen Rückgabemöglichkeiten für die (End-)Kunden zur Verfügung und veranlassen die Abholung der gesammelten Altbatterien. Die zweite Kategorie bilden die **Beförderer**. Bei ihnen handelt es sich um selbstständige Spediteure und Logistiker oder solchen die zu Verwertungsbetrieben oder Rücknahmesystemen gehören und die rechtskonforme und sichere Verbringung von Altbatterien erfüllen. Die **Rücknahmesysteme** bilden die dritte Kategorie. Es handelt sich um Dienstleister, die im Auftrag der Hersteller und Inverkehrbringer von Batterien deren Rücknahme- und Verwertungspflichten aus dem deutschen Batteriegesetz (BattG) umsetzen, das heißt alle Prozessschritte von der Sammlung bis zum Recycling im Auftrag der Automobilhersteller organisieren. Die letzte Kategorie bilden die **Verwerter**. Sie verantworten die sichere und umweltgerechte Rückgewinnung von Rohstoffen aus Altbatterien sowie die Deponierung von nicht verwertbaren Reststoffen.

5.2 Rechtlicher Rahmen

Im Folgenden wird ein Einblick in die Gesetze, Verordnungen und Richtlinien gegeben, welche die Rahmenbedingungen und die organisatorische Struktur für die Verwertung von Altbatterien in Deutschland vorgeben. Es wird nicht im Detail auf den Inhalt jedes Gesetzes eingegangen, sondern die jeweiligen Rechtsvorschriften werden ihren entsprechenden Anwendungsbereichen innerhalb der Altbatterieverwertung zugeordnet.



Das Kreislaufwirtschaftsgesetz bildet den Kern der gesetzlichen Regelungen in der Verwertung von Abfällen. Es gibt eine Abfallverwertungshierarchie vor. Diese besagt im Grundsatz, dass Wiederverwertung und Recycling einer Entsorgung vorzuziehen sind, solange diese technisch möglich und ökonomisch zumutbar sind. An erster Stelle steht die Vermeidung von Abfällen z. B. durch Reparaturen. Wenn Abfälle nicht vermieden werden können, müssen alternative Verwendungsmöglichkeiten geprüft werden. Erst wenn keine Wieder-

verwertung praktikabel ist, soll recycelt werden. Dafür sollen die umwelttechnisch nachhaltigsten und wirtschaftlich tragbaren Prozesse umgesetzt werden. Für die Reststoffe sind anschließend sonstige Verwertungen zu prüfen, bevor sie deponiert werden dürfen.

Während das Kreislaufwirtschaftsgesetz Regelungen für Abfälle aller Art betrifft, beschreibt das Batteriegesetz, als Umsetzung der EU-Richtlinie 2006/66/EG, die Verantwortungen in der Entsorgung von Altbatterien. Im derzeit gültigen Gesetz wird nicht explizit auf lithiumhaltige Batterien eingegangen. Diese werden in der aktuellen Vorlage zur Novellierung des BattG berücksichtigt. Sollten Batterien in Elektrogeräten oder Fahrzeugen verbaut sein, so sind neben dem BattG das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) sowie die Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV) zu berücksichtigen.

Das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) und das Chemikaliengesetz (ChemG) stellen den gesetzlichen Rahmen für Lagerung und Verwertungseinrichtungen, während die Entsorgungsfachbetriebeverordnung (EfbV) Richtlinien zur Beurteilung von Unternehmen vorgibt, die einzelne Abfallsorten nachweislich nach den festgelegten Standards behandeln bzw. verwerten. Der Transport von Altbatterien und deren Bestandteilen wird von der Art des Transportgutes bestimmt. Die Klassifizierung in der Abfallverzeichnisverordnung basiert auf den Vorgaben des Europäischen Übereinkommens über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) und diese wiederum auf den UN-Empfehlungen zum Transport gefährlicher Güter, dem Gefahrgutbeförderungsgesetz und der Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB). Die Dokumentationsverpflichtungen entlang der gesamten Verwertungs- und Transportkette sind durch die Nachweisverordnung (NachweisV) sowie die Anzeige und Erlaubnisverordnung (AbfAEV) geregelt.

5.3 Rollenverteilung und rechtliche Pflichten von Akteuren

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Akteure der Verwertungskette mit ihren jeweiligen Rechten und Pflichten, dem Status quo und den bevorstehenden Herausforderungen im Rahmen des Ausbaus der Elektromobilität behandelt.

Hersteller

§2 Abs. 15 BattG definiert Hersteller als „jeder, der, unabhängig von der Vertriebsmethode, gewerblich Batterien im Geltungsbereich dieses Gesetzes erstmals in den Verkehr bringt.“ Auch Vertrieber und Zwischenhändler von Batterien werden als Hersteller gesehen. Im Sinne des Gesetzes sind Hersteller von Antriebsbatterien die Automobilhersteller, die an Endverbraucher Elektroautos verkaufen oder Batteriesystemhersteller, die zum Beispiel Ersatzakkus an Endnutzer vertreiben. Zellhersteller, wären demnach nur dann Hersteller nach BattG, wenn sie Batteriezellen direkt an Endnutzer vertreiben. Jeder Hersteller hat nach §5 BattG die Pflicht Altbatterien unentgeltlich von den Vertriebern zurückzunehmen.

Endverbraucher

Endverbraucher können sämtliche im Haushalt anfallenden Batterien kostenlos bei Händlern oder öffentlichen Rücknahmestellen entsorgen. Hierzu zählen neben Primärbatterien auch Lithium-Ionen-Batterien. Das Gewicht der einzelnen Batterie ist entscheidend dafür, ob sie im Batteriegemisch oder separat gesammelt werden müssen.

Laut §11 BattG ist der Endnutzer verpflichtet, Altbatterien einer vom Siedlungsabfall getrennten Erfassung zuzuführen. Im Fall von Antriebsbatterien können Endverbraucher diese bei Händlern bzw. Inverkehrbringern dieser Batterien ebenfalls kostenlos abgeben. Die Rücknahme der Batterien selbst muss kostenlos möglich sein, die dabei anfallenden Arbeiten müssen nicht kostenlos angeboten werden.

Händler/Werkstätten

Neben dem bestehenden Rücknahme- und Pfandsystem für Fahrzeugbatterien („Starterbatterien“) müssen Händler und Werkstätten auch Antriebsbatterien zurücknehmen. Händler gelten im Sinne des BattG §8, ergänzt durch §9 Abs.1, als Vertreiber von Antriebsbatterien und müssen diese stellvertretend für die Hersteller zurücknehmen. Die Annahme und Rücknahme von Altbatterien erfolgen nicht direkt durch den Hersteller.

Die Regelungen der Altfahrzeugverordnung (AltfahrzeugV) versichern dem Letztutzer sein Fahrzeug beim Hersteller bzw. an anerkannten Rücknahmestellen und Demontagebetrieben zurückgeben zu können. Eine flächendeckende Rückgabemöglichkeit wird als gewährleistet betrachtet, wenn im Umkreis von 50 km des Letzthalters eine Rückgabemöglichkeit angeboten wird. Diese Regelungen gelten sowohl für Kfz als auch für Pedelecs und ähnliche batteriebetriebene Fahrzeuge. Zukünftig ist mit einem signifikanten Anstieg des Aufkommens an Elektrofahrzeugen zu rechnen.

Für Händler ergeben sich durch Vertrieb, Wartung und neue Werkstattleistungen neue Ertragsmöglichkeiten aus dem Anstieg von Elektrofahrzeugen. Um diese Ertragspotenziale zu heben, sind Investitionen in neue Gerätschaften sowie Mitarbeiterqualifikation, z. B. für Arbeiten an Hochvoltssystemen von Elektrofahrzeugen, notwendig.¹⁰¹

Reine Werkstätten stehen zukünftig vor besonderen Herausforderungen. Die Rücknahme von Batterien ist für sie nur verpflichtend, wenn sie diese auch vertreiben, z. B. durch den Einbau als Ersatzbatterie. Um in einem Umfeld mit steigendem Anteil an Elektrofahrzeugen längerfristig bestehen zu können, müssen auch sie in neue Geräte und in die Mitarbeiterqualifikation investieren.

Rücknahmesysteme

Die Rücknahmesysteme sind Unternehmen, deren Tätigkeitsfeld vom BattG §6 und §7 geregelt wird. Sie erfüllen als Dienstleister für Batteriehersteller und Inverkehrbringer die im BattG §5 festgelegten Pflichten. Sie organisieren und verantworten stellvertretend die Koordination von Sammlung, den ADR-konformen Transport und die rechtskonforme Verwertung, die Gewährleistung von Rücknahme- und Verwertungsquoten sowie die Dokumentation dieser Prozesse gegenüber den zuständigen Behörden. Hierzu zählen auch die jährlichen Meldungen an die zuständigen Behörden mit den Zahlen der real verwerteten Batterien, deren Art und der jeweils angewandten Verwertungsmethode. Die Vergütung der Rücknahmesysteme erfolgt über eine Aufwandspauschale auf Grundlage der in Verkehr gebrachten Batterien. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass Verwertungsbetriebe für die gelieferten Altbatterien Zahlungen an Rücknahmesysteme leisten. Die Rücknahmesysteme können sowohl eigene als auch externe, eigenständige Logistikunternehmen mit dem Transport der Altbatterien beauftragen. Einzelne Rücknahmesysteme können sich auf spezielle Batterietypen spezialisieren. Die ECOBAT Logistics GmbH sammelt und verwertet beispielsweise ausschließlich Bleiakkumulatoren.

Beförderer

Aufgrund der potenziellen Gefahren, die von Lithium-Ionen-Batterien ausgehen können, unterliegen ihr Transport und ihre Lagerung einer Reihe von Regelungen entsprechend der jeweiligen Eigenschaften der Altbatterien. Unabhängig davon, ob es sich um selbstständige Logistiker oder um Dienstleister innerhalb eines Rücknahmesystems handelt, unterliegen die Unternehmen der Dokumentationspflicht gemäß der Nachweisverordnung. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass der Transport gemäß den Regelungen der

¹⁰¹ TÜV SÜD Akademie (19.11.2020) <https://www.tuvsud.com>.

ADR erfolgt. Die ADR regelt nicht nur den gesetzeskonformen Transport auf öffentlichen Straßen innerhalb der Europäischen Union, sondern gibt auch konkrete Handlungsanweisungen für die sichere Verpackung und den Transport gefährlicher Güter. Darüber hinaus wird ebenfalls die Kennzeichnungs- und Dokumentationspflicht festgelegt. Die Mitarbeiter müssen ihren Aufgaben und dem Transportgut entsprechend geschult sein, mit allen notwendigen Sicherheitsausrüstungen ausgestattet werden und diese auch verwenden. Ferner sind die jeweiligen Kennzeichnungen am Transportgut selbst und an den Fahrzeugen anzubringen. Vom ökonomischen Standpunkt aus betrachtet stehen den Kosten für das Personal, die Betriebskosten, Investitionen in die Fahrzeugflotte, Lager und die Sicherheitsvorkehrungen sowie deren Finanzierung Einnahmen aus den Zahlungen der Rücknahmesysteme gegenüber.

Prinzipiell darf jede Person Gefahrgüter transportieren, sofern die Regeln der ADR eingehalten werden. Die Haftungsrisiken beim Transport von Altbatterien liegen aber bis zu deren Verwertung beim Hersteller. Deshalb sollten Unternehmen bevorzugt werden, die als Entsorgungsfachbetriebe zertifiziert sind und ADR-konform transportieren. Die Zertifizierung als Entsorgungsfachbetrieb erhalten Unternehmen, die gewährleisten und nachweisen können, dass sämtliche gesetzlichen Vorgaben und Umweltstandards im Betrieb eingehalten werden. Die Zertifizierung wird für max. 18 Monate durch eine technische Überwachungseinrichtung wie den TÜV ausgestellt. Die Verfahren müssen stets dem neuesten Stand der Technik entsprechen, sofern dies wirtschaftlich zumutbar ist. Die entsprechenden Regelungen finden sich in der Entsorgungsfachbetriebeverordnung (EfbV).¹⁰²

Verwertungsbetriebe

Das Tätigkeitsfeld der Verwertungsbetriebe besteht in der umweltgerechten, wirtschaftlichen und möglichst ressourcenschonenden Rohstoffrückgewinnung sowie der Entsorgung nicht wiederverwertbarer Bestandteile. Die damit verbundenen Prozesse werden im Abschnitt 4 erläutert. Die zurückgewonnenen Zwischenprodukte und Rohstoffe können veräußert werden.

Zukünftig sind die Verwerter einem größeren Aufkommen an Altbatterien aus Elektrofahrzeugen ausgesetzt. Zudem werden sich die stofflichen Zusammensetzungen der Altbatterien sowohl zwischen verschiedenen Batterieherstellern, Batterietypen sowie Batterien verschiedener Produktgenerationen stark unterscheiden. Der Gehalt an hochpreisigem Kobalt wird voraussichtlich sinken. Derartige Veränderungen im Eingangsstrom müssen sowohl auf der Ebene der Prozessierung als auch in ihren wirtschaftlichen Auswirkungen berücksichtigt werden. Zusätzliche Ertragschancen liegen in der Rückgewinnung von Grafit und Lithium, wobei hierzu bislang kein wirtschaftlich konkurrenzfähiges Verfahren im industriellen Maßstab umgesetzt wurde. Des Weiteren ist bislang unklar, ob der Ankaufpreis für die Altbatterien positiv oder negativ sein wird. Die Ertragspotenziale der Verwerter sind stark an den Kobaltgehalt der Altbatterien sowie dessen Weltmarktpreis gekoppelt. Hervorzuheben ist, dass dem System lediglich durch den Endverbraucher Kapital hinzugefügt wird. Zusätzlich werden Erträge durch den Verkauf und somit den Entzug von Rohstoffen aus dem Kreislauf generiert.

5.4 Transportsicherheit bei Antriebsbatterien

Bei der Sammlung und dem Transport von Altbatterien, insbesondere von Lithium-Ionen-Batterien, können bei Beschädigung, ätzende und giftige Substanzen austreten und/oder es kann zu Bränden kommen. Insbesondere bei großen Batterien wie Antriebsbatterien ist die Herstellung eines sicheren Zustands notwendig, z.B. durch Tiefentladung und das Abkleben der Pole. Altbatterien werden üblicherweise nicht an der

¹⁰² TÜV-Süd (Hrsg.) (25.11.2020) <https://www.tuvsud.com>.

Annahmestelle demontiert. Denn für die Demontage bedarf es einer kleindimensionierten bzw. mobilen Verwertungsanlage sowie entsprechend qualifizierten Personals. Ferner ist die Notwendigkeit einer Betriebsgenehmigung zu prüfen. Die weitere Behandlung der getrennten Stoffe sowie deren Transport müssen ebenfalls von dem Betreiber der Anlage übernommen werden. Für jede einzelne Fraktion müssen die Regelungen gemäß ChemG, REACH, BImSchG und ADR berücksichtigt werden. Mit der Ausnahme von Duesenfeld, ist eine technisch umsetzbare und ökonomisch tragfähige Umsetzung der dezentralen Zerlegung derzeit nicht bekannt.

5.5 Zweitnutzung

In der Zweitnutzung werden gebrauchte Fahrzeugbatterien einer anderen Nutzung zugeführt als jener zu der sie ursprünglich entwickelt und hergestellt wurden. Ziel einer Zweitnutzung von Batterien ist die Nutzungsdauer der Batterie zu verlängern, wodurch die negativen Umweltauswirkungen gemessen an der Gesamtlebensdauer sinken. Bei günstigen Rahmenbedingungen kann auch der ökonomische Nutzen der Batterie erhöht werden. Derzeit werden Batterien in ihrer Zweitnutzung häufig als Zwischenspeicher für elektrische Energie aus erneuerbaren Energien verwendet. Hierbei können sie die intermittierende Einspeisung aus Solar- und Windkraft ausgleichen und zur Netzfrequenzstabilität beitragen.¹⁰³ Darüber hinaus werden sie in Schnellladesäulen und als Backup für die unterbrechungsfreie Stromversorgung nichtkritischer Infrastruktur verwendet.¹⁰⁴ Derzeit befinden sich Zweitnutzungsmodelle noch in der Pilotphase. Eine systematische Testung aller Rückläufer aus der Batterieerstanwendung zur Zweitnutzung findet nicht statt. Da sowohl die Preisentwicklung für neue Batterien und die Kosten für die Anschaffung von Altbatterien, deren Testung und eventuelle De- und Reassemblierung nicht eindeutig vorherzusehen sind, besteht schon aus technischen Gründen eine hohe wirtschaftliche Unsicherheit. Aktuell ist der Zustand einer gebrauchten Batterie ohne detaillierte Informationen zur Erstnutzung nur schwer bis gar nicht festzustellen. Aus regulatorischer Sicht bestehen weitere Hindernisse. Bei Einspeisung von elektrischer Energie in einen Zwischenspeicher wird die EEG-Umlage fällig. Sollte diese zu einem späteren Zeitpunkt zu einem anderen Zweck als der Einspeisung in das Stromnetz verwendet werden, dann wird die EEG-Umlage ein zweites Mal fällig.¹⁰⁵ Die Regelungen zur Produkthaftung von Hersteller und Zweitnutzer im Schadensfall sind derzeit ebenfalls unklar. Die Hersteller lehnen Gewährleistungen für eine andere als die von ihnen angedachte Nutzung ab, während die Zweitnutzer wegen des unklaren Zustands der Batterien keine Haftungsrisiken eingehen möchten. Es werden klare gesetzliche Regelungen notwendig sein, um dieses Hindernis zu beseitigen. Diese unsicheren Geschäftsbedingungen können die Finanzierung von Zweitnutzungsprojekten erschweren.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der rechtliche Rahmen für das stoffliche Recycling von Altbatterien gegeben ist, in Details noch unklar bleibt. Es bleibt abzuwarten, ob und wie bisherige Unklarheiten, wie die Pflichtverteilung zwischen Zellherstellern und den Inverkehrbringern von Batteriesystemen sowie die besondere Rolle von lithiumhaltigen Batterien in künftigen Novellierungen adressiert werden. Die notwendige Infrastruktur für die Sammlung und den Transport sind vorhanden, deren Kapazitäten werden aufgrund der zu erwartenden Mengen an Altbatterien allerdings deutlich ausgebaut werden müssen. Entlang der gesamten Verwertungskette können die Akteure von diesem Wachstum profitieren, sofern sie befähigt sind oder die notwendigen Anfangsinvestitionen in Gerätschaften, Fahrzeuge, Mitarbeiterqualifikation oder Prozessentwicklung aufbringen können. Die Zweitnutzung gebrauchter Batterien ist ein potenziell großer Markt, der bislang neben technischen Hürden an ungünstigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sowie unklaren Haftungsregeln leidet.

¹⁰³ Sonnen GmbH (31.08.2017 - 15:49) <https://sonnen.de> und Hunstadt (09.2019) <https://future.hamburg>.

¹⁰⁴ Jiao (2018) <https://www.idtechex.com> und Pagliaro/Meneguzzo (2019).

¹⁰⁵ FeBler (2017) <https://blogs.pwc.de>.

6 Marktentstehung und Recyclingstrategien international

Die Entwicklung des Batterierecyclings wird durch eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren bestimmt. Die Anzahl von benutzten Lithium-Ionen-Batterien in Produkten bestimmt nach einer Nutzungszeit von durchschnittlich acht bis zehn Jahren die zu recycelnden Batterievolumina. Außerdem stehen Lithium-Ionen-Batterien für das Recycling stark verzögert bereit, weil zum Beispiel Mobiltelefone auch nach beendeter Nutzung länger gelagert werden, über den normalen Müll entsorgt oder aber einer Zweitnutzung zugeführt werden.¹⁰⁶ Ein weiterer Faktor ist die vorhandene Recyclingkapazität der errichteten Anlagen. Drittens ist die Nachfrage nach Batterierohstoffen und Bestandteilen für die Zellproduktion ausschlaggebend: je mehr Zellfertigungskapazität in Europa verankert ist und ggf. eine Rohstoffverknappung einsetzt, desto mehr steigt voraussichtlich die Nachfrage nach ökologisch und sozialverträglich hergestellten Batterierecyclingprodukten.

Recyclingvolumen und Recyclingkapazitäten international

Global betrachtet spielt Europa im Recycling von Lithium-Ionen-Batterien bis dato eine geringe Rolle. Nach Schätzungen von Melin wurden 2018 ca. 90 % des Batterievolumens im asiatischen Markt recycelt. Davon fallen 70 % auf China, 20 % auf Südkorea und ca. 5 % auf Europa (siehe Abbildung 28).¹⁰⁷ Den technologischen Pionieren im Batterierecycling, Japan und Kanada/USA, stehen nur sehr geringe Recyclingvolumen zur Verfügung, weil der größte Teil der End-of-Life-Batterien aktuell nach China und Südkorea exportiert wird. Die Verteilung des Recyclingvolumens spiegelt sich auch in der Recyclingwirtschaft wider.

Von den über 50 Batterierecyclingunternehmen weltweit, sitzen 30 Unternehmen in China und ca. 10 Recyclingunternehmen in Europa. In den europäischen Ländern und Nordamerika variiert die Größe der Recyclingunternehmen stark. Neben vielen kleinen Pilotanlagen und gibt es auch einige große Recyclinganlagen. Auf allen Märkten ist die Recyclingpotenzial der Anlagen größer als das angebotene Recyclingvolumen. Insbesondere in Europa ist das Batterierecycling aktuell noch nicht sehr effizient, weil durch das geringe Batterievolumen Recycling nicht profitabel umgesetzt werden kann.¹⁰⁸ Im Projekt EcoBatRec wird für 2020 ein Recyclingpotenzial von 8000 Tonnen erwartet.¹⁰⁹

»Auf allen Märkten ist das Recyclingpotenzial der Anlagen aktuell größer als das angebotene Recyclingvolumen.«

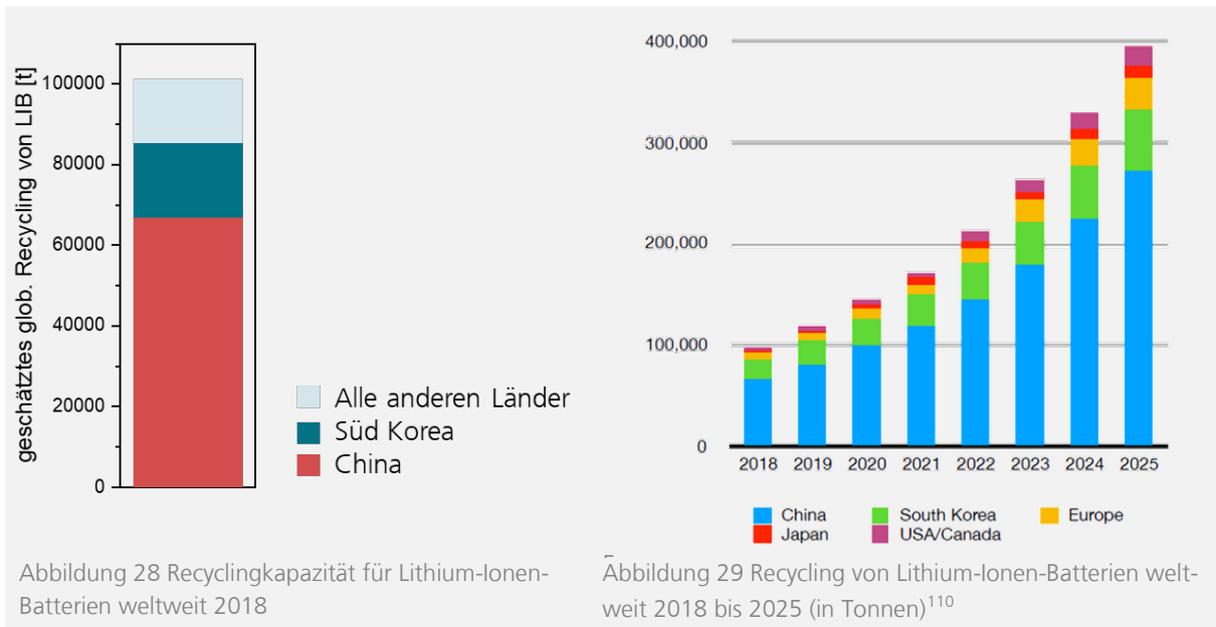
Hans Eric Melin, 2019

¹⁰⁶ Melin (2019).

¹⁰⁷ Melin (2019), S. 19.

¹⁰⁸ Melin (2019), S. 14.

¹⁰⁹ Weyhe/Friedrich (März 2016).



Aktuell entstehen laut Melin Recyclingvolumina in Europa vor allem durch portable Batterien und einige industrielle Batterien, weniger durch Antriebsbatterien. Weltweit werden 2024 ca. 700.000 Lithium-Ionen-Batterien, darunter Batterien aus portabler Elektronik, Werkzeugen und leichten Elektrofahrzeugen, ihr Lebensende erreichen. Im Jahr 2025 stehen davon durch Verzögerungseffekte wie Nutzungsdauer, Lagerung und Zweitnutzung 400.000 Tonnen fürs Recycling bereit. Die Menge an zu recycelnden Batterien vervierfacht sich damit im Vergleich zu 2020 (siehe Abbildung 29). Melin prognostiziert, dass der chinesische Anteil am Recyclingvolumen bis 2025 um 5 % sinkt. Damit erhöht sich der relative Anteil Europas am Batterierecycling, aber das Recyclingvolumen Europas bleibt mit ca. 30.000 Tonnen dennoch weit hinter China mit 270.000 Tonnen zurück.¹¹¹

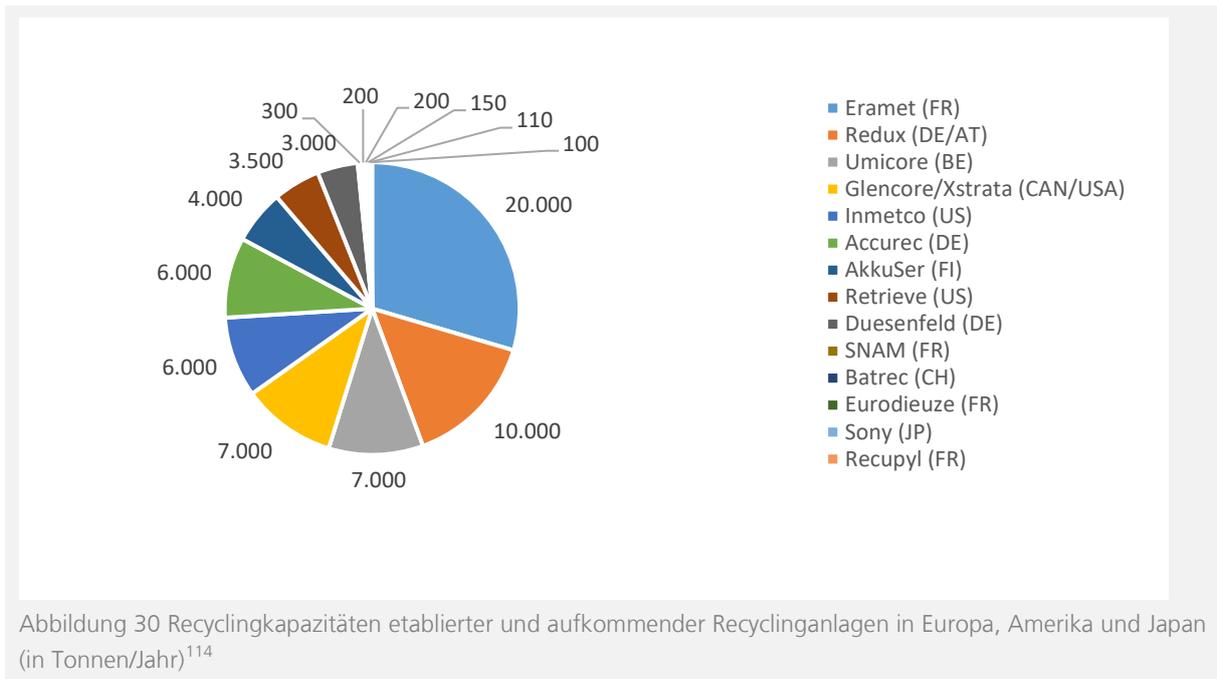
Abbildung 30 zeigt beispielhaft einige Recyclingkapazitäten von Batterierecyclinganlagen außerhalb Chinas. Ältere Marktakteure mit Anlagen in den USA, Kanada und Europa, zum Beispiel Inmetco (US) und Umicore (BE), bieten Recyclingkapazitäten von 6000 bis 7000 Tonnen. Eramet und Redux können mit einer Kapazität von 10.000 bis 20.000 Tonnen fast mit den chinesischen Anlagen mithalten. Diese haben eine Kapazität von 20.000 (GEM) bis 60.000 Tonnen (Quzhou Huayou Cobalt New Material). Recyclingkapazitäten von unter 1000 Tonnen zum Beispiel bei Sony in Japan und Recupyl in Frankreich deuten eher auf einen pilothaften Charakter der Anlage hin. Bei einigen Anlagen wie Recupyl bleibt auch unklar, ob sie weiterhin Lithium-Ionen-Batterien recyceln. Generell haben die europäischen Anlagen eher einen Pilotcharakter. Außerdem können aufgrund fehlender Batterievolumina viele Recyclinganlagen ihre Kapazitäten aktuell nicht ausschöpfen und auch nur begrenzt wirtschaftlich erweitern. Trotzdem sind zusätzlich zu den beschriebenen Kapazitäten in Europa weitere Batterierecyclinganlagen in Planung.¹¹² Northvolt in Schweden plant für 2020 eine Pilotanlage mit 100 Tonnen Kapazität, die innerhalb von zwei Jahren auf 25.000 Tonnen gesteigert werden soll.¹¹³

¹¹⁰ Melin (2019).

¹¹¹ Melin (2019).

¹¹² Melin (2019).

¹¹³ Northvolt (Hrsg.) (13.12.2019).



(Recycling)strategien der Zellhersteller in China

Der Batteriezellenmarkt wird dominiert von asiatischen Unternehmen, allen voran Zellherstellern in China. Mit Subventionen und Anreizen fördert China Elektro- und Plug-in-Hybridfahrzeuge mit dem Ziel, dass 2025 „New Energy Vehicles“ (NEV) 20 % der verkauften Autos ausmachen. Die führende Rolle in der Elektromobilität ist unter anderem so attraktiv, weil China unabhängiger von Ölimporten wird und das Luftverschmutzungsproblem in Städten verringert werden kann. Bereits jetzt ist China der wichtigste Markt für NEVs – 50 % aller elektrischen Pkws werden in China verkauft. In China produzierte NEVs werden gezielt subventioniert, wobei diese Subventionen auf einem Katalog genehmigter Fahrzeuge basieren. Die Aufnahmeanforderungen werden stetig angepasst an, zum Beispiel müssen Battery Electric Vehicles (BEV) seit Februar 2018 eine Reichweite von 150 km erzielen und die spezifische Energiedichte muss 105 Wh/kg erreichen.¹¹⁵

Für Zellhersteller schreiben zentrale Regeln eine Produktionsmindestkapazität von 8 GWh/Jahr für einen Markteintritt vor. Eine gezielte Subvention des Binnenmarktes und Positivlisten mit lokal hergestellter Batteriezellen schützt den chinesischen Markt seit 2018 vor den bis dahin führenden Zellproduzenten in Japan und Südkorea. Auch ein zentral festgelegtes Branchenziel für die Energiedichte, Kosten und Lade-/ Entladeraten trägt dazu bei, dass nur konkurrenzfähige Zellhersteller den Binnenmarkt bedienen. Besonders CATL hat von diesen Regeln profitiert.¹¹⁶

Dadurch wird ebenfalls die Umsetzung einer nationalen Recyclingstrategie und eine relevante Größe des Binnenmarktes und der Recyclingvolumina möglich. Neben der Regulierung des Recyclings kontrolliert die chinesische Chemieindustrie zu 50 % die Rohstoffproduktion der Batterien.¹¹⁷ Chinesische Unternehmen haben eigene Abbau- und Raffinationsprojekte. Sie besitzen zum Beispiel einen großen Teil der Kobalt- und

¹¹⁴ Darstellung IKTS, Datenquelle: Velázquez-Martínez u. a. (2019); Friedrich u. a. (29.11.2012); Deign (11.09.2019); GEM (19.11.2020) <http://en.gem.com.cn> und Danino-Perraud (März 2020).

¹¹⁵ Retzer u. a. (30.07.2018).

¹¹⁶ Busse (28.05.2020).

¹¹⁷ Nicke u. a. (November 2019), S. 73.

Lithium-Minen und sichern sich so die Rohstoffe für ihre Lithium-Ionen-Batterie-Produktion.¹¹⁸ Neben dieser Vorwärtsintegration in die Wertschöpfungskette haben chinesische Zellhersteller wie CATL Kooperationsverträge mit allen europäischen OEMs, um den Absatz ihrer Batteriezellen sicherzustellen.

In Deutschland und Europa besaßen Zellherstellung und Elektromobilität lange Zeit keine hohe Priorität. Seitdem 2017 die „European Battery Alliance“ von Vize-Präsident Maroš Šefčovic ins Leben gerufen wurde, zielt auch die deutsche Politik darauf ab, diesen wesentlichen Bestandteil von batterieelektrischen Fahrzeugen in Deutschland herzustellen. Tatsächlich ist die Produktion von hoch spezialisierten Batteriezellen in Kleinserien und für Sonderanwendungen in Deutschland schon etabliert, wie die Beispiele EAS Batteries, AKASOL, CUSTOMCELLS, BMZ und VARTA zeigen. In den Jahren 2021 und 2022 ist ein Produktionsstart von acht weiteren Zellherstellern in Deutschland geplant, darunter northvolt (mit VW), Tesla, CATL, PSA und microvast.¹¹⁹

Exkurs: Batterierecycling China

Mit ca. 2,5 Mio. BEVs stellt China die Hälfte des weltweiten Marktes dar. Bereits seit 2018 liegt die Recyclingverantwortung für Antriebsbatterien bei den Fahrzeugherstellern. Aktuell wird von Fahrzeug- und Batterieherstellern sowie Abfallhändlern im Rahmen eines Pilotprogramms in 17 Städten das Recycling von Antriebsbatterien erprobt. Die Batterien werden bis zu einer Menge von fünf Tonnen gesammelt und in zentralen Lagern mit einer Kapazität von 30 Tonnen bis zum Recycling gelagert. Das Programm setzt auf Steueranreize und Investitionszuschüsse. Durch die gleichzeitige Einrichtung einer Rückverfolgungsplattform im August 2018 müssen alle Batterien mittels Codes registriert werden, sodass der Lebenszyklus jeder Batterie überwacht werden kann.¹²⁰

In Zukunft werden Elektrofahrzeughersteller einen hohen Druck auf ihre Gewinnmargen spüren, da sie die Zusatzkosten für das Batterierecycling tragen und ab 2025 mit einem Wegfall der Subventionen rechnen müssen.

Exkurs: Batterierecycling Japan

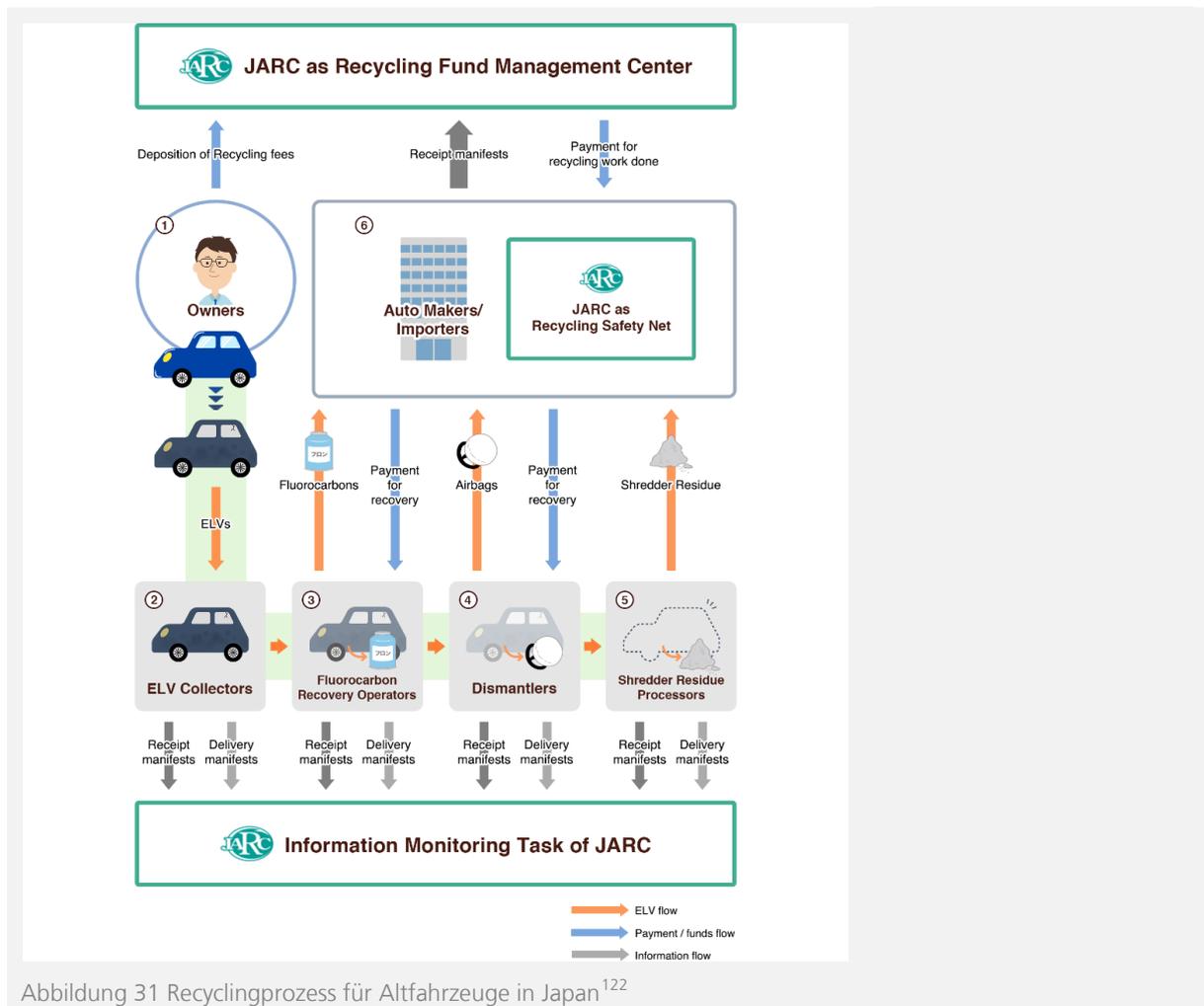
Die gemeinschaftliche Recyclingagentur Japan Automotive Recycling Promotion Center (JARC) wurde bereits 2000 von Fahrzeugherstellern und Organisationen der Automobilindustrie gegründet. Fahrzeugrecycling wird über Abgaben der Fahrzeughersteller und eine Umlage der Gebühren auf die Endnutzer beim Fahrzeugverkauf finanziert. Dieses geschlossene System aus Akteuren wurde 2018 auf Elektrofahrzeuge erweitert. Aus den Gebühren sollen zunächst Recyclinganlagen in sieben Präfekturen errichtet werden.¹²¹ Dabei wird die Erfahrung im Altfahrzeug-Recycling auf das Lithium-Ionen-Batterierecycling transferiert.

¹¹⁸ Miningscout (2018) <https://www.miningscout.de> und Chazan (23.02.2019).

¹¹⁹ Geilen (28.08.2020).

¹²⁰ Nicke u. a. (November 2019).

¹²¹ Elektroauto-News.net (07.09.2018).



Exkurs: Batterierecycling Skandinavien

In Skandinavien gibt es zwei beachtenswerte Batterierecyclingprojekte. In Finnland zielt die Kooperation von Fortum, BASF und Nornickel darauf ab, geschlossene Kreisläufe zu schaffen. Die Rückgewinnung von Wertstoffen aus Lithium-Ionen-Batterien soll von 50 auf 80 % gesteigert werden. Die Steigerung beruht auf dem Wissen, dass der bereits früher übernommene Hydrometallurgie-Spezialist Crisolteq beisteuert. Das Recyclingverfahren bildet die Grundlage für ein zukünftiges Batterierecycling in Finnland.

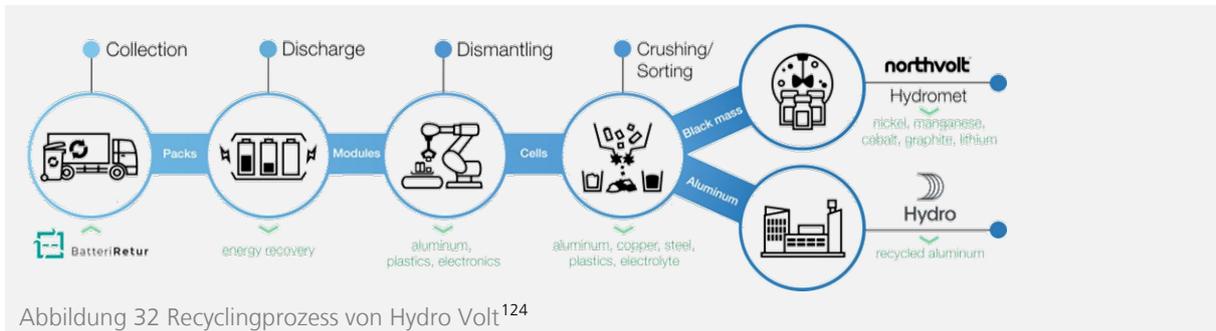
Darüber hinaus haben der schwedische Batteriehersteller northvolt und der norwegische Aluminium-Produzent Norsk Hydro Anfang 2020 das Joint Venture Hydro Volt gegründet. Ab 2021 soll die gemeinsame Recyclinganlage mit einer Kapazität von zunächst 8000 Tonnen Schwarzsasse produzieren, die von northvolt weiterverarbeitet wird. Versorgt und betrieben wird die Recyclinganlage vom norwe-

»The partnership with Hydro is an important piece of the puzzle to secure an external feed of material before our own batteries begin returning back to us [...]«

northvolt Pressemitteilung, 01.06.2020

¹²² Japan Automotive Recycling Promotion Center (19.11.2020) <https://www.jarc.or.jp>.

gischen Batterierecyclingunternehmen Batteriretur. Der treibende Faktor für das Batterierecycling ist in Norwegen damit ein Batteriehersteller und Rohstoffproduzent. Insgesamt ist die Recyclinginfrastruktur ähnlich wie in Deutschland, aber noch im Aufbau.¹²³



Zusammenfassend sind die treibenden Akteure von Batterierecyclingstrukturen international entweder der Staat wie in China, Autohersteller wie in Japan oder Hersteller von Batterien oder Batteriekomponenten wie in Skandinavien. In Deutschland und Europa sind staatliche und gesetzliche Vorgaben für das Recycling von Antriebsbatterien noch in der Revision, sodass die Verantwortung der Autohersteller als Inverkehrbringer noch definiert werden muss. Auch die Ansiedlung von Zellherstellern steht erst am Beginn (siehe Abbildung in Kapitel 7.3). Nach Festlegung der gesetzlichen Regelungen und mit dem Aufkommen höherer Recyclingvolumen wird sich auch in Deutschland und Europa eine Recyclingstruktur bilden müssen.

¹²³ Vgl. Northvolt (15.11.2020) <https://northvolt.com>; Miandi Group (19.11.2020) <https://www.aviationaluminum.com>.

¹²⁴ Moore (2020) <https://www.circularonline.co.uk>.

7 Akteursstudie

7.1 Aufbau und Methodik

Im Rahmen der Potenzialstudie wurde neben einer Betrachtung der technischen, rechtlichen und ökonomischen Voraussetzungen auch eine tiefere Analyse der Thüringer Unternehmenslandschaft vorgenommen. Aufgrund der sich dynamisch entwickelnden Strukturen im Speichersegment sowie der darauf aufbauenden Recyclingprozesse sind fest institutionalisierte Branchenstrukturen, Netzwerke und Akteursketten noch nicht etabliert. Für die Erstellung der vorliegenden Akteurs- und Potenzialstudie wurde daher bewusst ein exploratives Vorgehen gewählt. Durch eine Kombination von quantitativer und qualitativer Befragung wurden Einschätzungen von Unternehmern sowie Experten aus Forschung und Politik eingeholt.

Somit ergibt sich ein erstes realistisches Bild, das den unternehmerischen Kompetenzen, welche für den nachhaltigen Aufbau von industriellen Strukturen entscheidend sind, gerecht wird.

Zunächst wurden aus frei verfügbaren Quellen (Thüringer Landesamt für Statistik, Fachbetriebsregister, Firmendatenbanken Hoppenstedt/Creditreform, IHK ecoFinder etc.) sowie verfügbaren Studien (Forschungsatlas Thüringen, Umwelttechnik Thüringen, CIO, RIS3-Strategie etc.) mögliche Akteure recherchiert.

Die daraus entstandene Longlist von Unternehmen wurde sukzessive fokussiert. Die final ausgewählten Unternehmen wurden in Einzelrecherchen der verfügbaren Unternehmensinformationen (Jahresberichte, Investor Relations, Unternehmenswebsite) auf ca. 200 Unternehmen konzentriert, welche dann durch individuelle Gespräche mit lokalen Experten auf 255 finale Unternehmen ergänzt wurden. Diese dienen als Grundlage für eine quantitative Unternehmensbefragung mittels eines erstellten Online-Fragebogens sowie eine gesonderte telefonische Ansprache von 40 Akteuren, mit denen schlussendlich 15 Experteninterviews geführt wurden. Eine Übersicht der Expertengespräche findet sich im Anhang. Da die Unternehmensinformationen stets unter der Vorgabe der Vertraulichkeit erhoben wurden, fließen die Aussagen der Experten anonymisiert in die weiteren Studienergebnisse ein. Ausgewählte Akteure wurden zu einem Fokus-Workshop am TMUEN eingeladen.



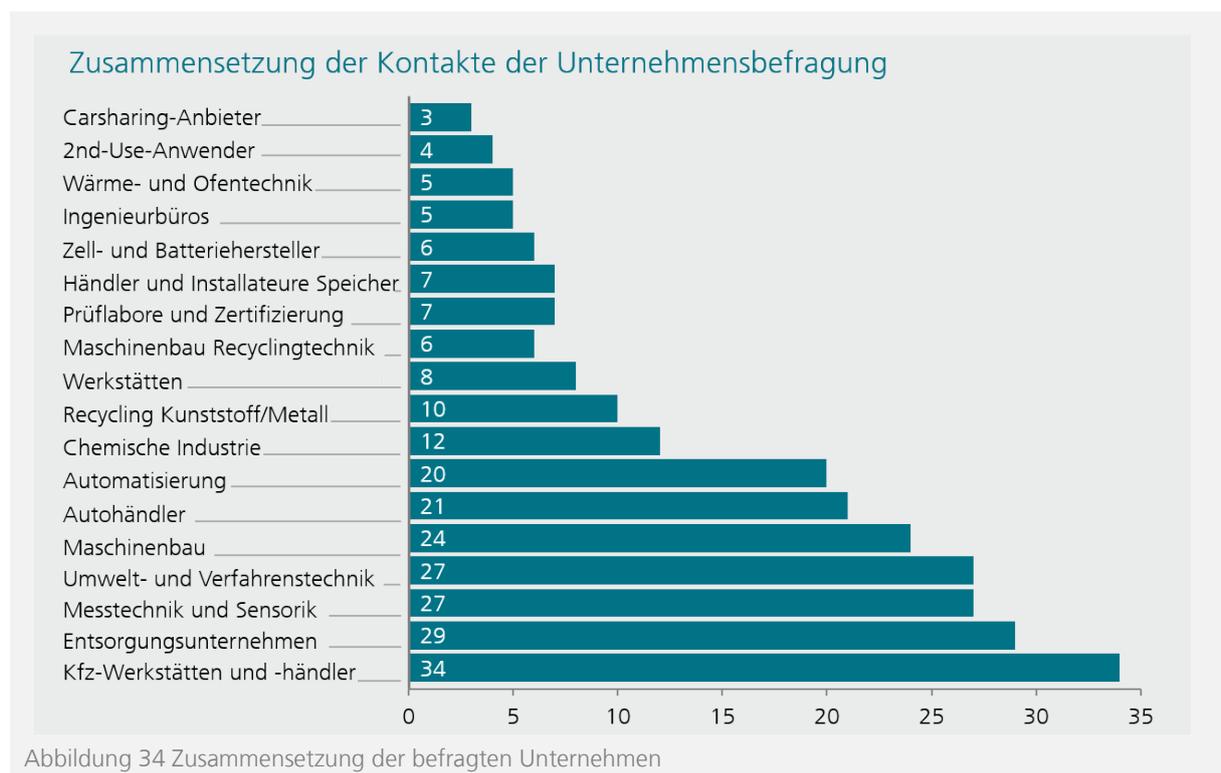
Abbildung 33 Methodisches Vorgehen Potenzialstudie

7.2 Ergebnisse aus der Akteursbefragung

Um zu erfahren, inwieweit die Unternehmen in Thüringen sich bereits mit dem Thema Batterierecycling befasst haben, wurde neben der Recherche eine Onlinebefragung durchgeführt. Damit sollten potenzielle Gesprächspartner identifiziert sowie ein erstes Stimmungsbild über den Status des Batterierecyclings bei einer Vielzahl von Unternehmen erfasst werden.

Die Onlinebefragung der Thüringer Unternehmen wurde mit einer Grundgesamtheit von 255 Unternehmen durchgeführt. Zusätzlich wurden durch die Unterstützung der drei regionalen Industrie- und Handelskammern weitere Unternehmen auf die Befragung aufmerksam gemacht. Insgesamt nahmen 39 Unternehmen an der Befragung teil, was einem Rücklauf von knapp 15 % entspricht. Für eine offene Befragung ist dies ein üblicher Wert. Da nur 21 Unternehmen den Fragebogen komplett ausfüllten, können jedoch zahlreiche Ergebnisse statistisch nicht signifikant ausgewertet werden und nur Tendenzen aufzeigen. Es wird deswegen darauf verzichtet, alle 16 Fragen sowie die resultierenden Ergebnisse darzustellen. Der Fokus richtet sich stattdessen auf deutliche Tendenzen.

Bei der Zusammensetzung der befragten Unternehmen wurde eine möglichst breite und repräsentative Beteiligung verschiedener Branchen angestrebt, die gegenwärtig oder zukünftig mit dem Bereich Berührungspunkte haben. Dabei wurden gleichermaßen Branchen berücksichtigt, die direkt in der Recyclingkette aktiv sind, als auch Unternehmen, die Lösungen für das Recycling anbieten.



In der generellen Abfrage zeigte sich bereits die erste Grundtendenz: Für mehr als 50 % der Thüringer Unternehmen spielt Batterierecycling bereits aktuell eine Rolle oder wird Batterierecycling zukünftig eine Rolle spielen. Von den Unternehmen, die bereits im Recycling aktiv waren, engagierten sich die Mehrzahl in der mechanischen, chemischen und thermischen Aufbereitung sowie bei Sammlung, Transport und Lagerung. Die Mehrzahl der Unternehmen, die an der Befragung teilnahmen, waren kleine und mittelständische Unternehmen (siehe Abbildungen 35, 36 und 37).

Hat Ihr Unternehmen in den vergangenen Jahren bereits im Bereich Recycling gearbeitet, planen Sie zukünftig im Recyclingbereich aktiv zu werden oder planen Sie das nicht?

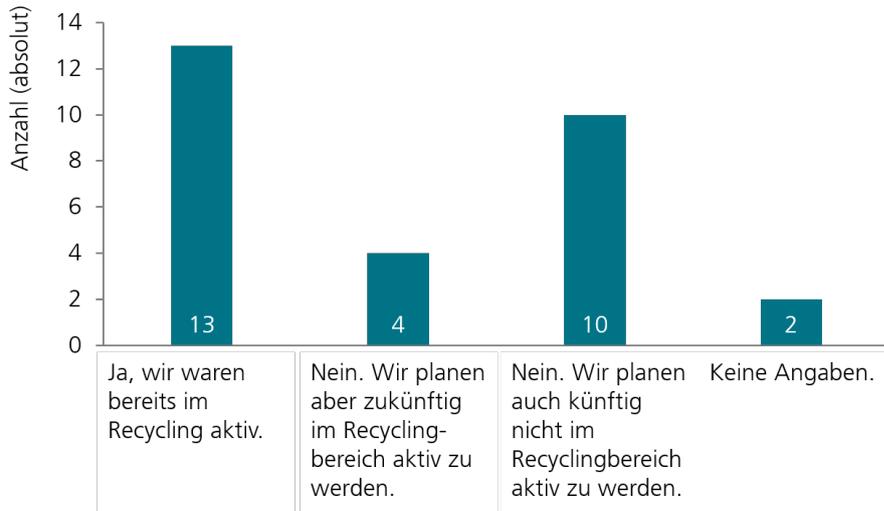


Abbildung 35 Bisheriges Engagement im Recycling (n=29)

In welchem Bereich der Recyclingkette arbeitet oder hat ihr Unternehmen bereits gearbeitet?
 [Mehrfachantworten möglich]

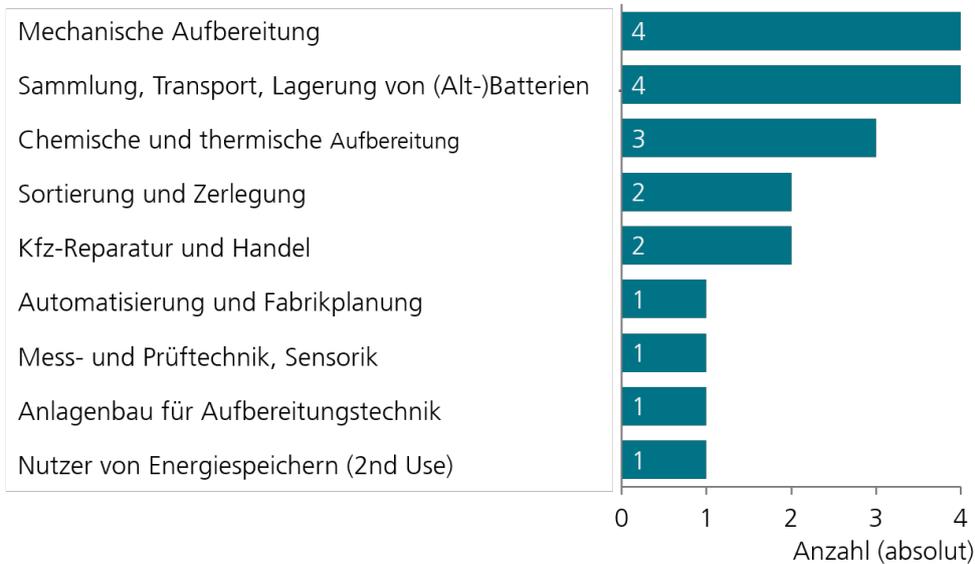


Abbildung 36 Verortung in Recyclingkette (n=19)

Wie viele Mitarbeitende beschäftigen Sie in Ihrem Unternehmen / in Ihrer Niederlassung?

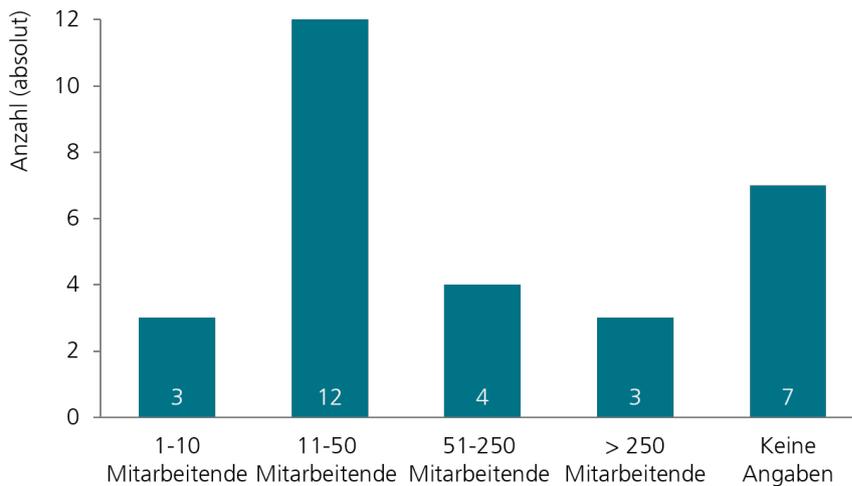


Abbildung 37 Unternehmensgröße (n=29)

Betrachtet man, welches Potenzial die Unternehmen in den kommenden zehn Jahren bei verschiedenen Batterietypen sehen (Abbildung 38), so dominiert eine zurückhaltende Einschätzung. Von den 29 Unternehmen, die diese Frage beantwortet haben, gehen nur fünf Unternehmen davon aus, dass sich das Volumen von Antriebsbatterien in den kommenden zehn Jahren um mehr als 50 % erhöht. Prognosen wie im Masterplan Elektromobilität für Thüringen 2030 (vgl. 2.1) sehen hier ein deutlich höheres Wachstum.

Wie schätzen Sie die Entwicklung in der Herstellung dieser Batterien für die folgenden Bereiche in den nächsten zehn Jahren ein?

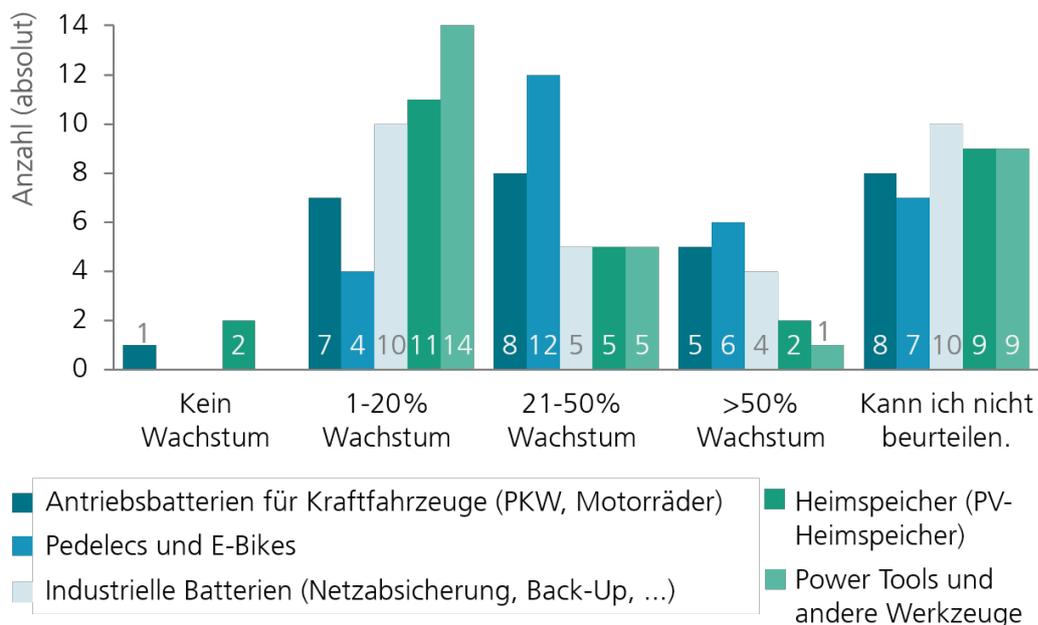


Abbildung 38 Entwicklung Batterieaufkommen (n=29)

Befragt nach dem Potenzial für das eigene Unternehmen (Abbildung 39) sieht die Mehrzahl der Unternehmen im Feld der Sortierung und Zerlegung die größten Chancen für eine eigene Wertschöpfung. Danach folgen chemische und thermische Aufbereitung, mechanische Aufbereitung sowie Anlagenbau für Aufbereitungstechnik.

In welchen Abschnitten des Batterierecyclings sehen Sie in den nächsten zehn Jahren Potenzial für Ihr Unternehmen?

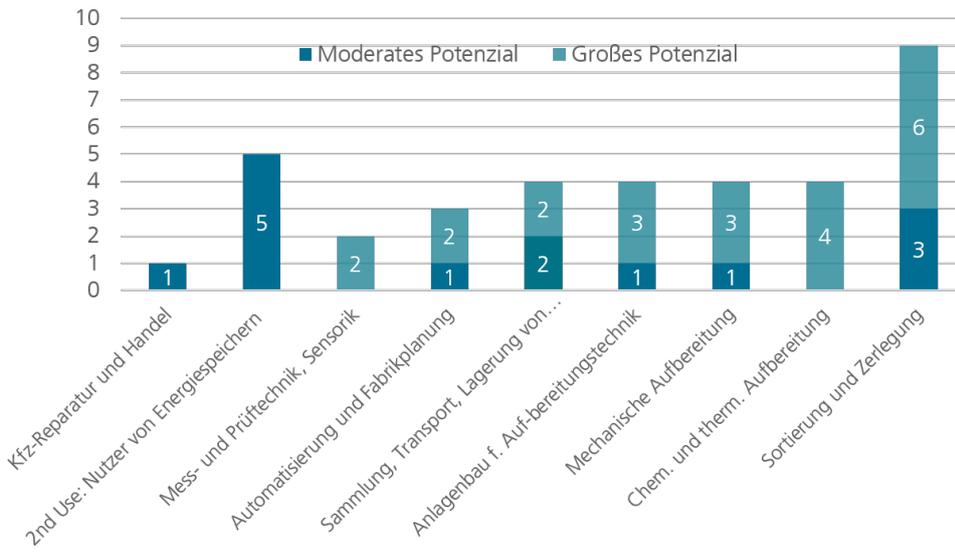


Abbildung 39 Potenzial in Recyclingkette (n=19)

Die größten Hürden sind gegenwärtig rechtliche Hürden und Zulassungen sowie mangelndes wirtschaftliches Potenzial.

Sehen Sie heute noch Hürden, die Ihr Unternehmen daran hindern, den Bereich Batterierecycling auszubauen?

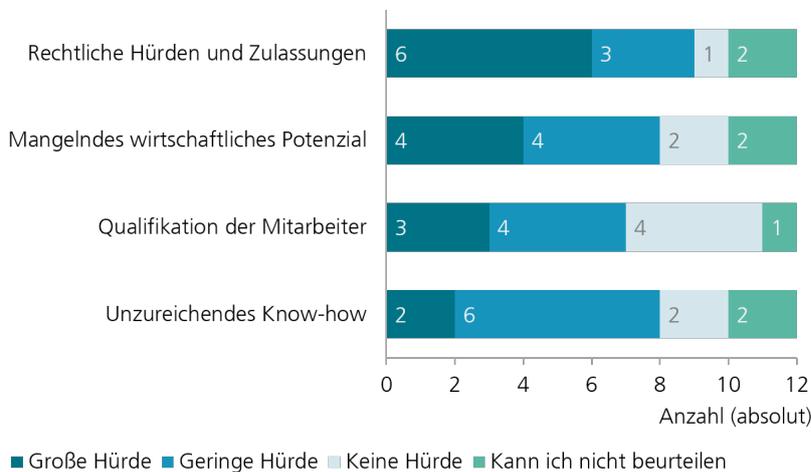


Abbildung 40 Hürden (n=12)

Potenzielle industrielle Strukturen und Akteure in Thüringen – Bedarfspotenzial und Kompetenzen

Wenn Antriebsbatterien zukünftig ihr Lebensende erreicht haben und ausgewechselt werden, wird ein Entsorgungs- beziehungsweise Recyclingprozess in Gang gesetzt. Der Recyclingprozess von Antriebsbatterien ist ein Prozess der Rückführung eines Produkts und das Management dieses Prozesses wird als „Reverse

Logistics“ (RL) bezeichnet. Es umfasst alle Aktivitäten, von der Erfassung der Produkte beim Endverbraucher bis zur Wiederverwendung oder Entsorgung über eine Verwertung oder Beseitigung.¹²⁵

Innerhalb des RL-Prozesses sind verschiedenste Akteure involviert, welche in bestehende regionale, überregionale oder sogar globale Lieferanten- und Absatznetzwerke eingebunden sind. Andere Akteure stehen außerhalb der klassischen RL-Kette und werden ggf. zukünftig erst in diesem Segment aktiv werden. Im Folgenden wird angestrebt, die schon in Kapitel 5 beschriebenen wichtigsten Akteure für Thüringen zu erfassen, zu beschreiben und hinsichtlich ihrer zukünftigen Chancen und Herausforderungen zu bewerten.

Einige Unternehmen werden dabei aktuell und zukünftig direkt mit der Sammlung, dem Transport oder der Verwertung von Batterien und/oder Batteriekomponenten konfrontiert sein. Sie bedürfen beispielsweise einer Entsorgungsstrategie für ihre Produktionsabfälle (Batteriezellhersteller), werden Batterien entgegennehmen müssen (Kfz-Werkstätten und -händler) oder müssen Transport und Verwertung unter hohen Sicherheitsanforderungen (Logistik- und Recyclingunternehmen) sicherstellen. Im Folgenden werden diese Unternehmen unter der Bezeichnung **Bedarfsfelder** zusammengefasst. Andere Unternehmen verfügen über Lösungen in Form von Produkten und Services, technologischen Kompetenzen oder etablierten Partnernetzwerken, um einen wertschöpfenden Beitrag im Recycling erbringen zu können. Sie werden im Folgenden unter der Bezeichnung **Kompetenzfelder** zusammengefasst. Unternehmen wie beispielsweise Entsorger in der Automobilverwertung haben sowohl einen Bedarf (Entsorgungswege für anfallende EoL-Batterien) als auch Kompetenzen (Erfahrung in der Gefahrstoff-Logistik) und können daher in beiden Feldern auftreten.

Bedarfsfelder: Entlang des idealtypischen Prozesses werden im Folgenden die wichtigsten Stufen betrachtet und in fünf Felder geclustert. Ein Anspruch auf Vollständigkeit besteht nicht, da der RL-Prozess für Batterien in Thüringen aktuell nicht etabliert ist und die gesamte Entwicklung von einer hohen Dynamik geprägt ist. Beispiele aus anderen Bereichen legen zudem nahe, dass in neu entstehenden Feldern auch vollkommen branchenfremde Akteure auftreten können.

¹²⁵ Corsten u. a. (Hrsg.) (2018).

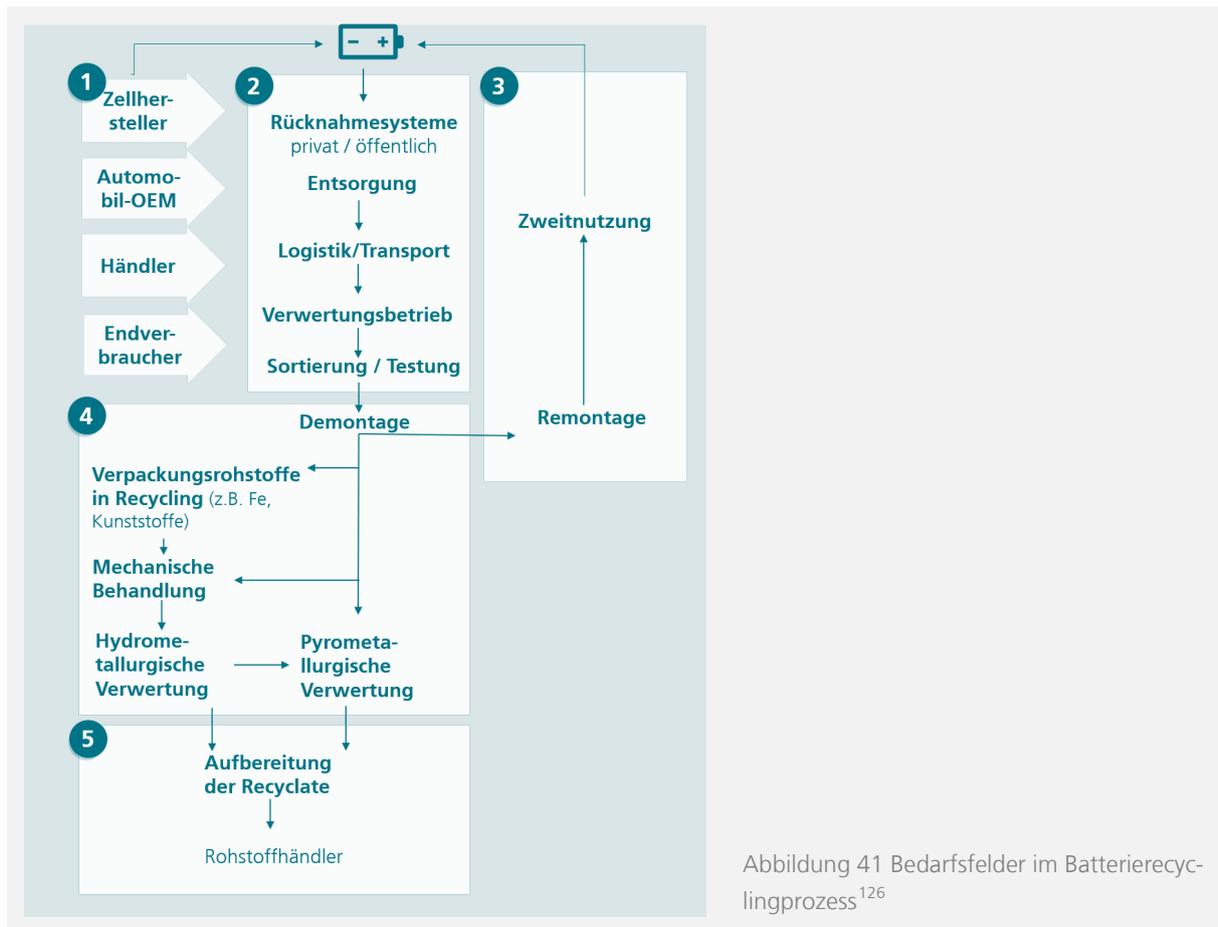


Abbildung 41 Bedarfsfelder im Batterie-Recyclingprozess¹²⁶

1. Ausgangspunkt ist die Batterie, welche an verschiedenen Punkten in den RL-Prozess eingebracht werden kann. Von Bedeutung sind in Thüringen insbesondere die ansässigen **Batteriezellhersteller, Automobilhersteller, Kfz-händler und -werkstätten** sowie **Endverbraucher**.
2. Die anfallenden Batterien oder Batteriekomponenten werden daraufhin gesammelt, vorsortiert, hinsichtlich ihres Zustandes getestet und bewertet, gelagert und transportiert. Diese Aufgaben können private und öffentliche **Entsorgungsunternehmen** und **Verwertungsbetriebe** aus Thüringen übernehmen. Auch **Kfz-Händler und Werkstätten** sowie **Automobilhersteller** könnten beispielsweise die Sammlung und Lagerung übernehmen oder über **Rücknahmesysteme** abwickeln lassen. Bereits in diesem Schritt müssen die Antriebsbatterien aus dem Ursprungssystem (Automobil, Power Tool etc.) ausgebaut werden, um die Batterie(-komponenten) für einen Transport vorzubereiten.
3. Noch unklar ist, an welcher Stelle des Prozesses über eine mögliche **Zweitnutzung** entschieden wird. Dies betrifft eine Wiederverwendung oder Weiterverwendung zum Beispiel als stationärer Energiespeicher. Anwender von Altbatterien für eine Zweitnutzung können vielfältig sein, sodass hier nur ausgewählte Beispiele im Bereich Heimspeicher oder Zwischenspeicherung Erneuerbarer Energien angerissen werden können.

¹²⁶ Eigene Darstellung des Fraunhofer IKTS

4. In der darauffolgenden mechanischen Behandlung werden Materialfraktionen der Altbatterien mittels unterschiedlicher Verfahren aufbereitet. Einige Bestandteile von Batterien werden nach der mechanischen Aufbereitung stofflich verwertet. Die wesentlichen Batteriebestandteile werden jedoch hydrometallurgisch oder pyrometallurgisch verwertet. Nach einer weiteren Aufbereitung (Resynthese) der entstehenden Materialströme, Recyclate oder chemischen Produkte können diese als Rohstoffe oder Bestandteile für neue Lithium-Batterien genutzt oder anderen Nutzungswegen zugeführt werden. Diese Stufe betrifft in Thüringen **Recyclingunternehmen**, die bereits im **Kunststoff- oder Metallrecycling** aktiv sind, aber gegebenenfalls auch Unternehmen der **chemischen Industrie**.
5. Je nach Reinheit der zurückgewonnenen Stoffe und Wirtschaftlichkeit der Recyclingtechnologien werden die entstehenden Sekundärrohstoffe für eine weitere Verwendung qualifiziert oder dem **Rohstoffhandel** zugeführt. Abnehmer könnten Zellhersteller selbst, Unternehmen der chemischen Industrie oder anderer Branchen wie Metallurgie und Glasherstellung sein.

Kompetenzfelder:

Für den Aufbau nachhaltiger Recyclingketten werden unterschiedlichste Kompetenzen benötigt, die in Form von Vorleistungs- und Investitionsgütern, aber auch Dienstleistungen an der Wertschöpfung teilhaben können. Hieraus ergibt sich für zahlreiche Thüringer Unternehmen die Chance, regional, national und international neue und erweiterte Absatzmärkte zu erschließen. Dies betrifft spezifische **Maschinen- und Anlagentechnik** in den Stufen Demontage/Zerlegung, Sortierung und mechanische Aufbereitung. Insbesondere in Hochlohnländern wird ein hoher Grad an **Automatisierungstechnik** erforderlich sein, um eine Wirtschaftlichkeit sicherzustellen. Durch den Einsatz innovativer **Mess- und Prüftechnik** sowie qualifizierter **Analysetechnik** können an zentralen Stellen hochautomatisierte Abläufe sichergestellt werden, was in Thüringen durch weltweit unikale Kompetenzen in Sensorik und Messtechnik ein besonderes Potenzial bietet.

Die hohen Anforderungen an Prozesssicherheit und der Umgang mit Gefahrstoffen eröffnet Chancen für Unternehmen in der Umwelt- und Verfahrenstechnik sowie entsprechende Zulieferer von Hochleistungskomponenten. Des Weiteren werden entlang der wichtigsten Stufen Konzepte für eine sichere Gefahrstofflogistik notwendig. Unternehmen aus dem **Entsorgungsbereich** mit entsprechendem Know-how können hier ebenso wie originäre **Logistikunternehmen** Lösungen entwickeln und anbieten. Auch in der **chemischen Industrie** bieten sich Anknüpfungspunkte für die (Weiter)Verarbeitung und Nutzung gewonnener Rohstoffe. Die Akteure im Feld der **Grundlagenforschung und Angewandten Forschung** verfügen über Netzwerke und branchenübergreifende Ansätze, um die verschiedenen Kompetenzfelder mit speziellem Blick auf das Batterierecycling zusammenzuführen und so interdisziplinäre Lösungen zu erarbeiten.

7.3 Bedarfsfelder

Batterie- und Zellhersteller

Das Batteriegesetz definiert: Hersteller ist jeder, der (Traktions-)Batterien gewerblich erstmals in Verkehr bringt (vgl. Kapitel 5). Zellhersteller und Batteriesystemhersteller haben deswegen häufig unterschiedliche Pflichten. Zellhersteller sind nur dann zu einer Rücknahme von Batterien verpflichtet, wenn sie Batteriezellen direkt an Endnutzer vertreiben. Batteriesystemhersteller, darunter auch Elektroautohersteller, sind dagegen verpflichtet, einen Entsorgungs- oder Recyclingpfad anzubieten. Die für Ende 2020 geplante Revision der

europäischen Batterierichtlinie soll die Kreislaufwirtschaft und technologischen Fortschritte berücksichtigen.¹²⁷ Insbesondere für Antriebsbatterien könnte dadurch auch die Definition von Inverkehrbringer noch präzisiert werden.

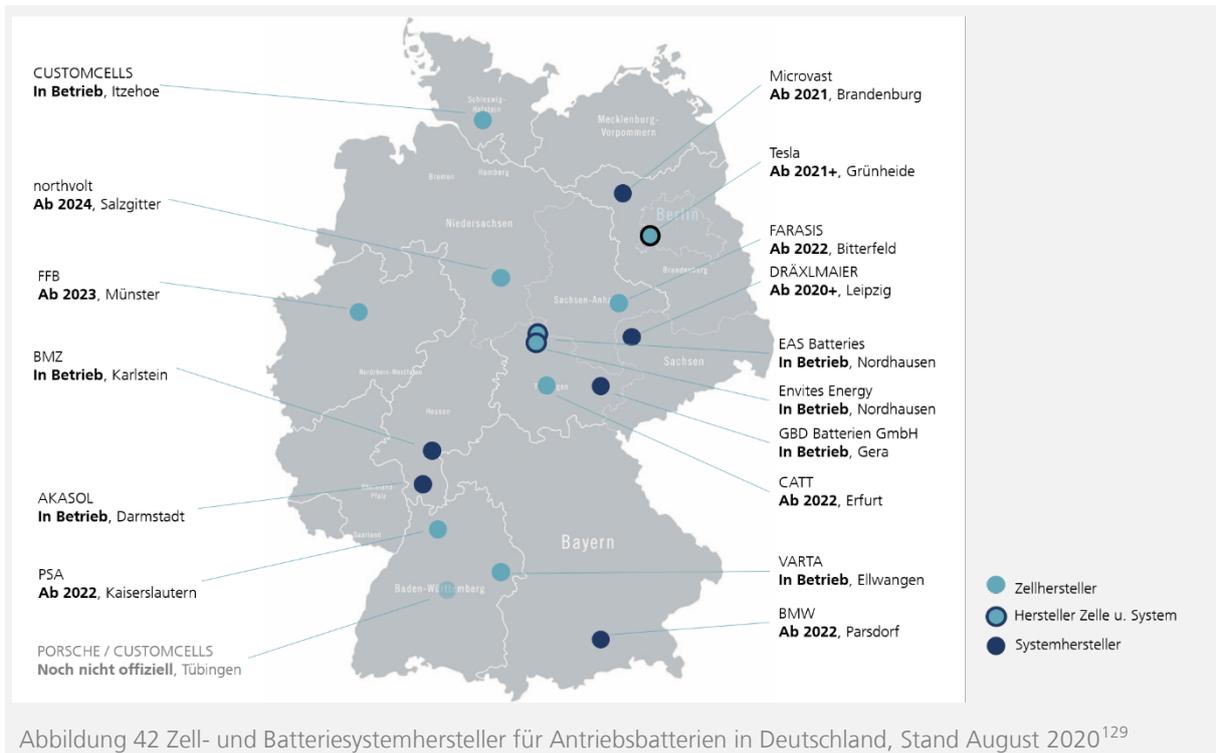
Recyclingstrategien in asiatischen Märkten mit Vorlaufcharakter weisen darauf hin, dass Zellhersteller ein deutliches Interesse an der strategischen Sicherung von Sekundärrohstoffen haben. Darüber hinaus gilt für Hersteller von Batterien und Batteriekomponenten die Herausforderung, den Umgang mit Produktionsabfällen aus verschiedenen Herstellungsstufen entsprechend der geltenden Richtlinien zu regeln. Beide Gründe sprechen dafür, dass auch Zellhersteller zukünftig eine relevante Position im RL-Prozess einnehmen werden – als potenzieller Abnehmer von Sekundärrohstoffen als auch im Umgang mit Ausschuss.

Sowohl die politischen Rahmenbedingungen als auch das wachsende Engagement der deutschen Automobilhersteller sprechen in den kommenden Jahren für ein deutliches Wachstum der Batteriezellproduktion weltweit und in Europa. Bis zu 312 GWh Kapazität sind dabei nach Berechnungen des Öko-Instituts bereits im Jahr 2020 zu erwarten – bis 2030 ist ein Anstieg auf 1000 bis 1500 GWh prognostiziert.¹²⁸ Die Mehrzahl dieser Kapazitäten wird allerdings außerhalb Europas gefertigt werden.

Thüringen verfügt aktuell mit der EAS Batteries GmbH bereits über Kapazitäten in der Batteriefertigung. Das Unternehmen stellt seit mehreren Jahrzehnten Hochleistungsbatterien auf Lithium-Ionen-Basis her. Die zylindrischen Zellen mit hoher Leistung und hoher Energie von 7,5 bis 55 Ah sind in Nischenmärkten wie der Schifffahrt etabliert. Zusätzlich plant das Unternehmen Contemporary Amperex Technology Ltd. (CATL) über seine deutsche Niederlassung Contemporary Amperex Technology Thüringen (CATT) ab Mitte 2022 Batteriezellen und -module mit einer Leistung von 14 GWh in Arnstadt bei Erfurt zu produzieren. CATL hat bereits Lieferverträge mit Tesla, BMW, Daimler und anderen OEMs abgeschlossen und plant trotz geringer Verzögerungen bereits zu Beginn 2021 Speicher mit aus China importierten Zellen am Standort zu fertigen. Darüber hinaus sind die Unternehmen GBD Batterien GmbH als Anbieter von Lithium-Ionen-Systemen sowie das Unternehmen Envites Energy in der Batterieentwicklung tätig.

¹²⁷ Europäische Kommission (29.01.2020).

¹²⁸ Buchert u. a. (16.01.2019).



Herausforderungen:

Aufgrund des aktuellen Status kann bei keinem der Unternehmen von einer großen Anzahl an Rückläufern ausgegangen werden. Mit der Installation der Fertigungskapazitäten insbesondere bei CATT rückt das Thema der Entsorgung jedoch in den Fokus der Hersteller – sowohl auf Rückläufer von Kunden als auch auf Entwicklungs- und Produktionsabfälle bezogen. Expertengespräche legen nahe, dass die sichere und umweltgerechte sowie wirtschaftliche Entsorgung auf absehbare Zeit die höchste Priorität hat.

Zellhersteller sind in der Zusammensetzung ihrer Ausgangsmaterialien auf standardisierte, hochreine und

»Europäische Zellhersteller stehen gegenwärtig in erster Linie vor der Herausforderung, die Entsorgung von Batterie(-komponenten) wirtschaftlich durchzuführen.«

Zellhersteller Thüringen, Roundtable 02.11.2020

zuverlässige Rohstoffquellen angewiesen. Aufgrund der aktuellen Situation am Rohstoffmarkt, langfristiger Lieferantenbeziehungen sowie der Rückwärtsintegration (beispielsweise durch eigene Minenkapazitäten) besteht kein Leidensdruck, Sekundärrohstoffe mit möglicherweise geringerer Qualität zu verwenden. Das Primat der Sicherheit sowie der maximalen Leistung einer Batteriezelle stehen vor der Motivation, Rohstoffe aus Antriebsbatterien zurückzugewinnen. Auch innerhalb der Produktion ist Ausschuss von unbefüllten und befüllten Zellen in erster Linie ein Entsorgungsthema, das mit möglichst geringem Kosteneinsatz realisiert werden muss. Als Niederlassung eines international agierenden Konzerns ist CATT in die strategischen Überlegungen seiner Zentrale eingebunden. CATL hat angekündigt, auch batteriebezogene Dienstleistungen im Bereich der Wartung oder des Austauschs anzubieten.¹³⁰

¹²⁹ Eigene Darstellung IKTS, Quellen: Geilen (28.08.2020) und DRÄXLMAIER Group (19.11.2020) <https://www.draexlmaier.com>.

¹³⁰ Elektroauto-News.net (08.06.2020).

Neben der sicheren Rohstoffversorgung setzen Zellhersteller aus folgenden Gründen derzeit nicht auf Rohstoffe aus der Recyclingindustrie. Zum einen stehen die anfallenden Mengen Altbatterien noch in keiner Relation zu den Bedarfen, die für die derzeitige Batterieproduktion notwendig sind. Dies wird sich, auch aufgrund der relativ langen Lebensdauer einer Lithium-Ionen-Batterie, bei einem exponentiellen Wachstum des Marktes kurzfristig nicht ändern. Ausnahme kann eine Verknappung der natürlich vorkommenden Rohstoffe sein. Daher ist eine langfristige Bindung der Hersteller an bestehende Lieferketten, die Etablierung kooperativer Partnerschaften oder der Aufbau einer eigenen, autarken Versorgung nachvollziehbar.

Auch der hohe Anspruch an Reinheit, der an die Rohstoffe für Batteriematerialien gestellt wird, kann nach einem Recyclingprozess durch die Vielzahl an Begleitstoffen typischerweise nur sehr aufwendig realisiert werden. Die Batteriequalität¹³¹ für Li_2CO_3 liegt beispielsweise bei einer Reinheit > 99,5 %, die Verunreinigungen in Übergangsmetallverbindungen im ppm-Bereich. Da aufgrund der vergleichsweise geringen Durchsätze eine aufwendige Raffination der Recyclingprodukte für industrielle Recyclingbetriebe per se weniger wirtschaftlich ist als die großtechnische Gewinnung aus angereicherten Erzen, ist es schwer, entsprechende Materialien wettbewerbsfähig am Markt zu platzieren.

Chancen:

Bei den Herstellern werden derzeit aktiv Strategien evaluiert, um das Wertstoffpotenzial der Rohstoffe zu nutzen und so gleichzeitig die Kosten der Entsorgung zu senken. Gegenwärtig sind diese Überlegungen bei den Thüringer Unternehmen aufgrund der geringen Mengen an Antriebsbatterien und den operativen Herausforderungen im Geschäft noch nicht finalisiert. Der hohe Aufwand im Transport von Gefahrgütern legt aber nahe, dass eine lokale Behandlung von Komponenten und Einzelfraktionen wirtschaftlich sinnvoll sein kann. Mit großer Wahrscheinlichkeit werden jedoch nur Teile der Recyclingkette wie die Demontage bis auf Zelllevel und die mechanische Vorbehandlung vor Ort durchgeführt – eine geschlossene dezentrale Recyclingkette bis zur Resynthese der Rohstoffe liegt gegenwärtig nicht im Fokus der Hersteller. Die so erzielten Zwischenergebnisse des Recyclings unterliegen dann weiterhin den Anforderungen des Gefahrguttransports.

Es bestehen aber Chancen, dass mit steigender Anzahl anfallender Batterien auch Initiativen der Batterie- und Zellhersteller gestartet werden. Dieses Potenzial wird sogar noch deutlicher, wenn man die regionale Verteilung anderer geplanter Batteriefertigungen im Umfeld anschaut.

Herausforderungen:	Chancen:
<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Kosten der Entsorgung von kritischen Produktionsabfällen • Bedarf an hochreinen Rohstoffen für Herstellung 	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherung der eigenen Rohstoffe • Senkung Entsorgungskosten • Imagefaktor • Verwertung der Nutzungsdaten

Automobilhersteller und -zulieferer

Automobilhersteller sind gesetzlich verpflichtet, die Antriebsbatterien ihrer Elektroautos nach Ende der Nutzung zurückzunehmen. Allgemein liegt der Fokus der Automobilhersteller in Europa und Deutschland Stand 2020 zunehmend auf der Produktion von Fahrzeugen mit Batterien als hauptsächlichem Energielieferant.¹³²

¹³¹ Im Englischen Battery Grade genannt

¹³² Chemnitz Automotive Institute (10. September 2020).

Der Druck auf Elektroautohersteller Rücknahme und Recycling zu organisieren, und damit der gesetzlichen Verpflichtung nachzukommen, wird demnach größer.

In Thüringen gibt es mit der Produktionsstätte der Opel Automobile GmbH Eisenach einen Automobilhersteller, wo ca. 1800 Mitarbeiter tätig sind. Dort werden nach einer Modernisierung der Opel Grandland X sowie dessen Hybridvariante produziert. Das Fortbestehen des Opel-Standorts Eisenach wird immer wieder diskutiert, sodass eine Prognose schwerfällt. Wenn das Werk bestehen bliebe, wäre eine Orientierung in Richtung Elektromobilität wahrscheinlich.

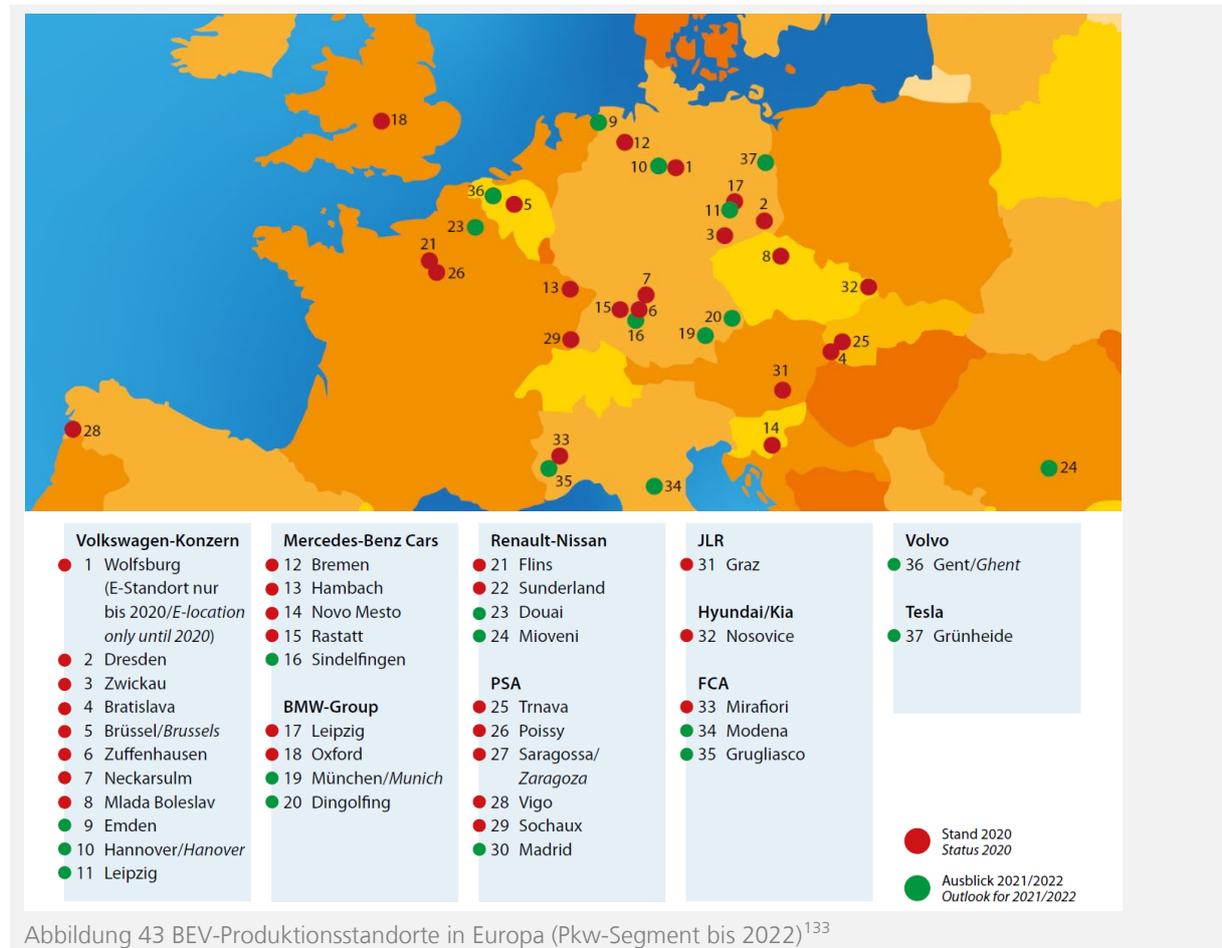


Abbildung 43 BEV-Produktionsstandorte in Europa (Pkw-Segment bis 2022)¹³³

¹³³ Chemnitz Automotive Institute (10. September 2020).

»Im Gegensatz zu vorherigen Initiativen beispielsweise im Recycling von Aluminiumspänen oder Katalysatoren, die später outgesourct wurden, interessiert OEMs beim Batterierecycling die Sicherheit der Rohstoffe und die Auswertung der Nutzungsdaten.«

Recyclingexperte strategischer Rohstoffe,
Expertengespräch am 15.10.2020

Mit Blick auf die Region Mitteldeutschland wird jedoch deutlich, dass in der geographischen Nähe, insbesondere in Sachsen, zahlreiche OEMs angesiedelt sind. Nach einer aktuellen Studie der Branchennetzwerke AMZ Sachsen und Automotive Thüringen werden Ende 2019 an acht Standorten in Deutschland batterieelektrische Pkws gefertigt. Neben den Werken der Volkswagen AG (Zwickau, Dresden) sowie der BMW AG (Leipzig) sind die Eröffnungen der Werke von Porsche SE (Leipzig) und Tesla (Grünheide) für 2021/22 geplant. Diese Werke in unmittelbarer Nähe sprechen zwar nicht zwingend für ein hohes regionales Aufkommen an zu recycelnden Antriebsbatterien, da der Produktionsort nicht dem Anfallort entspricht, es ist jedoch ein logisches Szenario, dass verschiedene OEMs zukünftig Allianzen für das Recycling von Batterien etablieren werden, die eigenständig oder durch Dritte eine Recyclingkette aufbauen werden. Vorbildhaft wäre hier das in Japan etablierte Vorgehen der JARC zu nennen, bei denen eine herstellerübergreifende Allianz die Verrechnung und Abwicklung des Recyclingprozess übernimmt. Die oben dargestellte räumliche Nähe weiterer Batteriehersteller als potenzielle Abnehmer von Zellen macht dieses Szenario nicht unwahr-

scheinlich.

Herausforderungen:	Chancen:
<ul style="list-style-type: none"> • Verantwortung für Rücknahme der Batterien • Entsorgungskosten von EoL-Batterien 	<ul style="list-style-type: none"> • Zugriff auf Nutzungsdaten • Sicherung der eigenen Lieferantenbeziehungen • Imagefaktor

Werkstätten und Händler

Im gesamten Freistaat Thüringen sind ca. 2000 Autohäuser und Kfz-Werkstätten¹³⁴ ansässig. Das Spektrum reicht dabei von einzelnen Werkstätten im ländlichen Bereich bis hin zu größeren Ketten, bei denen Händler und Werkstatt kombiniert sind. Werkstätten bilden innerhalb kleiner Gemeinden und Dörfer wichtige Infrastrukturpunkte und bedürfen daher einer besonderen Berücksichtigung.

Herausforderungen:

Während wie bereits dargestellt, reine Werkstätten Antriebsbatterien nicht annehmen müssen, gilt diese Regel nicht für Händler. Diese sowie Werkstätten, die an einen Händler angeschlossen sind, sind zur Rücknahme von Antriebsbatterien verpflichtet, insofern sie E-Fahrzeuge auch verkaufen (§5 und §8 BattG). Betrachtet man die für Thüringen prognostizierten Szenarien für den Hochlauf der Elektromobilität bis ins Jahr

¹³⁴ Landesverband des Kraftfahrzeuggewerbes Thüringen e.V.

» Die Ergebnisse der Unternehmensbefragung deuten darauf hin, dass gegenwärtig eine geringe Sensibilität für das Thema Lithium-Ionen-Batterien bei Werkstätten und Händlern besteht.«

Expertengespräche Roundtable 02.11.2020

2030, wird deutlich, dass dieses Bedarfsfeld unter besonderen Herausforderungen stehen könnte. Dies betrifft die Anforderungen an eine sichere Lagerung und Transportvorbereitung ebenso wie die notwendige Qualifikation der Mitarbeiter im Hinblick auf die Diagnose, Reparatur und den Ausbau von Batterien. Seit 2013 wurden nach Aussagen des Landesverbandes des Kraftfahrzeuggewerbes 50 Mitarbeiter für den Umgang mit Hochvolt-Batterien ausgebildet. Hier sind für Werkstätten zum Beispiel im Bereich Ausbildung zahlreiche Investitionen notwendig, die nur bedingt an den Endkunden weitergegeben werden können. Während bisherige Bleisäure-Batterien nur als gefährliche Güter gelten, sind Lithium-Ionen-Batterien als Gefahrgut klassifiziert. Die damit einhergehenden Anforderungen an Lagerinfrastruktur und -logistik können insbesondere für kleine Werkstätten zum kritischen Faktor werden. Von den 34 kontaktierten Werkstätten und Händlern hat nur ein Unternehmen Interesse an der Befragung gezeigt und das Wachstum elektrischer Antriebsbatterien auf maximal 20 % in den kommenden zehn Jahren geschätzt. Expertengespräche bestätigen, dass in diesem Bedarfsfeld zukünftig deutliche Anstrengungen unter-

nommen werden müssen, um insbesondere kleine Werkstätten frühzeitig auf die veränderten Anforderungen vorzubereiten.

Chancen:

Potenziell können Werkstätten und Händler neue Dienstleistungen an Endkunden vermarkten. Des Weiteren werden diejenigen Werkstätten respektive Händler einen Vorteil haben, die bereits frühzeitig als kompetenter Ansprechpartner im Verkauf, Reparatur und Rücknahme von Elektrofahrzeugen auftreten können.

Herausforderungen:	Chancen:
<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Anforderungen an Gefahrgutlagerung und -logistik • Investitionen in Mitarbeiterqualifikationen für Diagnose, Reparatur und Ausbau von Batterien 	<ul style="list-style-type: none"> • Zusätzliche Dienstleistungen • Etablierung als überregionale Kompetenzträger und Kundenakquise im Bereich E-Mobile

Entsorgungsunternehmen, Verwertungsbetriebe und Recyclingunternehmen

Der Leitmarkt Kreislauf- und Abfallwirtschaft nimmt in Thüringen mit knapp 250 Unternehmen eine zentrale Rolle ein. In Thüringen sind ca. 5900 Beschäftigte in den Feldern Abfallsammlung und -transport sowie Abfallbehandlung und -verwertung tätig¹³⁵, weitere 1.300 im Bereich Technik für die Abfallwirtschaft. Letztere bieten Lösungen für (über)regionale Recyclingaktivitäten an und sind daher den Kompetenzfeldern zuzuordnen. Besondere Kompetenzen bestehen im Kunststoffrecycling, der Aufbereitung von Baustoffen wie Gips sowie der Verwertung von Elektroaltgeräten. Als eine Säule der RIS3-Strategie¹³⁶ des Freistaats kommt der Kreislaufwirtschaft im Innovationsfeld Nachhaltige Energien und Ressourcen eine entscheidende

¹³⁵ Malik u. a. (April 2019).

¹³⁶ Regionale Forschungs- und Innovationsstrategie für intelligente Spezialisierung für Thüringen (RIS3 Thüringen)

Bedeutung zu. Es wird wahrscheinlich, dass in dem Segment der etablierten Entsorger einzelne Unternehmen Teile der Wertschöpfungskette bearbeiten werden. Hier finden sich primär überregional organisierte Unternehmen wie etwa TSR Recycling GmbH & Co. KG, die eine 100-prozentige Tochter der Remondis AG ist, sowie regional agierende Unternehmen wie die Thüringen Recycling GmbH wieder.

Herausforderungen:

Aus Expertengesprächen werden zwei Punkte deutlich:

1. Die Unternehmen der Thüringer Entsorgungswirtschaft sind gegenwärtig wenig vernetzt. Der Austausch ist primär über persönliche Netzwerke organisiert, Branchencluster fehlen aktuell. Hier besteht ein Bedarf, um der Komplexität des Feldes Batterierecycling gerecht zu werden, und ggf. auch überregional stärker wahrgenommen zu werden.
2. Recycling ist stark nachfragegetrieben und wird nicht zum Selbstzweck betrieben. Unter dem Primat der Wirtschaftlichkeit müssen für die Unternehmen lukrative Absatzmärkte für die zurückgewonnenen Stoffe erkennbar sein. In der aktuellen Situation fehlen dafür zentrale Informationen über die spezifischen Anforderungen an recycelte Stoffe, die im Batterieherstellungsprozess wiederverwendet werden könnten. Batteriehersteller und OEMs sind diesbezüglich mit Informationen sehr zurückhaltend.

Wie dargestellt, sind seitens der Batteriehersteller die zukünftigen Strategien zum Einsatz recycelter Stoffe nicht transparent, sodass eine strategische Planung für Entsorgungsunternehmen schwierig ist. Thüringen verfügt aktuell nicht über Kompetenzen im Bereich der hydro- und pyrometallurgischen Verwertung. Einzelne Fraktionen einer demontierten und aufbereiteten Batterie könnten aber sehr wohl in einen planbaren Kreislauf überführt werden. Entscheidend dafür ist eine stärkere Standardisierung sowohl der anfallenden EoL-Batterien als auch der Anforderungen an die recycelten Stoffe. Beide Informationen müssen von Seiten der OEMs und Batterie(zell)hersteller bereitgestellt werden.

Chancen:

Die Entsorgungsunternehmen signalisieren in den Expertengesprächen ein sehr hohes Interesse, sich in diesem Feld zu engagieren und vom Marktwachstum der Batterieherstellung sowie der -nutzung zu profitieren. Idealerweise können die Entsorger über langfristige Partnerschaften mit beispielsweise OEMs oder Zellherstellern stabile und wirtschaftliche Recyclingketten und/oder -kreisläufe etablieren. Insbesondere die Erfahrungen im Umgang mit Gefahrstoffen prädestinieren die Akteure in diesem Bedarfsfeld, relevante Teile der Sammlung, Bewertung, Beförderung sowie der mechanischen Vorbehandlung dezentral vorzunehmen. Ihre zentrale logistische Lage ermöglicht darüber hinaus, auch in überregionalen Rücknahmesystemen mitzuwirken.

Hierbei werden zukünftig drei mögliche Optionen wahrscheinlich, die in Kapitel 8 in konkreten Szenarien untersetzt werden:

1. Sammlung in etablierten Sammelstellen oder vor Ort beim Händler/Werkstatt, Transport, Tiefentladung, Demontage und ggf. mechanische Vorbehandlung von Batteriekomponenten bei Entsorgungsunternehmen zur Erzielung der Transportfähigkeit. Die Aufbereitung der Schwarzmasse wird zentral in größeren Einheiten deutschland- oder europaweit realisiert.

2. Recycling von Produktionsabfällen vor Ort beim Batteriehersteller über langfristige Partnerschaften zur Schließung von lokalen Rohstoffketten und Minimierung von Entsorgungskosten durch stark stoffspezifische Aufbereitungsverfahren mit kleiner bis mittlerer Kapazität.
3. Aufbau eines geschlossenen Kreislaufs in Thüringen von der Sammlung überregionaler EoL-Batterien bis zur Aufbereitung der Schwarzmasse.

Insbesondere für letzte Option sind deutliche Kapitalkaufwände und der Aufbau von Know-how notwendig. Hier erscheint eine besondere Chance in der Kooperation über Landesgrenzen hinaus zu liegen. Kooperationen mit sächsischen OEMs und den pyrometallurgischen Kompetenzen (beispielsweise Nickelhütte Aue), dem Fraunhofer Technologiezentrum für Hochleistungsmaterialien (THM) in Freiberg, den Aufbereitungskompetenzen in der Montanregion Harz oder mit dem BASF Standort in Schwarzheide wären sinnvolle Ergänzungen der Wertschöpfungskette. In einer Kooperation dieser Art würden alle notwendigen Kompetenzen abgedeckt und gleichzeitig logistische Aufwände überschaubar gehalten. Entsprechende Anstrengungen über beispielsweise Verbundvorhaben wären zu begrüßen.

Herausforderungen:	Chancen:
<ul style="list-style-type: none"> • Mangelnde Informationen über Aufbau und Zusammensetzung der verschiedenen Batterietypen • Mangelnde Spezifikationen über notwendige Eigenschaften von Sekundärrohstoffen für Zellherstellung 	<ul style="list-style-type: none"> • Partizipation am Marktwachstum • Teile der Wertschöpfung zur Sammlung, Bewertung, Beförderung sowie der mechanischen Vorbehandlung • Aufbau einer deutschland-/europaweiten Aufbereitungskapazität am Standort Mitteldeutschland

7.4 Kompetenzfelder

Maschinen- und Anlagentechnik

Die Thüringer Maschinenbaubranche gehört zu den wachstumsstärksten Branchen im Freistaat. Die Bandbreite der mehr als 400 Unternehmen reicht dabei von klassischen Maschinenbauanwendungen bis zu hochautomatisierten und digital vernetzten Lösungen. Ca. 1300 Erwerbstätige lassen sich dem Feld der Aufbereitungstechnik für die Kreislauf- und Abfallwirtschaft zuordnen. Dieser Bereich verzeichnet nach einer Studie des Thüringer Ministeriums für Umwelt, Energie und Naturschutz TMUEN auch die höchsten Wachstumsraten im Leitmarkt Kreislauf- und Abfallwirtschaft¹³⁷.

Im Technikbereich Kreislauf- und Abfallwirtschaft sind in Thüringen insbesondere Anlagenbauer und Ingenieurbüros aktiv, wobei die Branche von kleineren Familienbetrieben als auch globalen Marktführern geprägt ist. Insbesondere die Sortier- und Trenntechnik für verschiedenste Branchen ist durch einen hohen Innovationsgrad als auch eine hohe Exportquote weltweit wettbewerbsfähig. Das Portfolio der Anlagenbauer wird durch Hersteller von Sensoren ergänzt, deren Produkte für die sortenreine Trennung der Abfallstoffe elementar sind. Innerhalb der Akteursstudie wurden 50 Unternehmen identifiziert und kontaktiert, die dezidiert Anlagentechnik in Recycling-relevanten Bereichen (Bestandteile thermischer Abfallbehandlungsanlagen, Instrumente zur Abfallbehandlung/-analyse, Einrichtungen zum Agglomerieren, Pelletieren, Pressen und Mischen von Abfall) entwickeln und anbieten.

¹³⁷ Umweltwirtschaft in Thüringen. Leitmärkte, Zahlen und Fakten. 2019. Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN)

» Die langjährigen Erfahrungen im Maschinenbau, der Messtechnik sowie der Automatisierung eröffnen die Chance, sich zu einem Innovationsführer für hochautomatisierte Demontageprozesse zu entwickeln.«

Expertengespräche
Roundtable 02.11.2020

Herausforderungen:

Expertengespräche zeigen auf, dass aktuell zwei grundlegende Hemmnisse für die Akteure relevant sind. Die Entwicklung von international vermarktbareren Anlagen sowie der dafür notwendigen Zulieferkomponenten setzt ein hohes Maß an Standardisierung voraus. Während Abfall zwar von Charge zu Charge verschieden ist, ist die grundsätzliche Zusammensetzung der verschiedenen Fraktionen weltweit vergleichbar. Daraus ergibt sich ein hohes Potenzial, einmal entwickelte Anlagentechnik weltweit vermarkten zu können. Im Fall der Batterie aus Elektrofahrzeugen ist eine solche Vergleichbarkeit noch nicht gegeben. Weder der Aufbau, die Integration ins Gesamtsystem noch die Zusammensetzung der Zellchemien sind derzeit vergleichbar. Darüber hinaus wird weiterhin intensiv an neuen Zellchemien geforscht, sodass hier zukünftig viel Dynamik zu erwarten ist. Von einer Standardisierung kann kurzfristig auch nicht ausgegangen werden, auch wenn internationale Initiativen sich dahingehend bemühen. Schlussendlich sind die technologischen Routen, die sich als vielversprechend erweisen, noch nicht klar. Dementsprechend wird sich noch zeigen, inwiefern Anlagentechnik für besonders große Kapazitäten an zentraler Stelle oder kleinere, dafür stoffspezifischere Anlagenkonzepte nachgefragt werden.

Ein weiterer kritischer Punkt ist gegenwärtig die zu geringe Anzahl an Rückläufer-Batterien – ein profitables Geschäftsfeld ist noch nicht gegeben. Der Markt befindet sich im Hochlauf und die internationale Entwicklung ist divers. Schlussendlich ergibt sich daraus ein hohes unternehmerisches Risiko, zum jetzigen Zeitpunkt spezifische Anlagentechnik zu entwickeln.

Chancen:

Während die mangelnde Marktreife und die Unklarheit über die eingesetzten Technologien aktuell noch ein stärkeres Engagement der Maschinenbauer bremsen, ergibt sich mittel- bis langfristig für die Branche ein erhebliches Potenzial. Experten sind sich einig, dass weite Teile des Demontageprozesses hochautomatisiert durchgeführt werden müssen – aufgrund wirtschaftlicher, aber auch sicherheitstechnischer Anforderungen.

Zahlreiche Unternehmen in Thüringen verfügen über Erfahrungen im (Sonder)maschinenbau für die Sortier- und Trenntechnik sowie die dafür notwendigen Kernkomponenten wie beispielsweise Hochleistungskeramiken oder Hartmetall-Schneidwerkzeuge. In Verbindung mit der Kompetenz weltweit führender Messtechnikhersteller und Sensorentwickler verfügt der Freistaat über Alleinstellungsmerkmale, die bereits frühzeitig in konkrete Anwendungsfälle bei lokalen Zellherstellern überführt werden können.

Expertengespräche führen zudem noch einen weiteren, eher „weichen“ Faktor an: viele Unternehmen sind in den kommenden Jahren mit dem altersbedingten Wechsel der Inhaber und Geschäftsführer konfrontiert. Unternehmensnachfolger sind neuen Anwendungs- und Geschäftsfeldern gegenüber tendenziell offener – in Verbindung mit der Transformation der Automobilindustrie evaluieren zahlreiche Unternehmen gerade aktiv neue Chancen.

Herausforderungen:	Chancen:
<ul style="list-style-type: none"> • Unzureichende Marktreife • Mangelnde Standardisierung von Batterien (Aufbau, Zellchemien etc.) • Mangelnde Spezifikationen über notwendige Eigenschaften von Sekundärrohstoffen für Zellherstellung • Hohe sicherheitstechnische Anforderungen im Umgang mit Gefahrstoffen 	<ul style="list-style-type: none"> • Partizipation am Marktwachstum • Internationale Vermarktung von Anlagen und -komponenten • Innovationsführerschaft im Bereich hochautomatisierter Demontage
Ausgewählte Unternehmen	
<p>Hammel Recyclingtechnik GmbH SAMAG Saalfelder Werkzeugmaschinen GmbH EuRec Environmental Technology GmbH CABKA GmbH & Co. KG CUTMETALL Recycling Tools Germany GmbH TISOMA Anlagenbau und Vorrichtungen GmbH Arnstädter Werkzeug- und Maschinenbau AG Arjes GmbH JSJ Jodeit GmbH Tridelta Thermprozess GmbH MUT Advanced Heating GmbH AUMA-TEC Ausbau-, Umwelt- und Anlagen-Technik GmbH FCT Ingenieurkeramik GmbH</p>	

Messtechnik und Sensorik

Die Thüringer Optik- und Photonikindustrie beruht auf einer jahrhundertelangen Tradition, welche weit über die Grenzen Deutschlands einmalig ist. Die mehr als 180 Unternehmen aus den Bereichen Optik, Messtechnik und Sensorik, Lasertechnik sowie Optoelektronik sind mehrheitlich mittelständisch geprägt und erwirtschaften gemeinsam ca. 3,3 Mrd. € Umsatz (2019¹³⁸). Mit einem Exportanteil von 67 % und einer besonders hohen Forschungsintensität sind sie Innovationsführer und oft Weltmarktführer in ihren Segmenten. Knapp 30 % der Unternehmen sind schwerpunktmäßig im Geschäftsfeld Messtechnik und Sensorik engagiert¹³⁹. Beinahe 90 % der Produkte kommen dabei in der industriellen Produktion zum Einsatz (vgl. Abbildung 44).

¹³⁸ Optonet e.V.

¹³⁹ Ebd.

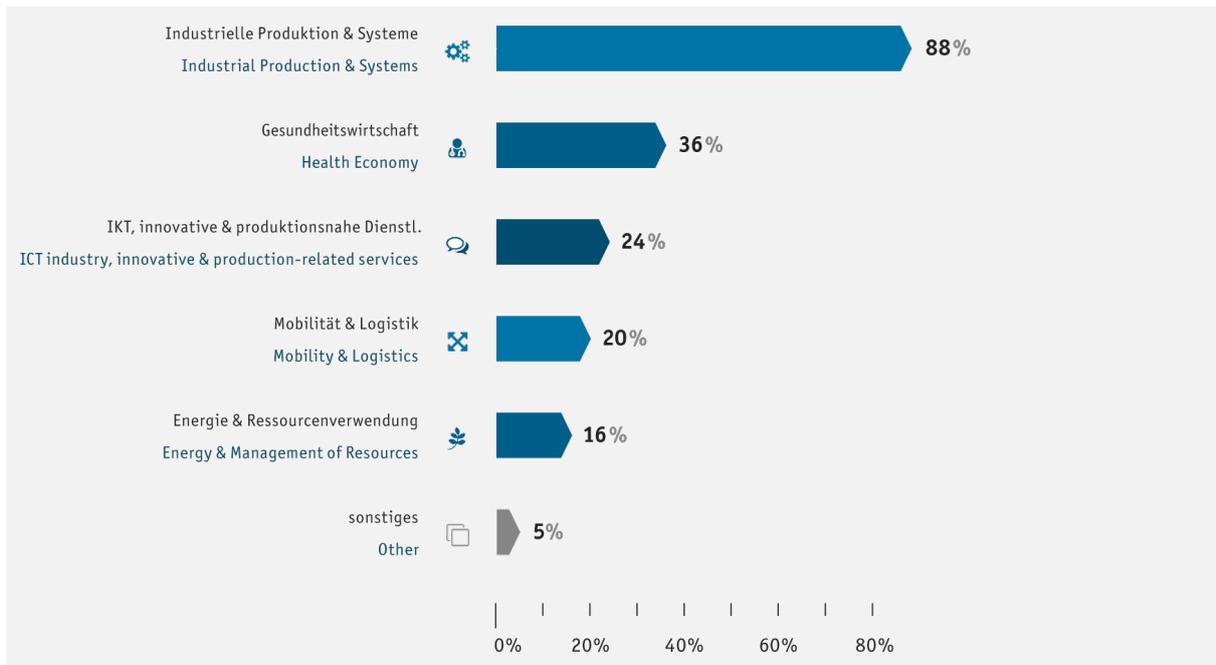


Abbildung 44 Einsatzgebiete der Produkte Thüringer Optik- und Photonikunternehmen¹⁴⁰
(Mehrfachnennung möglich)

Im Recyclingprozess spielt Messtechnik bei der Automatisierung, Prozesssicherheit und Qualitätsbewertung eine entscheidende Rolle. Die verschiedenen Verfahrensrouten haben individuelle Anforderungen hinsichtlich der zu bewertenden Parameter, sodass eine generelle und umfassende Übersicht zu den Messtechnologien an dieser Stelle nicht gegeben werden kann. Grundsätzlich lassen sich aber für die Stufen Sammeln/Sortieren, mechanische Aufbereitung sowie hydro- und pyrometallurgische Aufbereitung verschiedenste Technologien einsetzen.



Abbildung 45 Einsatzgebiete industrieller Messtechnik im Batterierecycling (Auswahl)

Expertengespräche zeigen auf, dass Messtechnikhersteller bereits seit Längerem Systeme für die Prozess- und Qualitätsbewertung in der Batterieherstellung entwickeln und international vermarkten. Das Batterierecycling ist als Einsatzfeld zukünftig sehr interessant, insbesondere für Unternehmen, die in vergleichbaren Branchen wie Metallindustrie und Bergbau Lösungen vorhalten. Generell werden daher zunächst

¹⁴⁰ Schmidt (25. Juni 2015).

Technologien und Produkte zum Einsatz kommen, die bereits entwickelt sind. Eine Eigenentwicklung für das Batterierecycling bedarf konkreterer Fragestellungen, die zum jetzigen Zeitpunkt aufgrund der fehlenden Recyclingstruktur nicht gegeben sind. Mit Blick auf die zukünftig zu erwartenden Kapazitäten könnte sich der Standort Thüringen in diesem Einsatzfeld eine internationale Spitzenposition erarbeiten. Vorbild können hier Beispiele aus den asiatischen Ländern geben. Insbesondere in China ist es gesetzlich verpflichtend, dass Batteriesysteme eine eigene digital erfassbare Kennzeichnung haben, um sie während des gesamten Lebenszyklus eindeutig identifizieren und bewerten zu können.¹⁴¹ Herstellerseitig bietet dies die Chance, individuelle und aggregierte Nutzungsdaten zu erfassen und in die Entwicklung einfließen zu lassen. Aus Blick des Entsorgers können Zellchemie und Aufbau schnell erfasst und entsprechend automatisiert einem spezifischen Demontage- und Aufbereitungsfahren zugeführt werden.

Besondere Chancen ergeben sich dabei beispielsweise in der Entwicklung von Systemen für die vorgelagerte Ausbaulogistik:

- Digitale Erkennung von Batterietyp und -zusammensetzung
- Digitale Track&Trace-Systeme
- Zustandsbewertung und Erfassung von Nutzungsdaten
- Schnittstellenmanagement zu Herstellerdaten
- Prozessintegrierte Mess- und Prüfsysteme

Herausforderungen:	Chancen:
<ul style="list-style-type: none"> • Unzureichende Marktreife in Europa • Unsicherheit über technologische Routen im Recycling 	<ul style="list-style-type: none"> • Partizipation am Marktwachstum • Transfer von Wissen aus anderen Geschäftsbereichen (Metall, Rohstoffe, Bergbau, Batterieherstellung) • Technologieführerschaft für ausgewählte Segmente entsprechend der Kernkompetenzen
Ausgewählte Unternehmen	
ams Sensors Germany GmbH Göpel Elektronik GmbH Carl Zeiss AG Docter Optics SE JENOPTIK Industrial Metrology Germany GmbH Optics Balzers Jena GmbH Mahr GmbH Photonic Sense GmbH	

Umwelt- und Verfahrenstechnik

Die Umwelt- und Verfahrenstechnik ist eine übergreifende Kategorie von Unternehmen und kann daher nur bedingt präzise von anderen Branchen wie dem Maschinen- und Anlagenbau abgegrenzt werden. Es sollen an dieser Stelle schwerpunktmäßig Unternehmen der Abwasserbehandlung sowie der Luft- und Filtertechnik verstanden werden. Die identifizierten Unternehmen zeichnen sich weniger durch eine klare

¹⁴¹ Retzer u. a. (30.07.2018), S. 31.

Branchenstruktur, sondern vielmehr durch zahlreiche innovative klein- und mittelständische Unternehmen aus.

Während in Europa gegenwärtig vor allem im Umicore-Prozess eine Verwertung über die pyrometallurgische Route vorgenommen wird, weisen sowohl die Entwicklungen in Asien als auch die wissenschaftlichen Einschätzungen darauf hin, dass eine stoffspezifischere Rückgewinnung mittels hydrometallurgischer Prozesse effizienter ist. Diese Prozesse sind allerdings von einem hohen Einsatz an Chemikalien sowie Wasser geprägt. Mit Blick auf die gesetzlichen Anforderungen bietet sich Thüringer Unternehmen in diesem Kompetenzfeld ein attraktiver Wachstumsmarkt.

»Neue Akteure werden das Spiel dominieren, die sich mit den Anforderungen von Gefahrstoffen besser auskennen.«

Recyclingexperte,
Expertengespräch am 15.10.2020

Das Land Thüringen verfügt über eine langjährige Kompetenz im Bereich Technischer Keramiken, welche in der Behandlung aggressiver chemischer Medien Einsatz finden. Die enge Verbindung zahlreicher Unternehmen zur Angewandten Forschung ermöglicht den Zugriff auf unikale Kompetenzen beispielsweise im Bereich der Nanofiltration industrieller Abwässer, der UV-Behandlung sowie der Wertstoffrückgewinnung. In der Abluftreinigung und Filtertechnik finden sich in der Region Unternehmen mit Erfahrungen in der Heißgasentstaubung sowie in der Phosphorrückgewinnung. Ein Transfer dieser Kompetenzen und Produkte verspricht auch in der hydro- und pyrometallurgischen Anwendung Entwicklungschancen.

Herausforderungen:	Chancen:
<ul style="list-style-type: none"> • Unzureichende Marktreife in Europa • Unsicherheit über technologische Routen im Recycling insbesondere in Bezug auf hydrometallurgische Prozesse 	<ul style="list-style-type: none"> • Partizipation am Marktwachstum in hydrometallurgischen Anwendungen mit hohem Energie- und Wassereinsatz • Hohe Anforderungen an Prozessreinheit und -sicherheit
Ausgewählte Unternehmen	
NESTRO Lufttechnik GmbH Schulz & Berger Luft- und Verfahrenstechnik GmbH Colandis GmbH R&R BETH GmbH HPS Filtertechnische Anlagen GmbH JAT Wasseraufbereitung u. Reinstwassertechnik Jena GmbH aqua consult Ingenieur GmbH	

Logistik

Die zentrale Lage Thüringens in Deutschland und Europa sowie die Nähe zu weiteren mitteldeutschen Zellherstellern bieten eine geeignete Grundlage für spezialisierte Logistikunternehmen, um von dem zukünftigen Wachstum des Batteriemarktes zu profitieren. Thüringen verfügt über optimale Verbindungen per Straße und Schiene. Thüringen ist der Autobahnknotenpunkt in Deutschland, was bereits viele führende Logistikunternehmen wie DHL, DB Schenker, Kühne + Nagel, BLG LOGISTICS, Dachser, Zalando, Fiege und KNV Zeitfracht angezogen hat. Zum anderen hat Thüringen das dichteste Schienennetz Europas im Verhältnis zur Einwohnerzahl. Diese bereits vorhandenen Logistikerfahrungen lassen sich gut für den notwendigen Transport der Antriebsbatterien in Thüringen und Deutschland umnutzen. Je nach zugrunde liegendem Szenario werden verschiedene Stufen des Recyclingprozesses zentral oder dezentral durchgeführt. Egal ob als eigenständiger Logistiker oder als Teil eines Rücknahmesystembetreibers sind die Anforderungen an den sicheren Transport von Batterien und ihren Komponenten mit hohen Auflagen verbunden (vgl. Abschnitt 5.4). Es ist daher noch nicht abzusehen, inwieweit in Thüringen ansässige Logistikdienstleister von dem sich entwickelnden Markt profitieren werden.

8 Potenziale und Handlungsempfehlungen

8.1 Einschätzung des Status

Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Einschätzungen aus der vorliegenden Studie aggregiert, eingeordnet und der Versuch unternommen, die zukünftige Entwicklung anhand von Szenarien vorzuzeichnen. Aus den technischen sowie rechtlichen Betrachtungen und insbesondere den Einschätzungen der befragten Unternehmen lassen sich einige Annahmen ableiten. Aufgrund der dynamischen Entwicklung in der Mobilität, dem politischen und wirtschaftlichen Zusammenspiel verschiedener internationaler Akteure sowie der technologischen und wissenschaftlichen Weiterentwicklung kann dies jedoch nur ein Ansatz sein, der kontinuierlich hinterfragt und aktualisiert werden muss.

Im Gegensatz zu den staatlich gesteuerten Recyclingstrukturen asiatischer Länder ist die **Recyclingstruktur für Antriebsbatterien in Deutschland nicht staatlich vorgezeichnet**. Dies führt dazu, dass eine standardisierte Recyclingroute fehlt und die Recyclingpfade dadurch **komplexer und kleinteiliger werden**.

Obwohl die gesetzliche Verantwortung zur Entsorgung beim Automobilhersteller als Inverkehrbringer liegt, ist in Deutschland aktuell **keine herstellerübergreifende Initiative** zum Recycling von Antriebsbatterien wahrnehmbar, an der sich Unternehmen orientieren können. Es fehlen **Branchenstandards zu Aufbau und Zusammensetzung von Batteriezellen und -systemen sowie definierte Anforderungen an mögliche Recyclate**, die in der Batterieherstellung wieder genutzt werden können.

In Verbindung mit der dynamischen Erforschung und Entwicklung neuer Zellchemien mit geringeren Gehalten an Kobalt und Nickel, längeren Lebensdauern sowie alternativen Batteriekonzepten (beispielsweise ASSB¹⁴²) führt dies bei zahlreichen Beteiligten der möglichen Recyclingkette zu einem hohen Maß an **Unsicherheit sowie mangelnder Investitionsbereitschaft**.

Die derzeit in Europa betriebenen Recyclinganlagen (Recyclingkapazitäten) sind trotz der geringen Dimensionierung wegen der unvollständigen Erfassung von Lithium-Ionen-Batterien nicht ausgelastet. Mit Blick auf die zukünftig zu erwartenden Mengen an Antriebsbatterien wird in Europa in 10 bis 20 Jahren der Bedarf an Recyclinganlagen mit höheren Kapazitäten entstehen. Aus diesem Grund müssen bestehende Anlagenkapazitäten deutlich hochskaliert werden. Darüber hinaus sind Rohstoffe aktuell preiswerter als Recyclate. Erst wenn Batterierecycling effizient und wirtschaftlich umgesetzt werden kann, können Recyclate preislich mit Rohstoffen konkurrieren. Alternativ kann der Gesetzgeber oder der Automobilhersteller eine Mindestmenge an recycelten Rohstoffen vorgeben.

Nur **durch politische und gesetzliche Rahmenbedingungen entsteht für Unternehmen ein Anreiz und eine langfristige Planungssicherheit**, die ein Recycling von Batteriematerialien auch wirtschaftlich attraktiv machen.

Für Zellhersteller ist die lokale Rückgewinnung von Aktivmaterialien aus Produktionsabfällen sowie Entwicklungsprodukten mittelfristig eine sinnvolle Strategie, um Entsorgungskosten zu senken. Dies muss aber mit der Strategie internationaler Zellhersteller, Prozesse zu vereinheitlichen und die Rohstoffversorgung zur Sicherung gleichbleibender Qualität für alle Niederlassungen gleich zu gestalten, abgeglichen werden.

In Thüringen fehlen aktuell Kompetenzen in der Recyclingkette von Antriebsbatterien. Dies betrifft insbesondere die hydro- und pyrometallurgische Aufbereitung der Aktivmaterialien. Der **Aufbau dieser**

¹⁴² All-Solid-State-Battery

Kompetenzen ist zeit- und kapitalintensiv, darüber hinaus konnten aktuell keine Unternehmen identifiziert werden, die in Bezug auf Größe, Kapitalkraft und Kompetenz diese Lücke füllen könnten.

Die Forschungslandschaft in Thüringen ist sehr vielfältig, verfügt aber aktuell über keine übergreifende Strategie, um überregional als Lösungsanbieter für Recyclingprozesse wahrgenommen zu werden. Im bundesweiten Vergleich sind die **Kompetenzen für die Erforschung** integrierter Recyclingketten in Thüringen noch **im Aufbau**. Fokussierte Forschung im Recyclingbereich könnte in Thüringen primär an universitären und außeruniversitären Einrichtungen durchgeführt werden. Zu berücksichtigen ist auch, dass es kaum FuE-Abteilungen größerer Konzerne in der Region gibt.

8.2 Szenarien und Potenziale

Es ist in den bisherigen Darstellungen deutlich geworden, dass die verschiedenen Akteure in der Kette unterschiedliche Interessen haben, sich mit dem Recycling von Batterien oder Batteriebestandteilen zu befassen. Aus den in Abschnitt 5 und 7 beschriebenen Akteuren spielen folgende eine herausragende Rolle: Inverkehrbringer der Antriebsbatterien, Zellhersteller sowie Rohstoffhersteller und Recyclingunternehmen. Tabelle 4 Akteure, Treiber und Strukturen für die Entwicklung von Recyclingstrukturen gibt einen Überblick über diese zentralen Akteure sowie deren Interessen und bildet die Basis für die Entwicklung von drei Szenarien.

Die **Batteriesystem- und Automobilhersteller** sind Akteure mit dem größten Handlungsdruck, da sie nach deutschem BattG und der europäischen Batterierichtlinie **als Inverkehrbringer** stark in die Pflicht genommen werden, Rücknahme und Recycling ihrer Produkte zu organisieren. Somit tragen die OEMs die Verantwortung für die Entsorgung des Großteils der Batterieproduktion. Ein weiterer Treiber ist die Rückgewinnung von Rohstoffen. Durch eine sozial und ökologisch vertretbare Gewinnung und gute Verfügbarkeit lassen sich wichtige Wettbewerbsvorteile erschließen. Um die Kosten für die Recyclingstrukturen ihrer Produkte gering zu halten, sind Automobilhersteller somit motiviert, möglichst effiziente und übergreifende Strukturen für das Antriebsbatterierecycling für ihre Marken zu errichten. Bisher ist dabei noch weitgehend offen, ob diese Aufgaben von den Unternehmen im weitesten Sinne selbst übernommen werden oder ob sich Partnerschaften bspw. mit Recycling- und Rohstoffunternehmen herausbilden.

Beim **Zellhersteller** fallen Ausschuss- bzw. Produktionsabfälle aus der Batterieproduktion an. Die Mengenangaben dafür reichen je nach Reifegrad des Produktionsprozesses von unteren einstelligen bis zweistelligen Prozentsätzen. Somit bilden diese für das jeweilige Unternehmen im Rahmen der Betriebskosten einen relevanten Anteil, stellen aber global betrachtet nur einen geringen Teil des Recyclingvolumens dar. Dennoch kann es für die Unternehmen sinnvoll sein, spezifische Recyclingrouten für ihre Materialien zu etablieren, da Produktionsabfälle qualitativ hochwertiger sind als End-of-Life-Produkte. Somit könnten mit recycelten Produktionsabfällen zum einen Erträge auf dem Rohstoffmarkt erzielt werden. Zum anderen könnten sie auch der eigenen Produktion zugeführt werden, was sowohl zur Rohstoffsicherung als auch zu Kostenreduzierung beitrüge. Da die Zellhersteller nicht unmittelbare Inverkehrbringer sind, haben sie keine gesetzliche Verpflichtung zum Recycling ihrer Produkte am Ende der Lebensdauer, es sei denn, sie gehen mit den OEMs in einen arbeitsteiligen Prozess. In jedem Teil herrscht eine enge Verzahnung mit den Batteriesystem- und Automobilherstellern, die im Rahmen ihrer Lastenheftspezifikation wesentliche Anforderungen definieren (z. B. Performance und Form der Zellen). Wegen der geringeren Stoffströme und der Position in der Verantwortungskette kann der Zellhersteller als ein Nebenakteur im Recyclingprozess von Batterien betrachtet werden. Für diesen kann, abhängig von der Kapazität, in gewissem Umfang der Aufbau lokaler Aufbereitungsanlagen sinnvoll sein. In jedem Falle ist die partnerschaftliche Beteiligung an Rücknahme- und Entsorgungsstrukturen mit Partnern wirtschaftlich relevant.

Tabelle 4 Akteure, Treiber und Strukturen für die Entwicklung von Recyclingstrukturen

		Inverkehrbringer (Automobil-OEMs und Batteriesystemhersteller)	Zellhersteller	Rohstoffunternehmen	Recyclingunternehmen
Treiber	Recyclingstrom	Rücknahme in Verkehr gebrachter Batterien und eigener Produktionsabfälle	Eigene Produktionsabfälle (geringer Anteil der Gesamtkapazität)	Schwarzmasse aus Vorprozessen	Batterien und Abfälle aus Sammlung
	Gesetzliche Anforderungen	Entsorgung von Altbatterien als Inverkehrbringer	Sichere Abfallentsorgung	Keine Verpflichtung definiert	Keine Verpflichtung definiert
	Rohstoff sicherung	Sicherung ökologischer Rohstoffbasis für eigene Produkte	Sicherung ökologischer Rohstoffbasis für eigene Produkte (nur geringer Anteil der Gesamtkapazität)	Sicherung ökologischer Gewinnung von Rohstoffen	Eigene wirtschaftliche Tätigkeit
	Unternehmerisches Interesse	Senkung Entsorgungskosten für eigene Produktionsabfälle und Altbatterien	Senkung Entsorgungskosten für eigene Produktionsabfälle	Senkung Rohstoffkosten und Erweiterung des Angebots um recycelte Rohstoffe	Steigerung Umsatz durch wirtschaftliche Tätigkeit
	Recyclingstruktur	Zentral (bspw. für eigene Marke)	Lokal (Kosten für eigene Produktionsabfälle + End-of-Life Systeme)	Zentral im Auftrag	Zentral im Auftrag

Rohstoff- und Recyclingunternehmen verstehen sich in der Recyclingkette im Wesentlichen als Dienstleister, die im Sinne ihrer eigenen Marktplatzierung Know-how und effiziente Prozesse zur Aufbereitung von Antriebsbatterien als Wettbewerbsvorteil entwickeln. Sie können diese Kompetenzen am Markt entweder frei anbieten bzw. strategische Partnerschaften beispielsweise mit Batteriesystem- und Automobilherstellern schließen. Für Rohstoffunternehmen kommt ein wesentlicher Aspekt hinzu. Insbesondere durch die Aufbereitung der Schwarzmasse können Rohstoffe wie Kobalt und Nickel zurückgewonnen werden, die teilweise unter ökologisch und sozial fragwürdigen Bedingungen gefördert werden. So kann ein Beitrag zur nachhaltigen Fertigung von Antriebsbatterien geleistet werden, wie beispielsweise die Aktivitäten der Unternehmen Umicore und BASF zeigen. Aus wirtschaftlicher Sicht profitieren Akteure in diesem Bereich von zentralisierten Organisationsformen mit einem hohen Recyclingvolumen. Dementsprechend lassen sich die Recyclingkapazitäten optimal auslasten.

Basierend auf den erläuterten Faktoren und Interessen der Einzelakteure erscheinen heute drei Szenarien für Recyclingstrukturen von Antriebsbatterien als relevant: **zentrales Rücknahmesystem**, **Recyclingcluster** und **lokale Recyclinganlagen** (siehe Tabellen 5 bis 7). Jedes der Szenarien ist aktuell denkbar und bringt jeweils verschiedene Implikationen mit sich. Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich Organisationsform, Struktur, Logistik, treibender Akteure, involvierter deutscher und thüringischer Unternehmen sowie Wertschöpfungstiefe an zentralen und dezentralen Standorten. Aufgrund der noch unklaren rechtlichen

und wirtschaftlichen Entwicklung, insbesondere hinsichtlich der EU-Gesetzgebung, besitzen alle drei Szenarien hypothetischen Charakter.

Tabelle 5 Szenario 1 – „Zentrales Rücknahmesystem“

Szenario 1 „Zentrales Rücknahmesystem“	
Charakterisierung	Herstellerübergreifendes, zentralisiertes Rücknahmesystem
Beschreibung	<p>In Szenario 1 wird der Auf- und Ausbau von Recyclingketten durch eine herstellerübergreifende Allianz der Automobil-OEMs vorangetrieben. Als verantwortliche Inverkehrbringer mit steigender Produktion etablieren die Automobilhersteller, getrieben durch gesetzliche Anforderungen, so eine sichere Entsorgung und innereuropäische Kreislaufwirtschaft.</p> <p>Dieses zentrale Rücknahmesystem organisiert, beispielsweise wie JARC in Japan, Sammlung, Recycling, Dokumentation und Finanzierung. Mit der Sammlung, Sortierung und Demontage vor Ort werden Dritte, wie Händler und Werkstätten, beauftragt. Die Batterien werden zu ausgewählten Recycling- und Rohstoffunternehmen in Europa transportiert und dort hydro- oder pyrometallurgisch aufbereitet und als Sekundärrohstoffe einer Wiedernutzung zugeführt.</p> <p>Die übergeordnete Organisation würde durch ein qualifiziertes Dokumentationssystem die entstehenden Kosten erfassen und mit den beim Autokauf gebildeten Rückstellungen decken. Diesem System könnten ebenfalls Produktionsausschüsse und -abfälle zugeführt werden. Die Kosten dafür wären durch die Hersteller zu tragen.</p> <p>Für die wirtschaftliche Umsetzung von Szenario 1 wären eine zunehmende Standardisierung und die Umsetzung der geplanten Kennzeichnungspflicht von Batterien (EU-Initiative für den „Battery Passport“) erforderlich, um die Entsorgungskomplexität und -kosten zu reduzieren. Insbesondere große Rohstoff- und Recyclingunternehmen hätten in diesem Szenario Investitionssicherheit und könnten Skaleneffekte maximal ausnutzen. Gleichzeitig gibt Szenario 1 Automobil-OEMs die Möglichkeit, anfallende Nutzungsdaten auszulesen und in die Produktentwicklung zurückfließen zu lassen.</p>

Tabelle 6 Szenario 2 – „Recyclingcluster“

Szenario 2 „Recyclingcluster“	
Charakterisierung	Automobil-OEM-getriebene, unternehmensspezifische Recycling-Cluster
Beschreibung	<p>In Szenario 2 entstehen, beispielsweise in Deutschland oder Europa, von Einzelakteuren getriebene Cluster, in denen Automobil-OEMs ggf. in Kooperation mit Recycling- und Rohstoffunternehmen geschlossene Wertstoffkreisläufe für ihre Produkte organisieren. Durch solche Recycling-Cluster könnten auch unterschiedliche Bedürfnisse und Batteriezusammensetzungen adressiert werden.</p> <p>Die Rücknahme und Demontage werden dabei von den Marken-Händlern und -werkstätten vorgenommen. Die weitere Verarbeitung der Batteriesysteme erfolgt entweder im Konzern oder über Partnerschaften mit Recycling- und Rohstoffunternehmen.</p>

	<p>Szenario 2 bildet im Wesentlichen den bereits heute erkennbaren Trend ab, dass konzernspezifische Lösungen für die Entsorgung von Batteriesystemen gesucht werden. Dadurch können angepasste, effiziente Prozesse aufgebaut werden, die den OEMs weiterhin Zugriff auf Rohstoffe und Lebensdauerdaten der Batterien ermöglichen. Eine umfassende Standardisierung ist hier nicht erforderlich.</p> <p>In Szenario 2 entstehen mittlere Aufbereitungskapazitäten. Um aus den Schwarzmassen Rohstoffe zurückzugewinnen, können ggf. clusterübergreifende Allianzen gebildet werden, wobei die Sekundärrohstoffe entweder seitens der gebundenen Zellhersteller oder von Rohstoffunternehmen abgenommen werden. Die Finanzierung über Rückstellungen beim Verkauf und die Dokumentation würde durch die jeweiligen Cluster selbst organisiert und wäre auf die spezifischen Batterietypen der Automobilhersteller fokussiert. Die Planungssicherheit für Recycling- und Rohstoffunternehmen wäre aufgrund kleinerer Altbatteriemengen geringer als in Szenario 1.</p>
--	---

Tabelle 7 Szenario 3 – „Lokale Recyclinganlagen“

Szenario 3 „Lokale Recyclinganlagen“	
Charakterisierung	Aufbau lokaler Recyclingstrukturen
Beschreibung	<p>In Szenario 3 entstehen lokale Recyclinganlagen, die frei am Markt agieren und beispielsweise relevante Mengen von Produktionsausschüssen und -abfall von Zellherstellern, Altbatterien von Inverkehrbringern (auch aus anderen Branchen) oder in der kommunalen Entsorgung anfallende Gerätebatterien recyceln. Diese Strukturen sind nicht notwendiger Weise an zentrale Rücknahmesysteme gebunden.</p> <p>Gerade für Zellhersteller, die unverbrauchte Materialien aus der Produktion kostengünstig entsorgen müssen, kann eine separate Aufbereitung sinnvoll sein, weil die wenig kontaminierten Stoffströme effizientere Prozesse erlauben. Allerdings ergeben sich hierbei verglichen mit Szenarien 1 und 2 durch den Fokus auf Produktionsausschüsse und -abfälle lokal geringere Stoffströme. Die Wirtschaftlichkeit dieses Szenario hängt wesentlich davon ab, ob in diesen Maßstab Recyclinganlagen profitabel betrieben werden können.</p> <p>Die Tiefe der Aufbereitung in lokalen Recyclinganlagen wird stark von den Stoffmengenströmen abhängen. Ggf. werden für Wertschöpfungsschritte wie die hydro- oder pyrometallurgische Aufbereitung von Schwarzmasse Partnerschaften mit Rohstoffunternehmen eingegangen.</p> <p>Dieses Szenario kann einzeln oder neben den beiden anderen Szenarien existieren. Es profitiert von seiner Flexibilität gegenüber spezifischen Kundenbedürfnissen und der Offenheit gegenüber anderen Marktsegmenten jenseits der Automobilbranche. Auf diese Weise könnten auch mehrere parallele wettbewerbliche Rücknahmesysteme entstehen, die dezentral Sammlung, Sortierung und Demontage organisieren.</p>

Im Überblick unterscheiden sich die Szenarien klar durch die treibenden Akteure, deren primäre Motivation sowie die technische, logistische und betriebswirtschaftliche Ausgestaltung.

Tabelle 8 Übersicht über mögliche Szenarien

	„Zentrales Rücknahmesystem“	„Recyclingcluster“	„Lokale Recyclinganlagen“
Treiber	Allianz von Automobil-OEMs und Batteriesystemherstellern	Einzelne Automobil-OEMs und Batteriehersteller	Zellhersteller, lokale Aufbereitungsunternehmen , andere Branchen
Motivation	Gesetzgebung, Rohstoffsicherung, Kostenreduktion	Gesetzgebung, Rohstoffsicherung, Kostenreduktion	Lokale Schließung von Stoffkreisläufen, Kostenreduktion
Struktur	europäisch , ggf. national	national oder europäisch	lokal
Logistik	Mittlere bis lange Wege, höhere Logistikkosten	Mittlere Wege, mittlere Logistikkosten	Kurze Wege, geringe Logistikkosten
Technologische Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Anfall sehr unterschiedlicher Batterietypen • Unspezifische Demontage-, Trenn- und Aufbereitungsprozesse • Große Aufbereitungskapazitäten • Hohe Skaleneffekte 	<ul style="list-style-type: none"> • Anfall bekannter Batterietypen • Spezifischere Demontage-, Trenn-, und Aufbereitungsprozesse 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Flexibilität erforderlich, ggf. nicht komplette Fertigungstiefe umsetzbar • Anfall aus Zellherstellung vergleichbar sortenrein → hochspezifische Trenn- und Aufbereitungsprozesse möglich (durch genaue Kenntnis der Materialzusammensetzung)
Betriebswirtschaftliche Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • „Economies of scale“ durch: <ul style="list-style-type: none"> - Effiziente logistische Organisation - Große Anlagenkapazitäten • Bedarf für Standardisierung und Kennzeichnung 	<ul style="list-style-type: none"> • Effizienteres Wirtschaften durch höhere Spezialisierung möglich • Geringere Skalierungseffekte 	<ul style="list-style-type: none"> • Ggf. effiziente Kostenstruktur durch sehr spezifisches Recycling • Höhere CAPEX- und OPEX¹⁴³

Neben strukturellen und politischen Fragen ist die Umsetzung der drei Szenarien auch dadurch beeinflusst, wie spezifisch Recyclingprozesse für Antriebsbatterien zukünftig gestaltet werden können und müssen. Große Volumina an Batterien, wie in Szenario 1 zu erwarten, bieten erhebliche Chancen, um Strukturen zu optimieren, Standards einzuführen, Dokumentationen zu vereinheitlichen und durch entstehende Skaleneffekte kostengünstiger zu recyceln. Andererseits muss in einem zentralen Rücknahmesystem das gesamte Spektrum an Geometrien und Batteriechemien verarbeitet werden. Die Recyclingprozesse werden dadurch komplexer. Insbesondere Szenario 1 könnte zukünftig dabei von der Europäischen Initiative zur Einführung des „Battery Passport“ profitieren. Hier sollen wichtige Informationen beispielsweise zur Batteriechemie für jedes Batteriesystem hinterlegt werden. Bilden sich, wie in Szenario 2, Recyclingcluster für konzernspezifische Batterietypen, können Recyclingprozesse speziell abgestimmt und damit effizienter gestaltet werden. Im Szenario 2 übernehmen der Automobil-OEMs eine führende Rolle. Ein großer Vorteil dieser Konstellation ist, dass Materialkreisläufe konzernspezifisch mitgedacht und umgesetzt werden können. Lokal agierende Recyclinganlagen, wie in Szenario 3, müssen einerseits flexibel und wandlungsfähig sein, um am Markt

¹⁴³ Als CapEx (Capital Expenditures) werden Investitionsausgaben für längerfristige Anlagegüter bezeichnet, wie Maschinen, Gebäude, aber auch die Erstausrüstung. Als OPEX (operational expenditures) werden die Betriebsausgaben auf die laufenden Ausgaben für einen funktionierenden operativen Geschäftsbetrieb bezeichnet.

passgenaue Dienstleistungen anbieten zu können. Andererseits können aber auch für spezifische Kunden mit gleichbleibender Qualität der Stoffströme (z. B. Zellhersteller) sehr spezifische und effiziente Prozesse etabliert werden, weil alle verwendeten Materialien und Zusammensetzungen bekannt sind. Große Nachteile einer lokalen Lösung sind jedoch geringe Volumina und hohe CAPEX- und OPEX-Kosten.

Auswirkung der Szenarien auf Thüringen

Betrachtet man die Szenarien, ergeben sich für den Freistaat Thüringen unterschiedliche Handlungsspielräume und Möglichkeiten, durch eigene vertiefte Wertschöpfung von diesen prognostizierten Entwicklungen zu profitieren.

In Szenario 1 kann Thüringen die Bildung der Recyclingstrukturen nach Maßgabe des zentralen Rücknahmesystems abwarten und die Bedarfsfelder vorbereiten. Thüringer Akteure in Sammlung, Transport und Recycling bzw. Entsorgung können Aufträge als Auftragnehmer ausführen und sich auf zentrale Ausschreibungen bewerben.

Gründen Automobil-OEMs wie in Szenario 2 spezifische Recyclingcluster, kann Thüringen als politischer Akteur deren Ausbildung forcieren und mitgestalten. Außerdem können regionale Kompetenzträger strategisch unterstützen und tätig werden bzw. sich durch Ausbildung und Förderung beteiligen.

Sowohl in Szenario 1 und 2 demontieren Werkstätten bzw. Händler mit Werkstätten die Antriebsbatterien der Endnutzer und lagern diese bis zu einer mehr oder weniger zentral organisierten Sammlung. Der Aufbau von regionalen Recyclinganlagen ist in den Szenarien 1 und 2 möglich, im Recyclingcluster aber wahrscheinlicher.

In Szenario 3 werden lokale Strukturen für die dezentrale Entsorgung von Produktionsabfällen und Altbatterien genutzt. Dieses Szenario kann für Thüringen im Zusammenhang mit der bereits ansässigen EAS und der Ansiedlung von CATL interessant sein, da auf dieser Basis Produktionsabfälle und -ausschuss lokal behandelt werden können, sofern die Unternehmen dies im Rahmen der Verpflichtung zur Entsorgung der Produktionsabfälle wünschen. Prinzipiell stehen den Unternehmen aber auch alle anderen bekannten Wege, lokal oder international, offen. In welcher Konfiguration lokale Recyclingstrukturen spezifisch für Produktionsabfälle für Zellhersteller wirtschaftlich sinnvoll sind, muss immer anhand der jeweiligen Stoffströme ermittelt werden. Die Machbarkeit einer lokalen Recyclinglösung müsste daher mittels einer Wirtschaftlichkeitsanalyse geklärt werden.

Tabelle 9 Schwerpunkte, Rollen und Beteiligte Akteure in Thüringen anhand der drei Szenarien

	„Zentrales Rücknahmesystem“	„Recyclingcluster“	„Lokale Recyclinganlagen“
Mögliche Schwerpunkte in Thüringen	Sammlung, Sortierung, Demontage von Altbatterien, lokale Aufbereitung bis zur Transportfähigkeit	Sammlung, Sortierung, Demontage von Altbatterien, lokale Aufbereitung (In Mitteldeutschland: mechanische Aufbereitung, hydrometallurgische Aufbereitung)	Mechanische Behandlung, lokale Aufbereitung bis zur Transportfähigkeit und potenziell: pyro- und hydrometallurgische Aufbereitung
Rolle Thüringer Akteure	<ul style="list-style-type: none"> • Akteure in Sammlung, Transport, Recycling/Entsorgung führen Aufträge als Auftragnehmer aus • Werkstätten und Händler bauen Antriebsbatterien aus und lagern diese • Thüringen kann Standort einer Recyclinganlage sein 	<ul style="list-style-type: none"> • Thüringen kann Kompetenzträger in Recyclingcluster eingliedern • Werkstätten und Händler bauen Antriebsbatterien aus und lagern diese • Thüringen kann Standort einer Recyclinganlage sein 	<ul style="list-style-type: none"> • Wirtschaftlichkeitsanalyse von lokalen Recyclingstrukturen • Vernetzung potenzieller Akteure • Thüringen kann Standort für Recyclinganlage sein
Beteiligte Akteure in Thüringen	<ul style="list-style-type: none"> • Werkstätten/Händler • (Entsorger) • Recyclingunternehmen • Logistikunternehmen • Batteriehersteller • (Zellhersteller) • Forschung und Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> • Werkstätten/Händler • Entsorger • Logistikunternehmen • (Recyclingunternehmen) • Batteriehersteller • (Zellhersteller) • Forschung und Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> • Werkstätten/Händler • Entsorger • Logistikunternehmen • Recyclingunternehmen • Zellhersteller • Forschung und Entwicklung
	Vorbereiten	Mitgestalten	Mitgestalten und vorangehen

Alle drei Szenarien bedingen auch unterschiedliche **Chancen für Unternehmen**, die nicht direkt im Recyclingprozess involviert sind, aber über **spezifische technologische und technische Kompetenzen** verfügen. Insbesondere Akteure aus den Kompetenzfeldern (Sonder-)Maschinen- und Anlagenbau, Messtechnik oder Automatisierung könnten eine Vorreiterrolle und Innovationsführerschaft bei der Entwicklung der notwendigen Anlagen und Systeme übernehmen, welche sich dann international vermarkten ließen. Thüringen verfügt über unikale Kompetenzen im Bereich der Messtechnik, des Recyclings von Kunststoffen und Metallen sowie der Automatisierung und des Sondermaschinenbaus. Diese sind **zukünftig in der weltweiten Entwicklung/Vermarktung von Recyclingprozessen gefragt und sollten aktiv gefördert werden**. Je nach Szenario können diese Chancen unterschiedlich durch die Landespolitik beeinflusst werden. Besondere Chancen bestehen dabei im Szenario 3, bei der herstellernah durch erste Demonstrationsversuche neue Technologien erprobt werden können. Der Aufbau solcher **Know-how- und Demonstrationszentren** kann aktiv gefördert und durch entsprechende Maßnahmen unterstützt werden. Bei Szenario 1 sowie 2 besteht eine größere Abhängigkeit von den Automobilherstellern sowie größeren Rohstoffunternehmen, welche in Thüringen nicht vertreten sind. Hier lassen sich entsprechende aktive Maßnahmen schwerer gestalten.

Demnach besitzt Thüringen besonders günstige Bedingungen für:

- Den Aufbau von **herstellernahen Aufbereitungsclustern für produktionsnahe Batteriebestandteile und -materialien** (Testen, Sortieren, Demontage, mechanische Aufbereitung bis zur Schwarzmasse)
- Eine **(inter-)national ausgerichtete vorgelagerte Demontagekompetenz** mit besonderem Fokus auf starker Automatisierung gestützt auf die vorhandenen Kompetenzen im

Maschinen- und Anlagenbau, Optik/Sensorik sowie in der Forschung (digitale Erkennung, Schnittstellen zu Herstellerdaten, Zustandsbewertung, Tiefentladung → Erzielen von Transportfähigkeit, Produkte für Vor-Ort-Entladung und Batteriesortierung)

- Die Entwicklung von **prozessintegrierten Mess- und Prüfsystemen** sowie **digitalen Erfassungssystemen (Track & Trace)** für den gesamten Batterielebenszyklus

8.3 Handlungsempfehlungen

Sensibilisierung der Wirtschaft und Qualifizierung

Aus der Unternehmensbefragung wird deutlich, dass die wirtschaftlichen Akteure ein hohes Maß an Unsicherheit empfinden. Vergleichbar zur Umsetzung der Elektromobilitätsstrategie bedarf es politischer Maßnahmen, diese **Unsicherheiten abzubauen**. Ein klares Bekenntnis, die Bedarfsfelder bestmöglich auf den steigenden Anfall von Antriebsbatterien vorzubereiten und den Kompetenzfeldern die Chancen für eigene Wertschöpfung aufzuzeigen, ist entscheidend. Im ersten Schritt seien hier Kommunikations- und Sensibilisierungsmaßnahmen durch Fachdialoge, Roadshows ebenso wie konkrete Handreichungen zu den gesetzlichen Rahmenbedingungen zu nennen. Dafür gilt es, bestehende Netzwerke, Kammern und Multiplikatoren frühzeitig einzubinden, als Träger zu benennen und in ihren Maßnahmen zu unterstützen.

Es wird angenommen, dass insbesondere die kleinsten Struktureinheiten auf lokaler Ebene, allen voran **Werkstätten und Händler**, als erstes mit einer steigenden Anzahl von Elektrofahrzeugen und Altbatterien konfrontiert sein werden. Der Umgang mit Gefahrstoffen bei der Reparatur, Lagerung und Sammlung stellt nicht nur finanziell eine Herausforderung für diese Unternehmensgruppe dar, sondern auch mit Blick auf die Qualifikation der Mitarbeiter. Ein umfassendes **Qualifizierungsprogramm sowie Maßnahmen zur Unterstützung von Investitionen** (Batterielagerung, Ausstattung der Werkstätten), getragen von Verbänden und Kammern, kann diese Unternehmen frühzeitig vorbereiten.

Politische Maßnahmen

Die hier vorliegende Studie kann nur als erster Auftakt und Statusbericht verstanden werden, der zu weiteren tiefergehenden Betrachtungen animieren sollte. Dem deutlichen Nachholbedarf im Kompetenzaufbau sowie der wirtschaftlichen Strukturen stehen unikale Standortfaktoren sowie ein zeitlicher Vorsprung bei der Ansiedlung von Zellherstellern gegenüber. Es gilt nun möglichst zügig, einen **interministeriellen Dialog** zu starten, um eine **eigene Position des Freistaats zu erarbeiten**. Denkbar wäre eine fachübergreifende TaskForce unter Einbezug relevanter Experten und Forschungseinrichtungen zur Erarbeitung einer Roadmap. In der Fortführung der RIS3-Strategie sollte das Thema Batterierecycling weiterverfolgt und noch deutlicher hervorgehoben werden. Nur so können die Standortvorteile bei der dynamischen Entwicklung in wirkliche Wertschöpfungspotenziale überführt werden.

Die entstehenden industriellen Strukturen im Batterierecycling sind komplex und bedürfen deutlicher Kapitalaufwände. Es liegt nahe, dass wirtschaftlich stärkere Regionen in Deutschland dies schneller bereitstellen können. Die Region Mitteldeutschland sollte sich daher ihrer gemeinsamen Chancen bewusstwerden, die ein einzelnes Bundesland schwer aufbringen kann. **Es wird daher empfohlen, frühzeitig eine mitteldeutsche Initiative ins Leben zu rufen**, die die Kompetenzen der einzelnen Bundesländer gezielt zusammenführt und so ihre Standortvorteile wie hohes Flächennutzungspotenzial, Verfügbarkeit erneuerbarer Energien, angesiedelte Zellhersteller im bundesdeutschen Wettbewerb gemeinsam ausspielt. Eine solche Kooperation könnte gemeinsam auf verschiedenen Stufen politischer und wirtschaftlicher Arbeit aktiv werden. Besonders zu empfehlen ist eine frühzeitige Beteiligung an politischen und Forschungsinitiativen im europäischen Kontext.

Aufbau von Know-how

Nur wenige Unternehmen und Forschungseinrichtungen verfügen aktuell über ausreichende Kompetenzen, die gezielt in der Wertschöpfung des Batterierecyclings eingebunden werden können. Diese **Kompetenzen** gilt es zu bündeln und durch gezielte Unterstützung auszubauen. Bestehende Ansätze wie das ThiWert sollten gestärkt werden. Im nächsten Schritt können fokussierte **Demonstrationsvorhaben** Unsicherheiten hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit, möglicher Technologierouten und der Potenziale der eigenen Produkte abbauen. Für Unternehmen und Forschungseinrichtungen bilden solche Demonstrationsvorhaben einen Nukleus, um ihre Kompetenzen gezielt auf die Anforderungen hin weiterzuentwickeln und so Angebote für einen internationalen Absatz zu erarbeiten.

9 Literaturverzeichnis

Accurec Recycling GmbH (04.12.2020): Lithium – Accurec Recycling GmbH, URL: <https://accurec.de/lithium>, Stand: 4. Dezember 2020.

Agentur für Erneuerbare Energien (2016): Bundesländer-Übersicht zu Erneuerbaren Energien. Anteil Erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch (2016, in %), URL: https://www.foederal-erneuerbar.de/uebersicht/bundeslaender/BW|BY|BB|HB|HH|HE|MV|NI|NRW|RLP|SL|SN|ST|SH|TH|D/kategorie/energiemix/auswahl/289-anteil_erneuerbarer_/jahr/2016/#goto_289, Stand: 17. November 2020.

Agentur für Erneuerbare Energien (20.12.2019): Renewables Kompakt: Bundesländervergleich Erneuerbare Energien 2019: Zusammenfassung der Ergebnisse.

Allied Market Research (04.12.2020): Graphite Market Size, Share| Industry Analysis & Forecast, 2027, URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/graphite-market>, Stand: 4. Dezember 2020.

Alves Dias, Patricia et al. (2018): Cobalt. Demand-supply balances in the transition to electric mobility, Luxembourg.

Ammermann, Heiko u. a. (März 2011): Trendatlas. Endbericht - Freistaat Thüringen, Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Technologie.

Ammon, Martin u. a. (2013): „Umweltfreundliche Energien und Energiespeicherung“ in Thüringen. Potentialanalyse – Endbericht.

Argus Media group (28.03.2020): Large lithium battery plants to dominate capacity, URL: <https://www.argusmedia.com/en/news/1874627-large-lithium-battery-plants-to-dominate-capacity>, Stand: 27. November 2020.

Bertau, Martin/Martin, Gunther (2019): Integrated Direct Carbonation Process for Lithium Recovery from Primary and Secondary Resources, in: Materials Science Forum, 959. Jg., S. 69–73.

BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (o.J.): Deutschland - Rohstoffsituation 2018, Hannover, Stand: 4. Dezember 2020.

Buchert, Matthias/Dolega, Peter/Degreif, Stefanie (16.01.2019): Gigafactories für Lithium-Ionen-Zellen. Rohstoffbedarfe für die globale Elektromobilität bis 2050.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (08.10.2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050.

Bundesverband ostdeutscher Banken e.V. (2018): Größenstruktur der Unternehmen in Thüringen. Mittelstand in Thüringen, URL: <https://ostbv.de/portfolio/mittelstand-wirtschaftsstandort-groessenstruktur-der-unternehmen-in-thueringen/>.

Busse, Alexander (28.05.2020): China als Leitmarkt für Elektromobilität – quo vadis?, in: Stiftung Energie & Klimaschutz vom 28.5.2020.

Chazan, Yigal (23.02.2019): China Rushes to Dominate Global Supply of Lithium. The Diplomat. Online: vom 23.2.2019.

Chemnitz Automotive Institute (10. September 2020): Europa löst die Handbremse bei der E-Mobilität.

Corsten, Hans/Gössinger, Ralf/Spengler, Thomas S. (Hrsg.) (2018): Handbuch Produktions- und Logistikmanagement in Wertschöpfungsnetzwerken, Berlin/Boston.

Danino-Perraud, Raphael (März 2020): The Recycling of Lithium-Ion Batteries. A Strategic Pillar for the European Battery Alliance, URL: <https://www.ifri.org/en/publications/etudes-de-lifri/recycling-lithium-ion-batteries-strategic-pillar-european-battery>, Stand: 19. November 2020.

Deign, Jason (11.09.2019): How China Is Cornering the Lithium-Ion Cell Recycling Market, in: Greentech Media vom 11.9.2019.

Deutsches Patent- und Markenamt (26.02.2020): Aktuelle Statistiken: Patente,, URL: <https://www.dpma.de/dpma/veroeffentlichungen/statistiken/patente/index.html>, Stand: 9. November 2020.

Die Bundesregierung (Juni 2020): Masterplan Ladeinfrastruktur der Bundesregierung. Ziele und Maßnahmen für den Ladeinfrastrukturaufbau bis 2030.

Diekmann, J. u. a. (2016): (Invited) Ecologically Friendly Recycling of Lithium-Ion Batteries - the LithoRec Process, in: ECS Transactions, 73. Jg., Nr. 1, S. 1–9.

Diekmann, Jochen u. a. (Oktober 2014): Vergleich der Bundesländer: Analyse der Erfolgsfaktoren für den Ausbau der Erneuerbaren Energien 2014. Indikatoren und Ranking.

Diekmann, Jochen u. a. (November 2019): Vergleich der Bundesländer: Vergleich der Bundesländer: Analyse der Erfolgsfaktoren für den Ausbau der Erneuerbaren Energien 2019. Indikatoren und Ranking.

DRÄXLMAIER Group (19.11.2020): Neuer Standort für Hochvolt-Batterie-Produktion, URL: <https://www.draexlmaier.com/detail/neuer-standort-fuer-hochvolt-batterie-produktion>, Stand: 19. November 2020.

Duesenfeld (2020): Savings of 4.8 t CO₂ per ton of recycled batteries - Duesenfeld, URL: https://www.duesenfeld.com/recycling_en.html, Stand: 7. Dezember 2020.

Duffner, F. u. a. (2020): Battery cost modeling: A review and directions for future research, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 127. Jg., S. 109872.

EAS Batteries (27.11.2020): Wegweisende Produkte, URL: <https://eas-batteries.com/de/innovationsfabrik/wegweisende-produkte>, Stand: 27. November 2020.

EL-Cell GmbH (12. Oktober 2017): Lithium metal dendrites: Pictures speak louder than words, URL: <https://el-cell.com/lithium-metal-dendrites-pictures-speak-louder-than-words/>, Stand: 27. November 2020.

Elektroauto-News.net (07.09.2018): Japanische Automobilhersteller gehen gemeinsam Batterie-Recycling an, in: Elektroauto-News.net vom 7.9.2018.

Elektroauto-News.net (08.06.2020): CATL plant Angebote für Tausch und Wartung von Elektroauto-Batterien, in: Elektroauto-News.net vom 8.6.2020.

Energy Central (2020): World Battery Production, URL: <https://energycentral.com/c/ec/world-battery-production>, Stand: 27. November 2020.

Envites Energy - Gesellschaft für Umwelttechnik u. Energiesysteme mbH (27.11.2020): Batterien und Systeme, URL: <https://www.envites.de/batterien-und-systeme>, Stand: 27. November 2020.

Europäische Kommission (29.01.2020): Arbeitsprogramm der Europäischen Kommission für 2020: ein ehrgeiziger Fahrplan für eine Union, die mehr erreichen will.

Farjana u. a. (2019): Life cycle assessment of cobalt extraction process.

Fastmarkets (04.12.2020): Lithium price spotlight - Weekly price updates | Fastmarkets, URL: <https://www.fastmarkets.com/commodities/industrial-minerals/lithium-price-spotlight>, Stand: 4. Dezember 2020.

Feßler, Hendrik (2017): Das neue EEG 2017 (23): Behandlung von Speichern - PwC Auf ein Watt, URL: <https://blogs.pwc.de/auf-ein-watt/regulierung-energierecht-energiesteuern/das-neue-ee-2017-behandlung-von-speichern/1874/>, Stand: 19. November 2020.

Fraser, Gray (2015): Environmentally Sound Management of End-of-Life Batteries from Electric-Drive Vehicles in North America.

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2015): Gute Entwicklung. Gute Aussichten. Thüringer Mittelstandsbericht. Mittelstandsbericht Thüringen 2015.

Friedrich, Bernd/Träger, Thomas/Weyhe, Reiner (29.11.2012): Recyclingtechnologien am Beispiel Batterien. 25. Aachener Kolloquium Abfallwirtschaft am 29. November 2012 im Forum M (Mayersche Buchhandlung) in Aachen, URL: https://www.researchgate.net/publication/305392142_Recyclingtechnologien_am_Beispiel_Batterien.

Geilen, Maximilian (28.08.2020): Batteriezellfertigung in Deutschland (August, 2020), in: Battery-News.de vom 28.8.2020.

GEM (19.11.2020): Battery Material and Raw Material, URL: <http://en.gem.com.cn/index.php/xinchanpin/>, Stand: 19. November 2020.

Global Market Insights, Inc. (Mai 2020): Lithium Ion Battery Market Outlook 2020-2026, URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/lithium-ion-battery-market>, Stand: 27. November 2020.

Graf, Alexandra u. a. (2019): Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. Grundlagen und Anwendungsbeispiele aus dem Förderprojekt LINOx BW, URL: <https://www.e-mobilbw.de/service/publikationen>, Stand: 30. November 2020.

Hamann, Carl H./Vielstich, Wolf (1998): Elektrochemie, 3. Aufl.

Hunstadt, Daniel (09.2019): Batteriespeicher. Mit gebrauchten Akkus das Stromnetz stabilisieren, URL: <https://future.hamburg/project/batteriespeicher/>.

Institut für Seltene Erden und strategische Metalle e.V. (04.12.2020): Nickel Preis, Vorkommen, Gewinnung und Verwendung | Institut für Seltene Erden und strategische Metalle e.V., URL: <https://institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/basismetalle/nickel/>, Stand: 4. Dezember 2020.

Japan Automotive Recycling Promotion Center (JARC) (19.11.2020): JARC as recycling fund management center, URL: <https://www.jarc.or.jp/en/recycling/flow/>, Stand: 19. November 2020.

Jentsch, Bernd (04.11.2019): Bolivien stoppt Lithium-Projekt - Firma aus Thüringen betroffen, in: Thüringer Allgemeine vom 4.11.2019.

Jentsch, Bernd/Grosser, Dietmar (30.04.2015): Zwei Thüringer Firmen planen Lithium-Anlage in Bolivien. Sondershausen. In Südamerika setzt man auf den Sachverstand Thüringer Forscher. vom 30.4.2015.

Jiao, Na (2018): China Tower can 'absorb' 2 million retired electric vehicle batteries, URL: <https://www.id-techex.com/de/research-article/china-tower-can-absorb-2-million-retired-electric-vehicle-batteries/15460>.

JOGMEC (2010): JOGMEC Annual Report 2010.

JX Nippon Mining & Metals (27.11.2020): Recycling and Environmental Services, URL: <https://www.nmm.jx-group.co.jp/english/company/industry/recycling/>, Stand: 27. November 2020.

Kushnir, Duncan (Dezember 2015): Lithium Ion Battery Recycling Technology 2015. Current State and Future Prospects, URL: http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/230991/local_230991.pdf, Stand: 27. November 2020.

Larouche, François et al. (2020): Progress and Status of Hydrometallurgical and Direct Recycling of Li-Ion Batteries and Beyond, in: Materials (Basel, Switzerland), Vol. 13, No. 3.

Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung Halle (IWH) (2019): Vereintes Land – drei Jahrzehnte nach dem Mauerfall., Halle (Saale).

Lv, Weiguang u. a. (2018): A Critical Review and Analysis on the Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries, in: ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 6. Jg., Nr. 2, S. 1504–1521.

Malik, Fabian u. a. (April 2019): Umweltwirtschaft in Thüringen. Leitmärkte, Zahlen und Fakten.

Marsh, Harry (1991): A tribute to Philip L. Walker, in: Carbon, 29. Jg., Nr. 6, S. 703–704.

Melin, Hans Eric (2019): State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries – A research review.

Meyring, Gerd (04.12.2020): Rohstoff Mangan – Reichtum vom Grund der Weltmeere, URL: <https://www.technik-einkauf.de/rohstoffe/rohstoffe-a-z/rohstoff-mangan-reichtum-vom-grund-der-weltmeere-100.html>, Stand: 4. Dezember 2020.

Miandi Group (19.11.2020): Hydro und Northvolt gründen Joint Venture, um das Recycling von Batterien für Elektrofahrzeuge in Norwegen zu ermöglichen, URL: <https://www.aviationaluminum.com/de/news/hydro-and-northvolt-launch-joint-venture-to-enable-electric-vehicle-battery-recycling-in-norway>, Stand: 19. November 2020.

Miningscout (2018): China baut Dominanz in der Kobalt-Branche aus, URL: <https://www.miningscout.de/blog/2018/12/04/china-baut-dominanz-in-der-kobalt-branche-aus/>, Stand: 24. November 2020.

Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (o.J.): Zahlen - Daten - Fakten (Auswahl). Personal in Forschung und Entwicklung, URL: <https://wirtschaft.thueringen.de/forschung-innovation-technologie/facts-figures/>, Stand: 17. November 2020.

Moore, Darrel (2020): 'World's largest' giga-scale lithium-ion battery recycling facility gets backing, URL: <https://www.circularonline.co.uk/news/worlds-largest-giga-scale-lithium-ion-battery-recycling-facility-gets-backing/>, Stand: 19. November 2020.

Mudd, Gavin M./Jowitt, Simon M. (2018): Growing Global Copper Resources, Reserves and Production: Discovery Is Not the Only Control on Supply, in: *Economic Geology*, 113. Jg., Nr. 6, S. 1235–1267.

Nakajima, Kenichi u. a. (2018): Global distribution of material consumption: Nickel, copper, and iron, in: *Resources, Conservation and Recycling*, 133. Jg., S. 369–374.

National Minerals Information Center (2017): Mineral Commodity Summaries 2017.

Neitzel, Dörte (3.6.2020): 10 Batteriehersteller mit besten Zukunftschancen, URL: <https://www.technik-einkauf.de/einkauf/id-10-batteriehersteller-mit-besten-zukunftschancen-129.html>, Stand: 27. November 2020.

Nicke, Katrin u. a. (November 2019): Batterierecycling als Beschäftigungsperspektive für die Lausitz. Ansätze einer arbeits- und beschäftigungsorientierten Regionalentwicklungsstrategie.

NORILSK NICKEL (2015): 2015 Annual report PJSC "MMC NORILSK NICKEL".

Northvolt (13.12.2019): Northvolt launches recycling program targeting 50 percent recycled material in new cells.

Northvolt (15.11.2020): Cell to cell: creating a circular European battery industry, URL: <https://northvolt.com/stories/industrializing-battery-recycling>, Stand: 19. November 2020.

Olivetti, Elsa A. u. a. (2017): Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals, in: *Joule*, 1. Jg., Nr. 2, S. 229–243.

Ostdeutscher Bankenverband e.V. (o.J.): Wirtschaftsentwicklung 2007 bis 2017 in Thüringen, URL: <https://ostbv.de/portfolio/mittelstand-wirtschaftsentwicklung-wirtschaftsentwicklung-2007-bis-2017-in-thueringen/>.

Pagliaro, Mario/Meneguzzo, Francesco (2019): Lithium battery reusing and recycling: A circular economy insight, in: *Heliyon*, 5. Jg., Nr. 6, e01866.

Plank-Wiedenbeck, Dr.-Ing. Uwe u. a. (August 2016): Ladeinfrastrukturstrategie für Elektrofahrzeuge des Freistaats Thüringen für die Jahre 2016-2020. Abschlussbericht, Weimar, Ilmenau.

Plank-Wiedenbeck, Dr.-Ing. Uwe u. a. (Juni 2018): Masterplan Elektromobilität für Thüringen 2030. Abschlussbericht.

Premium Market Insights (März 2019): Electric Vehicle Battery Recycling Market by Application (Electric Cars, Electric Buses, Energy Storage Systems, and Others). Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2018 - 2025, URL: <https://www.premiummarketinsights.com/reports-amr/electric-vehicle-battery-recycling-market>, Stand: 27. November 2020.

PureEnergy Materials (2017): Breakthroughs in Lithium Production: 21ST CENTURY MINES WILL BREAK NEW GROUND.

Ragnitz, Joachim (14. November 2018): Der Wirtschaftsstandort Thüringen: Positionen im Standortwettbewerb. Vortrag anlässlich der 25. Jahresveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft kommunaler Wirtschaftsförderer, Erfurt.

Retzer, Sandra/Huber, Martin/Wagner, Markus (30.07.2018): The-E-Mobility-Race-and-Chinas-Determination-to-Win---Measures-by-the-Chinese-government-to-accelerate-e-mobility-development. Measures by the Chinese government to accelerate e-mobility development, Beijing.

Richa, Kirti u. a. (2014): A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles, in: Resources, Conservation and Recycling, 83. Jg., S. 63–76.

Schlick, Thomas u. a. (2011): Zukunftsfeld Elektromobilität. Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen und Anlagenbau.

Schmidt, Daniel (25. Juni 2015): Wachstumsreport Photonik 2015.

Schubert, Torben u. a. (October 2011): Innovation indicator. Methodology report.

Smarter Fahren (2020a): Elektroauto zuhause laden: So geht's, URL: <https://www.smarter-fahren.de/elektroauto-zuhause-laden/>, Stand: 30. November 2020.

Smarter Fahren (2020b): Elektroauto: Akku wechseln statt laden?, URL: <https://www.smarter-fahren.de/wechsel-akku-elektroautos/>, Stand: 30. November 2020.

sonnen GmbH (31.08.2017 - 15:49): Netzdienstleistungen mit Batteriespeichern, URL: <https://sonnen.de/wissen/netzdienstleistungen-mit-batteriespeichern/>, Stand: 27. November 2020.

Stolze, Christian u. a. (August 2019): Forschungs- und Entwicklungspotenziale der Thüringer Energiespeicherbranche. Energiespeicherstudie für das Bundesland Thüringen.

Sumitomo Metal Mining Co., Ltd (27.11.2020): Recycling Business : Recycling of Precious Metals, URL: https://www.smm.co.jp/E/products/group/recycle_metal/, Stand: 27. November 2020.

Sun, Xin u. a. (2017): Tracing global lithium flow: A trade-linked material flow analysis, in: Resources, Conservation and Recycling, 124. Jg., S. 50–61.

Sun, Xin u. a. (2020): Insights into the global flow pattern of manganese, in: Resources Policy, 65. Jg., S. 101578.

Takehita, Hideo (2016): LIB Cell Materials Market Bulletin.

Thielmann, Axel u. a. (Dezember 2017): Energiespeicher Roadmap (Update 2017). Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien.

Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur GmbH (ThEGA) (2020): Elektromobilität in Thüringen, URL: https://www.thega.de/fileadmin/user_upload/Elektromobilit%C3%A4t/Elektromobilitaet-Thueringen-Infografik-2020.jpg, Stand: 20. November 2020.

Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur GmbH (ThEGA) (Juni 2020): Nachhaltige Mobilität in Thüringen, URL: https://www.thega.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Elektromobilit%C3%A4t/Nachhaltige_Mobilit%C3%A4t_Th-2020-Web-Einzelseiten.pdf, Stand: 20. November 2020.

Thüringer Landesamt für Statistik (o.J.): Zahl der Erwerbspersonen in Thüringen sinkt voraussichtlich bis 2040 um ein Viertel. Pressemitteilung 041/2020 vom 20. Februar 2020.

Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und digitale Gesellschaft (2019): Wirtschaftsstandort Thüringen. Zwischenbilanz und weitere Schritte.

Traud, Gertrud R. (September 2011): Die 100 größten Unternehmen in Thüringen.

trurnit GmbH (2020): Induktives Laden beim Elektroauto: Bereits serienreif » smarter-fahren.de, URL: <https://www.smarter-fahren.de/induktives-laden/>, Stand: 30. November 2020.

TÜV SÜD Akademie (19.11.2020): Kfz-Hersteller und Kfz-Zulieferer Weiterbildung, URL: <https://www.tuvsud.com/de-de/store/akademie/seminare-technik/elektromobilitaet-hochvolttechnik/kfz-hersteller-und-kfz-zulieferer>, Stand: 19. November 2020.

TÜV-Süd (25.11.2020): Zertifizierung für die Abfallwirtschaft, URL: <https://www.tuvsud.com/de-de/dienstleistungen/auditierung-und-zertifizierung/umwelt-und-nachhaltigkeit/efbv>.

U.S. Geological Survey (USGS) (04.12.2020): National Minerals Information Center, URL: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/>, Stand: 4. Dezember 2020.

Umweltbundesamt (27.10.2020): Altbatterien, URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altbatterien#geratebatteriemarkt-masse-der-lithium-sekundar-batterien-stieg-wie-im-jahr-zuvor-starker-als-jedes-andere-batteriesystem-an>, Stand: 27. November 2020.

Velázquez-Martínez u. a. (2019): On the Use of Statistical Entropy Analysis as Assessment Parameter for the Comparison of Lithium-Ion Battery Recycling Processes, in: Batteries, 5. Jg., Nr. 2, S. 41.

Velázquez-Martínez, Omar u. a. (2019): A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective, in: Batteries, 5. Jg., Nr. 4, S. 68.

Wang, Xue u. a. (2014): Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure, in: Resources, Conservation and Recycling, 83. Jg., S. 53–62.

Weyhe, Thomas/Friedrich, Bernd (März 2016): Demonstrationsanlage für kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Li-Ionen Batterien aus der Elektromobilität - EcoBatRec. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben.

Wirtschaft und Energie, Bundesministerium für (27.11.2020): Batterien „made in Germany“ – ein Beitrag zu nachhaltigem Wachstum und klimafreundlicher Mobilität, URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/batteriezellfertigung.html>, Stand: 27. November 2020.

Zeng, Xiaoqiao et al. (2019): Commercialization of Lithium Battery Technologies for Electric Vehicles, in: Advanced Energy Materials, Vol. 9, No. 27.

10 Anhang

10.1 Expertengespräche

KUSTAN GmbH

Roland Ernst (Vertriebsleiter)
Prof. Hermann-Klare-Straße 10
07407 Rudolstadt

CATT – Contemporary Amperex Technology Thuringia GmbH

Matthias Zentgraf, President CATL Europe
Robert-Bosch-Straße 1
99310 Arnstadt

EAS Germany GmbH

Michael Deutmeyer (Geschäftsführer)
Lokomotivenstraße 21
99734 Nordhausen

TSR Recycling GmbH & Co. KG

Marina Dankert (Regionalleiterin Südost)
Im Gewerbepark 1
07646 Stadtroda OT Bollberg

Thüringen Recycling GmbH

Lars Kossack (Geschäftsführer)
Am Fliegerhorst 2
99947 Bad Langensalza

BAC Entsorgungswirtschaft GmbH

Thomas Moritz (Vertriebsleiter/Prokurist)
Stotterheimer Straße 37A
99087 Erfurt

Thüringer Zentrum für Maschinenbau – TU Ilmenau

Dr. Andreas Patschger (Leiter)
Ehrenbergstraße 29
98693 Ilmenau

Elektrogeräteverwertung Göllingen GmbH

Uwe Peyer (Geschäftsführer)
Frankenhäuser Straße 64
99706 Sondershausen

Thüringer Innovationszentrums für Wertstoffe (ThiWert) – FH Nordhausen

Jantje Samtleben (Leiterin)
Helmestraße 94
99734 Nordhausen

Thüringer Clustermanagement – Spezialisierungsfeld Nachhaltige Energie und Ressourcenverwendung

Dr. Michael Bär (Leiter Spezialisierungsfeld)
Mainzerhofstraße 12
99084 Erfurt

Recycling-Cluster wirtschaftsstrategischer Metalle REWIMET e.V.

Dr. Dirk Schöps (Leiter Geschäftsstelle)
Leibnizstraße 23
38678 Clausthal-Zellerfeld

m&k gmbh

Gregor Müller (Geschäftsführer)
Im Camisch 49
07768 Kahla

CUTMETALL Recycling Tools Germany GmbH

Jakob Mangold (Geschäftsführer)
Am Eichgraben 8
98673 Eisfeld

NOBRA GmbH

Frederik Brand (Unternehmensnachfolger)
Sandfeld 16
98639 Rippershausen

Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH

Dr. Robert Zarnetta (Head of Field of Business; Industrial Microscopy Solutions, X-ray Microscopy)
Carl-Zeiss-Promenade 10
07745 Jena

10.2 Forschungseinrichtungen

AUGUST-KRAMER-INSTITUT, HS Nordhausen

Forschungsbereich Ingenieurwissenschaften, Umwelt- und Recyclingtechnik / Partner von ThiWert

Fokus: Interdisziplinäre und anwendungsorientierte ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen zu Aspekten der Ressourcen- und Energieeffizienz beantworten

Kompetenzen:

Werkstoff- und Verfahrenstechnik

- Stoffstrommanagement
- Recyclingverfahren und -systeme
- Elektrolysetechnik und Hydrometallurgie
- Recyclinggerechte Produktentwicklung

Projekte

- Innovationsbasierte Steigerung der Wertstoffrückgewinnung (InnoWert) (Projekt-Nr. 2017 FGR 0059): Das beantragte Vorhaben zur nachhaltigen Wertstoffrückgewinnung adressiert zwei wichtige Stoffströme mit hoher wirtschaftlicher und ökologischer Relevanz - Elektroaltgeräte und Baustoffe. Hierbei steht insbesondere das Recycling von Gips im Fokus, um Naturgipsvorkommen in Nordthüringen zu schonen.
- Thüringer Innovationszentrum für Wertstoffe (ThiWert) (Projekt-Nr.: 2016 IZN 0007): Ziel des entstehenden Thüringer Innovationszentrum für Wertstoffe ist es sowohl Prozesse und Produkte aus der Recyclingtechnik, als auch komplexe Recyclinganlagen und deren Anlagen-komponenten in modularer Bauweise aufzubauen, zu testen und zu optimieren.
- Projekt Leichtstoffrecycling – Unterdrucktrenner: Sortenreine Abtrennung flächiger Bestandteile (z.B. Folien) aus Abfällen des Dualen System Deutschland (DSD) mit hohem Wertstoffausbringen

Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Viktor Wesselak (Vizepräsident für FuE), Prof. Dr. Jürgen Poerschke, Dr.-Ing. Volker Asemann

Thüringer Innovationszentrum für Wertstoffe (ThiWert)

Kooperationseinrichtung der Hochschule Nordhausen, der Bauhaus-Universität Weimar (b.is) und des Instituts für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH (IAB), im Aufbau seit Frühjahr 2019

Fokus: Prozesse und Produkte aus der Recyclingtechnik, als auch komplexe Recyclinganlagen und deren Anlagen-komponenten in modularer Bauweise aufbauen, testen und optimieren.

Kompetenzen:

- Bündelung der Partnerkompetenzen zum Thema Wertstoff- und Kreislaufwirtschaft, u.a. Elektroaltgeräterecycling und Gipsrecycling
- FH Nordhausen Forschungsthemen: Sammelsysteme für Elektroaltgeräte, Li+-Batterien und deren sichere Entsorgung, Rückführung von gebrauchten Batterien

Projekte:

- ZIM-Projekt Entwicklung eines innovativen Multimetall-Separators zur Aufbereitung von Elektronikschrott aus dem Post-Consumer-Bereich
- Gipsrecycling als Chance für den Südharz – Nordhausen

Ansprechpartner: Prof. Dr. Ariane Ruff (Leitung Innovationszentrum), Jantje Samtleben (wissenschaftliche Leitung), Dr.-Ing. Christian Borowski

Bauhaus-Institut für zukunftsweisende Infrastruktur-systeme (b.is), Bauhaus-Universität Weimar

Bereiche: Professuren Biotechnologie in der Ressourcenwirtschaft, Siedlungswasserwirtschaft, Technologien urbaner Stromnutzung und Verkehrssystemplanung / Partner von ThiWert

Kompetenzen:

- Biologische Abfallbehandlung
- Abwassertechnik
- Materialforschungs- und -prüfung im Bereich Bau, Baustoffe

Projekte:

- INTERREG NWE BioRefine, "Recycling anorganischer Stoffe aus landwirtschaftlichen und bioindustriellen Abfallströmen", 05/2011 - 12/2015

Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kraft (Biotechnologie in der Ressourcenwirtschaft), Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke (Wissenschaftlicher Direktor Materialforschung)

Institut für Werkstofftechnik, TU Ilmenau

Bereiche: Fakultät für Maschinenbau, FG Anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe & Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Fokus: Kompetenzen und Lösungen in Fragen der Herstellung, Optimierung, Anwendung und Charakterisierung von Werkstoffen aller Art

Kompetenzen:

- metallische Werkstoffe und Verbundwerkstoffe
- anorganisch-nichtmetallischen Werkstoffe: Technologien, Verfahren und Anlagen zur Herstellung von innovativen Werkstoffen und Erzeugnissen auf den Gebieten Glas und Keramik, inklusive Rohstoffe und Recycling
- Energie und Spreichertechnik

Projekte:

- Entwicklung des Verfahrens und der Anlagentechnik zur kontaminationsminimierten Feinstzerkleinerung organischer Wirkstoffe auf der Basis des elektromechanischen Wirkprinzips (EMZ) (AiF ZIM-Koop)
- Verbesserung der Sicherheit durch neue Elektrolyte und Untersuchung der Degradationsmechanismen in Lithium-Ionen-Batterien

Ansprechpartner:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Edda Rädlein (Fachgebietsleiter)

Thüringer Energieforschungsinstitut (ThEFI), TU Ilmenau

Bereiche: FG Grundlagen von Energiematerialien, daran angeschlossen Zentrum für Energietechnik (ZET),

Fokus: Interdisziplinäre Forschung, Wissenstransfer und Forschungskompetenz auf dem Gebiet der elektrischen Energie-, Antriebs und Umweltsystemtechnik von den Grundlagen bis zur Anwendung zu intensivieren,

Kompetenzen: Energieerzeugung und -verteilung über die Energiespeicherung und -steuerung bis hin zur Energiewandlung in konkreten Anwendungsfelder

Projekte:

- Modulare Test- und Simulationsplattform für multimodale Energiesysteme
- Abtrennung von Stärke aus Abwasser der Nahrungsmittelindustrie zur Gewinnung von energiereichen Rohstoffen für alternative Energieverfahren

Ansprechpartner: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann (Leiter), M.Sc. Dipl.-Betriebswirtin (FH) Susan Oxfart (Leitung ZET)

Institut für Produktion, Transport, Umschlag und Lagern (proTUL), FH Erfurt

Fokus: Ansprechpartner für Forschen, Planen und Beratung u.a. im Feld Logistik

Kompetenzen: Materialflussplanung /-analyse und-simulation (Witness, eMPlant), Planung Lager- und Kommissioniersystemen

Projekte:

- Logistik-Konzept / Ablauforganisation, Kommissionierung
- Material- / informationsflussanalyse
- Optimierung der Informations- und Materialflüsse sowie der Lagerung entlang der Wertschöpfungskette: Untersuchung der Warenströme, Potenzialanalyse, Lösungsentwicklung und -umsetzung

Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. M. H. Wagner (Direktor des Institutes proTUL)

Zentrum für Energie und Umweltchemie (CEEC Jena)

Friedrich-Schiller-Universität Jena, Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät und Physikalisch-Astronomische Fakultät

Fokus: Nutzung interdisziplinärer Kompetenzen und Synergien, konkret: Entwicklung von Batterien und Superkondensatoren mit hoher Leistungsdichten, maximaler Flexibilität, geringsten Verluste und hoher Lebensdauer der Speichersysteme mit bestmöglicher Umweltverträglichkeit, zuverlässiger Ressourcenverfügbarkeit und geringstmöglichem Gefahrenpotenzialen

Kompetenzen: Energiespeicherung, Energieumwandlung, Umwelttechnik

Projekte:

- POLY STORAGE - European Training Network in Innovative Polymers for next-generation electrochemical energy storage: Batterien aus Kunststoffen weiterentwickeln und für neue Anwendungen erschließen
- TRANSITION - Natrium-ionen Batterie Demonstratoren für mobile und stationäre Energiespeicher

Ansprechpartner: Prof. Dr. Ulrich S. Schubert (Vorsitzender), Prof. Dr. Michael Stelter, Prof. Dr. Philipp Adelhelm

Forschungsschwerpunkt Technologien und Werkstoffe, Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Bereiche: Wirtschaftsingenieurwesen (Umwelttechnik) und SciTec (Präzision-Optik-Materialien)

Fokus: Innovative Verfahren für die Fertigung, aber auch optische Systeme und Nano- und Mikrotechnologien

Kompetenzen: Im Bereich Technologien und Werkstoffe, z.B. Technologien im Explosionsschutz, Funktionskeramische Werkstoffe und Präzision-Optik-Materialien

Projekte:

- Entwicklung eines effizienten, laserbasierten Maschinenkonzeptes zur Oberflächenmodifikation von Stahlwerkstoffen
- IntelKerFun: Intelligente Keramische Funktionsmaterialien für innovative Anwendungen für Energie, Mobilität und Industrie 4.0
- Mittelstand 4.0 Kompetenzzentrum: Unterstützung der Digitalisierung von Arbeits- und Produktionsprozessen in kleinen und mittelständischen Unternehmen, insbesondere unter Einbeziehung moderner additiver Fertigungsverfahren

Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Engelmann (Explosionsschutz), Prof. Dr. Jörg Töpfer (Funktionskeramiken), Prof. Dr. Lutz Wilde (Physikalische Werkstoffdiagnostik), Prof. Dr. Jens Bliedtner (Lasermaterialbearbeitung)

Thüringer Zentrum für Maschinenbau (ThZM)

Partner: Technische Universität Ilmenau, Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH Jena, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, GFE Schmalkalden, Fachhochschule Schmalkalden

Fokus: Know-how und Infrastruktur der fünf beteiligten Forschungseinrichtungen bündeln und mithilfe von modernen Maschinenbautechnologien über Produkt- und Prozessinnovationen die heimische Wirtschaft zu stärken

Kompetenzen:

- Wandlungsfähige Produktionsmethoden und Fertigungsketten
- Interaktive Assistenzsysteme für die Produktion
- Adaptive Prozessregelung und wandlungsfähige Qualitätssicherung; u.a. Produkt- und Prozesssimulation

Projekte:

- Verbundprojekt: Lasermaterialbearbeitung von Hochleistungskunststoffen im Maschinenbau Trennen und Fügen
- Verbundprojekt: In-Prozess Qualitätssicherung – Berührungsloses Sensorsystem
- Bundesprojekt "ELMO - Entwicklung eines effizienten, laserbasierten Maschinenkonzeptes zur Oberflächenmodifikation von Stahlwerkstoffen"

Ansprechpartner: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Gunther Notni (Projektleiter)

Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH (IAB Weimar gGmbH)

Partner von ThiWert

Fokus: Entwicklung von neuen Produkten, Technologien und Verfahren mit Kunden und Partnern

Kompetenzen:

- Baustoffe und Verfahrenstechnik
- Bausysteme und Bauteile
- Tief- und Rohrleitungsbau
- Energie und Gebäudetechnik

Projekte:

- OptiLoop – Sensorgestütztes Sortierverfahren: Entwicklung eines sensorgestützten Sortierverfahrens zur sortenreinen Trennung mineralischer Bau- und Abbruchabfälle auf Basis hyperspektraler Nahinfrarot-Sensorik (NIR) gekoppelt mit einer Farberkennung (VIS)

- Sensorgestützte Sortierung von Bau- und Abbruchabfällen

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Ulrich Palzer (Institutsdirektor)

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS

Fokus: Angewandte Forschung in 8 marktorientierten Geschäftsfeldern

Das Batterierecycling setzt neben einem tiefgreifenden Materialverständnis der Zellchemien Kompetenzen im Bereich der Verfahrenstechnik sowie der hydrometallurgischen Prozesse voraus. In Kooperation mit der TU Bergakademie Freiberg entwickelt das IKTS Ansätze und Pilotanlagen für die hydrometallurgische Aufbereitung.

Kompetenzen:

- Batterierecycling
- Energiespeicher, Lithium-Ionen-Batterien
- Umwelt- und Verfahrenstechnik
- Wasser- und Abwasseraufbereitung

Projekte:

- Recycling von seltenen Metallen mit keramischen Membranen (Dresden)
- ePadFab: Innovative Technologien zur industriellen Herstellung integrierter, großformatiger Bipolarbatterien (Dresden)
- EMBATT2.0: Material- und Prozessentwicklung für die effiziente Fertigung der großformatigen Bipolarbatterie EMBATT (Dresden)
- Batterierecycling am Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM in Freiberg

Ansprechpartner: Dr. Mareike Wolter (Abteilungsleiterin: Mobile Energiespeicher und Elektrochemie)

GFE - Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden e.V.

Fokus: Komplettlösungen rund ums Werkzeug, neue wissenschaftliche aus Theorie und Praxis in die industrielle Anwendung überführen

Kompetenzen:

- Werkzeuge und Werkzeugkomponenten mit integrierter Sensorik und Aktorik, Werkzeuge und Technologien zur Bearbeitung neuer Materialien
- Strukturierung der Schneidenmakro- und Mikrogeometrie von Präzisionswerkzeugen
- Beschichtung zur Verbesserung von Reib- beziehungsweise Verschleißigenschaften
- Einsatz neuartiger Werkstoffe für Werkzeuge und Maschinenbauteile

Projekte:

- Entwicklung eines neuartigen Messsystems und Messverfahrens zur prozesssicheren Anlagekontrolle von Wendeschneidplatten in Präzisionswerkzeugen (2016 FE 0110)
- Sensorintegrierte automatisierte Bearbeitungszelle mit vernetzter intelligenter Prozess- und Qualitätskontrolle

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Florian Welzel (Geschäftsführer)

Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF

Fokus: Das Fraunhofer IOF entwickelt innovative Lösungen mit Licht für ein breites Anwendungsspektrum.

Kompetenzen: Lichtquellen und Laser, opto-mechanische Systeme sowie Sensorik und Metrologie.

Projekte:

- Kompaktes Mikrooptisches System für multispektrale Bildaufnahme (anwendbar für Recycling und industrielle Sortierung)
- Mehrbild-3D-Messsysteme in Rapid Prototyping und Qualitätssicherungs-Prozessketten (anwendbar für Entsorgung und Recycling)

Ansprechpartner: rof. Dr. Uwe Zeitner, Dr. Robert Brüning, Dr. Peter Kühmstedt