

**Katrin Nicke/Gregor Holst/Tabea Gleiter/Lutz Reichelt/Werner Zittel**



# **Batterierecycling als Beschäftigungsperspektive für die Lausitz**

**Ansätze einer arbeits- und beschäftigungsorientierten  
Regionalentwicklungsstrategie**

**Ein Projekt der Stiftung Neue Länder in der Otto Brenner Stiftung  
Frankfurt am Main 2019**

Eine Studie der Stiftung Neue Länder in der  
Otto Brenner Stiftung

Herausgeberin:

Otto Brenner Stiftung

Jupp Legrand

Wilhelm-Leuschner-Straße 79

D-60329 Frankfurt/Main

Tel.: 069-6693-2810

Fax: 069-6693-2786

E-Mail: [info@otto-brenner-stiftung.de](mailto:info@otto-brenner-stiftung.de)

Autor\*innen:

Katrin Nicke

Gregor Holst

IMU-Institut Berlin GmbH

Alte Jakobstraße 76

10179 Berlin

Tel.: 030-29 36 970

E-Mail: [imu-institut@imu-berlin.de](mailto:imu-institut@imu-berlin.de)

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH

Tabea Gleiter

Lutz Reichelt

Dr. Werner Zittel

Schützengasse 16

01067 Dresden

Tel.: 0351-89 05 200

E-Mail: [lutz.reichelt@lbst.de](mailto:lutz.reichelt@lbst.de)

Satz und Gestaltung:

think and act –

Agentur für strategische Kommunikation

Titelbild:

Gregor Holst

Hinweis zu den Nutzungsbedingungen:

Diese Veröffentlichung darf nur für nichtkommerzielle Zwecke im Bereich der wissenschaftlichen Forschung und Beratung und ausschließlich in der von der Otto Brenner Stiftung veröffentlichten Fassung – vollständig und unverändert! – von Dritten weitergegeben sowie öffentlich zugänglich gemacht werden.

Für die Inhalte sind die Autorinnen und Autoren verantwortlich.

Bestellungen:

Weitere Exemplare dieser Veröffentlichung können – solange Vorrat reicht – bestellt werden über:  
[birgit.schumacher@otto-brenner-stiftung.de](mailto:birgit.schumacher@otto-brenner-stiftung.de)

oder als PDF-Datei geladen werden:

<https://www.otto-brenner-stiftung.de/publikationen-snl>

November 2019

Die Studie ist entstanden in Zusammenarbeit mit:



## Vorwort

Die Bundesregierung hat im Konsens mit wichtigen gesellschaftlichen Gruppen und betroffenen Interessenverbänden den Ausstieg aus der Braunkohleförderung und Braunkohleverstromung beschlossen. Neben anderen Regionen betrifft dies besonders die Lausitz. Nicht nur ein großer, auch indirekt beschäftigungsrelevanter Industriezweig, steht zur Disposition – sondern auch ein bedeutender Identitätsfaktor für die ganze Region ist gefährdet. Diese bevorstehende Entwicklung, die nicht zuletzt aus klimapolitischen Gesichtspunkten als unumkehrbar gilt, sollte bereits jetzt mit Ideen für die Schaffung nachhaltiger industrieller Perspektiven für die Region begleitet werden.

In der vorliegenden Studie gehen die Autoren der Frage nach, ob die Region den Markthochlauf der Elektromobilität mit der Errichtung eines Recyclingwerkes für Traktionsbatterien als Baustein zur Gestaltung einer „Energierregion der Zukunft“ nutzen kann. Mit der Beschreibung von Hintergründen, der Darlegung von Rahmenbedingungen und der Entwicklung von Zukunftsperspektiven wird relevantes Handlungswissen für die Etablierung eines Batterierecyclingwerkes in der Lausitz erschlossen, um den dort bereits seit drei Jahrzehnten andauernden Strukturwandel weiter aktiv zu begleiten zu können, der mit dem vorgesehenen Braunkohleausstieg in eine neue Runde geht.

Die Autoren plädieren dafür, dass es gerade das absehbare Ende dieses für die Region identitätsstiftenden Industriezweiges dringend erforderlich macht, die Menschen vor Ort an dem Prozess kontinuierlich zu beteiligen. Zudem verweisen sie darauf, dass neben der Beschäftigungssicherung auch das Ziel der Herstellung gleichwertiger Lebensverhältnisse, basierend auf einer funktionierenden Daseinsvorsorge, von ebenso großer Relevanz ist wie eine ressourcenschonende Wirtschaftsweise, um weitere ökologische Schäden zu vermeiden. Herausgestellt wird, dass die Lausitz über zahlreiche endogene Potentiale verfügt, die als Standortvorteile begriffen und stärker genutzt werden könnten. Neben der gut ausgebildeten Facharbeiterschaft, vor allem im Bereich der metallbearbeitenden und metallverarbeitenden Vorleistungsgüter- und Zulieferindustrie, sind dies eine hoch leistungsfähige (Energie-) Netzinfrastruktur und eine bereits rund um die regenerative Energieerzeugung und -speicherung entstandene innovative Unternehmenslandschaft.

Die Studie der „Stiftung Neue Länder“ (SNL), die in Zusammenarbeit mit der Otto Brenner Stiftung (OBS) auf den Weg gebracht worden ist, hebt neben dem aktuellen technologischen Entwicklungsstand besonders das Innovationspotential der Lithium-Ionen-Batterien für regionale Märkte hervor, welches mit dem erwarteten großindustriellen Einsatz der Technologie im Zuge des Aufschwungs bzw. der Umrüstung auf die Elektromobilität einhergeht. Das Autorenteam setzt sich kenntnisreich und konstruktiv mit Vor- und Nachteilen dieser Batterierevolution auseinander und diskutiert ergebnisoffen ihre Chancen und Risiken.

Als Ergebnis der innovativen Untersuchung zeichnet sich ab, dass das Recycling von Li-Io-Batterien zukünftig notwendig sein wird, denn

- die zu ihrer Herstellung erforderlichen Rohstoffe sind endlich,
- sie werden zum Teil unter menschenunwürdigen Arbeitsbedingungen und mit erheblichen ökologischen Folgeschäden in teilweise politisch instabilen Ländern abgebaut,

- die globalen Rohstoffmärkte sind (aufgrund dessen und aufgrund der Marktdominanz einzelner Staaten) sehr volatil,
- es ist ein notwendiger Beitrag dazu, die automobilen Wertschöpfungskette vollständig in Europa und in Deutschland abzubilden und um
- eine sichere Entsorgung und verantwortungsvolle Wiederverwertung der Batterien, die hochgiftige Substanzen enthalten, zu gewährleisten.

Das Recycling von Li-Io-Batterien kann, so das Autorenteam, eingebettet in eine integrierte Strategie nachhaltigen Wirtschaftens zudem das Prinzip der Kreislaufwirtschaft stärken. Dazu werden exemplarisch die notwendigen Voraussetzungen in der vom Braunkohleausstieg betroffenen Lausitz analysiert. Ziel der Autoren ist, mit der Untersuchung auch exemplarisch aufzuzeigen, wie sich Zukunftstechnologien so verankern lassen, dass

- ökologische nicht gegen soziale Interessen ausgespielt werden,
- der Wegfall hochwertiger Industriearbeitsplätze unter den Bedingungen Guter Arbeit kompensiert werden könnte,
- eine Energieregion der Zukunft mit Modellcharakter entsteht, in der auch kommende Generationen ein Auskommen in lebenswerter Umwelt finden und
- durch Partizipation der Bevölkerung der erneute Strukturwandel regional verankert und im Konsens durchgeführt werden kann.

Im Ergebnis kommen die Autoren zu dem Schluss, dass die Lausitz nicht zuletzt aufgrund des vorhandenen Arbeitskräftepotenzials und der hier schon vorhandenen Qualifikationen ein gut geeigneter Standort für den Aufbau eines Recyclingwerks für Batterien im industriellen Maßstab sein könnte. Autoren und Stiftung hoffen, dass die interessanten Befunde und strategischen Überlegungen der vorliegenden Untersuchung einen kleinen Beitrag dazu leisten können, eine zukunftsfähige industrielle Perspektive für die Region zu entwickeln.



Jupp Legrand

Geschäftsführer der Otto Brenner Stiftung/Stiftung Neue Länder  
Frankfurt am Main und Berlin, im November 2019

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Strukturwandel in der Lausitz</b> .....	<b>6</b>
	2.1 Arbeitsmarkt und Demografie .....	8
	2.2 Wirtschaft und Beschäftigung .....	11
	<i>Exkurs: Die Bedeutung der Braunkohlewirtschaft für den Industriestandort Lausitz</i> .....	20
	2.3 Leitbild Energieregion .....	24
<b>3</b>	<b>Batterierecycling</b> .....	<b>30</b>
	3.1 Aufkommen und Nachfrage .....	30
	3.2 Batterien der Elektromobilität: Typologie, Rohstoffe, Produktionsweisen .....	36
	3.3 Aufkommen und Nachfrage von Altbatterien .....	53
	3.4 Recyclingtechnologien .....	58
	3.5 Prognose über stoffliche Ergebnisse und Abfälle des Recyclings .....	66
	3.6 Ökologische Bewertung .....	67
	3.7 Unternehmensstrategien – Batteriezellhersteller und OEM .....	69
	3.8 Strategien anderer Wirtschaftsräume .....	72
<b>4</b>	<b>Diskussion: Batterierecycling als industrielle Perspektive für die Lausitz?</b> .....	<b>77</b>
	4.1 Marktentstehung .....	77
	<i>Exkurs: Rechtliche Situation des Batterierecyclings in Deutschland</i> .....	79
	4.2 Wertschöpfungskette .....	81
	4.3 Beschäftigungseffekte .....	83
	4.4 Quintessenz und Ausblick .....	85
<b>5</b>	<b>Gestaltungsfelder</b> .....	<b>87</b>
	5.1 Gestaltungsfeld regional- und strukturpolitische Rahmenbedingungen .....	87
	5.2 Gestaltungsfeld Wirtschafts- und Innovationsförderung .....	90
	5.3 Gestaltungsfeld Arbeitsmarktpolitik .....	92
<b>6</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>96</b>
	Literatur- und Quellenverzeichnis .....	98
	Abkürzungsverzeichnis .....	107
	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis .....	108
	Hinweise zu den Autor*innen .....	109

*„Kajkež žórło, tajka woda.“*

*„Wie die Quelle, so das Wasser.“*

Sorbisches Sprichwort

# 1 Einleitung

Gemäß den Übereinkünften der UN-Klimakonferenz von Paris 2015 ist die globale Erwärmung auf möglichst deutlich unter 1,5°C im Vergleich zum Beginn des Industriezeitalters zu begrenzen. Dazu ist es notwendig, in der Summe über alle wirtschaftlichen Prozesse Klimaneutralität herzustellen. Die laut „Klimaschutzplan 2050“ der Bundesregierung vorgesehenen Einsparungen klimaschädlicher Emissionen gehen deshalb einher mit Etappenzielen für besonders CO<sub>2</sub>-intensive Wirtschaftssektoren. Als zentral gelten die Abkehr von der Nutzung fossiler Energieträger und eine Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien.

Für den Verkehrssektor, als einen der Hauptemittenten<sup>1</sup>, schreibt der Klimaschutzplan bis 2030 eine CO<sub>2</sub>-Minderung von 42 % gegenüber dem Wert von 1990 fest. Bis 2050 soll eine Verminderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes um bis zu 95 % erreicht und damit ein ausgeglichenes Verhältnis von emittierten und kompensierten Treibhausgasen durch klimaneutrale Mobilität hergestellt sein (Frieske et al. 2019: 7). Um diesen Vorgaben gerecht zu werden, stehen die Automobilhersteller und ihre Zulieferer vor der komplexen Herausforderung, den Verbrennungsmotor durch schadstoffärmere Technologien zu ergänzen und die konventionelle, auf fossilen Kraftstoffen basierende Antriebstechnik mittelfristig zu ersetzen (ebd.: 30).

Als Stellschraube für die Verkehrswende hin zu umweltfreundlicher, klimaneutraler Mobilität, stellt sich die Unterstützung des Markthochlaufs alternativ angetriebener Fahrzeuge dar, flankiert vom Ausbau öffentlicher Ladeinfrastruktur. Dem Willen der Politik nach sollen bis 2030 mindestens zehn Millionen Elektroautos und 500.000 weitere elektrifizierte Nutzfahrzeuge auf bundesdeutschen Straßen sein.<sup>2</sup> Dabei haben CO<sub>2</sub>-arme oder CO<sub>2</sub>-neutrale Antriebstechnologien (rein elektrisch, Brennstoffzellen- oder Hybridantrieb) hinsichtlich ihrer Versorgungs- und industriellen Fertigungsinfrastruktur jeweils unterschiedliche Umsetzungsvoraussetzungen. Gemeinsam ist allen (teil-)elektrischen Antrieben jedoch die Nutzung von Traktionsbatterien.

Auch der Energiesektor steht vor massiven Umbrüchen. Derzeit sind rund 17 % aller deutschen CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die Braunkohleverstromung zurückzuführen (AGORA Energiewende 2017: 25f.). Die durch Dekarbonisierung zu erreichenden CO<sub>2</sub>-Einsparziele im Energiesektor liegen für das Jahr 2050 bei 80 % bis 95 % gegenüber dem Vergleichswert von 1990 (BMU 2019). Der Abschlussbericht der „Kommission für Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ (KWSB 2019) sieht dafür mit der Schließung der Braunkohletagebaue im Mitteldeutschen, Rheinischen und Lausitzer Revier bis einschließlich 2038 die Abkehr von einer weiteren Nutzung des fossilen Energieträgers Kohle vor: Der Bundesregierung wird der Beschluss einer schrittweisen Stilllegung aller Braun- und Steinkohlekraftwerke ab 2022 empfohlen; verbunden mit der Option, ihre endgültige Schließung um drei Jahre auf 2035 vorzuverlegen.

Unter den vom Kohleausstieg berührten Revieren gilt die Lausitz als besonders betroffen. Wie in anderen Regionen auch, ist in der Lausitz die Angleichung der Arbeits- und Lebensbedingungen an das gesamtdeutsche Niveau seit 1989/90 bis heute trotz erkennbarer Fortschritte nicht vollständig

1 In Deutschland beliefen sich die Emissionen des Verkehrssektors 2017 auf rund 18% des gesamten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes, wovon etwa 61 % auf Pkw entfielen (Leisinger/Runkel 2019: 1).

2 Der Spiegel (25.06.2019): Klimaschutz. Scheuer will zehn Millionen Elektroautos – bis 2030. Online: <https://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/verkehrsministerium-will-zehn-millionen-e-autos-bis-2030-a-1274272.html>.

gelingen (BMW 2019). Der anhaltende Strukturwandel in der Lausitz, in der Tagebaue über fast zwei Jahrhunderte sowohl Landschaftsbild und Wirtschaftsstruktur als auch das Selbstverständnis als industrielle Energieregion stark prägten, wird sich somit nochmals verstärkt auf die Regionalentwicklung niederschlagen. Mit dem Ausstieg aus der Braunkohleförderung und -verstromung geraten neben den hochwertigen und gut bezahlten Industriearbeitsplätzen in der Lausitzer Energie- und Bergbauwirtschaft auch die Beschäftigungsverhältnisse in den mit diesen Sektoren über Vorleistungen und Zulieferungen verbundenen Unternehmen in der Metall- und Elektroindustrie in Gefahr: Aus diesem Grunde ist es erforderlich, im Zuge von Energie- und Mobilitätswende jetzt alternative, zukunftsfähige, nachhaltig stabilisierende (Wirtschafts-)Strukturen für die Region zu entwickeln.

Mit der Zielstellung, die Lausitz als Industrie- und Energieregion zu erhalten, geht die Studie der Frage nach, ob durch die Errichtung einer Recyclingstrecke für Traktionsbatterien der Elektromobilität ein Beitrag zur Gestaltung des Strukturwandels geleistet werden kann. Erstmals wird diese Fragestellung unter strukturpolitischen Erwägungen und aus der Perspektive der Metall- und Elektroindustrie untersucht. Dies einerseits im Hinblick auf die Schaffung von Beschäftigung, um die im Kontext des Braunkohleausstiegs drohenden Verluste guter, hochwertiger Industriearbeitsplätze zu kompensieren. Andererseits davon ausgehend, dass die Transformation in eine „Energieregion der Zukunft“ unter der Maßgabe nachhaltigeren Wirtschaftens mit einem konsensfähigen Leitbild gelingen kann.

Weltweit verlaufen die Trends des Markthochlaufs der Elektromobilität und die Weiterentwicklung relevanter Batteriefertigungs- und Recyclingtechnologien hoch dynamisch. Maßgebliche Faktoren für die Entstehung eines industriellen Batterierecycling-Marktes nehmen dabei erst langsam Gestalt an, der regulatorische Rahmen ist noch modellierbar. Zugleich ist der Technologiepfad Elektromobilität als eingeschlagen zu begreifen: Die Vorgaben des Klimaschutzplans der Bundesregierung zur CO<sub>2</sub>-Reduktion begründen Umbrüche in der Automobilbranche, die mittelfristig zu steigenden Verkehrssanteilen von Fahrzeugen mit rein elektrischem oder hybridem Antrieb an den PKW-Neuzulassungen führen werden.

Damit steigt der Bedarf an geeigneten Traktionsbatterien und die Nachfrage nach den zu ihrer Herstellung erforderlichen, endlichen Rohstoffen. Daraus erwächst bis 2030, mit einem der Batterielebensdauer entsprechenden zeitlichen Versatz, ein relevantes Altbatterie-Aufkommen. Weil die Batterien zudem zahlreiche Gift- und Gefahrstoffe enthalten, kommt dem Aufbau einer industriellen Recyclingstrecke für Traktionsbatterien nicht nur ökonomisch, sondern auch ökologisch eine strategische Schlüsselrolle zu. Die dafür zukünftig industriell notwendigen Recyclingkapazitäten sind derzeit weder vorhanden, noch im Aufbau befindlich.

Um Entwicklungschancen für die Lausitz im Zuge des Aufschwungs der Elektromobilität zu prüfen, werden ihre endogenen Potentiale analysiert und weitere Umsetzungsvoraussetzungen erörtert. Es wird aufgezeigt, welche Faktoren potentiell begünstigend zur Ansiedlung eines Traktionsbatterie-Recyclingwerkes wirken würden und hinterfragt, inwiefern sie mit den strukturpolitischen Zielen der Nachhaltigkeit und einer Angleichung der Lebensverhältnisse vereinbar sind. Da Batterierecycling gegenwärtig maßgeblich durch energieaufwendige metallurgische Prozesse bestimmt ist, kann an die lange, industrielle Geschichte der Lausitz, die sich durch eine hoch qualifizierte Facharbeiterschaft und weitreichende energietechnische Kompetenzen kennzeichnet, unmittelbar angeknüpft werden. Indem der zeitliche Vorlauf in Rechnung gestellt wird, der sich aus der erst mittelfristig zu erwartenden Wertschöpfungsrelevanz des Batterierecyclings ergibt, wird die zeitlich relevante Korrelation zum bevorstehenden Ende des Kohletagebaus und der Verstromung fossiler Energieträger in der Region erfasst.

## Aufbau der Studie

Um zu analysieren, ob die Errichtung einer Recyclingstrecke für Traktionsbatterien der Elektromobilität eine Perspektive für die Zukunft der Energieregion darstellen kann, werden eingangs mit der demographischen Entwicklung (Kapitel 2.1), der Darstellung von Arbeitsmarkt und Wirtschaftsstruktur (2.2) und unter Bezugnahme auf die Leitbilddebatte um eine „Energieregion der Zukunft“ (2.3) zentrale Rahmenbedingungen und Hintergründe des Strukturwandels in der Lausitz erfasst. Anschließend bietet die umfassende Analyse des gegenwärtigen technologischen Entwicklungsstands Aufschluss über die innovativen und industriellen Anforderungen zum Aufbau von Recyclingkapazitäten für Traktionsbatterien (Kapitel 3). Im Hinblick auf die zum Einsatz kommenden Verfahren und Technologien betrifft dies in erster Linie die Potentiale der aktuell verwendeten Lithium-Ionen-Batterien (3.1). Im weiteren werden aktuelle Themen in Forschung und Entwicklung nachvollzogen sowie Aspekte für das Aufkommen relevanter Altbatterien zusammengetragen (3.2 bis 3.5), ökologische Aspekte reflektiert (3.6) und Unternehmensstrategien relevanter OEM von Elektromobilen, Batterieherstellern sowie von Recyclingunternehmen betrachtet (3.7) um zuletzt entsprechende Aktivitäten in anderen Wirtschaftsräumen zu beleuchten (3.8). Unter Rekurs darauf werden nachfolgend die Perspektiven des Batterierecyclings zusammengefasst (4.1). Basierend auf der Darstellung einer exemplarischen Wertschöpfungskette (4.2), lassen sich mögliche Beschäftigungseffekte und Qualifikationsanforderungen für ein Traktionsbatterie-Recyclingwerk industriellen Maßstabs ableiten (4.3) und die Potentiale der Zukunftstechnologie vor der Folie der endogenen Potentiale der Lausitz als Entwicklungschance diskutieren (4.4). Vor dem Fazit (6) werden schließlich die drei Gestaltungsfelder regional- und strukturpolitische Rahmenbedingungen (5.1), Wirtschafts- und Innovationsförderung (5.2) sowie Arbeitsmarktpolitik (5.3) aufgegliedert, worin Handlungsempfehlungen für eine arbeits- und beschäftigungsorientierte Regionalentwicklungsstrategie verzeichnet sind. Sie vermitteln Ideen, wie sich die Ansiedlung der Zukunftstechnologie industrielles Batterierecycling in der Lausitz unterstützen ließe und bieten Hilfestellung für die Gestaltung des Strukturwandels unter der Prämisse einer „Just Transition“<sup>3</sup> – damit die Menschen nicht zu Verlierern des Strukturwandels werden und die Schaffung einer nachhaltig wirtschaftenden „Energieregion der Zukunft“ mit Guter Arbeit gelingt. Dazu werden mit den Handlungsempfehlungen Eckpunkte für ein integriertes arbeits- und beschäftigungsorientiertes Entwicklungskonzept formuliert.

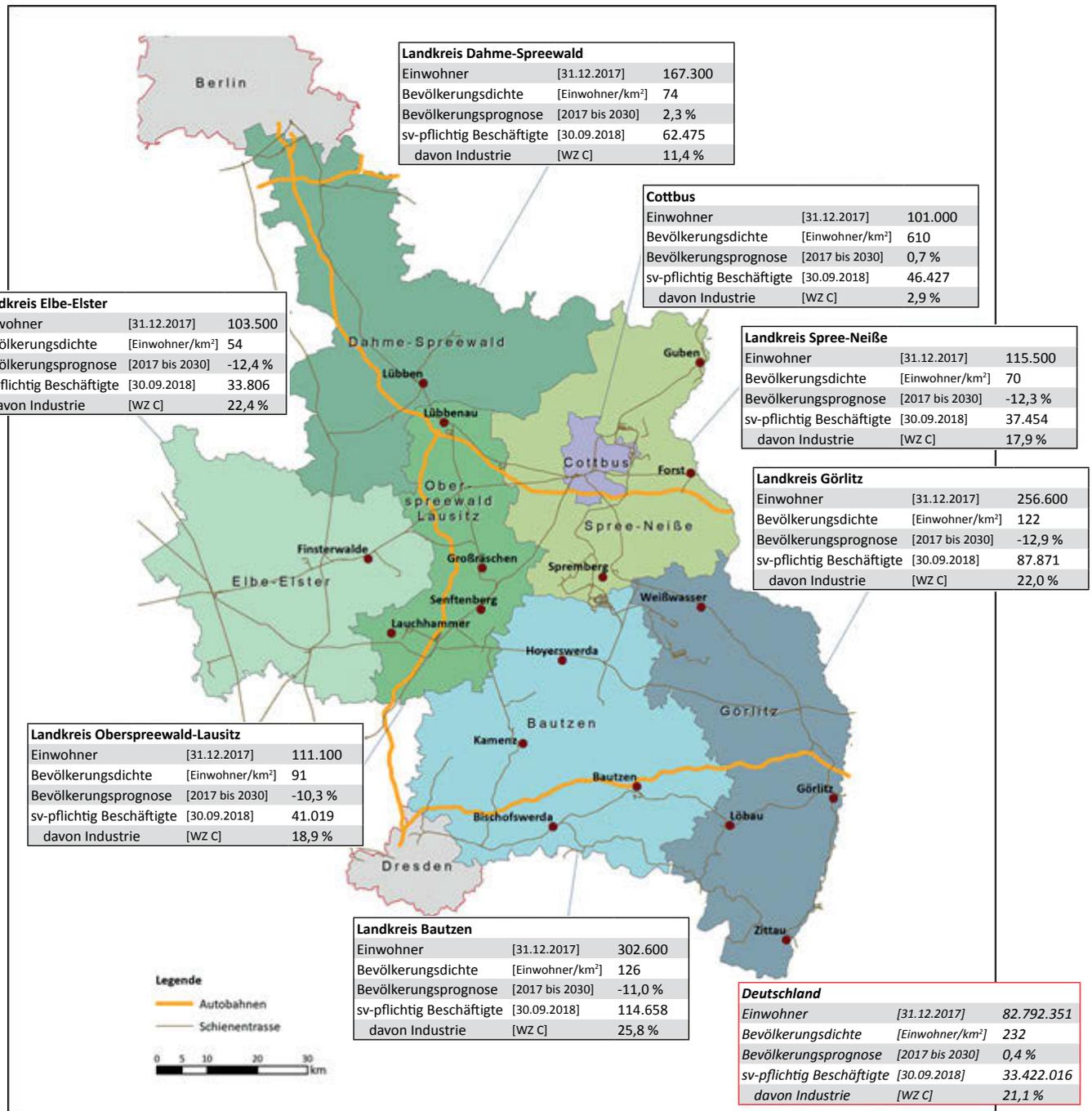
3 Wörtlich übersetzt findet die „Just Transition“ ihre Entsprechung im Begriff der „gerechten Transformation“. Der Begriff geht zurück auf die US-amerikanische Gewerkschaftsbewegung. Er wurde in den vergangenen Jahren zu einem Konzept weiterentwickelt, welches für die Beschreibung von Strukturwandelprozessen dann genutzt wird, wenn sowohl ökologische als auch soziale Interessen im Transformationsprozess Berücksichtigung finden bzw. ein Interessenausgleich stattfindet, so dass Gute Arbeit nicht in Widerspruch mit ökologischen Zielsetzungen zur Abwendung des Klimawandels stehen (vgl. Smith 2017: 2 ff.).

## 2 Strukturwandel in der Lausitz

Der in der Lausitz seit der Nachwendezeit andauernde Strukturwandel ist komplex und tiefgreifend. Er findet weitgehend unabhängig von gesamtdeutschen Konjunkturlagen statt. Nach dem Umbruch Anfang der 1990er Jahre, der zum Verlust von 90 % aller Arbeitsplätze in der Bergbauindustrie sowie dem Niedergang etwa der Lausitzer Glas- und Textilindustrie führte und die Abwanderung zehntausender Menschen aus der massiv de-industrialisierenden Region nach sich zog, stellt nun die Energiewende eine Zäsur dar, die zu einer zweiten wirtschaftsstrukturellen Disruption innerhalb von nur drei Jahrzehnten führen kann: Mit dem Ausstieg aus der Braunkohlewirtschaft bis spätestens 2038 geht der Strukturwandel in eine neue Runde und wird aufgrund seiner alle gesellschaftlichen Bereiche erfassenden, unverändert hohen Intensität die Entwicklung der Lausitz voraussichtlich auch über die kommenden Dekaden hinweg stark prägen. Er wird in seiner Dimension zwar nicht mit den Brüchen zu Beginn der 1990er Jahre vergleichbar sein, allerdings gefährden das Ende der Tagebauaktivitäten und die Stilllegung der Kraftwerke zahlreiche qualitativ hochwertige Arbeitsplätze in der Bergbau- und Zulieferindustrie. Damit gerät einerseits ein großer Teil der in der Lausitz verbliebenen Industriebeschäftigung unter Druck. Andererseits – und dies ist als mindestens genauso gravierend zu beurteilen – nagt der Ausstieg aus der Kohleförderung und -verstromung an der Identität als Energieregion und ruft tief eingeprägte, negative Erinnerungen an bestenfalls bedingt erfolgreich verlaufene Transformationsprozesse der Nachwendezeit hervor. Der bevorstehende Wandel weckt Ängste und Widerstände, deren sozio-ökonomische Auswirkungen nicht unterschätzt werden sollten.

Als geographische Region umfasst die Lausitz grenzüberschreitend deutsches und polnisches Territorium. Im Kontext dieser Studie wird sie als bundesländerübergreifender Wirtschaftsraum Deutschlands verstanden, der mit sächsischer Oberlausitz und brandenburgischer Niederlausitz ein Gebiet von rund 12.000 km<sup>2</sup> umspannt. Administrativ gliedert sie sich in die brandenburgischen Landkreise Oberspreewald-Lausitz, Spree-Neiße, Elbe-Elster, Dahme-Spreewald und die kreisfreie Stadt Cottbus als Oberzentrum sowie die sächsischen Landkreise Bautzen und Görlitz. Alle Landkreise der im äußersten Osten Deutschlands befindlichen Region können als peripher gelegen und ländlich geprägt klassifiziert werden. Einzige Ausnahme diesbezüglich bildet der sich nördlich bis an den Berliner Stadtrand erstreckende Landkreis Dahme-Spreewald: Um Verzerrungen zu glätten, die sich aus dem Einbezug der Entwicklungsdaten des prosperierenden Hauptstadtuums ergeben, wird nachfolgend lediglich die südliche Spreewaldregion des Landkreises definitorisch der Lausitz zugerechnet. Statistische Werte des Kreises werden in dieser Studie daher nur zu einem Drittel der Lausitz zugeschlagen (vgl. *Abbildung 1*).

Abbildung 1: Lage, Strukturdaten und Verkehrswege der Lausitz



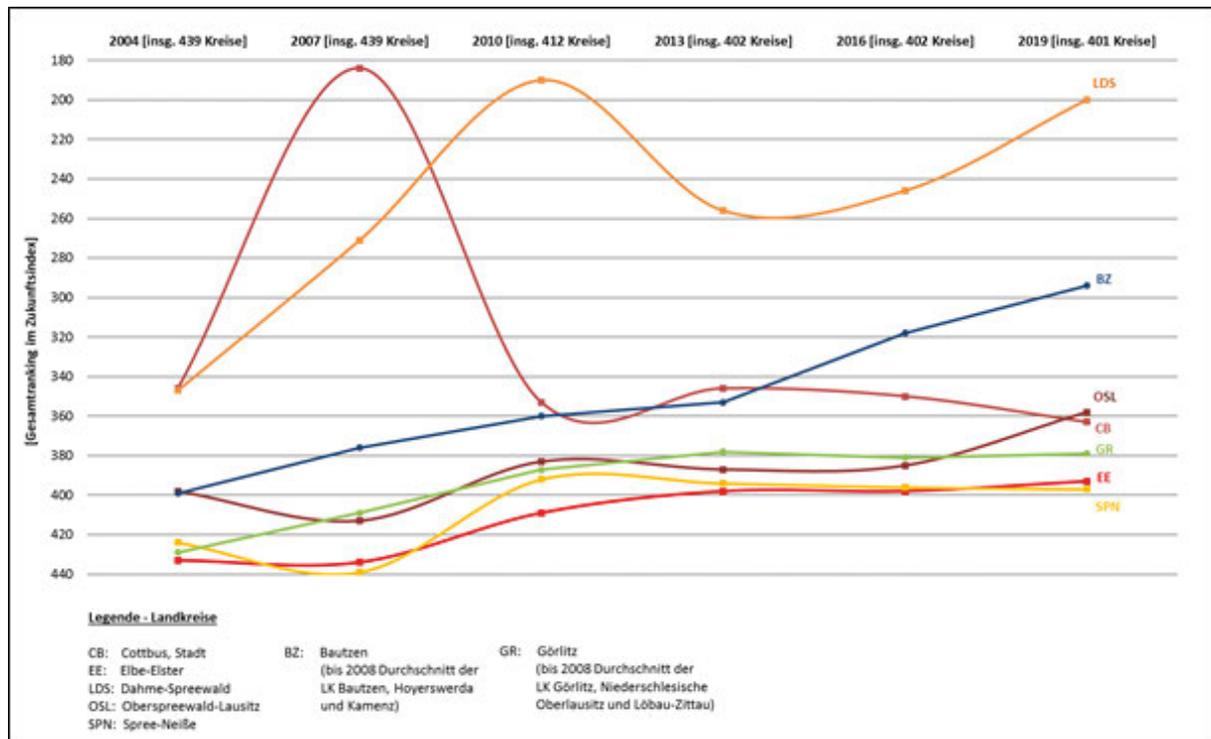
Quelle: Eigene Darstellung IMU-Institut. Datengrundlage Strukturdaten Statistische Ämter Berlin-Brandenburg und Sachsen; Datengrundlage Verkehrswege © OpenStreetMap-Mitwirkende

Im interregionalen Vergleich werden die anhaltend großen Herausforderungen sichtbar, vor denen die Lausitz steht. Mit Ausnahme des in seiner Entwicklung stark von der Nähe zur Metropole Berlin profitierenden Dahme-Spreewald, liegen die der Lausitz zugehörigen Landkreise im Gesamtranking<sup>4</sup> des Zukunftsatlas seit 2004 unverändert im letzten Fünftel aller deutschen Landkreise bzw. Städte

<sup>4</sup> Basierend auf 29 makro- und sozioökonomischen Indikatoren wird für das Ranking des alle drei Jahre aktualisierten Prognos-Zukunftsatlas (2019) ein Gesamtindex berechnet, woraus die Zukunftschancen aller Landkreise und kreisfreien Städte Deutschlands abgeleitet werden.

(vgl. Abbildung 2). Insbesondere die brandenburgischen Landkreise Elbe-Elster, Spree-Neiße und Oberspreewald-Lausitz sowie der sächsische Kreis Görlitz belegen regelmäßig die letzten Plätze des Rankings und werden auch 2019 als Regionen mit hohen bzw. sehr großen Zukunftsrisiken bewertet.

Abbildung 2: Entwicklung der Lausitzer Landkreise im Gesamtranking des Zukunftsatlas



Quelle: Eigene Darstellung IMU-Institut nach Prognos AG (zuletzt 2019).

Wenn auch ein multi-variables Ranking zur Zukunftsfähigkeit von Landkreisen viele Aspekte (darunter kulturelle und identitätsstiftende) außer Acht lässt und hinsichtlich der Aussagekraft sowie der öffentlichen (internen wie externen) Wirkung hinterfragt werden kann, so gibt es doch Hinweise darauf, dass die Lausitz im Vergleich mit anderen Regionen noch Optimierungspotentiale aufweist.

## 2.1 Arbeitsmarkt und Demografie

### Altersstruktur und Erwerbspersonenpotential

Knapp über eine Million Menschen leben heute in der Lausitz. Während in Sachsen und Brandenburg sowie auf Bundesebene zuletzt wieder Bevölkerungszuwächse zu verzeichnen waren, setzt sich – wiederum mit Ausnahme des durch seine Nähe zu Berlin wachsenden Landkreises Dahme-Spreewald – der Negativtrend bei der Bevölkerungsentwicklung in der Region fort, wenngleich sich die Zahl der Abwanderungen mittlerweile insgesamt verringert hat (Frondelet al. 2017: 48 ff.). Der lediglich im Jahr 2015 aufgetretene positive Wanderungssaldo in allen Landkreisen war auf einen Sondereffekt, die Zuwanderung von Geflüchteten, zurückzuführen (Carstensen et al. 2018: 14).

Insgesamt schrumpfte die Bevölkerung der Lausitz zwischen 1995 bis 2015 um rund 19 % (-270.000 Einwohner\*innen), von über 1.4 auf unter 1.2 Millionen Einwohner\*innen (ebd.: 13). In den letzten Jahren hat sich dieser Wert zwar weitgehend stabilisiert, aber eine Trendumkehr ist aufgrund der weiterhin negativen Geburten- und Wanderungssaldi nicht zu erwarten. Stattdessen wird Berechnungen der statistischen Landesämter Sachsens und Berlin-Brandenburgs zufolge ein weiterer Bevölkerungsrückgang um rund 10 % bis 2030, auf dann noch knapp 950.000 Einwohner\*innen vorhergesagt, während die Alterskohorte der 20- bis unter 65-Jährigen sogar um weitere 21 % zu schrumpfen droht (vgl. Tabelle 1). Einzig in Cottbus und Dahme-Spreewald sollen die Einwohner\*innenzahlen stabil bleiben bzw. leicht wachsen.

Besonders stark ausgeprägt waren demographische Veränderungen in der Altersklasse der 15- bis unter 65-jährigen, die das Gros des Erwerbspersonenpotentials abbildet. Sie schmolerte sich zwischen 1995 bis 2005 um knapp 260.000 Personen (rund -26,1 %) besonders stark (Carstensen 2018: 13). Die Verschiebungen in der Altersstruktur sind demnach erheblich und das Durchschnittsalter der Lausitzer Bevölkerung wird deutlich weiter ansteigen. Bestätigt werden diese Prognosen auch durch Annahmen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung, das für die Lausitz bis 2035 eine weitere Schrumpfung des Erwerbspersonenpotentials gegenüber 2012 (über 600.000 Erwerbspersonen) auf unter 400.000 Erwerbspersonen erwartet (ebd.: 15).

**Tabelle 1: Anzahl Einwohner\*innen 2017 und Veränderung 2017 bis 2030 nach Altersklassen**

	Einwohner nach Altersklassen						Einwohner insgesamt	
	bis unter 20 Jahre**		20 bis unter 65 Jahre**		über 65 Jahre		absolut 2017	Veränderung 2017-2030
	absolut 2017	Veränderung 2017-2030	absolut 2017	Veränderung 2017-2030	absolut 2017	Veränderung 2017-2030		
Cottbus	16.157	-3 %	59.877	-7 %	25.002	20 %	101.036	1 %
Dahme-Spreewald (Lausitzteil,*)	9.635	-5 %	32.864	-6 %	13.274	27 %	55.773	2 %
Elbe-Elster	15.788	-18 %	59.329	-26 %	28.338	19 %	103.455	-12 %
Oberspreewald-Lausitz	16.856	-15 %	62.853	-20 %	31.413	11 %	111.122	-10 %
Spree-Neiße	17.670	-19 %	66.578	-27 %	31.208	23 %	115.456	-12 %
Bautzen	52.522	-14 %	168.657	-22 %	81.455	15 %	302.634	-11 %
Görlitz	42.071	-15 %	139.941	-25 %	74.575	11 %	256.587	-13 %
<b>Lausitz*</b>	<b>170.669</b>	<b>-14 %</b>	<b>590.099</b>	<b>-21 %</b>	<b>285.265</b>	<b>16 %</b>	<b>1.046.063</b>	<b>-10 %</b>

\*Für die Angaben zur Lausitz ist der Landkreis Dahme-Spreewald gemäß der verwendeten Definition zu einem Drittel einbezogen.

\*\*Für die Brandenburger Kreise gibt die Prognose Daten der Bevölkerungsgruppe 0 bis unter 18 sowie 18 bis unter 65 Jahre an. Daraus resultiert, dass die Werte für den Rückgang der jüngeren Bevölkerungsgruppe etwas höher ausfallen als real, die der mittleren Bevölkerungsgruppe hingegen etwas niedriger als real.

Quellen: Eigene Berechnungen nach Amt für Statistik Berlin Brandenburg ([https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/regionalstatistiken/r-gesamt\\_neu.asp?Ptyp=410&Sageb=12015&creg=BBB&anzwer=6](https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/regionalstatistiken/r-gesamt_neu.asp?Ptyp=410&Sageb=12015&creg=BBB&anzwer=6)), Statistisches Landesamt des Freistaats Sachsen (<https://www.statistik.sachsen.de/html/9674.htm>) und Statistisches Bundesamt (Ergebnisse auf Grundlage des Zensus 2011).

Mit einer derart starken Abnahme des Erwerbspersonenpersonals bei gleichzeitiger Zunahme des Durchschnittsalters spitzen sich Fragen der Fachkräftesicherung und Sicherung der Daseinsvorsorge im ländlichen Raum weiter zu. Es ist mit negativen Auswirkungen auf die zukünftigen Aussichten ansässiger Unternehmen zu rechnen, qualifizierte Mitarbeiter\*innen einstellen zu können (Kluge et al. 2014a: 2). Zudem erschwert es die demographische Entwicklung, der Anforderung gerecht zu werden, das Entstehen verlassener, unterversorgter Landstriche zu vermeiden und das Versprechen einer Herstellung gleichwertiger Lebensbedingungen.

## Arbeitslosigkeit und Fachkräfteverfügbarkeit

Waren 1998 noch annähernd 90.000 Menschen in der Lausitz arbeitslos, so verminderte sich dieser Wert kontinuierlich auf unter 38.000 Arbeitslose im Jahr 2018. Innerhalb nur eines Jahrzehnts (2008 bis 2018) sank die Arbeitslosigkeit in der Lausitz um 43 %.<sup>5</sup> Im April 2019 vermeldete die Agentur für Arbeit Cottbus, dass die Arbeitslosenquote Südbrandenburgs auf unter 6 % gefallen sei: Weniger als 19.000 Menschen waren dort als arbeitsuchend gemeldet. Bei der Agentur für Arbeit Bautzen in Ost-sachsen waren zu diesem Zeitpunkt etwas mehr als 18.000 Menschen als arbeitslos registriert.<sup>6</sup> Der positive Trend des Beschäftigungsaufschwungs setzte sich somit auch auf dem gesamten regionalen Arbeitsmarkt fort. Insgesamt liegt die Arbeitslosenquote in der Lausitz jedoch trotz dieser äußerst positiven Entwicklung nach wie vor oberhalb der bundesdeutschen (4,9 %), brandenburgischen (5,8 %) und sächsischen (5,5 %) Vergleichswerte (BA: 04/2019).

Zugleich schwanken die Werte zwischen den Landkreisen in der Region stark. Die höchsten Arbeitslosenquoten verzeichneten im April 2019 die Landkreise Görlitz mit 7,9 % (über 10.000 Arbeitslose) und Cottbus mit 7,6 % (fast 4.000 Menschen), dicht gefolgt von Oberspreewald-Lausitz mit 7,5 % (knapp 4.400 Personen), Spree-Neiße (6,3 %, fast 4.000 Personen) und Elbe-Elster (5,9 %, rund 3.200 Arbeitslose). In Dahme-Spreewald indes waren weniger als 3.400 Menschen als beschäftigungslos registriert, die Arbeitslosenquote ist hier mit 3,7 % am geringsten. In Bautzen liegt sie mit 5,2 % (8.200 Personen) nur knapp über dem Bundesschnitt (ebd.).

Insgesamt sind in der Lausitz mehr Männer als Frauen erwerbslos gemeldet, in allen Regionen liegen ihre Arbeitslosenquoten durchschnittlich rund 1 % über denen der Frauen. Im Hinblick auf das Alter sind am häufigsten über 50jährige arbeitsuchend, die Arbeitslosenquote der 55- bis 65jährigen liegt in den Teilregionen insgesamt um 1,5 % bis zu 3 % über der Gesamtarbeitslosenquote. Dem Anforderungsniveau der Tätigkeiten nach ist die Gruppe der Helfer\*innen unter den Erwerbslosen am stärksten vertreten – in den Landkreisen Cottbus, Elbe-Elster und Oberspreewald-Lausitz zu über 50 %, wenngleich Helfer\*innentätigkeiten nur rund 30 % der neu aufgenommenen Beschäftigungsverhältnisse ausmachen (Carstensen et al. 2018: 42 f.).

Die seit Anfang der 1990er Jahre positive Entwicklung der Arbeitslosenquote ist auch Ergebnis des demographischen Wandels: Faktoren wie Verrentungen, das rückläufige Erwerbspersonenpotential und ein negativer Wanderungssaldo wirken sich hier in begünstigender Weise auf die Arbeitslosenstatistik aus. Im Hinblick auf die Fachkräftesicherung ist eine differenzierte Betrachtung der Qualifikationsstruktur der Beschäftigten erforderlich, denn Ungleichgewichte zwischen branchen- und sektorspezifischem Fachkräftemangel und Auslastungsproblemen bzw. strukturbedingten Fachkräfteüberhängen können (verstärkte) Spannungsverhältnisse im Arbeitsmarkt hervorrufen.

---

5 Vgl. Bundesagentur für Arbeit (o.J.), Bundeszentrale für politische Bildung (2019) und Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2017).

6 Lausitzer Rundschau. 02.05.2019: Korken-Knall auf die Statistik bleibt aus. Online: [https://www.lr-online.de/nachrichten/wirtschaft/arbeitslosigkeit-sinkt-strukturschwache-bleibt-kein-korkenknall-in-der-lausitz\\_aid-38483901](https://www.lr-online.de/nachrichten/wirtschaft/arbeitslosigkeit-sinkt-strukturschwache-bleibt-kein-korkenknall-in-der-lausitz_aid-38483901) (Zugriff: 19.06.2019).

## 2.2 Wirtschaft und Beschäftigung

### Wirtschaftsstruktur

Die Wirtschaftsstruktur der Lausitz ist, abgesehen von den Sektoren Energie und Bergbau, als sehr kleinteilig zu bezeichnen. Es überwiegen mittelständische Unternehmen und kleine Betriebe (KMU) in traditionellen Branchen, deren Exportorientierung wachsend, aber insgesamt vergleichsweise gering ist – Unternehmen der Hightech-Branchen oder große, wertschöpfungsintensive Betriebe hingegen sind in der Region ebenso wie Konzernsitze oder -zentralen kaum angesiedelt (Kluge et al. 2014a: 1 ff.; Kluge et al. 2014b: 11).

Neben dem Energiesektor sind die Metallindustrie, die Chemie- und Kunststoffindustrie, der Anlagen-, Fahrzeug- und Maschinenbau sowie die Nahrungsmittelindustrie zentral für die Wirtschaftsleistung der Region (Carstensen et al. 2018: 32). Zuletzt konnte auch die Tourismusindustrie rund um die „Lausitzer Seenlandschaft“ Fuß fassen.<sup>7</sup> Durchschnittlich stärker ausgeprägt als im ostdeutschen Vergleichsraum sind als Beschäftigungsträger die Sektoren Bergbau, Verkehr und Lagerei, Baugewerbe sowie die Energiewirtschaft (ebd.: 22).

Die Industrie – aus Gründen der statistischen Datenverfügbarkeit hier verstanden als Summe aus Verarbeitendem Gewerbe (WZ C) sowie Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden (WZ B) – bildet das wirtschaftliche Rückgrat der Region: Trotz der ab 1989/90 einsetzenden Deindustrialisierung verfügt die Lausitz noch immer über einen deutlich höheren Industrialisierungsgrad als der ostdeutsche Durchschnitt (Kluge et al. 2014b: 7). In den letzten zehn Jahren ist die Zahl der Industriebetriebe in der Lausitz um gut 8 % angewachsen. Diese Veränderungsrate liegt leicht über dem Vergleichswert auf Landesebene in Sachsen (+7 %) und leicht unter dem in Brandenburg (+11 %).<sup>8</sup> Im Jahr 2017 waren rund 800 Industriebetriebe mit jeweils mindestens 20 Beschäftigten in der Lausitz ansässig. Ungefähr zwei Drittel der Lausitzer Industriebetriebe sind in den Landkreisen Görlitz und Bautzen beheimatet, wo auch rund zwei Drittel der Umsätze erwirtschaftet werden<sup>9</sup>.

Hinsichtlich der Umsätze verzeichnete die Lausitzer Industrie in der jüngeren Vergangenheit ein deutliches Wachstum (vgl. *Tabelle 2*). Die Gesamtumsätze stiegen von rund 14 Mrd. Euro im Jahr 2014 auf rund 15,5 Mrd. Euro im Jahr 2017 (für das Jahr 2018 liegen noch keine landkreisspezifischen Daten aus Sachsen vor). Das Umsatzwachstum der Industrie liegt damit in der Lausitz auf dem Niveau, das im Freistaat Sachsen erreicht wird und zugleich deutlich über dem Brandenburger Landesdurchschnitt.

Dabei sind die Anteile der in der Lausitz im Verarbeitenden Gewerbe erwirtschafteten Umsätze innerhalb Brandenburgs und Sachsens für die Länder von so großer Bedeutung, dass sich konjunkturelle Schwankungen auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung der Region auszuwirken vermögen (Kluge,

7 MDR Sachsen Spiegel. 29.12.2018. Abschluss nach 20 Jahren Leipziger Neuseenland ist vollständig geflutet. Online: <https://www.mdr.de/sachsen/leipzig/leipzig-leipzig-land/abschluss-flutung-neuseenland-100.html> (Zugriff: 15.05.2019).

8 Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2018): Statistischer Bericht. Verarbeitendes Gewerbe (sowie Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden) im Land Brandenburg. Online: [https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/publikationen/stat\\_berichte/2019/SB\\_E01-01-00\\_2018j01\\_BB.pdf](https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/publikationen/stat_berichte/2019/SB_E01-01-00_2018j01_BB.pdf) und Statistisches Landesamt Sachsen (2018): Statistischer Bericht. Bergbau und Verarbeitendes Gewerbe im Freistaat Sachsen. Online: [https://www.statistik.sachsen.de/download/050\\_W-Ind-Bau/E\\_I\\_3\\_j18\\_SN.pdf](https://www.statistik.sachsen.de/download/050_W-Ind-Bau/E_I_3_j18_SN.pdf).

9 Ebd.

Lehmann, Ragnitz & Rösel 2014: 44). Erschwerend kommt hinzu, dass die nur vereinzelt ansässigen Großunternehmen (wie BASF in Schwarzheide, Siemens in Görlitz und Bombardier in Görlitz und Bautzen) zusätzlich eine gewisse wirtschaftliche Volatilität der Landkreise bedingen (ebd.: 29). Dennoch haben sich in der gesamten Lausitz industrielle Strukturen gebildet, die solides Wirtschaftswachstum ermöglichen, was gleichzeitig aber auch von (extern bedingten) singulären Effekten abhängig sein kann.

**Tabelle 2: Umsatzentwicklung im Verarbeitenden Gewerbe (WZ C) sowie Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden (WZ B)**

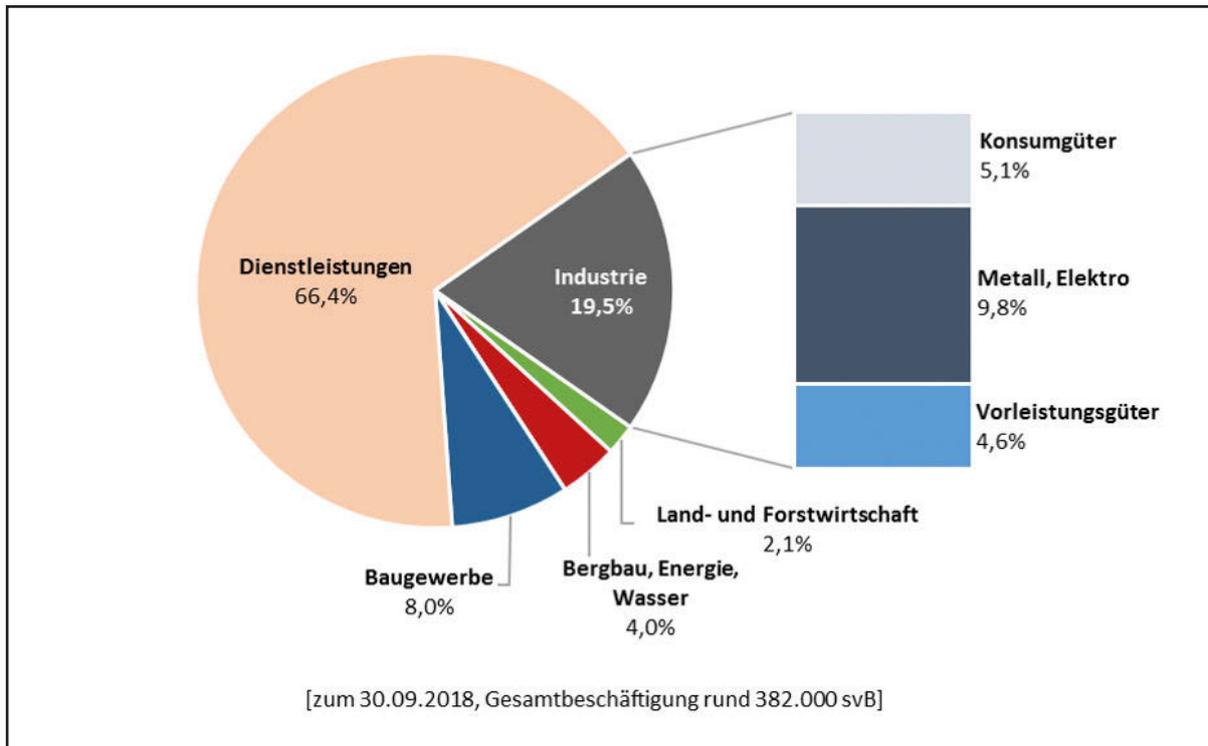
	[in Millionen Euro, Betriebe mit mind. 20 Beschäftigten]									
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Cottbus	100	196	174	157	179	131	192	136	135	
Dahme-Spreewald <sup>(Lausitzteil)*</sup>	310	339	367	360	338	337	358	350	371	
Elbe-Elster	860	914	1.067	1.011	1.012	1.023	1.009	1.038	1.134	
Oberspreewald-Lausitz	1.518	1.564	1.699	1.764	1.886	1.824	1.861	1.799	2.003	
Spree-Neiße	1.425	1.592	1.669	1.693	1.661	1.752	1.719	1.729	1.756	
Bautzen	5.712	6.290	7.008	7.388	7.505	6.176	5.659	5.544	6.320	
Görlitz	2.380	2.349	2.690	2.921	2.491	2.826	2.969	3.062	3.756	
<b>Lausitz*</b>	<b>12.305</b>	<b>13.245</b>	<b>14.675</b>	<b>15.294</b>	<b>15.072</b>	<b>14.070</b>	<b>13.767</b>	<b>13.658</b>	<b>15.476</b>	
Brandenburg	20.198	22.511	25.787	25.432	25.532	26.031	25.910	25.800	26.272	
Sachsen	48.433	54.423	60.889	59.529	58.589	60.917	63.660	63.793	67.396	

\* Für die Berechnung der Angaben zur Lausitz ist der Landkreis Dahme-Spreewald gemäß der verwendeten Definition zu einem Drittel einbezogen.

Quellen: Eigene Berechnungen nach Statistisches Bundesamt (2019): Jahresbericht für Betriebe im Verarb. Gewerbe, Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2019): Jahresbericht für Betriebe im VAG, Statistisches Landesamt des Freistaats Sachsen (2018): Branchenreport Industrie – Kreisergebnisse.

Die Region als Vergleichsmaßstab zugrunde legend ist feststellbar, dass die Industrie in der sächsischen Oberlausitz (Sachsen) insgesamt stärker ausgebildet ist als in der Niederlausitz (Brandenburg). Die Lausitzer Industrieunternehmen tragen insbesondere im ländlichen Raum, abseits der industriellen Zentren Zwickau, Leipzig, Chemnitz und dem Erzgebirge, wesentlich zur Wirtschaftskraft des Freistaats bei. Für Brandenburg leistet die Lausitz wiederum einen so entscheidenden Beitrag zur Wirtschaftskraft und Wachstumsdynamik der Wirtschaft, dass die Daten die Rolle der Lausitz als „industrielles Herz“ des Bundeslandes bestätigen: Rund 28 % aller Industriebeschäftigten Brandenburgs sind in der Niederlausitz tätig, obwohl in der Region lediglich 19 % der Einwohner\*innen leben.

Abbildung 3: Anteile sv-pflichtiger Beschäftigung in der Lausitz nach Sektoren



Quelle: Eigene Berechnungen nach Bundesagentur für Arbeit. Regionalreport über Beschäftigte. 2019

Unter den Industriebranchen stellt die Metall- und Elektroindustrie mit knapp 10 % aller sv-pflichtig Beschäftigten den Schwerpunkt dar (vgl. Abbildung 3). Jeweils rund 5 % der Gesamtbeschäftigung entfallen auf die Hersteller von Konsumgütern (z. B. Nahrungsmittel, Textilien, Pharmazeutika und Mobiliar) bzw. auf die Produktion von Vorleistungsgütern (z. B. Holz, Papier, chemische Produkte und Kunststoffe). Zum Vergleich: Der Bergbau- und Energiesektor trägt zusammen mit der Wasserwirtschaft zu 4 % der Gesamtbeschäftigung in der Lausitz bei. Für die Bewertung sind hier aber zum Teil hohe lokale Unterschiede sowie die mit Bergbau und Energie über Zulieferbeziehungen verbundenen Industrieunternehmen zu berücksichtigen.

### Beschäftigung

Zum Stichtag am 30.09.2018 zählte die Lausitz über 380.000 sozialversicherungspflichtige Beschäftigungsverhältnisse. Gegenüber 2013 hat sich diese Zahl um rund 16.000 (+4,3 %) erhöht (BA 2019). Alle Landkreise sowie die kreisfreie Stadt Cottbus konnten im Beobachtungszeitraum Beschäftigungszuwächse verzeichnen.

Gegenwärtig ist die Beschäftigungsentwicklung in der Lausitz noch immer durch einen leichten Beschäftigungsaufbau gekennzeichnet, wodurch sich die Zahl der Erwerbstätigen in der Lausitz seit Mitte der 2000er Jahre wieder stabilisiert hat (Frondelet al. 2017: 57 ff.). Die Zahl der Erwerbstätigen stieg in der Lausitz zwischen 2007 bis 2015 um knapp 1 % (ca. 4.700 Beschäftigte) leicht an.

Der Beschäftigungsaufbau fand in der Lausitz zwischen 2007 bis 2017 vor allem in den Branchen Gesundheitswesen, den sonstigen wirtschaftlichen Dienstleistungen (hier vor allem im Teilbereich

der Arbeitnehmerüberlassung), im Verarbeitenden Gewerbe, im Gastgewerbe sowie in den Bereichen Verkehr und Lagerei statt (Carstensen et al. 2018: 23). Dies entspricht etwa der Beschäftigungsentwicklung im gesamten ostdeutschen Raum, wobei sie in ländlichen Regionen stets etwas weniger dynamisch als in den Metropolräumen verläuft und demgemäß in der Lausitz schwächer als im Bundesschnitt und in Ostdeutschland insgesamt ausfiel.

Zudem verliefen Beschäftigungsauf- und -abbau auch innerhalb der Lausitz regional höchst unterschiedlich. So blieben in den Jahren 2007 bis 2017 überdurchschnittlich hohe Zuwächse beschränkt auf die Landkreise Dahme-Spreewald (8,6 %) – begründet vor allem durch Spill-Over Effekte aus Berlin in die angrenzende Regionen – und Oberspreewald-Lausitz (4,1 %). Den höchsten Beschäftigungsrückgang verbuchte demgegenüber das Oberzentrum Cottbus (-6,8 %). Weniger Beschäftigte weisen auch Elbe-Elster, Görlitz und Spree-Neiße aus (Dehio/Schmidt 2018: 17). Zurückführbar ist dies auf verringerte Anteile Erwerbstätiger in den Bereichen Erziehung und Unterricht<sup>10</sup>, in der Energie- und Wasserversorgung sowie Entsorgungswirtschaft, der Land- und Forstwirtschaft, im Bergbau und der Gewinnung von Steinen und Erden sowie im Bereich der Finanz- und Versicherungsdienstleistungen (ebd.: 23).

Die Teilzeitquote in der Lausitz entsprach 2018 mit 31 % (ca. 120.000 Beschäftigte) der brandenburgischen und lag knapp über dem sächsischen Wert (30 %). Gegenüber dem bundesdeutschen Durchschnitt (28 %) merklich erhöht ist sie in Cottbus (33 %) und im Landkreis Görlitz (35 %). Der Anteil der Teilzeitbeschäftigten an der Gesamtbeschäftigung in der Lausitz hat sich in den vergangenen fünf Jahren um rund vier Prozentpunkte erhöht, womit der Anstieg leicht über dem auch bundesweit zunehmenden Trend (+3 %) liegt.

Geringfügig beschäftigt waren im Jahr 2018 fast 55.000 Erwerbstätige mit Wohnsitz in der Lausitz; in der Region selbst gingen rund 52.000 Arbeitnehmer\*innen einer geringfügigen Beschäftigung nach. Dies bedeutet, dass mehrere Tausend Erwerbstätige aus der Region auspendeln, um anderswo einer geringfügigen Beschäftigung nachzugehen. Insgesamt ist die Zahl geringfügig Beschäftigter in der Lausitz seit 2013 um jeweils knapp 5.000 geringfügig Beschäftigte (am Wohn- bzw. Arbeitsort) gesunken. Garloff (2015; 2016) verweist in diesem Zusammenhang auf einen signifikant positiven Zusammenhang zwischen Mindestlohnbetreffenheit und sozialversicherungspflichtiger Beschäftigung sowie einen signifikant negativen Effekt auf geringfügige Beschäftigung durch die Einführung des Mindestlohns<sup>11</sup>.

Wie in der Gesamtbevölkerung ist unter sv-pflichtig Beschäftigten in der Lausitz ein Trend zur Überalterung festzustellen. Während im Jahr 2018 rund jeder vierte Beschäftigte 50 Jahre oder älter war (im Bundesdurchschnitt knapp jeder Fünfte), waren lediglich 7,5 % unter 25 Jahre alt (Bundesdurchschnitt 10,6 %). Die teilweise deutlichen Abweichungen der Lausitz vom bundesdeutschen Mittel lassen sich für die Region mit dem Geburtenknick der Nachwendezeit sowie der hohen Abwanderung vor allem junger Menschen in den 1990er Jahren begründen.

---

10 Hier sank der Beschäftigungsanteil in der Lausitz überdurchschnittlich stark von 5,8 % auf 3,7 %, während er sich innerhalb Ostdeutschlands von 6,3 % auf 4,7 % verringerte.

11 Zit. nach: Mindestlohnkommission (2016): Erster Bericht zu den Auswirkungen gesetzlichen Mindestlohns an die Bundesregierung nach § 9 Abs. 4 Mindestlohngesetz. S. 80.

## Bildungsabschlüsse und Anforderungsprofile

Zugleich ist die Lausitz überdurchschnittlich stark von qualifizierter Facharbeit geprägt, wie sich im Hinblick auf die Bildungsabschlüsse der Beschäftigten konstatieren lässt (vgl. Tabelle 3). Der Anteil der Beschäftigten mit abgeschlossener Berufsausbildung (66 %) und derer mit einem Meister- oder gleichwertigen Fachschulabschluss (fast 7 %) liegt zusammengerechnet bei knapp 73 % und damit deutlich über dem Durchschnitt der Länder Brandenburg (68 %) und Sachsen (69 %) sowie mehr als elf Prozentpunkte über dem Bundesschnitt (61 %). Der Anteil der Beschäftigten ohne Berufsabschluss beträgt in der Region hingegen nur 6,7 % (gegenüber 12,8 % im Bundesschnitt).

**Tabelle 3: Anteile der sv-pflichtig Beschäftigten zum 30.09.2018**

	ohne Berufsabschluss	mit abgeschlossener Berufsausbildung	mit Meister-/Techniker-/Fachschulabschluss	mit akadem. Abschluss	Ausbildung unbekannt
Cottbus	8%	60%	7%	17%	8%
Dahme-Spreewald <sup>(Lausitzteil,*)</sup>	8%	61%	6%	12%	13%
Elbe-Elster	6%	71%	7%	9%	8%
Oberspreewald-Lausitz	7%	66%	6%	13%	8%
Spreewald-Neiße	7%	64%	7%	9%	14%
Bautzen	6%	68%	6%	12%	7%
Görlitz	6%	67%	6%	13%	7%
Lausitz	7%	66%	6%	12%	8%
Deutschland	13%	56%	5%	16%	10%

\* Für die Berechnung der Angaben zur Lausitz ist der Landkreis Dahme-Spreewald gemäß der verwendeten Definition zu einem Drittel einbezogen.

Quelle: Eigene Berechnungen nach Bundesagentur für Arbeit. Regionalreport über Beschäftigte. 2019

Allerdings ist auch der Anteil formal hoch qualifizierter Beschäftigter in der Region niedriger. Während deutschlandweit 16,2 % aller sv-Beschäftigten über einen akademischen Abschluss verfügen, fällt ihr Anteil in der Lausitz mit 12,3 % auch hinter den der Länder Brandenburg (13,2 %) und – auffallend weit – Sachsen (17,2%) zurück.

**Tabelle 4: Sv-pflichtige Beschäftigung nach Anforderungsniveau der ausgeübten Tätigkeit**

	[Anteile der sv-pflichtig Beschäftigten zum 30.09.2018]			
	Helfer	Fachkraft	Spezialist	Experte
Lausitz	14,5%	64,1%	10,5%	10,2%
Brandenburg	16,1%	61,4%	11,0%	10,6%
Sachsen	13,7%	60,2%	11,9%	13,6%
Deutschland	15,5%	58,3%	12,6%	13,0%

Quellen: Eigene Auswertung nach Länder- und Regionalreports über Beschäftigte der Agentur für Arbeit. 2019

Über die formale Qualifizierung der Beschäftigten hinaus bestätigen die Daten zu den tatsächlich ausgeübten Tätigkeiten den hohen Stellenwert qualifizierter Facharbeit in der Lausitz. Dem Anforderungsniveau der ausgeübten Tätigkeiten nach sind in der Lausitz fast 15 % der sv-pflichtig Beschäftigten als Helfer\*innen<sup>12</sup>, 64 % als Fachkräfte, 11 % als Spezialist\*innen und 10 % als Expert\*innen tätig (vgl. Tabelle 4).

Während der Fachkräfteanteil deutlich über den jeweiligen Landeswerten Brandenburgs und Sachsens und auch klar über dem Bundesschnitt liegt, werden verglichen mit der Bundesebene im Durchschnitt weniger Spezialist\*innen (-2,1 %) und Expert\*innen (-2,8 %) in der Region beschäftigt. Der insbesondere in den ländlichen Regionen der Lausitz relativ gering ausgeprägte Anteil an Spezialist\*innen- und Expert\*innentätigkeiten, ist vor allem auf das weitgehende Fehlen großbetrieblicher Strukturen und die Absenz von Konzernzentralen zurückzuführen: In ihnen sind diese Beschäftigtengruppen üblicherweise vorwiegend tätig, etwa in Forschungs- und Entwicklungsabteilungen (F&E). Allein die Universitätsstadt Cottbus verfügt mit mehr als 6.000 Spezialist\*innen (12,9 %) und fast 6.200 Expert\*innen (13,3 %) über einen signifikant höheren Anteil dieser Beschäftigtengruppe. Der MINT-Anteil an allen in der Region sozialversicherungspflichtig Beschäftigten entsprach mit rund 5 % dem (deutlich über den Durchschnittswerten Brandenburgs und Sachsens liegendem) Bundesschnitt (Frondelet et al. 2017: 72).

Zwischen 2013 und 2017 nahm die Bedeutung der Helfer\*innentätigkeiten in der Lausitz zu. Wachsende Anteile an Hilfstätigkeiten um rund 2,5 % (2 % im ostdeutschen Schnitt) – zu Lasten von Facharbeitern und hoch qualifizierten Beschäftigten – sind in den Bereichen Verkehr und Lagerei, Maschinen- und Fahrzeugtechnik, Mechatronik und Elektroberufe, Metallherzeugung und -bearbeitung sowie der Lebensmittelherstellung zu beobachten (Carstensen et al. 2018: 20 ff.). Neben dem damit indizierten Trend zu fachlich-inhaltlich sinkenden Anforderungen an die ausgeübten Tätigkeiten birgt diese Entwicklung ein weiteres Risiko: Die dem Anforderungsniveau nach Helfer\*innen zuzuordnenden Tätigkeiten weisen ein (sehr) hohes Substituierungspotential auf – vor allem solche Stellenprofile, in denen überwiegend Routinetätigkeiten anfallen. In der Lausitz entspricht dies rund 55 % der Beschäftigungsverhältnisse für Helfer\*innen, deutschlandweit 58 %. Im Verarbeitenden Gewerbe sind etwa fertigungstechnische Berufe oder unternehmensbezogene Dienstleistungsberufe betroffen. Gegenwärtig arbeiten rund 105.000 Lausitzer Beschäftigte in Bereichen mit hohem Substituierbarkeitspotential (ebd.: 46 ff.).

---

12 Um die unterschiedlichen Komplexitätsgrade der ausgeübten Tätigkeiten abbilden zu können, werden vier Anforderungsniveaus unterschieden. Sie beziehen sich auf die jeweilige (Berufs-)Tätigkeit, unabhängig von der formalen Qualifikation der Person, die diese ausübt.

Die Kategorie „Helfer\*innen“ erfasst Anlern- und Hilfstätigkeiten, die üblicherweise von Beschäftigten ohne Berufsabschluss ausgeübt werden. Dabei handelt es sich typischerweise um einfache, wenig komplexe (Routine-)Tätigkeiten.

Das Anforderungsniveau „Fachkraft“ beschreibt fachlich ausgerichtete Berufe und Tätigkeiten, die fundierte Fachkenntnisse und Fertigkeiten voraussetzen. Zumeist bildet der Abschluss einer zwei- bis dreijährigen Berufsausbildung die Grundlage für eine Tätigkeit auf diesem Niveau.

Dem Anforderungsniveau „Spezialist“ werden gegenüber der „Fachkraft“ deutlich komplexere und mit Spezialkenntnissen und Fertigkeiten verbundene Tätigkeiten zugeordnet. Zudem ist die Befähigung zur Bewältigung gehobener Fach- und Führungsaufgaben wie Planung und Kontrolle erforderlich. Die notwendigen Kenntnisse und Fähigkeiten werden häufig im Rahmen von beruflichen Fort- oder Weiterbildungen (z. B. Meister, Techniker oder gleichwertiger Fach-/Hochschulabschluss) erworben.

Als „Expert\*innen“ werden Berufe und Tätigkeiten erfasst, die einen sehr hohen Komplexitätsgrad aufweisen bzw. entsprechend hohe Kenntnisse und Fertigkeiten verlangen. Dies können z. B. Entwicklungs-, Forschungs- und Diagnostiktätigkeiten, Wissensvermittlung sowie Leitungs- und Führungsaufgaben sein. In der Regel setzen Tätigkeiten auf diesem Anforderungsniveau eine mindestens vierjährige Hochschulausbildung und/ oder entsprechende Berufserfahrung voraus.

## Beschäftigungsrelevanz der Wirtschaftssektoren für regional relevante Berufsbilder

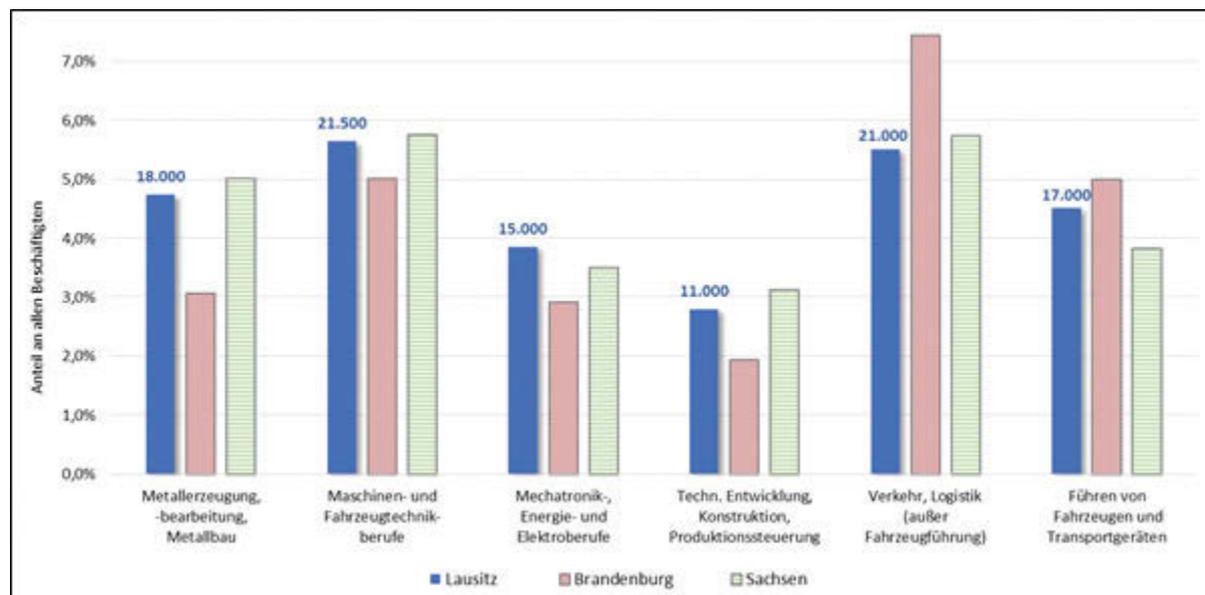
Betrachtet man die regional unterschiedlich stark ausgeprägten Wirtschaftssektoren, ergeben sich für die Beschäftigungsstruktur der Lausitz mehrere zentrale Befunde: Von den insgesamt rund 382.000 sv-pflichtig Beschäftigten sind über 66 % im Dienstleistungsbereich tätig, was im Verhältnis zum brandenburgischen (73 %), sächsischen (über 70 %) und auch bundesdeutschen (fast 71 %) einen eher niedrigen Vergleichswert darstellt. Eine im Landes- und Bundesvergleich überdurchschnittlich hohe Bedeutung haben in ihrer Beschäftigungsrelevanz das Baugewerbe (8 % aller sv-pflichtig Beschäftigten sind in diesem Bereich tätig) sowie der Sektor Bergbau und Energie (4 % aller sv-Beschäftigten), was den industriellen Charakter der Lausitz wiederum unterstreicht.

Regionalspezifische Analysen machen innerhalb der Lausitz zudem lokal sektorielle Schwerpunkte sichtbar, die Rückschlüsse auf die wirtschaftsräumliche Struktur zulassen. Im Landkreis Spree-Neiße sind mit über 16 % mehr als 6.100 aller sv-Beschäftigten im Sektor Bergbau, Energie- und Wasserversorgung, Entsorgungswirtschaft tätig. Die Metallbranche wiederum ist in den Landkreisen Bautzen mit 13,9 % (über 15.900 sv-Beschäftigte), Elbe-Elster mit 12,5 % (über 4.200 sv-Beschäftigte) und Görlitz mit 12,1 % (mehr als 10.600 sv-Beschäftigte) der Beschäftigtenanteile deutlich beschäftigungsrelevanter als in den anderen Landkreisen.

Im Hinblick auf die Berufsgruppenzugehörigkeit haben in der Lausitz im Vergleich zur Bundesebene (4 %) insgesamt mit mehr als 18.000 Beschäftigten (4,8 %) überdurchschnittlich viele Beschäftigte Berufe in der Metallherzeugung, -bearbeitung und im Metallbau ergriffen (vgl. *Abbildung 4*). Von ihnen sind über 6.900 in Bautzen (Anteil an allen Berufen im Landkreis: 5,9 %), rund 4.600 (5,2 %) in Görlitz und weitere knapp 2.000 in Elbe-Elster (5,7 %) beschäftigt. Auch Mechatronik-, Energie- und Elektroberufen (3,9 % bzw. rund 15.000 Beschäftigte) wird mit Blick auf die Bundesebene (3,2 %) und auf die Länder Brandenburg (2,9 %) und Sachsen (3,5 %) überproportional häufig nachgegangen. Fast 12.000 Beschäftigte dieser Berufsgruppen sind in Bautzen, Görlitz, Spree-Neiße und Oberspreewald-Lausitz tätig. Verkehrs- und Logistikberufen gehen in Bautzen und Oberspreewald-Lausitz knapp 10.000 Beschäftigte sowie weitere rund 8.000 im Landkreis Dahme-Spreewald nach, wo diese Berufe – auch aufgrund des Einzugsbereiches des Flughafens Berlin-Schönefeld – etwa doppelt so häufig (12,5 %) wie auf Bundesebene (6,3 %) nachgefragt werden. Führer von Fahrzeug- und Transportgeräten finden sich in Dahme-Spreewald (6,8 % bzw. über 4.200 Beschäftigte), ebenso wie im Landkreis Spree-Neiße (6 % bzw. knapp 2.300 Beschäftigte) überproportional häufig. Spree-Neiße ist zudem der Landkreis mit dem höchsten Anteil an Maschinen- und Fahrzeugtechnik-Berufen (7,5 % bzw. über 2.800 Beschäftigte), gefolgt von Bautzen (6,8 % bzw. fast 7.800 Beschäftigte).

Ansonsten sind Berufe in der Kunststoff- und Holzherstellung und -verarbeitung in der Lausitz (2,2 %) weiter verbreitet als in der Bundesrepublik (1,7 %) oder in den Ländern Brandenburg und Sachsen (jeweils 1,6 %). Auch Textil- und Lederberufe finden sich hier (0,9 %) mit einem lokalen Zentrum in Görlitz (2,2 % bzw. über 1.900 Beschäftigten) überdurchschnittlich häufig (Gesamtanteil auf Bundesebene: 0,4 %).

Abbildung 4: Beschäftigung nach ausgewählten Berufen



Quelle: Eigene Berechnungen nach Bundesagentur für Arbeit. 2019

### Fachkräfte-Engpässe und Ausbildungsbeteiligung

In den Berufsgruppen Maschinenbau- und Betriebstechnik (251), Klempnerei, Sanitär, Heizung und Klimatechnik (342) und Energietechnik (262) lagen gemäß einer Engpassanalyse der Bundesagentur für Arbeit<sup>13</sup> für den Zeitraum Mai 2017 bis April 2018 in der Lausitz Fachkräfteengpässe vor (Carstensen et al. 2018: 36). Über die Regionalagenturen für Arbeit wurde im Frühjahr 2019 vor allem nach Berufskraftfahrern, Fachkräften für den Verkauf und Gastronomie-Service sowie nach Fachkräften in den Bereichen Marketing, Kraftfahrzeugtechnik, nach Bau-Elektrikern, Köchen und Altenpflegern gesucht.<sup>14</sup>

Ausschlaggebend für die Fachkräftesicherung ist unter anderem, ob und in welchem Umfang die Unternehmen selbst ausbilden. Gegenwärtig steht einer allgemeinen Zunahme der Ausbildungsstellen zugleich ein Rückgang der Anzahl von Bewerbungen um Ausbildungsplätze gegenüber, was seit 2009 insgesamt zu einer signifikanten Verbesserung der Lehrstellenversorgung führte: So gab es 2017 pro Bewerber 0,96 gemeldete Ausbildungsstellen (1,05 Ostdeutschland) während es 2009 pro Bewerber lediglich 0,66 gemeldete Ausbildungsstellen in der Lausitz waren (ebd.: 38). Der Anteil Auszubildender an den sv-Beschäftigten lag 2017 in der Lausitz mit 3,1 % deutlich unter dem Bundesschnitt (4,2 %) (Frondelet al. 2017: 74). Insgesamt kann die Ausbildungsaktivität der Lausitzer Unternehmen damit als ausbaufähig charakterisiert werden.

13 Gemäß der Definition der Bundesagentur für Arbeit gelten als Engpassberufe solche, bei denen die durchschnittliche Vakanzzeit für eine Stelle über 40 % höher als für den Durchschnitt aller Berufe liegt, es weniger als zwei Arbeitslose pro ausgeschriebener Stelle für Fachkräfte oder Spezialist\*innen bzw. weniger als vier Arbeitslose pro ausgeschriebener Stelle für Expert\*innen gibt und deren berufs-spezifische Arbeitslosenquote maximal 3 % beträgt (IAB 2018: 35).

14 Lausitzer Rundschau. 02.05.2019: Korken-Knall auf die Statistik bleibt aus. Online: [https://www.lr-online.de/nachrichten/wirtschaft/arbeitslosigkeit-sinkt-strukturschwache-bleibt-kein-korkenknall-in-der-lausitz\\_aid-38483901](https://www.lr-online.de/nachrichten/wirtschaft/arbeitslosigkeit-sinkt-strukturschwache-bleibt-kein-korkenknall-in-der-lausitz_aid-38483901).

## Einkommen und Arbeitnehmerentgelte

Die Höhe der Einkommen<sup>15</sup> und Entgelte<sup>16</sup> ist in der Lausitz ebenfalls unterdurchschnittlich (vgl. Tabelle 5). Bei z. T. erheblichen regionalen Unterschieden liegen die verfügbaren Einkommen zwischen 83 % (Görlitz und Elbe-Elster) bis 91 % (Cottbus und Dahme-Spreewald) des Bundesdurchschnitts.

**Tabelle 5: Verfügbares Einkommen der privaten Haushalte und Arbeitnehmerentgelt je Arbeitsstunde**

	Verfügbares Einkommen der privaten Haushalte		Arbeitnehmerentgelt je Arbeitsstunde	
	[2016, Anteil an Deutschland]	[Entwicklung 2000-2016]	[2016]	[Entwicklung 2006-2016]
Cottbus	91%	21%	26,20 €	39%
Dahme-Spreewald	91%	10%	25,40 €	36%
Elbe-Elster	83%	16%	23,10 €	34%
Oberspreewald-Lausitz	85%	18%	24,60 €	36%
Spree-Neiße	88%	20%	25,50 €	40%
Bautzen	89%	20%	k.A.	k.A.
Görlitz	83%	18%	k.A.	k.A.
<i>Deutschland</i>	<i>21.952 Euro / Ew.</i>	<i>10%</i>	<i>31,50 €</i>	<i>28%</i>

Quellen: Arbeitskreis Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung der Länder 2019; Landesregierung Brandenburg 2019

Die verfügbaren jährlichen Einkommen bewegen sich in der Lausitz um 1.240 Euro unterhalb des brandenburgischen und um etwa 900 Euro unterhalb des sächsischen Durchschnitts, während das jährlich verfügbare Einkommen in Brandenburg wiederum bereits um 3.730 Euro und in Sachsen um über 3.630 Euro unter dem bundesdeutschen Schnitt liegt. Das höchste jährlich verfügbare Einkommen pro Einwohner\*in weist mit 22.068 Euro Dahme-Spreewald aus, womit sich die Einkommen des an den Berliner „Speckgürtel“ grenzenden Landkreises über dem Schnitt der ostdeutschen Länder und des Bundes bewegen. Eine Angleichung an das bundesdeutsche Niveau findet im Zeitverlauf eher schleppend statt, obwohl Einkommenswachstum und Anstieg der Arbeitnehmerentgelte in der Lausitz zuletzt deutlich höher ausfielen als in der Bundesrepublik. Die Zuwächse sind jedoch hauptsächlich auf die sinkende Arbeitslosigkeit und das geringere Ausgangsniveau zurückzuführen, wodurch auch absolut moderate Steigerungen hohe prozentuale Wachstumsraten bewirken.

15 Definition verfügbares Einkommen: Löhne/Gehälter + staatliche monetäre Transferleistungen – Steuern, Sozialbeiträge und laufende private Transfers = verfügbares Geld für Konsum und Sparen.

16 Definition Arbeitnehmerentgelt: Bruttolöhne und -gehälter sowie die tatsächlichen und unterstellten Sozialbeiträge der Arbeitgeber = Einkommen für die privaten Haushalte gleichzeitig Kostenfaktor für Unternehmen.

**Exkurs: Die Bedeutung der Braunkohlewirtschaft für den Industriestandort Lausitz**

Die jahrhundertealten Traditionen der Glasproduktion und des Textilgewerbes in der Lausitz waren nach der Wiedervereinigung vom Niedergang betroffen, während die Braunkohlewirtschaft bis heute in ihrer Beschäftigungswirkung für den Standort zentral ist. Die Bergbau- und Rohstoffindustrie ist in ihrer Bedeutung historisch gewachsen: Bereits seit Mitte des 19. Jahrhunderts fanden Tagebauaktivitäten in der Lausitz statt, seit Beginn des 20. Jahrhundert erfolgt der Abbau der Braunkohle in industriellem Maßstab.

Da die Braunkohle die einzige heimische Energiequelle der DDR darstellte, war eine sprunghafte Zunahme der Förderung in den 1950er Jahren zu verzeichnen, so dass sie schließlich bis zu 87 % zur Stromerzeugung beitrug und Ende der 1980er Jahre rund 80.000 Bergleute ihr Auskommen im Revier fanden. Seit dem Strukturbruch 1989/90 sank die Anzahl der Beschäftigten in den Sektoren Bergbau und Energiegewinnung kontinuierlich. Bis 1999 fiel sie laut Statistik der Kohlewirtschaft (2016), von etwa 80.000 auf noch knapp über 8.000 Beschäftigte.

Der Anteil der Braunkohle an der Bruttostromerzeugung in Deutschland lag 2016 bei 23 % (2000: 26 %) und es waren insgesamt noch knapp 20.000 Arbeitnehmer\*innen (2005: rund 23.000) in diesem Wirtschaftszweig beschäftigt. Auf die Region des Lausitzer Reviers, wo man mit 36 % zur gesamtdeutschen Braunkohleförderung beitrug und an der Bruttowertschöpfung der Region einen Anteil von über 4,3 % (rund 1,2 Mrd. Euro) erzielte, entfielen davon 42 % der direkten Beschäftigung (Dehio & Schmidt 2018).

Nachdem sich Vattenfall aus der Lausitz zurückzog, kaufte im Jahr 2016 der tschechische Energiekonzern EPH gemeinsam mit der Kapitalgruppe PPF Investments die Kraftwerke und Tagebaue. Seither verfügt die Tochter LEAG, als Marke der Unternehmen Lausitz Energie Bergbau AG und Lausitz Energie Kraftwerke AG unter dem Dach der LEAG Holding a.s. vereint, über die Kohlevorkommen und ist größter Arbeitgeber in der Region. Heute betreibt die LEAG in der Lausitz die drei aus den Tagebauen Jänschwalde, Welzow-Süd, Nochten und Reichwalde versorgten Braunkohlekraftwerke Jänschwalde, Schwarze Pumpe und Boxberg,<sup>17</sup> deren Beschäftigte die regionale Kaufkraft aufgrund ihrer für die Lausitz überdurchschnittlich hoch entlohnten Industriearbeitsplätze stärken: Die Bruttojahresverdienste der vollzeitbeschäftigten Arbeitnehmer\*innen (inkl. Sonderzahlungen) betragen etwa 2014 im arithmetischen Mittel in der Energieversorgung 56.905 Euro in Brandenburg und 54.899 Euro in Sachsen. In der Industrie (VAG) insgesamt betragen sie demgegenüber noch 36.160 Euro in Brandenburg und 34.304 Euro in Sachsen und über alle Branchen hinweg lediglich 27.720 Euro in Brandenburg bzw. 34.585 Euro in Sachsen.<sup>18</sup>

Derzeit wird angenommen, dass etwa 6.700 bis 8.400 Beschäftigte in den Lausitzer Tagebauen und Kraftwerken tätig sind, wobei diese Werte aufgrund unterschiedlicher Angaben des Arbeitgebers LEAG und des DEBRIV schwanken (KWSB 2019: 62).<sup>19</sup>

---

17 Vgl. LEAG (Online: <https://www.leag.de/de/geschaeftsfelder/kraftwerke/>).

18 Vgl. Verdienststrukturerhebung im Land Brandenburg 2014 des Amtes für Statistik Berlin-Brandenburg (2016) (Online: [https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/publikationen/stat\\_berichte/2016/SB\\_N01-05-00\\_2014j04\\_BB.pdf](https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/publikationen/stat_berichte/2016/SB_N01-05-00_2014j04_BB.pdf)) und Verdienststrukturerhebung im Freistaat Sachsen 2014 des Statistischen Landesamtes des Freistaates Sachsen (2017) (Online: [https://www.statistik.sachsen.de/download/100\\_Berichte-N/N\\_I\\_5\\_4j14\\_SN.pdf](https://www.statistik.sachsen.de/download/100_Berichte-N/N_I_5_4j14_SN.pdf)).

19 Der Deutsche Braunkohlen-Industrie-Verein (DEBRIV), gegründet 1885 in Halle/Saale, ist der Branchenverband der deutschen Braunkohlewirtschaft.

Je nach Ausgangswert und gewähltem Beschäftigungsmultiplikator sind zwischen 10.000 (6.700 direkte Arbeitsplätze, Multiplikator 1,5) und 16.000 (8.000 direkte Arbeitsplätze, Multiplikator 2,0) Arbeitsplätze sind schätzungsweise direkt oder indirekt von der Braunkohlewirtschaft abhängig (Greib et al. 2019; Frondel et al. 2017; Kluge et al. 2014a; KWSB 2019).

Das Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung (RWI) beziffert die Zahl der im Braunkohlesektor Beschäftigten des Lausitzer Reviers auf 13.245 Personen, wovon 5.000 als indirekt oder induziert beschäftigte Erwerbspersonen eingestuft werden (Dehio & Schmidt 2018: 5; Frondel et al. 2017: 41 f.). Dies entspräche einem Gesamtanteil von 3,3 % an allen sv-Beschäftigten<sup>20</sup> und einem Anteil von rund 17,5 % an allen sv-Beschäftigten des Verarbeitenden Gewerbes. Indirekte Beschäftigung besteht vordergründig aufgrund des Bezugs von Vorleistungsgütern, d. h. Hilfs- und Betriebsstoffen für die fossile Energiewirtschaft. Darüber hinaus wird von indirekter Beschäftigung in der Konsumgüterindustrie (Industriegüterherstellung und Dienstleistungen) und im Bereich der Investitionsgüterindustrie (Anlageinvestitionen, etwa zum Erhalt und zur Erneuerung der Anlagen, bspw. in Form von Umrüstungen zur Einhaltung der Emissionsrichtlinien) ausgegangen.

Was bedeutet nun der geplante Braunkohleausstieg für die Beschäftigungssituation in der Lausitz? Zwar gehen etwa zwei Drittel der aktuell direkt im Braunkohlebergbau Beschäftigten altersbedingt bereits bis 2030 in Rente (Hermann et al. 2018). Neueinstellungen werden jedoch – und das ist die hier interessierende beschäftigungspolitisch relevante Entwicklung – voraussichtlich nicht mehr stattfinden (ebd.). Zur Absicherung der verbleibenden direkt Beschäftigten der Braunkohlewirtschaft ist laut vorgesehen, betriebsbedingte Kündigungen in den Kraftwerken und Tagebauen auszuschließen (KWSB 2019). Hier soll gelten: Fällt ein Arbeitsplatz weg, werden die Betroffenen (unter Ausgleich etwaiger Gehaltseinbußen) in neue Beschäftigungsverhältnisse vermittelt. Ältere Beschäftigte sollen (unter Ausgleich von Rentenabschlägen) auch in den vorzeitigen Ruhestand wechseln können. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Bund ein staatliches Anpassungsgeld bereitstellt, mit dem die Jahre bis zum vorzeitigen Renteneintritt überbrückt werden können. Ergänzende Ausgleichszahlungen könnten Gewerkschaften und Arbeitgeber in Tarifverträgen regeln (DGB 2019). Offen ist der Verbleib der durch die Braunkohle indirekt und induziert Beschäftigten: Für sie muss es gelingen, umgehend alternative Beschäftigungsperspektiven zu entwickeln.

20 Greib et al. (2019) gehen demgegenüber von einem Anteil an der sv-pflichtigen Beschäftigung von nur 2,2 % aus.

## Innovationskraft

Die Innovationskraft kann als ein Gradmesser für Entwicklungs- und Wachstumspotentiale einer Region herangezogen und über den Anteil der Beschäftigten im Bereich F&E an allen sozialversicherungspflichtig Beschäftigten sowie anhand der Anzahl von Patentanmeldungen gemessen werden (Dehio & Schmidt 2018: 12 ff.). Beide Indikatoren sind im Lausitzer Revier vergleichsweise gering ausgeprägt (vgl. Tabelle 6).

**Tabelle 6: Forschungsintensität und F&E-Personalintensität in der Lausitz**

	Forschungsintensität [in % des BIP ] (Interne FuE-Aufwendungen) [in Tsd. Euro]			Veränderungs- rate [in % p.a.] 2015 ggü. 2005	FuE-Personalintensität [Beschäftigungsanteil] (FuE-Personal) [in Personen]			Veränderungs- rate [in % p.a.] 2015 ggü. 2005
	2005	2015			2005	2015		
	<b>Lausitz</b>	0,24 (55.621)	0,5 (156.061)		7,5	0,22 (771)	0,34 (1.369)	
<b>Brandenburg</b>	0,29 (140.000)	0,6 (397.000)	7,6	0,23 (1.620)	0,45 (3.667)	7		
<b>Sachsen</b>	1,08 (915.000)	1,19 (1.346.000)	0,9	0,71 (9.393)	0,8 (12.294)	1,3		
<b>Deutschland</b>	1,68 (38.651.000)	2,01 (60.952.000)	1,8	1,17 (304.503)	1,32 (404.767)	1,2		

Quelle: Eigene Bearbeitung nach Dehio & Schmidt 2018: 12 ff.

Da die Innovationskraft mit der Entfernung zu Metropolräumen allgemein abnimmt, lassen sich die vergleichsweise limitierte Forschungsintensität und begrenzte interne Aufwendungen (der Unternehmen) für F&E auch auf die periphere Lage der Lausitz zurückführen: Dieser Befund spiegelt zudem die bisherige Ausrichtung der Regionalen Innovationsstrategie des Landes Brandenburg sowie der sächsischen Förderung auf Metropolräume (Frondelet al. 2017: 69). Erschwerend kommt die weitgehende Abwesenheit von Konzernzentralen in der Region hinzu, an die eigene Abteilungen für F&E unternehmensintern zumeist angegliedert sind. Die zahlreichen kleinen und mittelständischen Unternehmen verfügen häufig nicht über ausreichende Ressourcen (z. B. finanzieller Art im Hinblick auf zu entrichtende Eigenanteile und hinsichtlich des Investitionskapitals), um Innovationsstrategien zu implementieren (Markwardt & Zundel 2017: 20 f.).

Dennoch bestehen in der Lausitz auch vielzählige regionale und überregionale Kooperationen zwischen solchen KMU, die Forschungsprojekte aus eigener Kraft nicht stemmen können, und universitären oder außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Viele mittelständische Lausitzer Unternehmen lassen sich zudem als hoch innovativ charakterisieren und sind global in Nischenmärkten erfolgreich. In der Summe können diese Innovationstätigkeiten jedoch den quantitativen Nachteil der Größenstrukturen nicht kompensieren – woraus eine (weit) unter Landes- und Bundesschnitt befindliche mittlere Anzahl von Patentanmeldungen resultiert (Frondelet al. 2017: 69).

Der ebenfalls geringeren Personalintensität im Bereich der F&E (Anteil der in diesem Bereich tätigen Arbeitnehmer\*innen an allen sv-Beschäftigten), der als ein Indikator für die Leistbarkeit von Wissens- und Technologietransfers innerhalb einer Region herangezogen wird, stehen hingegen in Ostdeutschland und auch in der Lausitz vergleichsweise hohe Ausgaben aus Landes- und Bundesprogrammen für F&E an den Hochschulen gegenüber (Dehio & Schmidt 2018: 13). Damit wird der relativ niedrigen Forschungsintensität der Unternehmen zumindest entgegengesteuert, was Impulse für (im Vergleich zum Bundesschnitt in der Lausitz weitaus seltener stattfindende) Gründungsaktivitäten setzen kann. Festzustellen ist, dass die Forschungsstandorte Cottbus und Görlitz bis 2004 überdurchschnittlich hohe Gründungsaktivitäten aufwiesen. Cottbus lag im Bereich der Hightech-Gründungsintensität<sup>21</sup> bis 2016 noch über dem Bundesschnitt, während die Gründungsintensität in der Lausitz insgesamt zuletzt deutlich hinter den bundesdeutschen Vergleichswert zurückfiel (Frondelet al. 2017: 68). Hier begründet sich insgesamt ein Nachholbedarf der Energieregion gegenüber dem bundesdeutschen Entwicklungsstand, nicht zuletzt um den anstehenden Strukturwandel zu meistern. Pläne, wonach die Dichte der öffentlichen Forschungsinfrastruktur – wie der BTU Cottbus-Senftenberg und der Hochschule Zittau-Görlitz (FH) – in der ländlichen Region zukünftig erhöht werden soll, weisen somit in die richtige Richtung. Geplant sind u. a. Neuansiedlungen der Fraunhofer Gesellschaft und des DLR in der Lausitz (KWSB 2019). Eine Aufgabe wird darin bestehen, diese FuE-Potentiale mit der regionalen Wirtschaft zu verzahnen.

### Infrastruktur: Digitalisierung und Verkehrswege

Über Internetanschlüsse mit einer Breitbandverfügbarkeit von mindestens 50 Mbit/s verfügten im Jahr 2016 in der Lausitz 52 % der Haushalte.<sup>22</sup> Zwischen städtischen und ländlichen Räumen bestehen erhebliche intraregionale Unterschiede. Insgesamt ist die Lausitz hinsichtlich schneller Internetverbindungen im Vergleich zum Land Brandenburg (63 %), zum Freistaat Sachsen (57 %) sowie zum Bundesdurchschnitt (75 %) als unterversorgt zu bezeichnen. Dabei ist eine moderne und leistungsfähige Kommunikationsarchitektur als „wesentliche Voraussetzung für Innovation, gesellschaftliche Teilhabe, Wirtschaftswachstum und Beschäftigung“ (Carstensen et al. 2018: 51) einzustufen. Auch aus Unternehmersicht besteht akuter Aufholbedarf, um die Anschlussfähigkeit (und damit: Wettbewerbsfähigkeit) an moderne (digitale) Kommunikations- und Produktionsweisen nicht zu verlieren.<sup>23</sup>

Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur werden als ebenso vordergründige Voraussetzung für die weitere Entwicklung der Lausitz erachtet; vor allem die Anbindung an Metropolräume gilt als verbesserungsbedürftig. Bislang müssen aus den Flächenkreisen zumeist große Entfernungen zurückgelegt und unverhältnismäßig lange Wegezeiten in Kauf genommen werden, um Flughäfen, Autobahnauffahrten oder Bahnhöfe mit Anschlüssen an den IC- und ICE-Bahnverkehr zu erreichen (Frondelet al. 2017: 48).

21 Die Gründungsintensität entspricht der Anzahl der Unternehmensgründungen pro 10.000 Einwohner\*innen pro Jahr.

22 Vgl. Landtag Brandenburg 16.11.2016: Antwort der Landesregierung auf die Kleine Anfrage Nr. 2182 des Abgeordneten Dierk Homeyer der CDU-Fraktion Drucksache 6/5271. Ausbau der Breitbandversorgung in Brandenburg. Drucksache 6/5453.

23 Handelsblatt (26.06.2019): Neue Wohnungen, die Rückkehr der Depots und Deutschland als digitales Mittelmaß. S. 24-25. Online: <https://www.handelsblatt.com/infografiken/grafik/handelsblatt-grafiken-des-monats-juni-2019-neue-wohnungen-urlaub-in-der-heimat-und-die-renaissance-des-depots/24520254.html?ticket=ST-36346287-lHbf32JwbxEZgPYQhDv9-ap1>.

## 2.3 Leitbild Energieregion

Ziel einer integrierten Regionalentwicklung zur Stärkung der Lausitz als Wirtschaftsraum zwischen brandenburgischen und sächsischen Agglomerationsräumen muss es sein, den Kohleausstieg zu kompensieren und den Nachhaltigkeitsgedanken in der Energieregion zu implementieren. Prämisse bleibt die Angleichung der Lebensverhältnisse in der Region an das bundesdeutsche Niveau, um zumindest eine Abmilderung der Folgen negativer demographischer Entwicklung zu erreichen.

Nachfolgend werden die auf Ebene des Bundes, der Länder und der Region vorliegenden Entwicklungskonzepte und Projektideen zur Bewältigung des Strukturwandels ebenso wie die von zivilgesellschaftlichen Akteuren entwickelten Ansätze skizziert und deren Gemeinsamkeiten wie offene Flanken aufgezeigt. Daran wird mit den Gestaltungsfeldern (Kapitel 5) angeknüpft.

### Vorliegende Konzepte und Ansätze

Die von der Bundesregierung eingesetzte Kommission für Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung diskutiert in ihrem Abschlussbericht relevante Faktoren für den Erhalt der Region als Industriestandort. Moderne Mobilitätskonzepte und eine gut ausgebaute Verkehrswegeinfrastruktur werden dabei als besonders maßgeblich für eine erfolgreiche Entwicklung der ländlich gelegenen Lausitz im Zuge des Strukturwandels erachtet. Unter anderem werden schnellere, überregionale Anbindungen im Nah- und Fernverkehr sowie die flächendeckende Breitbandabdeckung als entscheidende Voraussetzungen für die Fachkräftegewinnung und Standortentscheidungen neu anzusiedelnder Unternehmen genannt (KWSB 2019: 87 f.). Mögliche „Leuchtturmprojekte“ könnten demnach die Anbindung Mitteldeutschlands über eine Ost-West-Magistrale (MiLau), der sechsspurige Ausbau der A 13, die Fortentwicklung der Bahnverbindungen zwischen Dresden, der Lausitz und Berlin und ein verbesserter Anschluss des Wirtschaftsstandorts Kamenz an das Bahnnetz darstellen.<sup>24</sup> Mittels dieser infrastrukturellen Maßnahmen ließe sich demnach die Einbindung von in der Lausitz anzusiedelnder Zukunftstechnologien in die Wertschöpfungssysteme der Ballungszentren gewährleisten.

Neben dem Infrastrukturausbau sei der Fokus laut KWSB auf die Wirtschafts- und Innovationsförderung zu legen, die wiederum einhergehen sollte mit der Ansiedlung von Bundesämtern und zusätzlichen Forschungseinrichtungen (ebd.: 75). Es wird betont, dass die Stärkung der Forschungslandschaft durch den Aufbau eines Fraunhofer Instituts für Energieinfrastrukturen und Geothermie in der Lausitz, die Ansiedlung eines DLR-Institutes „Future Fuels“ in Jülich und zweier weiterer DLR-Institute gelingen könne. (Innovations-)Potential wird auf dem Gebiet neuer Energietechnologien vermutet, u. a. in den Kompetenzfeldern Akkumulatoren, Zellproduktion und -recycling, der Langzeit-Energiespeicherung und der Speicherung regenerativer Energien in großem Maßstab. Zusätzlich sollten Anreize für den Um- oder Neubau von Kraftwerken gesetzt werden.

Auch auf Landesebene zielen die wirtschafts- und strukturpolitischen Bestrebungen darauf ab, die Lausitz als Modellregion für Energiespeicher zu profilieren. Neben Überlegungen zur Einrichtung eines Batterie-Projekts mit über 60 MW Leistung wurden etwa seitens des brandenburgischen Ministeriums für Wirtschaft und Energie Anstrengungen unternommen, ein Fraunhofer Institut für Speichertechnologien und eine Fabrik zur Produktion von Batteriezellen in der Lausitz anzusiedeln.

---

24 Vgl. Spiegel Online (05.04.2019): Strukturhilfen für die Länder. So will der Bund die Milliarden für den Kohleausstieg verteilen. Online: <https://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/kohleausstieg-wie-der-bund-die-milliarden-verteilen-will-a-1261524.html>.

Im Juli 2018 nahm zur Koordination von Strukturwandel-Themen mit Klaus Freytag ein „Beauftragter des (Brandenburger) Ministerpräsidenten für die Lausitz“ seine Arbeit in Cottbus auf.<sup>25</sup> Der Freistaat Sachsen legte zur Erarbeitung einer passenden Cluster- und Innovationsstrategie industriepolitische Strategiedokumente vor und setzte mit Stephan Rohde im Februar 2019 ebenfalls einen direkt der Landesregierung unterstellten „Revierbeauftragten“ ein.<sup>26</sup>

Zusammen erarbeiteten die Länder Sachsen und Brandenburg das 2017 beschlossene Grundsatzpapier „Gemeinsam für die Zukunft der Industrieregion Lausitz“<sup>27</sup>, demzufolge die Region länderübergreifend zu einer „europäischen Modellregion für Strukturwandel“ entwickelt werden könne. Die Zielstellung bildet dabei die zukunftsfeste Gestaltung der Lausitz im Verbund mit EU, Bund, Sozialpartnern und Zivilgesellschaft. Als Handlungsschwerpunkte werden die Infrastrukturentwicklung und Daseinsvorsorge, Innovation, Forschung und Wissenschaft, Wirtschaftsförderung und -entwicklung, Fachkräfteentwicklung und -sicherung, Marketing sowie Kultur, Kunst und Tourismus identifiziert. Zahlreiche Projektskizzen für die Umsetzung der Vorhaben in den einzelnen Handlungsfeldern (ein Teil der Projektvorschläge des Grundsatzpapiers der Länder) fanden Eingang in den Abschlussbericht der KWSB – dort unter zusätzlicher Berücksichtigung von Kategorien wie Experimentierklauseln, Real-laboren und regulatorischen Maßnahmen sowie regionaler Verankerung und der Beteiligung der Zivilgesellschaft am Wandlungsprozess.

Auf der letzten gemeinsamen Kabinettsitzung der Landesregierungen am 11. Juli 2019 wurde zudem die Einrichtung einer „Steuerungsgruppe Strukturentwicklung Lausitz“ beschlossen, deren Aufgabe die Koordination der jeweiligen Aktivitäten ist. Im Sommer 2019 fasste das Brandenburger Landeskabinett den Beschluss, eine landeseigene Entwicklungsgesellschaft als Tochter der Investitions- und Landesbank (ILB) zu gründen, die mit der Verwaltung der mit dem Kohlekompromiss zugesagten Strukturhilfen des Bundes und mit der Begleitung entsprechender Projekte betraut werden soll.<sup>28</sup> Auch die sächsische Staatsregierung hat ihre Absicht erklärt, eine eigene Entwicklungsgesellschaft zu gründen.<sup>29</sup>

Gewerkschaftliche Akteure (neben dem DGB in der Lausitz vordergründig IG Metall und IG BCE) sehen im Erhalt von Beschäftigung und in der Schaffung industrieller Perspektiven für die Lausitz die Hauptaufgaben bei der Gestaltung des Strukturwandels. In diese Zukunftsfelder sollten neben dem Kompetenzfeld Energie auch die vorhandenen Branchenstärken aus Chemie-, Kunststoff-, Metallindustrie und Kraftwerkstechnik einfließen. Dazu wären „umfassende Unterstützungsmaßnahmen für die indirekt Beschäftigten in der Metall- und Elektroindustrie, die im Bereich Maschinenbau, Wartung und Instandhaltung arbeiten“, einschließlich eines „Transformationskurzarbeitergeldes“ in allen vom Kohleausstieg betroffenen Industriebereichen vorzusehen (DGB 2019; IG Metall 2019). Die Energiewende solle unter Orientierung an Innovationspotentialen und unter Berücksichtigung von Preisentwicklungen auf den Energiemärkten erfolgen, damit eine bezahlbare Energieversorgung für die Wirtschaft wie Bevölkerung gesichert bleibe.

25 Land Brandenburg (02.07.2018): Lausitz-Beauftragter jetzt mit Sitz in Cottbus. Online: <https://www.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.601616.de>.

26 Sächsische Zeitung (29.01.2019): Sachsen will Struktur in den Strukturwandel bringen. In den nächsten Wochen werden die 171 Vorschläge für den Kohleausstieg geprüft. Online: <https://www.saechsische.de/freistaat-bringt-struktur-in-den-strukturwandel-5029224.html>.

27 Vgl. online: [https://www.smwa.sachsen.de/download/Grundsatzpapier\\_Gemeinsam\\_fuer\\_die\\_Zukunft\\_der\\_Industrieregion\\_Lausitz.pdf](https://www.smwa.sachsen.de/download/Grundsatzpapier_Gemeinsam_fuer_die_Zukunft_der_Industrieregion_Lausitz.pdf).

28 Land Brandenburg (20.08.2019): Landesentwicklungsgesellschaft für die Lausitz soll gegründet werden. Online: <https://lausitz-brandenburg.de/2019/08/20/landesentwicklungsgesellschaft-fuer-die-lausitz-soll-gegruendet-werden/>.

29 rbb 24 Studio Cottbus (26.06.2019): Koordinierung des Strukturwandels Neue Entwicklungsgesellschaft für die Lausitz geplant. Online: <https://www.rbb24.de/studiocottbus/wirtschaft/2019/06/entwicklungsgesellschaft-lausitz-gruendung.html>; DGB Lausitzkonferenz, 22.08.2019.

Auch zahlreiche kommunale und private Akteure aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft befassten sich mit der Erarbeitung von Perspektiven für die Region (vgl. Tabelle 7). Aus unterschiedlichen Blickwinkeln suchten sie Strategien zur Bewältigung des Strukturwandels aufzuzeigen und agieren (mitunter) als Interessenvertretungen im intermediären politischen Raum. Um Synergien zwischen Wirtschaft, Wissenschaft und Politik zu fördern, erfolgte u. a. die Gründung diverser Unternehmens- und Forschungsnetzwerke. Sie eint die Befürchtung einer De-Industrialisierung und weiterer Strukturbrüche in der Lausitz. Verallgemeinerungsfähiger Standpunkt der Akteure ist die Anforderung, mit der Schaffung attraktiver Beschäftigungsalternativen im Rahmen der nachhaltigen Gestaltung des Strukturwandels einem solchen Szenario etwas entgegenzusetzen. Bezug wird dabei überwiegend auf die starke Identifikation der Lausitzer (als beschäftigende Arbeitgeber und beschäftigte Arbeitnehmer\*innen) mit der prägenden Energiewirtschaft genommen, womit zunächst vornehmlich die fossilen Energieträger assoziiert wurden. Die klimapolitischen Initiativen der Bundesregierung zur Begrenzung der Treibhausgasemissionen förderten jedoch auch vor Ort Debatten, die nunmehr energiewirtschaftliche Alternativen zum Gegenstand haben. Im Zuge dessen wurde mit der „Zukunftswerkstatt Lausitz“ zu Beginn des Jahres 2018 ein durch die Wirtschaftsregion Lausitz (WRL) moderierter, mehrstufiger Leitbildprozess zur Entwicklung der Region angestoßen. Vorschläge der Länder und Empfehlungen der KWSB werden darin aufgegriffen.<sup>30</sup>

**Tabelle 7: Regional und überregional involvierte Akteure und Akteursgruppen (Auswahl)**

Klaus Freytag	Lausitzbeauftragter der Brandenburger Landesregierung: Herr Freytag hat als dem Ministerpräsidenten direkt unterstellter Mitarbeiter der Staatskanzlei die Aufgabe, die Aktivitäten der Landesministerien zur Entwicklung Lausitz zu koordinieren. Als ein Ziel beschreibt er, das Projekt „Zukunftswerkstatt Lausitz“ der Wirtschaftsregion Lausitz (WRL) zum Erfolg zu führen.
Grüne Liga e. V	Die Grüne Liga ist eine Umweltgruppe, deren „Bundeskontaktstelle Braunkohle“ in Cottbus Tagebauegegner durch Beratung und Vernetzung unterstützt.
IHK	Die Industrie- und Handelskammern Dresden (96.000 Unternehmen) und Cottbus (34.000 Unternehmen) spielen als Repräsentanten der Wirtschaft in zahlreichen Projekten und Initiativen in der Lausitz eine aktive Rolle.
Innovationsregion Lausitz (iRL)	Die Innovationsregion Lausitz GmbH ist ein von der BTU Cottbus-Senftenberg und regionalen Wirtschaftsakteure im Jahr 2016 (nach dem Beschluss der Bundesregierung zur Überführung zweier Jänschwalder Kraftwerksblöcke in die Reserve) ins Leben gerufener Zusammenschluss. Ihre Aufgabe ist die Unterstützung von Betrieben im Strukturwandel, etwa durch die Erschließung neuer Geschäftsfelder. Gesellschafter der iRL sind neben der BTU die IHK und HWK Cottbus, die Wirtschaftsinitiative Lausitz (WiL), die Vereinigung der Unternehmerverbände Berlin-Brandenburg (UVBB). Die iRL verfügt über einen Beirat der aus Gewerkschaften (IG BCE, IG Metall), dem Verein Pro Lausitzer Braunkohle e.V., dem Bundesverband erneuerbarer Energien und Unternehmen (LEAG, BASF) gebildet wird. Sie widmet sich auch der Erschließung neuer Wertschöpfungsketten und -systeme.
Lausitzer Perspektiven e.V.	Ebenfalls als Dialogplattform entwickelt, die gemeinsam mit dem ZDW das Konzept eines aufzulegenden Fonds „Zivilgesellschaft“ erarbeitet hat, mit dem zukunftsweisende Projekte umgesetzt werden sollen.
Lausitzrunde	Ein Bündnis von Bürgermeister*innen und Amtsdirektor*innen aus der brandenburgischen und sächsischen Lausitz, u. a. Christine Herntier (Spremburg, Kommissionsmitglied WSB). Die Lausitzrunde möchte eine Klammer zwischen Regionalgesellschaften WRL, iRL und Bevölkerung darstellen sowie kommunale Anliegen in die Landes- und Bundespolitik vermitteln. Sie versteht Struktur- und Regionalentwicklung als Prozess, der Bürger*innen transparent zu machen sei und will die demokratische Teilhabe weiter entwickeln. Die Lausitzrunde befürwortet die Einrichtung eines Strukturfonds, aus dem Kommunen Aufgaben der Daseinsvorsorge finanzieren und strebt einen Sonderstatus der Lausitz als „Europäische Modellregion für den Strukturwandel“ an. Seit ihrer Gründung 2016 gibt sie ein klares Bekenntnis zur Braunkohle ab.

30 Vgl. WRL (Online: <https://zw-lausitz.de/leitbild/>).

Stephan Rohde	Sächsischer Revier- und Lausitzbeauftragter der Landesregierung: Abteilungsleiter in der sächsischen Staatskanzlei. Herr Rohde ist zuständig für die Koordination der Strukturentwicklung der sächsischen Braunkohlereviere (neben Lausitz auch das Mitteldeutsche Revier). In seiner Anfang 2019 eingerichteten Abteilung sollen über 20 Mitarbeiter*innen aus allen Ministerien tätig werden.
Wirtschaftsregion Lausitz GmbH (WRL)	Die 2009 gegründete und bis 2017 unter „Energierregion Lausitz“ firmierende WRL ist eine Kooperationsgemeinschaft der Lausitzer Landkreise und der kreisfreien Stadt Cottbus, die den Strukturwandel strategisch koordinieren und die länderübergreifende Kooperation der Struktur- und Regionalentwicklung gewährleisten soll. Die WRL betreut bis 2020 im Rahmen des GRW-Projektes „Zukunftswerkstatt Lausitz“ den Leitbildprozess der Region, um Zukunftsstrategien zu entwickeln. Neben den Publikationen „Die Lausitz: Zahlen und Fakten“ (2018) und „Zukunftswerkstatt Lausitz: Zukunftsatlas, Potentiale, Perspektiven“ (2018) setzt sie (Innovations-)Projekte wie das „Bundesmodellvorhaben Unternehmen Revier“ um und verwaltet den „Mitmach-Fonds“ des Landes Sachsen, aus dem derzeit zivilgesellschaftliche Bildungsprojekte und zukunftsweisende Mobilitätskonzepte in Görlitz und Bautzen finanziert werden.
Zentrum für Dialog und Wandel (ZDW)	Eine von der Evangelischen Kirche getragene Dialogplattform, die Bürger*innen und Entscheidungsträger*innen zum Austausch über Perspektiven für die Lausitz einlädt.

Quellen: DGB Region Südbrandenburg Lausitz. Online: <https://suedbrandenburg-lausitz.dgb.de/ueber-uns>; Greib et al. 2019: 33ff.; Grüne Liga Umweltgruppe Cottbus. Online: <http://www.kein-tagebau.de/index.php/de/argumente>; IHK Cottbus. Online: <https://www.cottbus.ihk.de/>; IHK Dresden. Online: [https://www.dresden.ihk.de/servlet/portal?knoten\\_id=7&navpfad=7](https://www.dresden.ihk.de/servlet/portal?knoten_id=7&navpfad=7); Innovationsregion Lausitz. Online: <https://www.innovationsregionlausitz.de/>; Lausitzer Perspektiven. Online: <http://www.lausitzer-perspektiven.de/de/verein/ueber-uns>; Lausitzrunde. Online: <https://www.lausitzrunde.com/index.php/aktuelles>; Staatskanzlei Brandenburg. Online: <https://www.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.617552.de>; Staatsregierung Sachsen. Online: <https://www.staatsregierung.sachsen.de/informationsveranstaltungen-zum-strukturwandel-6068.html>; Zentrum für Dialog und Wandel. Online: <https://zdw.ekbo.de/startseite.html>

## Perspektive

In der Gesamtschau ergeben sich aus der Betrachtung des demographischen Wandels und der Wirtschafts- und Beschäftigungsdaten sowohl für die Regionalentwicklung als auch für die betriebliche Nachwuchs- und Fachkräftesicherung komplexe Problemstellungen, die weit über die Konsequenzen des Beschlusses zum Kohleausstieg hinausreichen. Der Strukturwandel erfordert im Sinne der Bevölkerung sowie der Lausitzer Unternehmens- und Wirtschaftsstruktur heute nachhaltige Antworten auf Fragen industrieller und beschäftigungspolitischer (Entwicklungs-) Perspektiven. Diese sollten einerseits dem Charakter der Lausitz als Energieregion gerecht werden und andererseits die mit dem Wandel verbundenen Risiken für ihre Einwohner\*innen und Beschäftigten minimieren. Damit die Menschen nicht zu Verlierern der Energiewende werden, besteht die Herausforderung darin, neue Impulse für vorrangig industrielle, innovativ wertschöpfende Strukturen zu setzen. Diese sollten Möglichkeiten der Schaffung zukunftsfähiger Beschäftigung eröffnen und zugleich dazu beitragen, sich in der Region der Herstellung gleichwertiger Lebensverhältnisse anzunähern.

Zentral ist, dass die Anforderung, ein derart komplexes, vielfältige Facetten beinhaltendes Szenario des Strukturwandels zu gestalten, nur im gemeinsamen Dialog zwischen Bevölkerung, Wirtschaft, Wissenschaft, Sozialpartnern und Politik leistbar ist. Die Entwicklung einer, auf einem breiten gesellschaftlichem Konsens beruhenden Lebens- und Zukunftsperspektive für die Lausitz ist auch vor der Folie des Erstarkens anti-demokratischer rechtsradikaler Kräfte, die die (wahrgenommene) Perspektivlosigkeit in strukturschwachen Räumen instrumentalisieren, nicht hoch genug zu bewerten.

Es lässt sich festhalten, dass derzeit keine „fertigen“ Entwicklungsleitbilder und erst recht keine (integriert konzipierten) Konversionsstrategien vorhanden sind, die den Anforderungen eines nachhaltigen Wandels Rechnung tragen und dabei bereits konsensfähig wären. Im Diskussions- und Aushandlungsprozess um die Zukunft der Lausitz treffen eine Vielzahl von Perspektiven unterschiedlicher Akteure aufeinander, die es zu moderieren gilt. Neben der bislang noch zu wenig berücksichtigten

Schaffung von Partizipationsmöglichkeiten für die Zivilgesellschaft zeichnet sich als übereinstimmendes Moment aller Interessengruppen jedoch ab, ein möglichst hohes Innovations- und Industrialisierungsniveau in der Region schaffen, erhalten und nachhaltig stärken zu wollen. Es wird auch deutlich, dass in der Herausforderung des Strukturwandels für die Lausitz zugleich die Chance auf eine Vorreiterrolle mit Signalwirkung als Energieregion der Zukunft im Hinblick auf die Energiewende und eine Rekultivierung des sich seit Jahrzehnten im Wandel befindlichen Kultur- und Wirtschaftsraumes liegt.

Grundlegend bei der Erarbeitung von regional-, industrie- und strukturpolitischen Ansätzen ist zu bedenken, dass es sich mit der Lausitz um eine zwar (noch) sehr industriestarke, zugleich jedoch recht dünn besiedelte Region mit kleinteiliger Wirtschaftsstruktur handelt, die von unterdurchschnittlichen Gründungsaktivitäten sowie einer geringen Anzahl von Patentanmeldungen (v. a. im technischen Bereich) gekennzeichnet ist. Der Strukturwandel stellt hier somit eine größere Herausforderung als in Ballungsräumen dar, weil positive Wachstumsfaktoren – wie bspw. die Anbindung an überregionale Märkte, ein breit gefächertes Fachkräfteangebot, die Clusterbildung von Unternehmen, Wissensaustausch oder internationale Verbindungen (Mobilität) – weniger vorausgesetzt werden können.

Je nach gewähltem Entwicklungsansatz wären deshalb spezifische Anpassungen im regionalen Innovationssystem erforderlich und es sollte geprüft werden, ob diese kooperativ mit den angrenzenden (Metropol-) Räumen umgesetzt werden können. Die kleinteilige Wirtschaftsstruktur der Lausitz wird in diesem Kontext als Chance betrachtet, denn KMU weisen häufig ein hohes Maß an Flexibilität auf und erfüllen somit Voraussetzungen, die notwendig sind, um schnell an neue Technologien anzudocken.

Hervorzuheben ist, dass der (sich mit dem Kohleausstieg wiederum zuspitzende) Strukturwandel bereits seit langem in vollem Gange ist, denn parallel zum absehbaren Ende des Zeitalters der fossilen Energiewirtschaft haben bereits zahlreiche Unternehmensumstrukturierungen oder -neugründungen stattgefunden. Häufig erfolgte im Zuge dessen die Umwandlung oder Anpassung bestehender Geschäftsmodelle und eine Umnutzung von Flächen sowie bestehender (Netz-)Infrastruktur. In der Lausitz etablierten sich in jüngerer Vergangenheit mehrere erneuerbare Energien produzierende Unternehmen und die Energieregion der Zukunft nimmt mit ihnen bereits heute deutliche Formen an: Die Solarparks Finsterwalde (82 MW), Lieberose (52 MW) und Senftenberg (78 MW, angesiedelt auf einem ehemaligen Tagebaugelände) sind drei der größten Deutschlands. Die Windkraftanlage Laasow (2,5 MW Nennleistung) und die Windparks in Schipkau (137 MW) wurden ebenfalls auf Flächen ehemaliger Tagebaue errichtet. Die Kraftwerksblöcke (je 500 MW) am Standort Jänschwalde sollen in naher Zukunft womöglich in ein Wärmespeicherkraftwerk umgewandelt werden, während zur weitergehenden Nutzung des Industrieparks „Schwarze Pumpe“ von der BTU ein wasserstoffbasiertes Speicherwerk angedacht wird (Greib et al. 2019: 45 f.). Es bestehen Planungen für Batterie- und Rotationsspeicherprojekte. Die LEAG kündigte für das Großspeicherprojekt „BigBattery Lausitz“, mit einer Leistung bis zu 50 MW am Kraftwerks- und Industriestandort Schwarze Pumpe, eine Inbetriebnahme im Sommer 2020 an.<sup>31</sup>

Zukunftsfähigkeit lässt sich durch die aktive sozial- und umweltverträgliche Gestaltung des Strukturwandels herstellen, weshalb der Erhalt und die Weiterentwicklung der Region als Industriestandort

---

<sup>31</sup> gl. LEAG Speicherprojekt BigBattery Lausitz – Innovative Lösungen für eine sichere Energiewende (Online: <https://www.leag.de/de/bigbattery/>).

für (erneuerbare) Energie(technologien) und Recycling dann einen Schwerpunkt bilden kann, wenn die veränderten energiepolitischen Rahmenbedingungen als nachhaltige Entwicklungschance begriffen werden. Die traditionellen Kompetenzen der Lausitz lassen sich dabei nutzen: Erfolg versprechen dabei pro-aktive Anpassungsstrategien der regionalen Wirtschaft, die damit einhergehen a) auf Basis der eigenen Kernkompetenz neue Märkte zu erschließen oder b) die eigene Kernkompetenz durch Innovationen zu erweitern (Markwardt & Zundel 2017: 20).

Eine weitere Entwicklungsperspektive lässt sich aus der Mobilitätswende ableiten. Auch wenn die Lausitz nicht als traditioneller Automobilstandort gelten kann, ergeben sich aus dem Hochlauf der Elektromobilität (vgl. Kapitel 3.1) und den damit verbundenen Umstrukturierungen der automobilen Wertschöpfungsketten für bisher eher branchenferne Regionen Chancen, sich mit innovativen Technologien rund um die CO<sub>2</sub>-arme Mobilität zu profilieren. Sie könnten so von den aus der Herstellung neuer Komponenten in der Automobilindustrie erwachsenden Beschäftigungspotentialen profitieren.

Mit dem absehbaren Aufschwung der Elektromobilität und dem daraus resultierenden hohen Aufkommen an Lithium-Ionen-Batterien, stellen Überlegungen für den Bau eines industriellen Recyclingwerkes für Traktionsbatterien eine Option dar, deren Potentiale im Hinblick auf den Erhalt der Lausitz als Energieregion in den nachfolgenden Kapiteln erörtert werden sollen. Es wird davon ausgegangen, dass Batterierecycling ein neu erschließbares Innovations- und Wirtschaftsfeld darstellt, welches einen Beitrag zur Stärkung der Lausitz als Industrie- und Energieregion leisten kann. Investitionen in ein Recyclingwerk für den Wachstumsmarkt der Elektromobilität und ein sukzessiver Ersatz fossiler Brennstoffe durch erneuerbare Energien stellen deshalb ernsthaft zu prüfende Perspektiven dar.

### 3 Batterierecycling

#### 3.1 Aufkommen und Nachfrage

Mit einem Gesamtumsatz über 406 Mrd. Euro (2016) bei einem Exportanteil von 63 % und 923.800 sozialversicherungspflichtige Beschäftigten ist die Automobilbranche eine der Schlüsselindustrien der deutschen Wirtschaft. Mit 93.000 F&E-Beschäftigten ist sie zudem die forschungsintensivste Branche des Landes. Ihr Anteil an den gesamten Innovationsausgaben beläuft sich mit 52,4 Mrd. Euro auf rund ein Drittel (Frieske et al. 2019: 72).

**Tabelle 8: Umsatzsteigerung Branche „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen“ 2009 bis 2017**

	Gesamtumsatz in Mio. Euro				Auslandumsatz in Mio. Euro			
	2009	2015	2017	2009-2017	2009	2015	2017	2009-2017
Deutschland	265.593	401.014	422.957	64,8%	151.024	258.177	271.674	79,9%

Quelle: Frieske et al. 2019: 76

Die deutsche Automobilindustrie profitiert von einem global wachsenden PKW-Markt. Seit der Weltwirtschaftskrise 2008/2009 sind ein deutliches Umsatzwachstum und Beschäftigungszuwächse in der Branche zu verzeichnen, die zugleich von zunehmender Konzentration gekennzeichnet ist. Maßgeblich für diesen Erfolg sind die Zulieferer, die ein dezentrales Unternehmensnetzwerk mit komplementärer Spezialisierung darstellen, welches neben verteilten Kompetenzen über große Innovationskraft, hohe Flexibilität und Produktivitätsentwicklung verfügt. Auch die Produktionswerke entwickeln sich zunehmend zu Innovationsstandorten „die Produktionskompetenz in den Innovationsprozess einbringen und als Kompetenzknoten im internationalen Produktionsnetzwerk agieren“ (ebd.: 75).

**Tabelle 9: Emissionsgrenzwerte Deutschland 2021-2030**

Jahr	Grenzwert [CO <sub>2</sub> g/km]
2021	95
2025	81 (-15% im Vgl. zu 2021)
2030	59 (-37,5% im Vgl. zu 2021)

Quelle: Frieske et al. 2019: 88

Dennoch steht die Branche aufgrund der EU Grenzwerteregeln für CO<sub>2</sub>-Ausstoß unter massivem Druck, da bereits ab 2020 Strafzahlungen in Höhe von 95 Euro pro Gramm CO<sub>2</sub>-Überschreitung für die Hersteller vorgesehen sind, die die Grenzwerte nicht einhalten. Zwar konnte der durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Ausstoß der in Deutschland zugelassenen PKW seit 1998 von 188,6 Gramm CO<sub>2</sub>/km auf

128 Gramm im Jahr 2017 gesenkt werden (Frieske et al. 2019: 30). Der Trend zu größeren Fahrzeugen begünstigt derzeit aber eine Stagnation oder erneute kurzfristige Zunahme der Schadstoffemissionen. Den Automobilkonzernen drohen somit Bußgelder in Milliardenhöhe. So sehen Großbritannien und Frankreich etwa Verkaufs- und Fahrverbote ab 2040 bzw. 2050 vor (ebd.: 88).

### **Treiber Elektromobilität**

Diesen Risiken soll vor allem mit innovativen Fahrzeugbaukonzepten begegnet werden. Da Elektromobilität (in der gegenwärtig hybriden Übergangsphase) die (einzige) kurz- und mittelfristige Möglichkeit darstellt, die Grenzwerte einzuhalten und lokale Emissionen zu senken, führen die EU-Vorgaben zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei PKW-Neuzulassungen zu einer stärkeren Elektrifizierung, so dass in den kommenden Jahren mit einem erheblich steigenden Verkehrsanteil der Elektromobilität zu rechnen ist. Dieser absehbare Aufschwung der E-Mobilität soll durch den Aus- und Aufbau entsprechender Infrastruktur, bezahlbare Mobilitätskompromisse und unterschiedlichen Interessengruppen gerecht werdende Mobilitätskonzepte gesichert werden.

An die Branche stellt das Fahrzeug der Zukunft – flankiert von neuen Geschäftsmodellen, rasanten Entwicklungen in den Bereichen Digitalisierung, autonomes und automatisiertes Fahren und Industrie 4.0 – aufgrund des Technologiewandels erhebliche Anforderungen: Vor allem durch den Bedeutungsverlust von Verbrennungsmotoren durch die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs werden sich Wertschöpfungsprozesse und -strukturen in der Entwicklung und Produktion von Fahrzeugen ebenso wie die Beschäftigungssituation stark verändern (Frieske et al. 2019: 16 ff.). Dabei umfasst die Elektrifizierung neben rein elektrischen (immer mit elektrischer Lademöglichkeit) mit den hybriden Fahrzeugen (mit oder ohne externer Lademöglichkeit) auch solche, die einen Verbrennungsmotor und zusätzlich einen E-Motor nutzen, sowie Brennstoffzellenfahrzeuge, die mit einer wasserstoffbetriebenen Brennstoffzelle die Antriebsenergie für den Motor selbst erzeugen. Gemeinsam ist allen Modellen, dass sie zumindest Teilstrecken elektrisch zurücklegen können. Die neuen Fahrzeugbaukomponenten verlagern den Schwerpunkt der Wertschöpfung von der Mechanik zu einem steigenden Wertschöpfungsanteil in den Bereichen Elektrik und Elektronik, einhergehend mit der signifikanten Bedeutungszunahme der (Traktions-)Batterie.

### **Technologische Grundpfade elektrischer Antriebe**

Je nachdem, welcher Technologiepfad von den Herstellern eingeschlagen wird, um Emissionen zu reduzieren oder CO<sub>2</sub>-neutrale Antriebe zu realisieren – Antrieb des Motors mit synthetischen Kraftstoffen, mittels Brennstoffzellentechnologie oder rein-elektrisch durch die Nutzung von Traktionsbatterien – lassen sich die heute und zukünftig am Markt erhältlichen Modelle nach ihrem Elektrifizierungsgrad, der (rein) elektrisch erzielbaren Reichweite sowie den Anteilen an ihrer technischen Zusammensetzung aus konventionellen und elektrischen Komponenten unterscheiden.

### **Klassifizierung von Elektrofahrzeugen**

Die Klassifizierung von Elektrofahrzeugen erfolgt anhand der Variationen des Antriebsstrangs. Während es sich beim Hybrid um ein Fahrzeug mit Elektro- und Verbrennungsmotor handelt, welches beim Fahren aufgeladen werden kann und in der Lage, ist Bremsenergie zu speichern, kann ein Plug-in-Hybrid (PHEV) zusätzlich auch extern geladen werden. Das Range Extended Electric Vehicle (REEV) bezieht bei Bedarf Strom aus dem Verbrennungsmotor über einen Generator und verfügt

über eine höhere Reichweite als ein BEV. Allein bei den BEV ist der Antriebsstrang rein elektrisch, als Elektrofahrzeuge gezählt werden weiterhin PHEV, REEV und FCEV (Brennstoffzellenfahrzeug). Bei diesem erfolgt die Stromerzeugung an Bord aus chemischen Komponenten.

Tabelle 10: Übersicht Technologien Elektroantrieb

<b>Hybrid</b>	Hybride verfügen über mindestens zwei Antriebe, einen Verbrennungs- und einen Elektromotor, der den Antrieb unterstützt oder entlastet. Grade der Hybridisierung werden nach Leistung des E-Motors in Mikro-, Mild-, Full- und Plug-in-Hybride unterschieden.
<b>Mikro-Hybrid</b>	Der Mikro-Hybrid entspricht dem aktuellen Stand der Technik, wonach in allen (Hybrid-)Neuwagen ein Verbrennungsmotor - die Internal Combustion Engine (ICE) - verbaut wird. Der klassische Anlasser wird durch einen E-Motor ersetzt und die Motorsteuerung angepasst, um die Start-Stopp-Funktion zu ermöglichen. D.h. der Verbrennungsmotor wird bei Halt automatisch ab- und bei Weiterfahrt wieder eingeschaltet. Die technischen Veränderungen sind minimal, die Mehrkosten geringfügig, die Effizienzpotentiale liegen unter 10%.
<b>Mild-Hybrid</b>	Der Mild-Hybrid hat die Möglichkeit der Rekuperation und verfügt über Schub- und Boostfunktion durch zeitweise Unterstützung des Verbrennungsmotors mittels eines kleinen E-Motors (mit rund 15 kW) etwa durch stärkere Beschleunigung. Bis etwa 70 km/h kann das Fahrzeug bei stehendem Verbrennungsmotor rollen, wenn so Energie einsparbar („Segeln“) ist. Das Bordnetz wird mit höherer Spannung (etwa 48-Volt-System) betrieben, um elektrische Leistungen zu steuern, wodurch auch Nebaggregate elektrisch (statt mechanisch) angetrieben werden können, was zu höherer Effizienz führt. Die Installation des Hybridsystems einschließlich Batterie führt zu höherer Komplexität, mehr Masse, höheren Kosten, aber das Effizienzpotential liegt insgesamt (je nach Einsatzprofil) bei derzeit 15% bis 20% gegenüber konventionellen Fahrzeugen.
<b>Full-Hybride</b>	Mit dem Full-Hybrid ist rein elektrisches Fahren über kurze Strecken (etwa 5 km) möglich. Er besitzt eine größer dimensionierte Batterie mit mehr Speicher- und Abgabekapazität für elektrische Energie (2-4 kWh); die Aufladung der Batterie erfolgt über Rekuperation und Energieerzeugung des konventionellen Verbrennungsmotors. Er ist komplexer gebaut, hat mehr Masse und verursacht höhere Kosten als ein konventionelles Fahrzeug, verfügt aber über ein Effizienzpotential um 22-25%.
<b>Plug-in-Hybride (PHEV)</b>	Beim PHEV wird zusätzlich eine Ladeeinheit verbaut, so dass er an eine externe Energiequelle angeschlossen werden kann, um Strom aufzuladen; die Ladegeräte sind in Fahrzeug oder Ladesäule integriert. Seine Batterie ist als Energiespeicher größer dimensioniert (5-15 kWh) als beim Full-Hybrid, so dass rein elektrisches Fahren über Distanzen von 40-50 km oder auch mehr (stetiges Entwicklungsziel) möglich ist.
<b>Range-extended Electric Vehicle (REEV)</b>	Im REEV treibt ein vergleichsweise kleiner Verbrennungsmotor einen Generator an, der bei Bedarf die verbaute Batterie mit Energie versorgt und ein E-Motor ist zuständig für den Vortrieb. Damit erreicht er neben hohen Gesamtreichweiten hohe rein elektrische Streckenanteile durch die Kombination seiner Batteriekapazitäten mit der chemischen Energie des Kraftstoffs. Dieses komplexe Gesamtsystem führt zu viel Masse und erzeugt hohe Kosten durch den Einbau einer relativ großen Batterie.
<b>Battery Electric Vehicle (BEV, Batteriefahrzeug)</b>	Das BEV nutzt ausschließlich ein elektrisches Antriebssystem, bestehend aus mindestens einem (oder mehreren) Elektromotoren, der Leistungselektronik (einschließlich des Ladesystems) und des Batteriesystems, dessen groß dimensionierter Energiespeicher (20-150 kWh) über externe Stromquellen aufladbar ist. Rekuperation ermöglicht die Rückgewinnung von Bremsenergie und ihre Einspeisung in die Traktionsbatterie. Der Vortrieb erfolgt jederzeit elektrisch. Konventionelle Komponenten wie Verbrennungsmotor, Kraftstoffversorgung, Abgasanlage, Starter und Lichtmaschine entfallen komplett; die Teilekomplexität im Antriebsstrang ist somit verringert, der verfügbare Bauraum vergrößert. Für ein hohes Drehmoment bei Beschleunigung und effizienterem Betrieb bei hohen Geschwindigkeiten ist das Getriebe stufenlos oder zweistufig. Während der Fahrt treten keine Emissionen auf. Im Vergleich zum Verbrenner fallen (bei geringerer Reichweite) höhere Kosten (für die Batterie) an.
<b>Fuel cell Electric Vehicle (FCEV, Brennstoffzellenfahrzeug)</b>	Der Vortrieb des FCEV erfolgt über Elektromotoren, die sich mit Energie aus dem Wasserstofftank und Brennstoffzellensystem speisen. Die kleiner dimensionierten Batterien werden an Bord kontinuierlich von der Brennstoffzelle geladen, wobei durch Konstruktion als FC-PHEV auch die externe Ladung möglich ist. Im Brennstoffzellenfahrzeug werden 3-6kg Wasserstoff bei 700 bar gespeichert. Möglich sind damit PKW-Reichweiten bis zu 400 km, wobei die Füllzeit nur etwa sechs Minuten beträgt. Hohe Anschaffungskosten und der Mangel an Wasserstoff(tankstellen)infrastruktur wirken sich derzeit nachteilig auf die kurz- und mittelfristige Massentauglichkeit des FCEV aus.

Quellen: Frieske et al. 2019; LBST 2019

Die Batteriegrößen der Fahrzeuge unterscheiden sich (ebenso wie die Reichweiten) beachtlich voneinander: Hybridfahrzeuge nutzen Batterien ab ca. 35 kg, Plug-in-Hybridfahrzeuge benötigen ca. 100 bis 150 kg schwere Batterien und bei den vollelektrischen Fahrzeugen beträgt das Batteriegewicht 250 kg oder mehr (Buchert 2016a: 9). Zudem kommen bei HEV Hochleistungszellen, bei BEV Hochenergiezellen zum Einsatz (Hoyer 2015: 25 f.).

Die Zunahme der Fahrzeugelektrifizierung führt zur Veränderung und zum (teilweisen) Ersatz von Schlüsselkomponenten, die für die Wertschöpfung und damit auch für Beschäftigungspotentiale sowie Beschäftigungsanforderungen im Fahrzeugbau höchst relevant sind. Dazu zählen insbesondere der Verbrennungsmotor, das Getriebe, Elektromotoren, Leistungselektronik und Batteriesysteme. Während zunächst sehr hohe Investitionen in F&E erforderlich sind, sollen die Preise für die Herstellungskosten durch steigende Produktionszahlen bei den elektrischen Komponenten schließlich soweit sinken, dass Wettbewerbsfähigkeit mit konventionellen Fahrzeugen hergestellt werden kann.

Die deutsche Automobilindustrie, deren Produktportfolio sich in den vergangenen Jahren langsam aber stetig erweiterte, investiert bis 2020 über 40 Milliarden Euro in die Weiterentwicklung der Elektromobilität (VDA 2017). Deutlich wird bei der Betrachtung ihrer und der Angebotspalette global relevanter Hersteller, dass jeweils unterschiedliche Elektrifizierungsstrategien verfolgt werden: Während Toyota, Peugeot und Lexus auf Full-Hybrid-Antriebskonzepte und Audi, BMW sowie Volvo auf die Plug-in-HEV-Technologie fokussieren, konzentrieren sich Renault, Tesla, Nissan und Volkswagen – vor allem im Klein- und Sportwagensegment – auf die Entwicklung rein-elektrischer Antriebe (BEV). Insgesamt unterrepräsentiert ist der sich bei Opel, Chevrolet und BMW abzeichnende Schwerpunkt REV. BMW setzt zugleich wie Daimler auf Hybride, also einen optimierten Verbrennungsmotor und zusätzlichen E-Antrieb. Bei beiden deutschen Herstellern erfolgt derzeit die Ausrichtung ihrer Werke auf die Produktion von Verbrennern, Stromern und Hybriden auf einem Band (Handelsblatt, 15.04.2019).

Da die Kosten für Brennstoffzellen und zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe noch sehr hoch sind und die Frage nach den Voraussetzungen zur Errichtung eines Recycling-Werkes für Traktionsbatterien den Fokus darstellt, analysiert die hier vorliegende Studie die in ökonomischer und ökologischer Hinsicht eintretenden Effekte vordergründig im Hinblick auf den Technologiepfad der Elektrifizierung.

### **Entwicklung E-Mobilität und Markthochlauf**

Der globale PKW-Markt wächst, vor allem die Nachfrage nach E-Fahrzeugen steigt rasant: Während 2015 erst 0,56 Mio. PKW-Neuzulassungen auf Elektro-Mobile entfielen, so waren es 2018 bereits 2,24 Mio. und der globale Bestand nahm im gleichen Zeitraum von 1,40 Mio. (2015) auf 5,61 Mio. (2018) zu (Handelsblatt, 29.04.2019). Dabei ist die Entwicklung des internationalen Automobilmarkts für elektrifizierte Fahrzeuge stark abhängig von politischen Zielen und Maßnahmen wie CO<sub>2</sub>-Gesetzgebungen, Vorgaben in den Bereichen Klima- und Gesundheitsschutz, Quoten für E-Fahrzeuge, von finanziellen Subventionen und Kaufanreizen sowie der Förderung von F&E-Aktivitäten und dem Ausbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur, wie die im internationalen Vergleich stark variierenden Rahmenbedingungen verdeutlichen (ebd.).

In Europa mit einem Gesamtbestand von 252 Mio. PKW im Jahr 2015 waren 0,1 % elektrifiziert. Deutschland liegt bei den Neuzulassungen noch unter dem EU-Durchschnitt: Betrug der Anteil an E-Autos 2017 in Norwegen 40 % und in Schweden 5 %, so waren es hier unter 1 %, bei einer Ladeinfrastruktur von 22.213 normalen und 2.076 Schnellladesäulen (Frieske et al. 2019: 90 f.).

**Tabelle 11: Neuzulassungen 2017 und Neuzulassungen BEV Entwicklung in EU-28**

Neuzulassungen 2017	Europa	Deutschland
Gesamt (Elektrifizierungsgrad)	15,13 Mio. (1,43%)	3,44 Mio (0,3%)
BEV	98.000	25.000 (0,73%)
PHEV	119.000	29.000 (0,84%)

Quelle: Frieske et al. 2019: 88ff.

**Tabelle 12: Neuzulassungen batterieelektrischer PKW in der EU-28**

2015	59.165
2016	63.479 (7,29% Steigerung zum Vorjahr)
2017	97.920 (54,26% Steigerung zum Vorjahr)
2018	150.003 (53,19% Steigerung zum Vorjahr)

Quelle: Frieske et al. 2019: 88ff.

Demgegenüber liegen die Marktanteile elektrifizierter Fahrzeuge in China und den USA schon viel höher, wofür förderlichere gesetzliche und politische Rahmenbedingungen, die den Markthochlauf begünstigen, als ausschlaggebend angesehen werden müssen. China, als Haupttreiber der Entwicklung, forciert den Durchbruch der Elektromobilität durch gezielte staatliche Regulierung. Die chinesische E-Mobilitätsindustrie ist aufgrund dessen einer der bedeutsamsten wettbewerblichen Faktoren auf dem Weltmarkt: In dem Land sind ein Drittel aller E-Fahrzeuge weltweit auf den Straßen und es verfügt (neben Indien) über den derzeit wachstumsstärksten, größten PKW-Markt der Erde.

Für den europäischen PKW-Neuwagenmarkt wurden mit dem Modell DLR VECTOR21 Szenarien entworfen, die den Markthochlauf und das Käuferverhalten im Jahr 2030 simulieren (Frieske et al. 2019: 7). Beim „Business as usual“-Szenario wird von einer moderaten Entwicklung der Rahmenbedingungen ausgegangen, während für das „Progressiv“-Szenario eine günstige Entwicklung der Infrastrukturverfügbarkeit und die Senkung der Batteriekosten als Annahmen gelten. Diese gehen von einer bis dahin hergestellten Konkurrenzfähigkeit von reinen E-Mobilen im Hinblick auf ihre reinen Anschaffungskosten im Vergleich zu PKW mit einem klassischen Antriebsstrang aus, wobei auch die Stromerzeugung bereits „sauber“ sein müsste.

Angenommen wird, dass die Geschwindigkeit des Markthochlaufs von PKW im Bereich E-Mobilität durch interne und externe Einflussfaktoren, wie die Verschiebung von Preisrelationen für PKW zugunsten der E-Mobilität, beeinflussbar ist, was in den Szenarien reflektiert wird. Demnach würde die Beschleunigung des Markthochlaufs durch neue Anbieter mit offensiver Angebotspolitik begünstigt,

also vor allem durch exogene Faktoren bestimmt (ebd.: 158), da sie vor allem von Variablen wie den Batteriekosten, der Infrastrukturverfügbarkeit, von der CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung und CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerten oder auch dem jährlichen Produktionsangebot sowie von Energiepreisen abhinge (ebd.: 98 ff.).

**Tabelle 13: Markthochlaufszszenarien DLR**

Modell DLR VECTOR21- Szenarien 2030:		
Marktanteile an Neuzulassungen im PKW-Segment	„Business-as-Usual“	„Progressiv“
reine Elektrofahrzeuge	15%	51%
Plug-Ins	13%	23%
Full-Hybride	35%	22%
Brennstoffzellenfahrzeuge	als Antriebstechnologie ohne Bedeutung	
CO <sub>2</sub> -Minderung (Prämisse: Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien)	50%	55%

Quelle: Frieske et al. 2019: 88ff.

Rein-elektrisch betriebene Fahrzeuge (BEV) erreichen in den DLR-VECTOR21-Szenarien 2030 Marktanteile zwischen 15 % („Business as usual“) und 51 % („progressiv“) an den PKW-Neuzulassungen, wobei die für den Verkehrssektor laut Klimaschutzplan 2030 vorgesehenen Ziele in beiden Szenarien erreicht werden – allerdings unter der Prämisse, dass die Verkehrsleistungen nicht weiter steigen und die Effekte effizienterer Technologien und Antriebsstränge (über)kompensieren (Frieske et al. 2019: 98). Sowohl unter moderaten als auch unter progressiven Bedingungen wird der Rückgang des Marktanteils reiner Verbrenner erwartet, während der Einstieg des Brennstoffzellenfahrzeugs auf dem europäischen PKW-Markt nicht vor 2030 prognostiziert wird – wobei es aber von Spill-over-Effekten aus anderen Bereichen (Nutzfahrzeuge), vom Infrastrukturausbau und von absehbaren Kostensenkungen profitieren könnte. Deutlich wird, dass bei einem Anteil von rein-elektrisch angetriebenen Fahrzeugen von 15 % bzw. 51 % und zusätzlich teil-elektrifizierter Fahrzeuge in beiden Szenarien 2030 der elektrische Antriebsstrang EU-weit dominieren wird.

### Bisherige Entwicklung

Im Jahr 2018 ist der Bestand an zugelassenen Fahrzeugen mit ausschließlich elektrischem Antrieb (BEV und REEV, vgl. *Tabelle 10*) in Deutschland von 53.861 auf 83.175 gestiegen, die Anzahl der Fahrzeuge mit mindestens zwei unterschiedlichen Antriebsarten (HEV und PHEV, vgl. ebd.) stieg von 236.710 auf 341.411 Fahrzeuge an, darunter wuchs der PHEV-Bestand von 44.419 auf 66.997 (KBA 2019b).

Das aktuelle Ziel der deutschen Bundesregierung ist das Erreichen von einer Million Elektrofahrzeugen (BEV, REEV, PHEV und FCEV) im Jahr 2022. Ursprünglich war das Erreichen dieses Ziels bereits im Jahr 2020 geplant. Gründe für die Verzögerung sind unter anderem eine nicht ausreichende Anzahl an Fahrzeugmodellen, das späte Förderprogramm zum Ausbau der Ladeinfrastruktur, fehlende rechtliche Rahmenbedingungen und die zeitliche Verzögerung bei der Implementierung des Umweltbonus (NPE 2018: 6). Da die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen stark mit der Fahrleistung und dem elektrischen Fahranteil (bei PHEV und REEV) steigt, sind Elektrofahrzeuge bislang vor allem für Pend-

ler, im Carsharing, für den ÖPNV oder für gewerbliche Nutzung mit gut planbaren Fahrten rentabel (ebd.: 45 ff.).

Bisherige Maßnahmen zur Förderung der Elektromobilität in Deutschland umfassen u. a. steuerliche Erleichterungen, die Förderung von F&E, rechtliche Maßnahmen (v. a. das Elektromobilitätsgesetz von 2015), den 2016 eingeführten sogenannten Umweltbonus, der Zuschüsse in Höhe von 4.000 Euro beim Kauf eines BEV und 3.000 Euro beim Kauf eines PHEV vorsieht, die jeweils zur Hälfte von Bundesregierung und Automobilindustrie getragen werden (NPE 2018: 51).

### **Speichertechnologien elektrischer Energie in mobilen Anwendungen**

Eine Traktionsbatterie speichert die für den Vortrieb notwendige Energie in Batteriezellen und gibt sie bei Bedarf an den Elektromotor ab. Sie kann als Kernkomponente für den Erfolg der E-Mobilität betrachtet werden. Als derzeit größte Herausforderung gilt die Weiterentwicklung der Batteriesysteme, deren Leistungsfähigkeit gesteigert werden soll, damit Wettbewerbsfähigkeit der E-Mobile mit konventionellen Antrieben auch über die Konkurrenzfähigkeit bei den Reichweiten herstellbar ist. Zusätzlicher Forschungsbedarf besteht neben dem Ziel einer Erhöhung der Energiedichte zur Steigerung der Batterieleistungsfähigkeit in den Bereichen Crashesicherheit, Thermo- und Batteriemangement voraussichtlich auch zunehmend im Segment Batterierecycling.

Im Zuge des Markthochlaufs vollelektrischer, plug-in oder hybrider PKW ist mit einem (starken) Wachstum der Nachfrage nach geeigneten Batterien als Energiequelle der Fahrzeuge zu rechnen. Starken Einfluss auf die Marktentwicklung haben die Batteriekosten, die den Kaufpreis aller elektrifizierten Fahrzeuge maßgeblich bestimmen und im Jahr 2020 voraussichtlich zwischen 250 Euro/kWh (moderate Entwicklung) und unter 200 Euro/kWh (progressive Entwicklung) für eine Batteriegröße von 40 kWh variieren, was den Anschaffungspreis um rund 2.000 Euro beeinflusst. Bis 2030 könnte der Preis bei progressiver Entwicklung bei etwa 150 Euro/kWh liegen (Frieske et al. 2019).

### **3.2 Batterien der Elektromobilität: Typologie, Rohstoffe, Produktionsweisen**

Der Oberbegriff Batterie umfasst allgemein elektrochemische Energiespeicher und kann in nicht wiederaufladbare Primär- und wiederaufladbare Sekundärbatterien, zu denen die Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge zählen, unterschieden werden (Rahimzei et al. 2015: 2). Das gesamte Batteriesystem umfasst Batteriezellen, Batteriemangement (auch Zellmonitoring, überwacht das Batteriesystem, bspw. Spannungen, Temperaturen und steuert relevante Funktionen) und Gehäuse mit Elektronik, Sensorik, Kühlungskomponenten und Sicherheitskomponenten, wobei der Hauptanteil der Wertschöpfung, annähernd 50 %, bei den Batteriezellen selbst liegt. Die Kostenzusammensetzung einer Li-Io-Traktionsbatterie stellt sich gegenwärtig so dar, dass 47 % auf die Zellproduktion, 17 % auf die Materialverarbeitung, 13 % auf die Rohmaterialien, 13 % auf die Batteriemontage und 10 % auf weitere Komponenten entfallen (Rennhak et al. 2012: 7, 36).

Wesentliche Parameter zur Beurteilung der Qualität einer Batterietechnologie und ihrer Eignung für eine gewünschte Anwendung sind Energie- und Leistungsdichte, die vor allem Reichweite und Ladegeschwindigkeit beeinflussen. Für eine Strecke von 100 km werden bei aktuellen Modellen zwischen 10 und 30 geladenen kWh benötigt (ADAC-Stiftung 2019). Darüber hinaus spielen auch die Zellspannung und der Verlauf der Entladekurve, Kosten (z.B. durch Verfügbarkeit der Rohstoffe, Produktionskosten und Wartungsaufwand), Lebensdauer (z. B. durch Stabilität gegenüber mechanischer, elektri-

scher und thermischer Belastung), Umweltverträglichkeit (z. B. durch verwendete Materialien) und Sicherheit (insbesondere der Betriebstemperaturbereich) eine wesentliche Rolle. Die Entwicklung neuer und Weiterentwicklung bestehender Batterietechnologien zielt daher insbesondere auf die Verbesserung dieser Aspekte ab (Rahimzei et al. 2015: 9 ff.; Korthauer 2013: 42). Generell kann zwischen energieoptimierten und leistungsoptimierten Batterien unterschieden werden, die für unterschiedliche Anwendungen eingesetzt werden. Energieoptimierte Batterien haben hohe Energiedichten, aber eventuell geringere Lade-/Entladeraten und eignen sich daher eher für BEV, die langsam aufgeladen werden können, aber hohe Reichweiten erzielen sollen. Leistungsoptimierte Batterien haben eventuell geringere Energiedichten, aber hohe Lade-/Entladeraten und eignen sich daher besonders für HEV, die beim Bremsvorgang entstehende elektrische Energie schnell speichern sollen (Rahimzei et al. 2015: 10).

Insbesondere durch ihr vergleichsweise gutes Reichweite-Gewichts-Verhältnis aufgrund der hohen gravimetrischen Energiedichte bei gleichzeitig hoher Leistungsdichte unterscheiden sich Li-Io-Batterien bislang von anderen Batterietechnologien und werden daher als Energiequelle elektrischer Fahrzeugantriebe favorisiert (Rennhak et al. 2012: 16 f.). Daher fokussiert sich diese Studie bei der Analyse des Recyclingpotentials auf Li-Io-Technologien, andere Technologien, die parallel entwickelt werden, wie neue Generationen von Batterietechnologien, beispielsweise Feststoffbatterien oder Flusszellbatterien (Redox-Flow) sowie Brennstoffzellen, die künftig als Energieversorger der Elektromobilität fungieren könnten, werden nur überblicksmäßig behandelt.

Tabelle 14: Wesentliche Batterieparameter

Parameter	Erläuterung
<b>Entladerate/ Laderate</b>	Kehrwert der Zeit (in h), in der eine Batterie mit einer gegebenen Kapazität (in Ah) bei maximalem Entladestrom/Ladestrom entladen/geladen werden kann.
<b>Nennspannung</b>	Durchschnittliche Spannung während eines langen Zeitraums der Entladung, erst bei fast vollständiger Entladung schnell sinkende Spannung, Entladekurve abhängig von verwendeten Materialien.
<b>Ladeendspannung</b>	Spannung bei vollständiger Ladung (für Li-Io Batterien typisch 4,2 V).
<b>Entladeendspannung</b>	Restspannung bei vollständiger Entladung (für Li-Io Batterien typisch 2,5 V).
<b>Kapazität</b>	Eingelagerte Ladungsmenge bei vollständiger Ladung in Ah.
<b>Volumetrische Energiedichte</b>	Energiedichte bezogen auf das Volumen in Wh/l (Produkt aus Ladungsdichte und Zellspannung).
<b>Spezifische/ gravimetrische Energiedichte</b>	Energiedichte bezogen auf die Masse in Wh/kg (Produkt aus Ladungsdichte und Zellspannung).
<b>Theoretische Energiedichte</b>	Energiedichte bezogen allein auf die Masse der reinen Elektrodenmaterialien, exakter Wert kann angegeben werden.
<b>Praktische Energiedichte</b>	Energiedichte bezogen auf die Masse aller Zellbestandteile, üblicherweise weniger als die Hälfte der theoretischen Energiedichte, stets Richtwert, da mit dem Zelldesign variierend.
<b>Coulombscher Wirkungsgrad/ Ladewirkungsgrad</b>	Verhältnis von entnommenen Ah zu eingeladenen Ah, Maß für Ladungsverluste der Batterie beim Laden und Entladen.
<b>Energetischer Wirkungsgrad</b>	Verhältnis von entnommener Energie zu eingeladener Energie, Gesamtwirkungsgrad der Batterie, nicht nur Ladungsverluste, sondern z.B. auch Spannungsverluste und thermische Verluste berücksichtigt.
<b>Zyklenlebensdauer</b>	Lebensdauer in Ladezyklen (End of Life oft bei 80% der ursprünglichen Kapazität definiert).
<b>Kalendarische Lebensdauer</b>	Lebensdauer der Batterie im nicht genutzten Zustand, Verschleiß durch chemische Vorgänge in der Zelle.
<b>Memory Effekt</b>	Verkürzung der Lebensdauer durch Veränderungen in der Batteriezelle bei häufiger Teilentladung, bei Li-Io Zellen kein oder nur geringer Memory-Effekt.

Quelle: Korthauer 2013; KLiB 2019; Rahimzei 2015

### Aufbau und Funktionsweise von Li-Io-Batterien

Die hohe gravimetrische/spezifische und volumetrische Energiedichte der Li-Io-Batterien ist auf die spezifischen Eigenschaften von Lithium, dem kleinsten und leichtesten metallischen Element, welches mit dem negativsten elektrochemischen Potential von -3,04V gegenüber der Standard-Wasserstoffelektrode ein starkes Reduktionsmittel ist, zurückzuführen (Rahimzei et al. 2015: 4).

Eine Li-Io-Zelle besteht aus zwei Elektroden, einer negativ geladenen Anode und einer positiv geladenen Kathode. Die Elektroden setzen sich aus dem jeweiligen Aktivmaterial und einem Stromableiter zusammen. Die Kathode besteht üblicherweise aus Übergangsmetalloxiden mit einem Stromableiter aus dem leichten, billigen und sehr leitfähigen Material Aluminium, die Anode aus Graphit mit einer Kupferfolie als Stromableiter, da Lithium mit Aluminium bei dem niedrigen anodischen Potential Legierungen ausbilden würde. Der Raum zwischen den Elektroden ist mit Elektrolyt gefüllt und beinhaltet eine Separatorschicht, die für Elektronen isolierend und für Ionen leitend wirkt und einen Kurzschluss durch direkten Kontakt der Elektroden verhindert. Beim Entladevorgang wandern die positiv geladenen Li-Ionen im Elektrolyten, der den Li-Ionen Transport gewährleistet, von der Anode durch den Separator zur Kathode. Das Kathodenmaterial nimmt zum Ladungsausgleich pro Li-Ion ein Elektron aus der Anode über den Verbraucher auf, der dadurch betrieben wird. Die Oxidation findet demnach an der Anode, die Reduktion an der Kathode statt, beim Ladevorgang kehrt sich dieser Prozess um. Oxidiert und reduziert werden die jeweiligen Aktivmaterialien, welche mit den Li-Ionen keine chemische Verbindung eingehen, sondern diese in Interkalationsverbindungen einlagern, z. B. Einlagerung zwischen Kristallgitterebenen bei Graphit, d. h. die chemische Struktur der Elektrodenmaterialien ändert sich nicht (KLiB 2019).

Aktuelle internationale Forschungsthemen im Bereich der Li-Io-Batterien sind insbesondere die Kathoden- und Anodenforschung und die Elektrolytforschung. Im Bereich der Separatoren und Systemzusammensetzung wird momentan etwas weniger geforscht (Thielmann 2015: 10 f.).

## Elektrolyte

Jeder Elektrolyt besteht aus Leitsalzen, einem Lösungsmittel und Additiven und gewährleistet den Transport der Li-Ionen zwischen den Elektroden. Wichtige Eigenschaften sind eine gute Leitfähigkeit über einen großen Temperaturbereich, eine hohe Zyklenfestigkeit und die chemische Kompatibilität mit den Materialien der Batteriezelle. Außerdem sollte ein geeigneter Elektrolyt möglichst sicher, ökologisch und preiswert sein (Korthauer 2013: 61 f.).

Das Lösungsmittel eines guten Elektrolyten sollte eine geringe Viskosität und eine hohe Löslichkeit für die verwendeten Leitsalze, d. h. eine hohe Polarität, besitzen, um eine gute Leitfähigkeit aufzuweisen. Aufgrund der stark reduzierenden und oxidierenden Materialien in einer Batteriezelle können protische Lösungsmittel, insbesondere also wässrige Lösungsmittel, die zur Bildung von Wasserstoff führen würden, nicht verwendet werden. Als geeignete aprotische Lösungsmittel für Li-Io-Traktionsbatterien haben sich organische Ester, v. a. Carbonate, herausgestellt. Meist werden Mischungen aus zyklischen Carbonaten (Ethylencarbonat (EC), Propylencarbonat (PC)) mit hoher Polarität bei mittlerer Viskosität und offenkettigen Carbonaten (Dimethylcarbonat (DMC), Diethylcarbonat (DEC), Ethylmethylcarbonat (EMC)) mit niedriger Viskosität und mittlerer Polarität verwendet. Offenkettige Ester (Ethylacetat (EA), Methylbutyrat (MB)) können zur Verbesserung der Eigenschaften bei tiefen Temperaturen zugefügt werden (Korthauer 2013: 62 ff.).

Leitsalze erhöhen die elektrische Leitfähigkeit des Elektrolyten. Wichtige Eigenschaften für geeignete Leitsalze sind eine hohe Löslichkeit in aprotischen Lösungsmitteln und eine hohe Stabilität des Anions gegenüber Oxidation und dem Lösungsmittel. Die Anziehung zwischen Anion und Lithium-Ion soll möglichst gering sein, um eine hohe Mobilität zu gewährleisten. Bisher wird in Li-Io-Batterien aufgrund vieler positiver Eigenschaften fast ausschließlich Lithiumhexafluorophosphat (LiPF<sub>6</sub>) verwendet. Allerdings hat LiPF<sub>6</sub> nur eine begrenzte chemische und thermische Stabilität, in organischen

Lösungen zersetzt sich das Leitsalz ab Temperaturen von 70°C, außerdem reagiert es bereits bei Kontakt mit geringen Wassermengen zu Flusssäure. Daher werden stabilere Alternativen, vor allem auf Basis von Sulfonylimiden, entwickelt (Korthauer 2013: 64 ff.).

Bei geeigneten Elektrolyten bildet sich beim ersten Laden der Batterie eine für Elektronen isolierende, schwerlösliche Deckschicht auf der Anode aus, die sogenannte Solid Electrolyte Interphase (SEI), da sich das mit den Li-Ionen in die Anode eindringende Lösungsmittel und teils auch das Leitsalz unter den reduzierenden Bedingungen zersetzt. Die Anode wird durch die SEI vor der korrodierenden Elektrolytlösung geschützt und eine weitere Zersetzung des Lösungsmittels wird verhindert. Auch die Aufweitung des Anodenmaterials durch den eindringenden Elektrolyten würde bei fehlender SEI zur mechanischen Zerstörung der Elektrode führen. Somit trägt die SEI, die nur noch für Li-Ionen und nicht mehr für den Elektrolyten durchlässig ist und somit desolvatisierend wirkt, erheblich zur Lebensdauer und Leistungsfähigkeit der Batteriezelle bei, wobei die Stabilität der Schicht sehr wichtig ist, da sie ein Wachstum des Batteriezellvolumens verringert und den Widerstand der Batterie erhöht. Die Optimierung dieser Schicht ist das hauptsächliche Ziel von Additiven, die dem Elektrolyten zugegeben werden. Da vor allem EC eine gute SEI ausbildet, macht es 20-50 % der meisten Elektrolyte aus. Geeignete Additive sind elektrochemisch reaktiver als die anderen Elektrolytbestandteile und daher bereits reduziert und bilden eine SEI bevor die übrigen Bestandteile mit der Anode reagieren können. Am häufigsten wird hierfür Vinylencarbonat eingesetzt. Auch an Additiven zur Ausbildung einer Schutzschicht an der Kathode, meist als Conductive Interphase bezeichnet, die bei Batteriezellen mit erhöhter Spannung vermehrt wichtig wird, wird geforscht (Korthauer 2013: 69 ff.; Rahimzei et al. 2015: 5).

Ein weiteres Einsatzgebiet von Elektrolytadditiven sind Verbesserungen der Sicherheit, z. B. durch flammhemmende Additive bei entflammaren Elektrolytlösungen oder Shutdown-Additive, die durch elektrochemische Aktivierung ab einer bestimmten Zellspannung die Überladung und damit drohende Erhitzung der Batteriezelle bis zur Explosion verhindern. Dazu bilden sie eine isolierende Schicht für die Li-Ionen oder setzen Gase frei, die einen drucksensiblen Schalter zur Behinderung des Stromflusses auslösen. Eine weitere Lösung sind Redox Shuttle Systeme, bei denen elektrochemisch aktive Stoffe zum Elektrolyten hinzugefügt werden, die bei hoher Spannung in einem kreisförmigen Prozess durch Oxidation an der Kathode und anschließender Reduktion an der Anode überschüssige Ladung abbauen (Rahimzei et al. 2015: 16).

Neben der Verbesserung des bisher typischen Elektrolyten aus LiPF<sub>6</sub> in einem organischen Carbonatlösungsmittel wird momentan an Polymerelektrolyten, Gelpolymerelektrolyte, HV-Elektrolyten für Hochvoltkathoden, die entsprechend stabile Elektrolyte benötigen, verschiedenen Additiven und Festelektrolyten geforscht (Thielmann et al. 2015: 11).

Polymerelektrolyte vereinen die Funktionsweise des Elektrolyten und des Separators, das Lithium-Ion wird hier über Etherbrücken des Polymergerüsts geleitet. Vorteile der Polymerelektrolyte liegen vor allem in der hohen Sicherheit der Zellen, die robuster gegen Vibrationen sind und Volumenänderungen besser ausgleichen können als harte Separatoren, aber auch die leichtere Bauweise, da der Elektrolyt nicht austreten und daher das Batteriegehäuse reduziert werden kann, ist von Vorteil. Die Leitfähigkeit von Polymerelektrolyten steigt bei Erreichen der Glasstemperatur sprunghaft an, das Ziel von Gelpolymerelektrolyten ist es daher, durch Additive die Glasstemperatur zu senken und damit in einem niedrigeren Temperaturbereich eine hohe Leitfähigkeit zu erzielen. Da Polymerelektrolyte außerdem die Dendritenbildung bei Li-Metall-Zellen vermindern können, werden sie bisher hauptsächlich in

diesem Zusammenhang angewandt, beispielsweise bereits in den Autos ‚Bluecar‘ mit Li-Metall Anode der französischen Firma Bolloré (Korthauer 2013: 74 f.).

Festelektrolyte finden bislang in der Praxis kaum Anwendung. Ihre hauptsächliche Schwierigkeit besteht in der geringen Leitfähigkeit aufgrund der Grenzschicht zum Aktivmaterial, die für eine gute Funktionsweise auch bei Volumenveränderungen einen geringen Widerstand und guten Kontakt zu den Elektroden behalten muss. Da das Auslaufen des Elektrolyten nicht möglich ist, würden Festelektrolyte jedoch die Brandgefahr verringern und die Sicherheit der Batterien erhöhen (Ketterer et al. 2009: 11, 29; KliB 2019). Außerdem würden sie den Einsatz von Hochvoltkathoden und Lithiummetallanoden ermöglichen und damit essentiell zur Steigerung der Energiedichte beitragen (Braun 2016: 1).

## Separatoren

Separatoren sollen den direkten Kontakt zwischen den Elektroden und damit einen Kurzschluss verhindern, gleichzeitig einen möglichst guten Transport der Ionen sicherstellen und dabei möglichst hitzebeständig sein. Viele Separatoren werden außerdem so konstruiert, dass sie ab einer kritischen Temperatur den Stromfluss in der Zelle behindern und die Batterie damit vor dem Überhitzen schützen (Shutdown-Separatoren). Geeignet sind mit Elektrolyt gefüllte poröse Flächengebilde, häufig werden Polymermembranen, keramische Feststoffe, Vliesstoffe oder Glasfasermaterialien verwendet (Rahimzei et al. 2015: 6, Korthauer 2013: 79).

In Li-Io-Batteriezellen werden bislang meist Polymermembranen auf Polyolefinbasis (in der Regel Polyethylen oder Polypropylen), in die Poren eingebracht wurden, verwendet. Diese können entweder in einem Trocken- oder einem Nassverfahren hergestellt werden. Die Dicke der Separatoren liegt je nach Batteriegröße im Bereich unter 10 Mikrometer, wesentliche weitere Parameter sind Porosität (ca. 40 %), Porengröße (Submikrometerbereich) und homogene Verteilung der Poren, Elektrolytaufnahmefähigkeit, Durchstoßfestigkeit gegenüber Elektrodenpartikeln und Stabilität gegenüber Temperaturschwankungen und mechanischen sowie chemischen Einflüssen (Schrumpf- und Schmelzpunkt, Elastizität, Stabilität gegenüber spezifischer Zellchemie). In einer Batteriezelle einer Traktionsbatterie für Elektrofahrzeuge beträgt die typische Separatorfläche 200 Quadratmeter (Korthauer 2013: 79 ff.).

Shutdown-Separatoren nutzen mehrere Schichten mit verschiedenen Schmelztemperaturen, sodass das Überschreiten der Schmelztemperatur der einen Schicht diese zum Schmelzen bringt, wodurch die Poren der anderen, noch stabilen Schicht verschlossen werden und der Ionenfluss behindert wird. Die Temperaturerhöhung darf dabei jedoch nicht zu schnell erfolgen. Insbesondere bei internen Kurzschlüssen durch einen durchstoßenen Separator kann es zu abrupten lokalen Temperaturspitzen und damit dem Aufschmelzen beider Schichten und lokaler Schrumpfung kommen. In großen Traktionsbatteriezellen mit schwierigem Wärmeabtransport, kann das eine Ausbreitung des Kurzschlusses, ein großflächiges Aufschmelzen des Separators und damit eine unkontrollierte Entladung bewirken. Insbesondere die oft verwendeten Polyolefinmembranen weisen Einschränkungen bezüglich der Penetrationsbeständigkeit und des Schmelzverhaltens (Schmelztemperatur von ca. 165°C) auf. Um die hohen Sicherheitsanforderungen zur Vermeidung von Bränden oder Explosionen von Traktionsbatterien zu erfüllen, ist daher eine hohe Reinheit der Batteriezelle wichtig, da eingebrachte leitfähige Partikel besonders leicht den Separator durchstoßen können. Auch ein besonders hoher Schmelzpunkt der Separatorschicht, die im Falle des Shutdown stabil bleiben soll, ist hilfreich, es eignen sich daher vor allem keramische Materialien (Korthauer 2013: 83 ff.).

Neuartige Technologien, wie zusätzliche anorganische Beschichtungen zur Verhinderung von Kurzschlüssen oder keramisch beschichtete Vliesstoffe mit hoher mechanischer und thermischer Stabilität, die die Sicherheit großer Li-Io-Batterien erhöhen, sind aktuell Gegenstand der Forschung (Freudenberg Performance Materials).

### **Kathodenmaterialien**

Die Kathoden von Li-Io-Batterien können aus verschiedenen Materialkombinationen bestehen, die bezüglich Energiedichte, Nennspannung und Entladekurve, Lade-/Entladerate und damit Leistungsdichte, Lebensdauer, Sicherheit, Toxizität, Kosten und Verfügbarkeit der verwendeten Rohstoffe unterschiedliche Eigenschaften aufweisen und nach denen die Li-Io-Zelle in der Regel benannt wird. Anhand ihrer Kristallstruktur können die Kathodenmaterialien drei verschiedenen Gruppen zugeordnet werden, sie können in Spinelle (dreidimensionale Röhrenstruktur), Olivine (eindimensionale Röhrenstruktur) oder zweidimensional geschichtete Kristalle unterteilt werden. Während Spinell- und Olivinstruktur stabiler sind, ist die Energiedichte der geschichteten Struktur am höchsten (Ketterer et al. 2009: 8 f., Korthauer 2013: 41).

Die Verwendung der verschiedenen Zellchemien hängt wesentlich vom Einsatzgebiet der Batterie ab. Momentan sind hauptsächlich fünf Kathodenmaterialien auf dem Markt, von denen die meisten auf Übergangsmetalloxiden basieren. Aufgrund ihrer hohen Energiedichten und hohen Lebensdauer werden insbesondere NMC und NCA Kathoden für den Einsatz in der Elektromobilität verwendet (vgl. Tabelle 15). Die NMC Kathode, welche aktuell als aussichtsreichste Technologie für die Elektromobilität angesehen wird (NPE 2016: 19), verbindet die Vorteile der hohen Energiedichte von Lithiumnickeloxid mit der hohen Stabilität von Lithiummanganoxid. Während die standardmäßig eingesetzte NMC Kathode Nickel, Kobalt und Mangan zu gleichen Anteilen enthält, wird auch an neuartigen Materialien mit einem höheren Nickelanteil geforscht, NMC Kathoden mit einem 6:2:2 Verhältnis werden sogar bereits produziert und eingesetzt. Neben NMC und NCA Kathoden werden vereinzelt auch LMO Kathoden verbaut und vor allem in China auch LFP Kathoden produziert und eingesetzt (Thielmann et al. 2015: 13). Letztere sind wegen ihrer positiven Eigenschaften bezüglich Sicherheit (keine Sauerstoffabgabe im Störfall), Kosten und Lade-/Entladerate attraktiv, weisen jedoch eine deutlich geringere Energiedichte und damit Reichweite auf, wodurch sie bisher – auch aufgrund ihrer guten Schnellladefähigkeit – vor allem in (P-)HEV eingesetzt werden (KliB 2019). Daher wird auch an Möglichkeiten, Materialien mit höherer Energiedichte wie Mangan, Kobalt oder Nickel durch die Substitution von Eisen in LFP Kathoden einzubinden geforscht (Korthauer 2013: 40).

Tabelle 15: Übersicht über Eigenschaften der gängigen Kathodenmaterialien von Li-Io Batterien

Kürzel	LCO	LMO	NMC	NCA	LFP
Kathodenmaterial	Lithium-Kobalt-Oxid	Lithium-Mangan-Oxid	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid	Lithium-Eisen-Phosphat
Strukturformel	$\text{LiCoO}_2$	$\text{LiMn}_2\text{O}_4$	$\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$	$\text{LiNi}_{0,85}\text{Co}_{0,10}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$	$\text{LiFePO}_4$
Kristallstruktur	geschichtet	spinel	geschichtet	geschichtet	olivin
Praktische gravimetrische Energiedichte [in Wh/kg]	110-180	100-120	180-210	180-250	80-120
Praktische volumetrische Energiedichte [in Wh/l]	320-500	290-340	490-580	480-670	160-260
Nennspannung [in V]	3,6	3,7	3,60-3,70	3,6	3,20-3,30
Entladerate [in C]	1-2	3-20	1-10	1-10	10-50
Lebensdauer [in Zyklen]	300-1.000	1.000-1.500	500-1.000	500-1.000	2.000-5.000
Sicherheit	schlecht	gut	mittel	sehr schlecht	sehr gut
Toxizität/ Umweltfreundlichkeit	sehr schlecht	sehr gut	schlecht	schlecht	sehr gut
Kosten für Anschaffung [in €/kWh]	170	230	200	210	450
Relative Kosten [in €/kWh/Zyklus]	0,17-0,60	0,15-0,23	0,20-0,40	0,20-0,40	0,09-0,25
Anwendung in der Elektromobilität	Nein, aus Sicherheitsgründen nur in Kleinelektronik	Nein, nicht mehr	Ja	Ja, aus Sicherheitsgründen weniger als NMC	Ja, aber v.a. für HEV wegen geringer Energiedichte

Quelle: KIT, Rahimzei 2015, Life Cycle CO<sub>2</sub> Emissions of Li-Io-Batteries

Weitere Materialien, an denen aktuell geforscht wird, sind unter anderem andere Lithium-Metall-Phosphate, Mischungen verschiedener Kathodenmaterialien (z. B. NMC mit LFP oder NMC mit LMFP (mit Mangan angereichertes LFP)), Vanadiumoxid, Metallfluoride, Metallsulfide sowie Metallsilikate (KLiB 2019).

### Anodenmaterialien

Als Anodenmaterial wird konventionell unabhängig vom Kathodentyp Graphit (C6) verwendet, da es ein niedriges Elektrodenpotential und eine geringe Volumenausdehnung bei der Einlagerung von Lithium-Ionen besitzt. Daneben werden auch amorphe Kohlenstoffformen, bei denen die Kohlenstoffatome keine langreichweitige Ordnung haben, oder das in Spinellform kristallisierte (Korthauer 2013) Lithiumtitanatoxid  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  (LTO) eingesetzt. LTO Anoden zeichnen sich insbesondere durch hohe Sicherheit und Lebensdauer aus, haben dafür jedoch eine etwas geringere Energiedichte und

sind teurer als Graphit. Die niedrigere Leitfähigkeit und dadurch schlechten Leistungseigenschaften von Lithiumtitanatoxid werden durch kleine mit Graphit beschichtete LTO Partikel ausgeglichen, sodass sich sehr gute Leistungseigenschaften ergeben, die Energiedichte bleibt jedoch gering. Besonders geeignet sind LTO Anoden daher für große Zellen im stationären Einsatz oder Zellen mit hohen Leistungsanforderungen, in der Elektromobilität vor allem HEV (Korthauer 2013: 56). Von den meisten Herstellern werden jedoch auch hier Graphitanoden verwendet, eine Ausnahme ist der japanische Hersteller Toshiba (Tübke et al. 2017: 5).

Ein weiterer Ansatz für Anodenmaterialien ist die Verwendung von Silizium, welches fast die dreifache volumetrische Energiedichte von Graphit besitzt. Allerdings ist die Verwendung in Anodenmaterialien bisher nur in geringen Anteilen von einigen Prozent des Aktivmaterials gelungen, da Silizium starke Volumenveränderungen während des Ladens und Entladens aufweist und aufgrund dieser hohen mechanischen Belastungen schnell pulverisiert und auch die anderen Komponenten der Zelle beansprucht. Zur Lösung des Problems wird aktuell an Anodenmaterialien aus Silizium mit integrierten Leerraum-Strukturen für die Ausdehnung sowie an Kompositen aus Silizium und Kohlenstoff geforscht (KLiB 2019).

Im Bereich der Forschung liegt der Fokus damit weiterhin auf Anoden auf Graphitbasis, entwickelt sich jedoch auch in Richtung LTO, Kompositmaterialien und Legierungen (z. B. auch C/Sn-Komposite und Si-Legierungen) (Thielmann et al. 2015: 11).

Im Rahmen der Optimierung der Energiedichte wäre die Verwendung reinen Lithiummetalls als Anodenmaterial ideal, da dieses eine sehr hohe spezifische Kapazität (2860 Ah/kg) und ein sehr negatives Potential hat, und damit eine hohe Zellspannung und Energiedichte bewirkt (Korthauer 2013: 45). Allerdings reagiert reines Lithium stark mit dem Elektrolyten und wird während des Ladevorgangs in Dendriten auf der Anode abgeschieden, welche sich durch den Separator bohren und Kurzschlüsse auslösen oder nach Ablösung von der Elektrode die Menge an Anodenmaterial und dadurch die Kapazität der Batterie verringern können. Jedoch könnte Lithiummetall insbesondere in Kombination mit Festkörperelektrolyten als Anodenmaterial genutzt werden (KLiB 2019). Erste Verwendung findet Lithiummetall bereits in Polymerbatterien der französischen Firma Bolloré (EASE 2016).

## **Bauformen und Module**

Neben den verwendeten Materialien ist die Bauform einer Li-Io-Batteriezelle entscheidend für ihre Eigenschaften, vor allem für die volumetrische Energiedichte, die Fertigungskosten und die Wärmeabfuhr bzw. den Kühlaufwand. Grundsätzlich kann in drei verschiedene Bauformen für einzelne Zellen unterschieden werden: Die zylindrische Zelle, die prismatische Zelle und die Pouch-Zelle (Tübke et al. 2017: 5).

Zylindrische Zellen sind am weitesten verbreitet. Sie sind am einfachsten zu produzieren, mechanisch sehr stabil und haben eine große volumetrische Energiedichte, da die Zellausnutzung bei über 90 % liegt (Tübke et al. 2017: 12). Allerdings ist die Wärmeabfuhr aufgrund des geringen Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen schlecht und die Verbindung zu Modulen nicht volumensparend. Damit sich die Zelle bei Erwärmung ausdehnen kann, ist sie innen hohl und in ein stabiles zylindrisches Gehäuse gewickelt.

Prismatische Zellen bestehen aus einem flachen, quaderförmigen festen Gehäuse, in welches die Zellchemie gewickelt wird, wodurch die Wärmeabfuhr, die Kühlfähigkeit, die Detektion von Hotspots und die Verbindung zu Modulen verbessert sind (Rahimzei et al. 2015: 20, Korthauer 2013: 231). Allerdings sind sie aufwändiger in der Fertigung und besitzen bislang die geringste volumetrische Energiedichte, die Zellausnutzung liegt bei nur 60 % (Tübke et al. 2017: 12).

Pouch-Zellen haben ein flexibles Gehäuse aus beidseitig kunststoffbeschichteter Aluminiumfolie, in welches die eigentliche Zellchemieabfolge gestapelt wird. Diese Stapelzellen können in Stapel aus Bizellen, die aus nur zwei in umgekehrter Reihenfolge aufeinander gestapelten Einzelzellen bestehen, sodass nur ein gemeinsamer anodischer Stromableiter in der Mitte benötigt wird, und größere Stapelfolgen, bei denen auch die Anzahl an kathodischen Stromableitern um 50 % reduziert ist, unterteilt werden. Insbesondere die Reduktion der anodischen Stromableiter aus dem schwereren Kupfer, die bei Bizellen und größeren Stapelfolgen äquivalent ist, bewirkt eine Reduktion des Zellgewichts, während die Prüfbarkeit bei der Bizell-Technologie, bei der die Bizellen einzeln vor der Stapelung geprüft werden können, erhöht ist (Korthauer 2013: 232).

Die Wärmeabfuhr und die Verbindung zu Modulen ist für Pouch-Zellen sehr gut und sie sind vergleichsweise günstig in der Fertigung. Das geringe Gewicht bewirkt eine hohe gravimetrische Energiedichte, während die volumetrische Energiedichte bei einer sehr hohen Zellausnutzung von deutlich über 90 % etwa der von zylindrischen Zellen entspricht. Da die größten Potentiale zur Optimierung der Energiedichte bei Pouchzellen liegen, werden in der weiteren Entwicklung für Pouchzellen sehr hohe volumetrische Energiedichten von bis zu über 1000 Wh/l bis 2025 erwartet (Rahimzei et al. 2015: 20; Tübke et al. 2017: 12).

Nachteilig ist jedoch die geringe mechanische Stabilität, schlechtere Montierbarkeit und Handhabbarkeit und die Möglichkeit, dass sich die Pouch-Zelle bei erhöhtem Innendruck aufgrund unkontrollierter Gasentwicklung aufblasen kann (Rahimzei et al. 2015: 20). Dass Gase bereits bei vergleichsweise geringem Überdruck austreten, birgt aber auch Vorteile, da dadurch oft schwerere Unfälle mit Explosionen und Bränden verhindert werden können. Letztere treten bei Zellen in festen Gehäusen entsprechend häufiger auf (Korthauer 2013: 233).

Der Zusammenschluss mehrerer Zellen zu einem Batteriemodul kann auf unterschiedliche Weise geschehen: in Reihenschaltung und in Parallelschaltung. Die Spannung in Reihe geschalteter Zellen addiert sich während die Kapazität von der Zelle mit der geringsten Kapazität bestimmt wird. Bei parallel geschalteten Zellen wird die Kapazität der einzelnen Zellen addiert und die Spannung von der Zelle mit der geringsten Spannung bestimmt. Bei der Serienschaltung muss beachtet werden, dass der gesamte Stromfluss unterbrochen wird, sobald eine Zelle beschädigt ist. Oft werden Reihen- und Parallelschaltung für Anwendungen der Elektromobilität kombiniert. Dann werden die Zellen entweder zunächst in Serie geschaltet und diese Zellserien anschließend parallel geschaltet, wobei der Überwachungsaufwand relativ hoch ist, da jede einzelne Zelle auf das Einhalten der Zellspannungsgrenzen überprüft werden muss, oder parallel geschaltete Zellen werden anschließend seriell verschaltet, sodass die Spannungslage aller Zellen in einem parallel geschalteten Zellpaket gemeinsam überwacht werden kann. Letztere meist kostengünstigere und einfachere Variante wird jedoch nur bei Zellen mit niedriger Kapazität angewandt, da meist vor allem eine Erhöhung der Spannung für elektromobile Anwendungen angestrebt wird (Korthauer 2013: 96 ff.; Rahimzei et al. 2015: 6).

## Produktionsschritte

Für die Qualität einer Li-Io-Batteriezelle und damit für die Zellfertigung von besonderer Bedeutung sind eine gute elektronische Leitfähigkeit durch gute Kontakte zwischen Aktivmaterialien und Stromableitern in den Elektroden, eine gute ionische Leitfähigkeit durch homogene Elektrolytverteilung in der gesamten Zelle, die elektrische Trennung zwischen Anode und Kathode sowie deren homogener Abstand und eine anodische Kapazität, die mindestens der kathodischen Kapazität entspricht. (Kort-hauer 2013: 221) Die Produktion von Li-Io-Batteriezellen kann in drei wesentliche Prozessschritte unterteilt werden: die Fertigung der Elektroden, die Zellmontage und die Formierung und Prüfung. (ebd.: 238)

Zur Herstellung der Elektroden werden die Aktivmaterialien in Pulverform mit einem Bindemittel (üblicherweise organisches Bindemittel Polyvinylidendifluorid, zuletzt vermehrt wasserbasierte Bindemittel), einem Lösungsmittel (üblicherweise N-Methylpyrrolidon, welches beim Trocknen verdampft) und einem Zusatz an Leitmaterialien zur Erhöhung der elektronischen Leitfähigkeit (für Industrieanwendungen: Graphite, Ruße, Vapor Grown Carbon Fibres, für Laboranwendungen: Carbon Nanotubes, Graphene) gemischt und dispergiert und anschließend schichtförmig auf den Stromableiter aufgetragen. Danach werden die Elektroden geschnitten und zur Verdichtung eventuell vorhandener Hohlräume kalandriert. Je nach beabsichtigter Anwendung der Batteriezelle wird die Menge an Zusatzstoffen für die Optimierung der Energiedichte minimiert oder für die Optimierung der Leistung maximiert (ebd.: 222 f.).

Nach der Stapelung oder Wickelung der Zellchemie (Elektroden und Separator) in das Zellgehäuse, werden die Zellkörper mit Elektrolyt befüllt. Dieser Schritt ist technologisch anspruchsvoll und zeitaufwändig und kann sowohl unter Vakuum- als auch unter Atmosphärenbedingungen erfolgen. Da die Luft aus den Poren der Zellchemie für eine vollständige Benetzung mit Elektrolyt entweichen muss, dauert die Befüllung unter Atmosphärenbedingungen länger und erhöht die Wahrscheinlichkeit einer unvollständigen Benetzung. Nach der Elektrolytbefüllung wird die Zelle unter Vakuumbedingungen abgeschlossen. Schwierigkeiten entstehen bei der Elektrolytbefüllung vor allem dadurch, dass Elektrolytflüssigkeiten bei geringen Drücken bereits bei Raumtemperatur sieden und daher schäumen und außerdem hoch korrosiv auch gegenüber den eingesetzten Maschinen sind (ebd.: 229, 242 f.).

Der letzte Schritt der Batteriezellherstellung ist die Formierung, bei der die Zelle zum ersten Mal mit niedriger Stromrate langsam geladen wird und sich die essentielle SEI-Schicht aufbaut. Ein teils durchgeführter zweiter Ladezyklus dient der anschließenden Qualitätskontrolle, wird jedoch in der industriellen Fertigung oft aus Zeit- und Kostengründen ausgelassen, da die Formierung zeit- und energieintensiv ist. Bei mehreren Ladezyklen ist es aufgrund der signifikanten eingesetzten Energiemenge sinnvoll, die beim Entladevorgang freiwerdende Energie zurück zu speisen oder zu nutzen (ebd.: 230).

Der Anteil der Produktion an den Kosten der Batteriezellherstellung liegt bei ca. 20 % (Fraunhofer Zellfertigung). Die Senkung der Kosten kann durch hochautomatisierte Prozesse mit hohen Anlagen-durchsätzen und geringen Ausschussraten erreicht werden (ebd. 234).

Die einzelnen Batteriezellen werden zuletzt vor ihrer Anwendung zu Batteriemodulen verschaltet und das Batteriemanagementsystem sowie die Leistungselektronik im Batteriemodulgehäuse montiert (ebd.: 245).

## Sicherheitsaspekte

Sicherheitsrisiken ergeben sich vor allem beim Gebrauch von Li-Io Batterien, sie spielen aber auch für Transport-, Lagerungs- und Demontageprozesse im Rahmen des Recyclings eine wichtige Rolle. Das Gefahrenpotential ist durch die Kombination von Materialien mit hohen Energiegehalten und hochentzündlichen Elektrolyten innerhalb der Batterie gegeben. Bei Überhitzung der Zelle kann ein sogenannter *thermal runaway* auftreten, bei dem sich der Wärme produzierende Prozess in der Zelle selbst verstärkt und die Zelle schließlich durch Brand oder Explosion zerstört wird. In einer Li-Io-Zelle führt insbesondere ein innerer Kurzschluss zu starker lokaler Überhitzung. Dieser kann bei Zerstörung der Separatorschicht durch Schmelzen oder Durchstoßen im Falle äußerer Überhitzung, innerer Erwärmung durch den hohen Innenwiderstand bei einem äußeren niederohmigen Kurzschluss oder mechanischer Quetschung hervorgerufen werden. Daraufhin kommt es aufgrund der Überhitzung zu vielfältigen exothermen Reaktion des Elektrolyten und dadurch zu Gasentwicklung und weiterer Erhitzung. Im Falle der oxidischen Kathodenmaterialien kann dadurch der leicht desorbierbare Sauerstoff aus der Zelle freigesetzt werden und exotherm mit dem Elektrolyten reagieren, woraus die hohe Brandgefahr derjenigen Li-Io-Zellen, welche auf Übergangsmetalloxid-Kathoden basieren, resultiert. Ein weiteres Risiko des *thermal runaway* sind elektrische Schläge aufgrund des inneren Kurzschlusses (Weyhe 2013: 516 f.).

Zur Verbesserung der Sicherheit können zum einen alternative Elektrodenmaterialien ohne Sauerstoffbeteiligung wie beispielsweise LFP Kathoden eingesetzt werden, aber auch flammhemmende Elektrolyt-Additive, Shutdown-Elektrolyt-Additive sowie Redox-Shuttle als Elektrolyt-Additive, oder Shutdown-Separatoren stellen sicherheitswirksame Maßnahmen dar. Darüber hinaus können PTC (Positive Temperature Coefficient Device) Schalter im Stromkreislauf, die den Widerstand bei zu hoher Temperatur erhöhen und in den Stromkreislauf integrierte Schmelzsicherungen, die bei zu hoher Temperatur schmelzen, oder CID (Current Interrupt Device) Schalter, die die Verbindung zwischen Elektrode und Kontaktierung bei zu hohem Druck trennen und Sicherheitsventile, die sich bei steigendem Zelldruck öffnen und Gase entweichen lassen, die Sicherheit erhöhen (Rahimzei et al. 2015: 16 f.).

## Weitere Batterietechnologien

Langfristig ist mit den konventionellen Li-Io-Batterietechnologien nach heutigem Stand keine signifikante Steigerung der Leistungsparameter mehr zu erwarten, weshalb alternative Technologien diskutiert werden (Korthauer 2013: 200).

Ein Ansatz, der vor allem die Leistung und die volumetrische Energiedichte, weniger jedoch die gravimetrische Energiedichte optimiert und sich daher besonders für stationäre Einsätze eignet, sind andere Metallionenbatterien (z. B. Aluminium-Ionen). Aufgrund der höheren Wertigkeit der Ionen könnten diese mehr Ladung pro Ion speichern und transportieren, bislang ist die Umsetzung jedoch aufgrund des Mangels an passenden Kathodenmaterialien, Elektrolyten und Additiven noch nicht gelungen (KLiB 2019).

Im Fokus der Forschung in Bezug auf elektromobile Anwendungen steht allerdings die Erhöhung der Energiedichte, welche die Reichweite bestimmt und bislang deutlich geringer als die Energiedichte der konventionellen Kraftstoffe Benzin oder Diesel ist. Vor allem Li-Luft und Li-Schwefel Batterien, die

metallisches Lithium als Anode und O<sub>2</sub> oder S<sub>8</sub> als Kathodenmaterialien einsetzen, sind in dieser Hinsicht interessant, da sie durch den Ersatz der schweren Übergangsmetallverbindungen durch die leichteren Alternativen, die deutlich höhere Aufnahmefähigkeit des Kathodenmaterials für Lithiumionen pro Formeleinheit und die Verwendung metallischen Lithiums mit hoher spezifischer Kapazität und stark negativem Potential als Anode deutlich höhere Energiedichten als aktuell eingesetzte Batterien hätten. Für Lithium-Schwefel Batterien beträgt die theoretische Energiedichte 2.613 Wh/kg, für Lithium-Luft Batterien 5.220 Wh/kg, wenn die Masse des für die Reaktion verwendeten aus der Umgebungsluft extrahierten Sauerstoffs mit einberechnet wird. Sonst sogar über 11.000 Wh/kg, was nahe an die Werte der Verbrennungskraftstoffe heranreicht. Die praktische Energiedichte wird zwar aufgrund der weiteren benötigten Komponenten deutlich unter den theoretischen Werten liegen, aber immer noch deutlich über den Werten derzeit eingesetzter Batterien (>700Wh/kg). Bei Entwicklung bis zur Marktreife und Überwindung der bislang noch unzureichenden Zyklenstabilität sowie der Schwierigkeiten einer Li-Metall Anode wären beide Technologien günstige, umweltfreundliche und von seltenen Rohstoffen unabhängige Alternativen zu momentan eingesetzten Li-Io-Zellen (Kortbauer 2013: 202 ff.). Da die Li-Ionen in diesen Batterien nicht als Ionen in Interkalationsverbindungen eingelagert werden, sondern chemisch im Elektrodenmaterial gebunden werden, werden sie nicht zu den Li-Io Batterien, sondern zum Überbegriff der Li-Batterien gezählt (KLiB 2019:). Auch eine Kombination der beiden Ansätze in Metallionen-Luft Batterien, wie beispielsweise einer Vanadium-Luft Batterie, werden diskutiert (Brünglinghaus et al. 2015).

Zwei weitere Ansätze der Energiespeicherung für Elektromobilität, die weit von klassischen Batterietechnologien entfernt liegen, sind Flusszellbatterien und Brennstoffzellen.

Bei Flusszellbatterien (Redox-Flow-Batterien) liegen die Reaktionspartner separat gelöst in zwei verschiedenen Tanks vor, die Flüssigkeit enthält dabei Elektrolyt und Aktivmaterial zugleich, und der Ionenaustausch findet in der eigentlichen galvanischen Zelle, einem separaten Reaktionsraum über eine Membran, die eine Vermischung der beiden Flüssigkeiten verhindert, statt. Mithilfe von Pumpen zirkulieren die Flüssigkeiten zwischen galvanischer Zelle und Tank. Flusszellbatterien bieten viele Vorteile für die Elektromobilität, da Kapazität und Leistung der Batterie unabhängig voneinander skalierbar sind (die Kapazität hängt von der Größe der Tanks ab, die Leistung von der Größe des Reaktionsraums), sie durch Austausch der Flüssigkeiten schnell aufladbar sind und kaum Selbstentladung stattfinden kann. Auch die hohe Lebensdauer (10 bis 20 Jahre) und Zyklenfestigkeit (> 10.000 Zyklen), sowie Sicherheit und geringe Toxizität zählen zu den Vorteilen (KLiB 2019). Aufgrund der bislang eher geringen Energiedichte werden Flusszellbatterien bisher nur als Energiezwischenspeicher in der Industrie und nicht für Elektromobilität eingesetzt (ebd.). Im Jahr 2018 kündigte jedoch die Schweizer Firma Nano Flowcell die Produktion von 25.000 auf der Flusszelltechnologie basierenden Autos ihres Typs NanoFlowcell Quantino an, welches eine neue ungiftige, nicht auf seltenen Rohstoffen basierende Elektrolytflüssigkeit mit besonders hoher Energiedichte verwenden soll (Viehmann 2018).

Brennstoffzellen nutzen die exotherme Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser für die Energiegewinnung. Bei PEMFC-Brennstoffzellen (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) werden Wasserstoff und Sauerstoff über eine Protonenaustauschmembran zwischen den Elektroden in Kontakt gebracht, der Wasserstoff wird an der Anode zu Protonen reduziert, die die Membran passieren, die Elektronen fließen über den Verbraucher, an der Kathode wird der Sauerstoff oxidiert und reagiert mit den Protonen zu Wasser. Grundbestandteile der Brennstoffzelle sind die Elektroden, an denen die Reaktionsgase über eine Kanalstruktur gleichmäßig der Katalysatorschicht zugeführt werden und das

bei der Reaktion entstehende Wasser abgeführt wird, und die Polymerelektrolytmembran zwischen den Platten, die für Protonen und Wasser durchlässig, aber für Gase und Elektronen isolierend ist und beidseitig dünn mit einem Katalysator, meist Platinmetall, beschichtet ist (Proton Motor Fuel Cell GmbH).

Brennstoffzellen werden bereits in der Elektromobilität eingesetzt. Bislang behindern vor allem die hohen Kosten der Katalysatorschicht, die Wertmetalle wie Kobalt, Platin und Iridium enthält, und die schlechte Wasserstofftankstellen-Infrastruktur den Durchbruch der Technologie. Vor allem in Japan (Toyota) wird die Brennstoffzellentechnologie jedoch stark gefördert (Hornyak 2019).

Sowohl Flusszellen als auch Brennstoffzellen werden für technisch nutzbare Spannungen zu Stacks zusammengefügt, die aus mehreren Einzelzellen bestehen. Dafür werden sogenannte Bipolarplatten genutzt, die Kathode der einen und Anode der nachfolgenden Zelle verbinden und vor allem für die Stoffzufuhr (Flüssigkeiten bei der Flusszelle, Gase bei der Brennstoffzelle) wichtig sind. Die Spannungen der Einzelzellen addieren sich dann zur Gesamtspannung (KliB 2019; Proton Motor Fuel Cell GmbH).

### Prognostizierte technische Entwicklung

Nach der Prognose der Nationalen Plattform Elektromobilität für zukünftige Batteriegenerationen werden auf die bereits erfolgte Markteinführung von LFP, NCA und NMC Batterien, sowie NMC Batterien mit erhöhtem Nickelanteil und teils etwas erniedrigtem Kobaltanteil (alle mit 100 % Kohlenstoff Anoden) in nächster Zukunft (ca. ab 2020) NMC Batterien mit C/Si-Kompositanoden mit einem Siliziumanteil von fünf bis zehn Prozent folgen. Bis zum Jahr 2025 werden voraussichtlich sowohl Zellen mit Lithiummetallanode als auch Zellen mit optimierten Kathodenmaterialien und Silizium/Kohlenstoffanode den Markt für Elektrofahrzeuge erreichen. In fernerer Zukunft (ca. ab 2030) könnten Li-Luft Batterien eingesetzt werden (NPE 2016: 19).

### Rohstoffe

Die Analyse der Rohstoffe bezieht sich im Wesentlichen auf die aktuell eingesetzten Kathodenmaterialien von Li-Io-Traktionsbatterien, da erwartet wird, dass für das Recycling ab 2030 insbesondere die in den nächsten Jahren bis ca. 2025 in Umlauf gebrachten Batterien relevant sind. Obige Prognose geht bis dahin nur von der Einführung der C/Si-Kompositanoden aus, diese werden separat in die Rohstoffbetrachtung miteinbezogen, darüber hinaus kann aber von ähnlichen Batterietechnologien, wie sie im Moment für die Elektromobilität produziert werden (NMC, NCA, LFP) ausgegangen werden. Betrachtet werden im Folgenden insbesondere wirtschaftliche, sowie sozial- und umwelttechnische Aspekte.

Für die gängigen Li-Io-Batterien machen Materialkosten bislang ca. 55-65% der Kosten für die Batteriezellfertigung aus (Tübke et al. 2017: 26). Bei Massenanfertigung von Batteriezellen dürfte sich langfristig sogar ein Trend zu einem noch höheren Anteil der Rohmaterialkosten im Vergleich zu den Fertigungskosten ergeben (Weyhe 2013: 506). Grund dafür ist insbesondere die Verwendung der strategischen, nicht erneuerbaren Rohstoffe Nickel, Kobalt, Lithium und Graphit, deren Vorkommen auf einige Länder beschränkt ist, wobei der genaue Massenprozentanteil der Metalle je nach Batterietechnologie variiert (vgl. Tabelle 16). Grundsätzlich sind die Rohstoffe zwar auch für eine starke Expansion der Elektromobilität näherfristig ausreichend vorhanden, da die weltweiten Vorkommen

den prognostizierten Bedarf weit übersteigen, allerdings können dennoch temporäre Verknappungen oder Preissteigerungen, vor allem für Lithium und Kobalt, bei nicht ausreichenden Fördermöglichkeiten auftreten (Öko-Institut 2017: 42 ff.). Dieses Risiko ist dagegen für die ebenfalls in großen Mengen in Li-Io Batterien eingesetzten Metalle Kupfer und Mangan aufgrund ihrer hohen Quellendiversifizierung kaum gegeben, die Versorgung mit diesen Materialien wird als unkritisch eingeschätzt und ihre Preise liegen deutlich unter denen von beispielsweise Kobalt oder Nickel (Hoyer 2015: 34 ff.).

**Tabelle 16: Generische Zellzusammensetzung der Kathoden der für Elektromobilität relevanten Li-Io-Batterietypen in Massenprozent**

	NMC	NCA	LFP
Lithium	2,2%	2,2%	1,4%
Kobalt	6,2%	2,7%	/
Nickel	6,2%	14,4%	/
Mangan	5,7%	/	/
Aluminium	/	0,4%	/
Eisen	/	/	11,5%
Phosphor	/	/	6,4%
Sauerstoff	10,0%	9,7%	13,2%
Anodengraphit	22,2%	21,9%	20,9%
Elektrolyt	18,1%	16,9%	16,0%
Separator	8,6%	8,4%	8,1%
Stromableiter Anode aus Kupfer	10,5%	11,7%	11,3%
Stromableiter Kathode aus Aluminium	6,2%	6,7%	6,4%
Zellgehäuse aus Aluminium	3,3%	3,3%	3,2%
Sonstiges	1,0%	1,7%	1,6%

Quelle: Buchert et al. 2011: 23

Zudem ist die Förderung der Rohstoffe durch den hohen Energie- und Wasserbedarf, zum Teil gravierende Umweltschäden und Arbeitsbedingungen, die europäischen oder internationalen Standards, z. B. bezüglich Gesundheit oder dem Einsatz von Kindern als Arbeitskräfte, nicht entsprechen, aus sozialen und umwelttechnischen Aspekten problematisch. Besonders im Fokus steht dabei der Kobaltabbau im Kongo. Lösungsmöglichkeiten bieten sich hier zum einen durch die umwelt- und sozialverträglichere Gestaltung der Rohstoffgewinnung als auch durch Senkung des Rohstoffbedarfs, wofür Recycling neben Substitution und Erhöhung der Materialeffizienz einen wertvollen Beitrag leisten kann. Außerdem wird durch Recycling der materielle Wert der Rohstoffe in der nationalen oder EU Wirtschaft gehalten, die Produktionskosten gesenkt und die Abhängigkeit von anderen, oft poli-

tisch instabilen Ländern und kurzfristigen Preisfluktuationen reduziert und der Endlichkeit der Ressourcen langfristig etwas entgegengesetzt (Öko-Institut 2017: 8, 60 f.).

Bei der Betrachtung der Rohstoffverfügbarkeit muss in Ressourcen und Reserven unterschieden werden. Ressourcen bezeichnen den Teil des natürlichen Vorkommens, der potentiell zukünftig abgebaut werden könnte, während Reserven den Teil des natürlichen Vorkommens bezeichnen, der aktuell wirtschaftlich abgebaut werden könnte (vgl. Tabelle 17). Reserven können sich entsprechend z. B. bei Preisänderungen schnell ändern. Für keinen der Rohstoffe ist auch unter Berücksichtigung eines deutlichen Nachfrageanstiegs näherfristig eine physische Verknappung (Erschöpfung der Ressourcen zu erwarten), natürlicher Graphit kann zudem auch durch Synthesegraphit ersetzt werden. Dennoch kann es in der Versorgung mit Lithium, Kobalt, Nickel oder Graphit zu längeren temporären Verknappungen kommen, die ihre Ursachen in politischen Krisen, monopolartigen Versorgungsstrukturen, Naturkatastrophen und Unfällen, fehlenden Genehmigungen für den Minenausbau aus verschiedenen Gründen, Versorgungsengpässen bei Minen (z. B: Energie/Wasser), zu schnelles Nachfragewachstum oder die Kopplung des Rohstoffabbaus an einen anderen Rohstoff haben können (Öko-Institut 2017: 42 f.).

**Tabelle 17: Relevante Rohstoffdaten für die kritischen Rohstoffe in Li-Io-Batterien**

	Lithium	Kobalt	Nickel	natürlicher Graphit
<b>Globale Reserven</b>	14 Mio t	7 Mio t	78 Mio t	250 Mio t
<b>Globale Ressourcen</b>	47 Mio t	120 Mio t	130 Mio t	800 Mio t
<b>Form der Vorkommen</b>	Mineral Spodumen, Laken in Salzseen	kupfernichelhaltige Erze, Manganknollen im Ozean	Erze, lateritische Lagerstätten, Manganknollen im Ozean	Mineral
<b>Anteil Batterien am globalen Bedarf</b>	39%	42% (v.a. aber auch Kleinbatterien)	kaum von Bedeutung	gering
<b>Hauptreserveländer</b>	Chile (52%), China (22%), Argentinien (14%), Australien (11%) (ohne USA)	Kongo (49%), Australien (14%), Kuba (7%)	Australien (24%), Brasilien (13%), Russland (10%), Neukaledonien (9%), Kuba (7%), Indonesien, Philippinen (je 6%), Südafrika (5%)	Türkei (36%), Brasilien (29%), China (22%)
<b>Globale Minenproduktion</b>	35.000 t	123.000 t	2.250.000 t	1.200.000 t
<b>Hauptförderländer</b>	Australien (40%), Chile (34%), Argentinien (16%), China(6%), (ohne USA)	Kongo (54%), China, Kanada (je 6%), Russland (5%)	Philippinen (22%), Russland, Kanada (je 11%), Australien, Neukaledonien (je 9%), Indonesien (8%), Brasilien (6%)	China (66%), Indien (14%), Brasilien (7%)

Quelle: Öko-Institut 2017: 25 ff.; Lebedeva 2016: 8

Obwohl Lithium nur etwa ein bis zwei Gewichtsprozent einer Batterie ausmacht, wird sich der Lithiumbedarf durch den Ausbau der Elektromobilität stark erhöhen, sodass bei unzureichendem Ausbau der Minenproduktion und nur langsam anlaufendem Recycling je nach weiterer Entwicklung der Elektromobilität temporäre Verknappungen auftreten können, auch wenn aufgrund aktueller Aktivitäten zum Ausbau des Lithiumabbaus in verschiedenen Ländern länger anhaltende Verknappungen unwahrscheinlich sind. Lithium wird vorwiegend als Lithiumcarbonat aus Salzseen entnommener Sole durch Verdunstung und Fällung mittels Natriumcarbonat gewonnen. Außerdem kann es aus Lithiumerzen, insbesondere Spodumen, gewonnen werden, welche bei hohen Temperaturen mit Schwefelsäure aufgeschlossen werden. Dieses Verfahren ist jedoch teurer und ökologisch nachteilig gegenüber der Solegewinnung (Hoyer 2015: 37 ff.; Öko-Institut 2017: 37 ff.).

Die Kobaltförderung dagegen ist stark von der politischen Situation in der Demokratischen Republik Kongo abhängig. Positiv wirkt sich aber auf die Versorgungssicherheit aus, dass das Kobaltrecycling bereits deutlich besser etabliert ist als Lithiumrecycling und gut ausgebaut werden kann und Kobalt außerdem mehrheitlich gemeinsam mit Kupfer und Nickel gewonnen wird, für welche ebenfalls eine steigende Nachfrage erwartet wird (Hoyer 2015: 30 ff.; Öko-Institut 2017: 39 ff.).

Der Abbau von Nickel ist aufgrund der weiten geographischen Streuung der Reserven und Produktionsstätten am unabhängigsten von politischen Entwicklungen. Zudem kann Nickel gut in industriellem Maßstab recycelt werden, sodass eine temporäre Verknappung hier sehr unwahrscheinlich ist. Außerdem wird die Nachfrage durch den Ausbau der Elektromobilität verhältnismäßig wenig steigen, bis jetzt machen Traktionsbatterien nur einen sehr kleinen Teil des weltweiten Nickelbedarfs aus (Hoyer 2015: 33 f., Öko-Institut 2017: 39 ff.).

Für die Versorgung mit Graphit wird Synthesegraphit eine zunehmend wichtigere Rolle spielen und damit die Unabhängigkeit von der Förderung natürlichen Graphits reduzieren. Traktionsbatterien haben demnach nur einen geringen Anteil an der Nachfrage nach natürlichem Graphit und Verknappungen werden hier auch eher nicht erwartet (Öko-Institut 2017: 39 ff.).

Obwohl Verknappungen für keinen Rohstoff vollständig ausgeschlossen werden können, ist das Risiko für Lithium (hoher Nachfrageanstieg bei fehlendem Recycling) und Kobalt (politische Unsicherheit durch regionale Konzentration) am größten. Dennoch könnten temporäre Engpässe höchstens den Ausbau der Elektromobilität verzögern, jedoch nicht vollständig behindern. Gründe für das Recycling finden sich entsprechend vor allem in sozialen, umwelttechnischen und wirtschaftlichen Aspekten (geringere Produktionskosten für Batterien aus recyceltem Material, geringere wirtschaftliche Abhängigkeit) (Öko-Institut 2017: 44 ff.).

Der Siliziumanteil an neuen anodischen Aktivmaterialien in Li-Io-Batterien ist bis jetzt im Vergleich zu anderen Anwendungen vernachlässigbar, da Silizium bereits in der chemischen, metallurgischen und elektronischen Industrie breite Verwendung findet. Die großen weltweiten Ressourcen und Reserven, die die aktuelle Nachfrage noch viele Jahrzehnte decken könnten, lassen keine physische Verknappung erwarten (Lebedeva 2016: 10). Dennoch wird Silizium aufgrund der großen industriellen Bedeutung der europäischen Importabhängigkeit von der EU als kritischer Rohstoff eingestuft, was bedeutet, dass das Risiko eines Versorgungsengpasses und dessen Folgen für die Wirtschaft größer sind als bei den meisten anderen Rohstoffen (Europäische Kommission 2017: 7). In natürlicher Form liegt Silizium als Siliziumdioxid, beispielsweise als Quarz, vor. Im Jahr 2015 betrug die weltweite Siliziumproduktion 8.100 Tonnen, davon wurden 68 % in China, 8 % in Russland und 5 % in den USA

gewonnen. Weitere bedeutende Produktionsländer sind Norwegen und Frankreich. Für EU-Importe sind besonders Norwegen (35 %), Brasilien (18 %) und China (18 %) wichtig, die Importabhängigkeitsquote beträgt 64 %. Bisher wird Silizium kaum recycelt (Lebedeva 2016: 10).

### 3.3 Aufkommen und Nachfrage von Altbatterien

#### Faktoren für das Altbatterieaufkommen

Wesentliche Faktoren für das Altbatterieaufkommen sind die technische Entwicklung, d. h. die Einführungszeitpunkte der verschiedenen Batterietechnologien und die Absatzmengen. Die Marktentwicklung für elektrische Kraftfahrzeuge ist dabei von der politischen Unterstützung, der Öl- und Strompreisentwicklung und der Batteriepreisentwicklung abhängig. Außerdem sind die Lebensdauer der Fahrzeuge und Batterien im Betrieb, sowie die Verzögerungszeit beim Rücklauf, die Reparaturmöglichkeiten und mögliche second-life-Nutzungen für das Altbatterieaufkommen relevant (Kwade et al. 2012: 12 ff.).

#### Lebensdauer und Rücklauf von Traktionsbatterien

Die Lebensdauer einer Batterie kann sowohl als kalendarische als auch als zyklische Lebensdauer definiert werden. Die zyklische Lebensdauer beträgt bei Einsatz von NCA oder NMC Kathoden momentan etwa 500 bis 1.000 Ladezyklen, bei Verwendung einer LFP Kathode ist sie mit 2.000 bis 5.000 Ladezyklen deutlich höher (Rahimzei et al. 2015: 25). Über die Reichweite pro Ladezyklus kann die zyklische Lebensdauer in eine Gesamtleistung in km umgerechnet werden. Im kleinen und mittleren Segment konnten für die neuen Modelle (z. B. Tesla Model 3, Opel Ampera-E) zuletzt Reichweiten pro Ladezyklus von 300 bis 350 km und im großen Segment (z. B. Tesla Model S) von bis zu 500 km im Neuzustand erzielt werden. Obwohl sich damit unter Vernachlässigung der kalendarischen Alterung eine hohe theoretische maximale Laufleistung, die die durchschnittliche Laufleistung eines Gesamtfahrzeugs zwischen 200.000 bis 250.000 km übersteigt, ergibt, liegt die durchschnittliche Lebensdauer einer Traktionsbatterie mit etwas weniger als zehn Jahren (Fischhaber et al. 2016: 5) noch unter der durchschnittlichen Lebensdauer des Gesamtfahrzeugs, welche etwa 15 Jahre beträgt.

Gründe dafür sind unter anderem die kalendarische Alterung, geringere Reichweiten mit zunehmender Alterung sowie durch unvollständiges Laden und Entladen der Batterie. Prognosen zufolge wird die Lebenszeitspanne einer Li-Io-Traktionsbatterie bis zum End of Life (EoL), welches bei einer Restkapazität von 80 % definiert wird, bis 2025 von aktuell unter 10 Jahren auf durchschnittlich 11 Jahre gesteigert werden. Eine weitere Verzögerung des Alterungsprozesses wird darauf folgend jedoch nicht mehr erwartet, sodass für 2030 ähnliche Werte angenommen werden können (Fischhaber et al. 2016: 74). Diese liegen damit immer noch unter der Lebenserwartung des Gesamtfahrzeugs. Damit hat neben der Marktentwicklung für Elektromobilität die Batterienutzungsdauer und nicht die Fahrzeugnutzungsdauer den höchsten Einfluss auf das Altbatterieaufkommen (Kwade et al. 2012: 19).

Die Alterung einer Batterie ist bedingt durch den sukzessiven Verlust an Energie- und Leistungsdichte des Batteriesystems, da die Kapazität abnimmt und die Impedanz/der Innenwiderstand sich erhöht. Die kalendarische Alterung wird insbesondere durch einen hohen Ladezustand (SoC) und hohe Temperaturen beschleunigt, die zyklische Alterung wird durch hohe Temperaturen, aber auch hohe C-Raten (besonders in Laderichtung) und hohe Ladeschluss- (SoC) und Entladeschlussspannungen

(DoD) beschleunigt. Ursächlich ist hierfür vor allem die SEI (Solid Electrolyte Interphase), die als Passivschicht zwischen Anode und Elektrolyt Zersetzungsreaktionen des Elektrolyten in der Grenzschicht zwischen Anode und Elektrolyt verhindert. Ein hoher SoC oder hohe Temperaturen bewirken ihre Verdickung, während hohe C-Raten oder ein hoher DoD ihr Aufplatzen und ihre Neubildung bewirken, wobei stets aktives Lithium verbraucht wird. Die Verdickung führt zu verschlechterter ionischer Leitfähigkeit und damit zu einer Erhöhung der Impedanz, die Neubildung dagegen führt durch den Materialverlust zu einem Kapazitätsverlust. Der Kapazitätsverlust gelagerter Li-Io-Batterien erfolgt meist wurzelförmig in Abhängigkeit von der Zeit, während die zyklische Alterung lange linear mit dem Ladungsdurchsatz erfolgt, aber schließlich einen abrupten, nichtlinearen Kapazitätsabfall aufweist. Beeinflusst wird der Alterungsprozess sowohl durch (Umgebungs-)Temperaturen als auch durch die Qualität des Batteriemanagementsystems, da mit diesem die Laderate, SoC, DoD und die Temperatur optimiert werden. Besonders schädlich für die Lebensdauer einer Batterie sind Schnellladevorgänge, die mit hohen Ladeströmen arbeiten und vor allem hohe Temperaturen bewirken (Fischhaber et al. 2016: 30 f.). Da die Lade- und Entladecharakteristik einer Traktionsbatterie stark von dem Antriebskonzept des Fahrzeuges (BEV, PHEV oder HEV) abhängt, ist die Lebensdauer der Batterie direkt damit verknüpft. Während Batterien in BEV am schnellsten altern, können Batterien in HEV am längsten genutzt werden (Hoyer 2015: 41).

Da der Rücklauf ausgedienter Traktionsbatterien aktuell noch sehr gering ist, können noch keine präzisen Aussagen zur künftig erwartbaren Rücklaufquote getroffen werden. Fehlende Rückläufe durch falsche Entsorgung oder nicht nachverfolgbare Weiterverkäufe, wie sie bei Consumer-Elektronik auftreten, sind bei Traktionsbatterien unwahrscheinlicher (Peters et al. 2018: 11, Kwade et al. 2012: 19 f.).

### **Reparaturen und second-life-Nutzungen**

Die Reparatur von Traktionsbatterien ist vermutlich nur auf Modulebene und nicht auf Zellebene wirtschaftlich, d. h. schwächere Batteriemodule können durch Ersatzmodule ausgetauscht werden. Der Austausch einzelner Zellen, die je nach Schaltung Kapazität oder Spannung eines gesamten Moduls bestimmen können, lohnt sich jedoch nicht. Um schwache Module zu identifizieren sind insbesondere Alterungsschnelltests nötig (Fischhaber et al. 2016: 89).

Ergänzend zur Reparatur von Batterien können diese in second-life Konzepten weiterverwendet werden, welche eine gealterte Batterie nach dem Ende ihres Einsatzes in ihrer ursprünglichen Funktion in neuer Funktion nutzen. Ziel dabei ist es, eine Verwendung für die Batterie zu finden, die trotz ihrer geringeren Leistungsfähigkeit bis zum Erreichen des nichtlinearen zyklischen Alterungsverhaltens wirtschaftlich sinnvoll ist (Becker et al. 2019: 11). Für die second-life-Nutzung werden die Batteriemodule wiederaufbereitet, indem sie gegebenenfalls in modulare Einheiten zerlegt werden, der Alterungszustand detektiert wird, die Module anschließend nach ihrer Güte klassifiziert werden und ihr Weiterwendungswert bestimmt wird. Anschließend werden Batteriemodule mit ähnlichen Zellparametern zu neuen Batteriespeichern zusammengesetzt. Wirtschaftlich ist dabei ebenso wie bei Reparaturen nur die Zerlegung auf Modulebene und nicht die aufwändigere Zerlegung bis auf Zellebene, wodurch bei fortschreitender Alterung durch die zunehmende Streuung der Zellparameter abhängig von Reihen- oder Parallelschaltung Kapazitäts- oder Spannungsverluste entstehen, da diese Parameter von der schwächsten Zelle bestimmt werden. Auch die weiteren Komponenten wie Batteriemanagementsysteme, Sensoren, Kühlung und Gehäuse können in second-life-Konzepten weiterverwendet werden (Fischhaber et al. 2016: 15 ff.).

Als grober Richtwert für den Eintritt in die second-life-Nutzung, also des End of first-life, kann bei Traktionsbatterien das Erreichen eines Kapazitätswertes von 80 % der Ursprungskapazität betrachtet werden. Für das End of second-life sind dagegen kaum Richtwerte vorhanden. Je geringer die Restkapazität der Batterie ist, desto größer muss die Batterie für die Bewältigung des gleichen Lastprofils sein, sodass auch mehr zusätzliche Komponenten wie Gehäuse oder Kühlung benötigt werden, der Kapazitätswert am End of second-life muss daher wirtschaftlich abgewogen werden (Fischhaber et al. 2016: 35). Typischerweise beträgt die Zeitspanne der second-life Nutzung etwa weitere 10 Jahre und dauert damit ähnlich lange wie das first-life der Batterie (EOL-IS <http://www.eol-is.de/projekt>). Ein third-life mit noch milderem Lastprofil ist meist nicht wirtschaftlich (Fischhaber et al. 2016: 36).

Vorteile der second-life-Nutzung liegen sowohl in ökonomischen als auch in ökologischen Aspekten. So können zum einen die Kosten für den vorgeschriebenen Recyclingprozess verschoben und durch die Verlängerung der Lebensdauer der Batterie zusätzliche Erlöse generiert werden, zum anderen werden die mit der Batterieproduktion verbundenen ökologischen Belastungen durch Emissionen und Rohstoffverbrauch vermindert. Herausforderungen stellen dagegen die oft fehlende Standardisierung der Batteriemodule für eine effiziente und kompatible Montage in Zweitanwendungen, der Aufwand und die Kosten für die Wiederaufbereitung, fehlende effiziente Alterungsschnelltests, Sicherheitsbedenken und fehlende zuverlässige rechtliche Rahmenbedingungen, die Garantieansprüche und Besitzverhältnisse klären, dar. Zudem ist der Betrieb von second-life-Anwendungen mit hohen Unsicherheiten bezüglich nichtlinearer Alterungsprozesse, die die Restlebensdauer der Batterie abrupt verkürzen können, sowie bezüglich der Nutzungsdauern im first-life bzw. der Rücklaufzahlen und bezüglich der Preisentwicklung von Neubatterien und Recyclingkosten verbunden. Bei einem zu geringen Kostenunterschied zwischen Neu- und Altbatterien sinkt die Zahlungsbereitschaft für Altbatterien (Fischhaber et al. 2016: 19 f.). Prognosen zufolge wird der Kostenvorteil beim Einsatz von Altbatterien im Vergleich zu Neubatterien 2025 30-70 % betragen. Dieser Vorteil könnte sich bis 2040 auf 25 % reduzieren (Engel et al. 2019: 3). Nach dem Batteriegesetz (BattG) sind individuelle Vereinbarungen zur Recyclingkostenübernahme zwischen Hersteller und second-life-Batterie-Anbieter möglich, die Verpflichtung zum Recycling kann somit entweder an den second-life-Anbieter abgegeben oder beim Hersteller belassen werden (Fischhaber et al. 2016: 91).

Mögliche Sekundärmärkte für Li-Io-Traktionsbatterien sind vorwiegend stationäre Systeme, aber auch mobile Anwendungen mit geringeren Anforderungen, in denen die Energiedichte der Batterien weniger ausschlaggebend ist als geringere Speicherkosten. Beispiele hierfür sind Kleintraktion wie Flurförderfahrzeuge, Gabelstapler und fahrerlose Transportsysteme, portable Geräte und Konsumer-elektronik, Leistungspuffer für Schnellladesäulen, Starterbatterien für Dieselgeneratoren, industrielles Spitzenlastmanagement durch Netzdienstleistungen wie peak shaving oder load shifting, elektrische Hausspeicher, Notstromversorgung, Bereitstellung von Primärregelleistung oder Inselnetze (Fischhaber et al. 2016: 221, Kwade et al. 2012: 66). Zum Thema second-life Nutzung wurden bereits einige Forschungsprojekte durchgeführt, zu nennen wären hier unter anderem die Projekte EOL-IS (End-Of-Life Solutions für eCar-Batterien), ABattReLife (Automotive Battery Recycling and second-life) und StaTraK. Insbesondere stationäre second-life Nutzungen wurden auch bereits in industriellen Pilotprojekten realisiert und evaluiert. Seit 2016 erprobt eine Allianz aus der BMW Group, Vattenfall und Bosch einen Speicher aus gebrauchten Traktionsbatterien zur Netzstabilisierung in der Hamburger Hafencity im Projekt „Second Life Batteries“ (Plazzo 2016). Ebenfalls zur Netzstabilisierung hat ein Konsortium aus Daimler Automotive, The Mobility House und der GETEC Gruppe ca. 1.000 gebrauchte

Traktionsbatterien in Lünen, Nordrhein-Westfalen, zu einem Großspeicher mit einer Kapazität von 13 MWh zusammengeschlossen (heise online 2015).

### **Szenarien Altbatterieaufkommen**

Für das nach Batterietyp differenzierte Altbatterieaufkommen sind insbesondere die Einführungszeitpunkte der unterschiedlichen Batterietechnologien sowie die Marktentwicklung der Elektromobilität relevant. Da die Lebensdauer der Batterien momentan auf etwa zehn Jahre geschätzt wird, an welche sich für weitere ca. zehn Jahre eine second-life-Nutzung anschließen kann, und da von einem relativ vollständigen Rücklauf mit geringen zeitlichen Verzögerungen ausgegangen werden kann, ergibt sich das Altbatterieaufkommen aus der auf den Markt gebrachten Menge an Neubatterien (Elektromobilitätsentwicklung) mit einer Verzögerung von zehn bis 20 Jahren (Peters et al. 2018: 6). Für das Altbatterieaufkommen bis zum Jahr 2030 sind daher insbesondere die momentan verfügbaren Traktionsbatterietechnologien (Li-Io mit LFP, NCA und NMC Kathoden) relevant. Danach können auch in nächster Zeit neu auf den Markt gebrachte Technologien in das Altbatterieaufkommen einfließen. Eine Prognose zur technischen Entwicklung wurde in Kapitel 3.2 dargelegt. Aufgrund der hohen Unsicherheiten in der konkreten Zusammensetzung noch nicht eingeführter Batterietechnologien beziehen sich die im Folgenden vorgestellten Szenarien für das Altbatterieaufkommen und die durch Recycling erhältlichen Rohstoffmengen dennoch ausschließlich auf die aktuell gängigen Kathodentypen LFP, NCA und NMC mit ihren aktuellen generischen Zusammensetzungen. Insbesondere die wahrscheinliche Einführung von Batterien mit verringertem Kobaltanteil stellt jedoch eine wesentliche Fehlerquelle dar, da der Kobaltanteil für den möglichen Gewinn durch Recycling äußerst relevant ist.

Im Abschlussbericht des Projektes LithoRec I aus dem Jahr 2012 (Kwade et al. 2012) wurden drei Szenarien für das Altbatterieaufkommen in Deutschland ausgehend von einem langfristigen PKW-Absatzvolumen von 3,3 Mio. Fahrzeugen jährlich auf dem deutschen Markt vorgestellt, die als realistisch, politisch (optimistisch) und pessimistisch bezeichnet wurden. Im Vergleich des dort für das Jahr 2020 angegebenen Marktanteils von Elektrofahrzeugen, BEV und PHEV (realistisch: 2,5 %, politisch: 8 %, pessimistisch: <1 %) mit den aktuellen Zahlen des Kraftfahrtbundesamtes aus dem Jahr 2018 (Marktanteil Elektrofahrzeuge 2,0 %) zeigt sich, dass das als realistisch bezeichnete Szenario am ehesten mit der tatsächlichen bisherigen Entwicklung übereinstimmt (KBA 2019a). Auch die angegebenen Bestandszahlen für das realistische Szenario im Jahr 2020 (50.000 BEV, 200.000 PHEV, 50.000 HEV) liegen zwar bereits etwas unter den Bestandszahlen Ende 2018, spiegeln aber von den drei vorgestellten Szenarien am ehesten die tatsächliche Entwicklung wider. Dieses Szenario geht von einem natürlichen, das heißt nicht künstlich beschleunigten, Marktwachstum aus. Dafür wurde angenommen, dass der Ölpreis extrem stark steigt, einige zielgerichtete Anreizprogramme zur Förderung der Elektromobilität durchgeführt werden und Aufpreise vor allem durch vergleichsweise niedrige Betriebskosten kompensiert werden. Zudem sollen Standardisierung und technologische Entwicklung der Batterietechnologien sowie ein hoher finanzieller Restwert der Batterien durch second-life-Nutzungen die Entwicklung der Elektromobilität fördern. Langfristig wird der Elektromobilität somit ein hoher Erfolg beigemessen, hohe Marktanteile und Bestände von BEV und PHEV werden jedoch deutlich später erreicht als im politischen Szenario (Marktanteile 2020: 2,5 %, 2030: 32 %, 2036:

60 %) und das Altbatterieaufkommen steigt aufgrund der langen Lebensdauer sowohl der Fahrzeuge als auch der Batterien sowie der hohen Weiterverwendungsquote zunächst nur langsam an. Für das Jahr 2030 werden im realistischen Szenario 29.000 Tonnen Altbatterien aus BEV und PHEV prognostiziert, Batterien aus HEV spielen dagegen eine deutlich geringere Rolle (Stückzahlen 2030 BEV: 40.106, PHEV: 69.360, HEV: 4.845). Langfristig wird ein Anteil von 60 % LFP, 30 % NMC und 10 % NCA Kathoden aus den Altbatterien prognostiziert.

### LBST-Szenario bis 2050

Zusätzlich zu den vorgestellten Szenarien bis 2030, von welchen insbesondere das realistische Szenario der bisherigen tatsächlichen Entwicklung nahe kommt, wurde ein eigenes aktuelles Szenario bis zum Jahr 2050 berechnet. Für die mengenmäßige Hochrechnung wurde dabei angenommen, dass bis zum Jahr 2050 der Gesamtbestand an PKW konstant bleibt, d. h. dass die Zahl der Neuzulassungen der Zahl der Außerbetriebsetzungen entspricht, und dass bis 2050 alle Fahrzeuge mit Elektroantrieb ausgestattet sind. Weiterhin wurden batterieelektrisch (BEV und PHEV) und mittels Brennstoffzelle (FCEV) betriebene Fahrzeuge unterschieden und das Szenario nach deren Anteilen in ein Szenario A mit 80 % BEV, PHEV und 20% FCEV und ein Szenario B mit umgekehrt 20 % BEV, PHEV und 80 % FCEV unterteilt.

Bei einer angenommenen durchschnittlichen Lebensdauer sowohl der Fahrzeuge als auch der Batterien von zehn Jahren wurde das Altbatterieaufkommen bzw. der Bedarf an Recyclingkapazitäten aus der Lebensdauer und dem daraus resultierenden Aufkommen von Altfahrzeugen abgeschätzt. Hierzu wurde für BEV eine 250 kg und für FCEV eine 50 kg NMC-Lithiumbatterie angenommen.

Für Brennstoffzellen wurde der Gesamtmetallgehalt von zwei kg/kW mit 100 kW und anteilig 0,006 % Platin sowie für Wasserstoffspeicher mit 600 km Reichweite und 100 kg Composite-Materialien berechnet. Der linke Wert gilt für 20 % BEV/80 % FCEV, der rechte Wert für 80 %BEV/20 % FCEV (vgl. *Tabelle 18*).

**Tabelle 18: LBST Szenario 1**

Jahr	Altbatterien [1.000 t]	Brennstoffzellen [1.000 t]	davon Platin [t]	H2-Speicher [1.000 t Composite]
2030	19-44	33-8	<1	18 - 17
2040	138-333	246-62	7-2	123-31
2050	305-712	542-136	16-4	271-67

Quelle: Eigene Darstellung

Hierbei wurde angenommen, dass 90 % der Altbatterien einem Recycling zugeführt werden. Bei 100% Recycling der Einzelmetalle ergeben sich rechnerisch die in *Tabelle 19* aufgeführten Altmetallmengen, die theoretisch aus dem Aufkommen der Altbatterien gewonnen werden könnten.

Tabelle 19: LBST Szenario 2

Jahr	Lithium 1.000 t	Kobalt 1.000 t	Nickel 1.000 t	Kupfer 1.000 t	Mangan 1.000 t	Alu 1.000 t	Graphit 1.000 t	Stahl 1.000 t	Kunststoffe 1.000 t
2030	<1	<2	<2	2-4	<2	1-3	3-6	4-10	2-5
2040	2-5	5-12	5-12	11-25	5-12	8-19	19-45	30-69	15-34
2050	4-10	12-28	12-28	24-57	11-26	19-47	43-100	65-150	32-76

Quelle: Eigene Darstellung

### 3.4 Recyclingtechnologien

Um die rechtlichen Vorschriften einer Verwertungseffizienz von mindestens 50 Masseprozent zu erfüllen, einen wirtschaftlichen Prozess zur Rückgewinnung der Rohstoffe in hohen Reinheitsgraden mit angemessenem Aufwand zu etablieren und das Recycling der kritischen Rohstoffe zur Versorgung der Kreislaufwirtschaft sicherzustellen, sind effiziente Recyclingprozesse erforderlich. Um diese für Li-Io-Batterien im industriellen Maßstab zu gewährleisten, müssen verschiedene Herausforderungen bewältigt werden, die im Folgenden vorgestellt werden (Fraunhofer IWKS 2019):

- *Hohes Altbatterievolumen im Elektromobilitätsbereich:* Auslegung von Verfahren und Logistik für große Skalen, Automatisierung der personell aufwendigen Batteriedemontage.
- *Unterschiedliche und neue Systembauformen:* Flexibilität des Recyclings bezüglich verschiedener Bauformen und Materialmische, Vereinheitlichung von Bauformen, leicht trennbare Verbindungen sowie Etikettierungen und Marker, „Design for Recycling“, Generierung von Rücklaufströmen aus möglichst sortenreinen Altprodukten durch geeignete Rücknahme- und Logistikkonzepte.
- *Etablierung geschlossener Stoffkreisläufe:* Rückgewinnung und Aufbereitung von Funktionsmaterialien (bereits synthetisierte Verbindungen) statt metallurgischer Auftrennung in einzelne Elemente, Etablierung von „Re-Use“-Konzepten für gebrauchte Batteriesysteme.
- *Umweltschutzaspekte:* Reduktion von Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß, Erhöhung der Recyclingeffizienz, Einsparung von Prozessmitteln.
- *Sicherheitsaspekte:* sichere, zerstörungsfreie und kostengünstige Verfahren zur Detektion von Lade- und Alterungszuständen der Batteriezellen, sicherer Umgang mit Beschädigungen an den Batterien, sicherer Transport, Lagerung und Demontage.

Relevant ist auch die Frage, ob das Recycling zentral oder dezentral organisiert werden soll. Während das dezentrale Batterierecycling zur Erhöhung des Gesamtenergieverbrauchs der Recyclingprozesse führt und den prozessbezogenen CO<sub>2</sub>-Ausstoß erhöht, wird dafür der Transportaufwand und der damit verbundene CO<sub>2</sub>-Ausstoß reduziert (Korthauer 2013: 354). Zudem kann zwischen Dedicated und Non-Dedicated Recycling Plants unterschieden werden, die je nachdem auf wenige spezifische Stoffströme wie verschiedene Li-Io-Batterien ausgelegt sind und den Fokus auf Spurenelemente, Wert und Prozessqualität legen (Hagelüken 2011) oder allgemeine massenfokussierte Standardrecyclingverfahren auf unterschiedlichste Stoffströme anwenden. Grundsätzlich sind Dedicated Plants vorteilhaft, da die Verfahrenstechnik materialeffizienter auf spezifische Stoffstromzusammensetzungen angepasst werden kann und damit eine größere Bandbreite an Wertmaterialien statt weniger spezifischer Metalle zurückgewonnen werden kann. Allerdings sind Dedicated Plants aufgrund der geringe-

ren Stoffströme meist mittelständische Unternehmen ohne Zugang zu großtechnischen pyrometallurgischen Anlagen, sodass die Batterien oft vor einem finalen hydrometallurgischen Prozessschritt mechanisch aufgeschlossen und weiterverarbeitet werden. Problematisch ist dabei, dass sich die Zellen beim mechanischen Aufschluss entzünden können, der sichere Verbleib des desorbierten, umweltsensiblen Elektrolyts DMC nicht geklärt ist und außerdem die Störstofftoleranz der hydrometallurgischen Verfahren gering ist (insbesondere gegenüber Graphit, Halogenen, Phosphor etc.) (Weyhe 2013: 519 f.).

Wichtig ist außerdem die Unterscheidung zwischen Recycling und Refining, da nicht alle Recyclingunternehmen auch die Refiningschritte zur Aufbereitung der Wertmaterialien für die Industrieanwendungen durchführen (Korthauer 2013: 347).

### Grundlegende Verfahren

Während sowohl das Recycling von Sondermetallen aus Altfahrzeugen als auch das Recycling von Kleinbatterien bereits in industriellem Maßstab durchgeführt werden, befinden sich Prozesse zum Recycling der Li-Io-Traktionsbatterien vielfach noch in der Erprobungsphase. Dies liegt insbesondere darin begründet, dass aufgrund der Größe, des Gewichts und der Materialvielfalt der Batterien spezielle Vorbereitungs-schritte nötig sind (Korthauer 2013: 347 f.). So müssen die Batterien nach der Sammlung und Sortierung in Automobilwerkstätten, in denen alte gegen neue Batterien ausgetauscht werden, oder Altfahrzeugdemontagebetrieben, in denen die Batterien aus Altfahrzeugen entnommen werden, zum einen zunächst entladen werden, um Gefährdungen bei der Lagerung, dem Transport und der Handhabung auszuschließen. Im besten Fall erfolgt dies direkt durch Rückeinspeisung ins Netz. Zum anderen muss eine mechanische Demontage erfolgen. Bei dieser werden bereits Komponenten wie Gehäuse, Kabel, Elektronik gewonnen, die dann einem separaten Recycling zugeführt werden können. Anschließend werden die Batterien auf Modul- oder Komponentenebene zerlegt und störende und schadstoffhaltige Materialien entfernt. Bereits 20-30 Masseprozent können hier einem klassischen Metall-, Elektroschrott- oder Kunststoffrecycling zugeführt werden (Gellner et al. 2015: 2). Daraufhin erfolgt für den weiteren Aufschluss je nach genauem Prozessablauf eine unterschiedliche Kombination aus mechanischen, pyrometallurgischen und hydrometallurgischen Schritten zur Aufbereitung und Rückgewinnung der Wertmaterialien. Die nach dem oft angewandten pyrometallurgischen Prozessschritt anfallende lithiumhaltige Schlacke wird momentan meist noch anderen Anwendungen, insbesondere der Bauindustrie, zugeführt, sodass das Lithium nur dissipativ z. B. als Zusatzstoff in der Zementproduktion verwertet werden kann, obwohl prozesstechnische hydrometallurgische Lösungen zur Rückgewinnung des Lithiums aus den Schlacken in oxidischer Form oder als Lithiumcarbonat im Labor- und Pilotmaßstab bereits zur Verfügung stehen. Dies liegt vor allem in dem hohen Aufwand, der nötig ist, um einen signifikanten Anteil des Lithiums zurückzugewinnen, begründet. Neue, spezialisierte Recyclingtechnologien, in denen ein Großteil des Lithiums zurückgewonnen werden kann, sind daher Gegenstand aktueller Forschung (Hoyer 2015: 56 ff.). Im Folgenden werden die drei grundlegenden Prozessschrittarten, die in vielen Recyclingverfahren Anwendung finden, vorgestellt.

In der mechanischen Aufbereitung werden Zellmaterialien mithilfe verschiedener Zerkleinerungs-, Sortier- und Klassierverfahren (z. B. Brechen, Sieben, Magnetscheidung) separiert (Hoyer 2015). Meist erfolgt sie vor weiteren pyro- oder hydrometallurgischen Prozessschritten. An der TU Bergakademie Freiberg wurde aber beispielsweise auch ein neues Verfahren entwickelt, welches gänzlich auf

Pyro- und Hydrometallurgie verzichtet, damit energie- und kostensparender sein soll und einen höheren Anteil verschiedenster Materialien, u. a. auch Aluminium, Lithium, Graphit und die Separatorfolie recyceln soll (Gellner et al. 2015). Während dieses Verfahren auf der klassischen Schreddertechnik beruht, ist ein neuer Verfahrensansatz das elektrohydraulische Trennverfahren, welches z. B. am Fraunhofer Institut für Silikatforschung erprobt wird (Fraunhofer ISC 2016). Dabei wird das zu zerkleinernde Material in ein flüssiges Medium eingebracht, woraufhin durch elektrische Entladung (gepulste Funkenentladungen) induzierte Schockwellen durch das Wasser gleichmäßig an das Material weitergegeben werden. So sollen Werkstoffverbunde mithilfe von Schockwellen an den Materialgrenzen (makroskopische Verbindungsstellen oder mikroskopische Grenzflächen) aufgespalten werden und die Batterien damit in einzelne Bestandteile (Kathode, Anode, Elektrolyt, Separator, Zellgehäuse) aufgetrennt werden. Es werden also die Batteriematerialien selbst anstelle einzelner Metalle aus den Batterien zurückgewonnen.

In pyrometallurgischen Verfahren wird das Material in einem Hochofen bei sehr hohen Temperaturen erhitzt, sodass sich zum einen einzelne Komponenten thermisch zersetzen und zum anderen die enthaltenen Metalle schmelzen, wodurch sich komplexe Stoffgemische trennen lassen (Becker et al. 2019: 90). Meist werden nur wenige, sehr wertvolle Metalle zurückgewonnen. Besonders geeignet ist die Pyrometallurgie zur Rückgewinnung von Kobalt und Nickel (Hanisch 2014, Hoyer 2015: 58). Bei pyrometallurgischen Prozessen ergeben sich drei Ausgangsstoffströme: die Schlacke, die Schmelzlegierung und die Flugasche (Korthauer 2013: 350). Vorteile pyrometallurgischer Verfahren liegen in einer vergleichsweise hohen Reaktionsgeschwindigkeit und daraus folgend hohen Durchsatzrate. Außerdem ist Pyrometallurgie eher unempfindlich gegenüber der Änderung der Zusammensetzung des Inputmaterials und kann daher relativ universell angewandt werden. Nachteilig ist dagegen die geringe Reinheit des Outputs und Begrenzung des Recyclings auf wenige Materialien sowie das hohe Geräusch- und Emissionspotential (Bilitewski et al. 2018: 273).

In hydrometallurgische Verfahren werden Kombinationen chemisch-wässriger Verfahren wie Flotation (gezielter Auftrieb hydrophober Bestandteile durch Anlagerung zugegebener Gasblasen), Filtration (Abtrennung von Partikeln aufgrund von Partikeleigenschaften in einem Filter), Laugung (gezielter Übergang einzelner Komponenten in die wässrige Phase durch Wahl des Lösungsmittels), Kristallisation (Übersättigung des gelösten Stoffes durch Verdunsten des Lösungsmittels), Fällung (Ausflocken des gelösten Stoffes durch Zugabe von Fällungsmitteln, Druck oder Temperaturänderungen) und Elektrolyse angewandt (Becker et al. 2019: 90; Hoyer 2015: 58). Üblicherweise können damit vor allem Kobalt, Nickel und Lithium zurückgewonnen werden (Hoyer 2015: 58). Vorteile hydrometallurgischer Verfahren liegen in der hohen Reinheit des Outputs und Vielfalt zurückgewonnener Materialien aufgrund sehr verschiedener Reaktionen und in vergleichsweise geringen Emissionen. Nachteilig ist dagegen die geringere Geschwindigkeit der Reaktionen und daher geringere Durchsatzrate, die Empfindlichkeit gegenüber der Änderung der Zusammensetzung des Inputs und damit geringe Universalität der Verfahren, und das Entstehen von Prozessrückständen, die oft hinsichtlich der Entsorgung problematisch sind (Bilitewski et al. 2018: 273).

### **Stand in Industrie und Forschung**

Im Folgenden werden beispielhaft bereits industriell realisierte Recyclingverfahren sowie damit verknüpfte aktuelle Forschungsprojekte vorgestellt. Mit weltweit über 50 Firmen, die Li-Io-Batterien

recyclen (Maisch 2019), wurde bei der Auswahl der vorgestellten Unternehmen ein besonderer Fokus auf große Firmen, europäische Firmen, die Spezialisierung auf Li-Io-Traktionsbatterien, das Recycling des Lithiums und die Verbindung zu Forschungsprojekten gelegt.

**Tabelle 20: Überblick über vorgestellte Firmen und Forschungsprojekte im Zusammenhang mit dem Recycling von Li-Io-Traktionsbatterien**

Firma	Standort	Verfahren	recycelte Bestandteile	zugehöriges Forschungsprojekt	Ziel des Forschungsprojekts
Retriev Technologies	USA (Lancaster) und Kanada (Trail)	mechanische Demontage, mechanische Zerkleinerung, Hydrometallurgie	Lithiumcarbonat, Graphit, Co, Ni, Cu, Al	/	/
Umicore	Belgien	mechanische Demontage, Pyrometallurgie, Hydrometallurgie	Fe, Cu, Ni, Kobaltchlorid, Schlacke (Al, Si, Ca, Fe, Li)	LiBRi	Rückgewinnung von Lithium und weiteren Metallen
Duesenfeld	Deutschland	mechanische Demontage, mechanische Zerkleinerung, Hydrometallurgie	Al, Cu, Kobaltsulfat, Nickelsulfat, Mangansulfat, Lithiumcarbonat, Graphit	LithoRec	rein mechanischer und hydrometallurgischer Recyclingprozess
Accurec	Deutschland	mechanische Demontage, mechanische Zerkleinerung, Pyrometallurgie, Hydrometallurgie	Lithiumcarbonat, Al, Fe, Cu, Co, Mn, Ni	EcoBatRec	Entwicklung wirtschaftlicher Recyclingtechnologien
/	/	/	/	AutoBatRec	Verbesserung der Recyclingkette zur Sicherung wertvoller Rohstoffe

Quelle: Eigene Darstellung

Retriev Technologies (vormals ToxCo): Der bei Retriev Technologies, einer auf das Recycling und Management von Batterien spezialisierten Firma, als einer der ersten für das kommerzielle Recycling von Li-Io-Batterien eingesetzte Prozess verwertet die Batterien in einer vollautomatischen Kombination von mechanischer und hydrometallurgischer Aufbereitung. Retriev Technologies hat zwei Standorte, einen in Trail, Kanada, und einen in Lancaster, USA. Der Standort in Lancaster wurde vom US Department of Energy mit 9.5 Mio. US\$ finanziell gefördert, um sich insbesondere auf das Recycling von Traktionsbatterien zu spezialisieren (Retriev Technologies). Der verwendete Prozess ist unabhängig von der genauen Zusammensetzung der Batterie und gewinnt Lithiumcarbonat zurück.

Nach der Demontage, bei der Gehäusebestandteile und Elektronik entfernt und separatem Recycling zugeführt werden, werden die Batterien mit flüssigem Stickstoff behandelt, um ihre Reaktivität während der folgenden Prozessschritte herabzusetzen. Die Zerkleinerung erfolgt dann in einer Hammermühle in einer Lithiumsalzlösung, die flüchtige Bestandteile binden und so weiterhin Reaktionen unterbinden soll. Dabei entstehen zwei Ausgangsstoffströme: ein Mehrstoffgemisch und Plastikfluss, eine Mischung aus Kunststoff und Stahl. Der Plastikfluss wird einem separaten Prozess zur Rückgewinnung des Stahls zugeführt, das Mehrstoffgemisch wird auf einem Rütteltisch durch die Zugabe von Wasser in zwei Fraktionen aufgetrennt: metallische Feststoffe, je nach Batterietechnologie eine Mischung aus Kobalt, Kupfer und Aluminium, und mit Metallen angereicherte Schlämme aus Lithium, Kobalt und Graphit. Die metallischen Feststoffe werden anschließend weiter aufbereitet und die

Schlämme werden durch Erwärmung und einen hydrometallurgischen Prozess behandelt, sodass Kobalt und Graphit durch eine Filterpresse abgetrennt werden können und anschließend an anderem Ort aufgereinigt werden können. Die extrahierte Lithium-Salzlösung kann entweder wieder der Zerkleinerung zugeführt werden oder durch Zugabe von Natriumcarbonat zur Ausbildung von Lithiumcarbonat gebracht werden. Dieses kann anschließend abgefiltert werden (Becker et al. 2019: 91; Hoyer 2015: 59 f.).

Umicore: Bei Umicore, einem weltweit tätigen Materialtechnologie- und Recycling-Konzern, werden Li-Io-Traktionsbatterien einem eigenen Recyclingverfahren für Batterien mit der Bezeichnung Val'Eas, welches sowohl für NiMH als auch für Li-Io-Batterien verwendet wird, zugeführt. Während für die verwendete Art der pyrometallurgischen Behandlung ohne mechanische Vorbehandlung der Batterien normalerweise zwei Öfen bei unterschiedlichen Temperaturen benötigt werden, liegt die Besonderheit des Prozesses bei Umicore in der Behandlung der Batterien in einem einzigen dreistufigen Ofen, wodurch Investitionen, Betriebskosten und Energiebedarf verringert werden. Der Prozess eignet sich explizit auch für Traktionsbatterien, wurde allerdings zunächst zur Behandlung von Batterien aus Kleingeräten entwickelt und ist daher nicht auf die Minimierung von Verlusten aus Li-Io-Traktionsbatterien optimiert. Das Lithium wird ohne weitere nachgelagerte Prozessschritte nicht zurückgewonnen.

Größere Batterien wie Traktionsbatterien werden zunächst in Hanau, Deutschland, bis auf Modul- oder Zellebene demontiert, Gehäusebestandteile und Elektronikkomponenten werden hier entfernt und separaten Recyclingverfahren zugeführt. Anschließend werden die Batterien ohne weitere mechanische Aufbereitung in Hoboken, Belgien, direkt dem pyrometallurgischen Prozess in einem vertikalen Schachtofen zugeführt. Die Batterien werden dem dreistufigen Schachtofen gemeinsam mit Schlackenbildnern, Steinkohlenkoks (als Brennstoff), Sand (zur Emissionsverringerng durch Temperaturoptimierung) und Kalkstein (zur Rauchgasentschwefelung) in der Vorheizzone am oberen Ende des Ofens mit Temperaturen unter 300°C zugeführt. Dort entweicht der verdampfte Elektrolyt kontrolliert und die Explosionsgefahr wird durch den langsamen Temperaturanstieg gesenkt. Anschließend werden in der Plastikpyrolysezone bei bis zu 700°C die Plastikkomponenten eingeschmolzen, die hierbei entstehenden Gase werden für die Temperaturentwicklung in der Vorheizzone genutzt, sodass freiwerdende Energie genutzt wird. Sowohl Elektrolyt als auch Plastik dienen neben dem Koks als Reduktionsmittel. Daraufhin finden in der Schmelz- bzw. Reduktionszone bei Temperaturen zwischen 1.200 bis 1.450°C die eigentlichen Schmelzprozesse des übrigen hauptsächlich metallischen Materials statt, die die Materialien in zwei Fraktionen trennen: eine Schlacke aus Aluminium, Silizium, Calcium, Lithium und etwas Eisen sowie eine Legierung aus Eisen, Kupfer, Nickel und Kobalt. Die entstehenden, teils mit gefährlichen Stoffen belasteten Prozessgase werden mit einem Plasmabrenner nachverbrannt und einer Gaswäsche unterzogen. Die Flugasche aus der Abgasreinigung bemisst max. 3 % des Eingangsmaterials und wird zunächst im pyrometallurgischen Kreislauf geführt, bevor sie anschließend deponiert wird. Die granulierten Metalllegierung wird in Olen, Belgien, durch hydrometallurgische Verfahren weiterverarbeitet. Eisen, Kupfer, Nickel und Kobalt werden dort zurückgewonnen. In China, Korea und Japan, werden die zurückgewonnenen Materialien in weiteren Umicoreanlagen zu Kathodenaktivmaterialien weiterverarbeitet, beispielsweise kann durch einen anschließenden Oxidationsprozess unter Zugabe von Lithium Lithiumkobaltoxid aus dem Kobalt zurückgewonnen werden. Die lithiumhaltige Schlacke wird an die Betonindustrie weitergegeben (Becker et al. 2019: 97 ff.; Hoyer 2015: 60 f.; Umicore Deutschland 2019).

Projekt „Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – Lithium-Ionen-Batterierecycling Initiative (LiBRi)“ (Abschlussbericht und Okobilanz: Treffer et al. 2011; Buchert et al. 2011):

- Ziel: Entwicklung eines realisierbaren effizienten und umweltfreundlichen Recyclingkonzeptes für Li-Io-Traktionsbatterien auf pyrometallurgischer Basis im Wesentlichen durch Ergänzung des Umicore Recyclingverfahrens um ein Verfahren zur Lithiumrückgewinnung.
- Umsetzung: An der TU Clausthal wurden auf Grundlage mineralogischer und chemischer Analysen der Schlacken und Flustäube des Umicore Recyclingprozesses Verfahren im Labormaßstab entwickelt, die Lithium und weitere Metalle ökologisch und ökonomisch zurückgewinnen können. Das hydrometallurgische Verfahren zur Gewinnung von Lithium aus den Schlacken unter Einsatz von Schwefelsäure soll dabei ökologisch und ökonomisch effizienter sein als der Abbau aus Lithiumerzen. Dabei wird Lithiumcarbonat in batteriefähiger Qualität gewonnen.
- Partner: Umicore AG & Co. KG, Hanau (Koordination), Daimler AG, TU Clausthal, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik und Öko-Institut e. V.
- Zeitraum: September 2009 bis September 2011.
- Förderung: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Duesenfeld: Das von der 2017 gegründeten Firma Duesenfeld angewandte, auf Li-Io-Batterien spezialisierte Verfahren beruht allein auf mechanischen und hydrometallurgischen Prozessschritten und soll dadurch besonders energiesparend und emissionsarm bezüglich giftiger Rauchgase sowie CO<sub>2</sub> sein und hohe Recyclingquoten und damit geringe Abfallstoffströme erzielen. Die stoffliche Verwertungsquote liegt Angaben der Firma zufolge auf Batteriesystemebene bei 85 % und auf Batteriezellebene bei 55-75 %. Ziel ist zudem ein möglichst lokales Recycling, bei welchem zumindest die ersten Prozessschritte der Zerkleinerung und Elektrolytabtrennung vor Ort erfolgen können, um Kosten und Sicherheitsvorkehrungen beim Transport zu sparen. Der Recyclingprozess wurde daher so entwickelt, dass er in einer Anlage, die zwei Standard-Seecontainer umfasst und eine Kapazität von 1.500 t Altbatterien jährlich besitzt, durchgeführt werden kann. Das weitere Recycling nach den ersten Schritten kann entweder ebenfalls vor Ort oder am zentralen Standort von Duesenfeld in Wendeburg erfolgen.

Die Batterie wird zunächst manuell zerlegt und entladen, Gehäuse und Elektronik werden separat gesammelt und der Rest anschließend mechanisch bei Unterdruck unter Zugabe von Stickstoff zur Explosionsverhinderung zerkleinert. Die organischen Lösungsmittel des entzündlichen Elektrolyts werden dann mit einer eigens entwickelten Technik aus der Schreddermasse unter Unterdruck verdampft und als Kondensat zurückgewonnen. Mit verschiedenen Mitteln wie Sieben, Magneten und Wirbelstromabscheidern werden daraufhin die Fraktionen Zellhülle und Gehäusematerial, Separator und Folien, Elektroden und weitere Bestandteile voneinander getrennt und Kupfer sowie Aluminium aus der Elektrodenfraktion entnommen und separatem Recycling zugeführt. Lithium, Kobalt, Nickel, Mangan und Graphit werden so bei geringer Kupfer- und Aluminiumkontamination als Pulver zurückgewonnen und anschließend in einem Säurebad einer Sulfatlösung hydrometallurgisch getrennt. Als Ausgangsstoffe entstehen Nickel-, Mangan- und Kobaltsulfat sowie Lithiumcarbonat und Graphit. Die Reinheit dieser zurückgewonnenen Metalle ist ausreichend, um erneut in der Zellproduktion verwendet zu werden (Battery University; Seibt 2019; Kunde 2019; Duesenfeld).

Projekt „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (LithoRec+LithoRecII)“ (Abschlussberichte und Ökobilanz: Kwade et al. 2012; Kwade et al. 2016; Buchert et al. 2016b):

- Ziel: Entwicklung eines realisierbaren effizienten und umweltfreundlichen Recyclingkonzeptes für Li-Io-Traktionsbatterien auf mechanischer und hydrometallurgischer Basis, Darstellung des Prozesses im Pilotmaßstab.
- Umsetzung: Anfang 2017 wurden Ergebnisse des Forschungsprojektes durch die Duesenfeld GmbH verwirklicht, der entwickelte Prozess entspricht dem von der Firma Duesenfeld angewandten Verfahren. Zwischen Herbst 2015 und Frühjahr 2016 wurde bereits an der TU Braunschweig eine Demonstrationsanlage errichtet.
- Partner: Rockwood Lithium GmbH (Koordination), Audi AG, Electrocyling GmbH, H.C. Starck GmbH, Hosokawa Alpine AG, I+ME ACTIA GmbH, Solvay Fluor GmbH, Volkswagen AG, Universität Münster, TU Braunschweig, assoziierte Partner: Bosch Rexroth, KUKA Roboter GmbH, Adam Opel AG, Lion Engineering.
- Zeitraum: September 2009-September 2011 (LithoRec) und Juli 2012-März 2016 (LithoRecII).
- Förderung: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Accurec: Das Verfahren der Firma Accurec, welche auf Logistik und Verwertung von Altbatterien spezialisiert ist und einen großen Anteil der in Deutschland anfallenden Li-Io-Altbatterien recycelt, verbindet Pyrometallurgie, mechanische Verfahrensschritte und Hydrometallurgie und ermöglicht die Lithiumrückgewinnung als Lithiumcarbonat.

Nach der Vorsortierung der Batterien nach Subtypen, werden die Module zu einzelnen Zellen demonstert, wobei äußere Materialien wie Gehäuse und Elektronik bereits zurückgewonnen werden. Anschließend können zwei alternative Niedertemperaturbehandlungen stattfinden, die beide der autothermen Graphitisierung der Batterieorganik und damit der Deaktivierung zur Sicherheit der folgenden Prozessschritte dienen. Zum einen kann eine autotherme Vakuumpyrolyse in einem Retortenofen bei Temperaturen bis zu 250 °C und einem geringen Druck von 650 bis 700 mbar durchgeführt werden, welche in eigenen Anlagen der Firma stattfindet. Zum anderen kann eine atmosphärische Kalzinierung durch überstöchiometrische, thermische Vorbehandlung im Drehrohrofen durchgeführt werden, welche in Kooperation mit der Firma Currenta GmbH, einem Gemeinschaftsunternehmen der Bayer AG und Lanxess AG, stattfindet. Diese neuen Prozessschritte ermöglichen anschließend neue Verfahrensabläufe im Bereich der Zerkleinerung, Klassierung und Sichtung und Trennung der verschiedenen Materialfraktionen. Der Elektrolyt kann anschließend wieder auskondensiert, allerdings aufgrund verschiedener Zersetzungsprodukte nicht direkt wiederverwendet werden. Die Zellen werden dann in einer Hammermühle mechanisch zerkleinert und durch Vibrationssiebung, magnetische Separation und Luftstrahlsichtung in einem Zickzack-Sichter in vier Fraktionen aufgeteilt. Die Feinfraktion besteht aus den Elektrodenmaterialien, die anderen drei Fraktionen bestehen aus Eisen-Nickel, Aluminium, und Elektrodenfolien. Die Feinfraktion wird in einem Agglomerationsprozess mit einem Binder versetzt und daraufhin der recht hohe Graphitanteil der entstandenen Pellets durch thermische Vorbehandlung bei 800°C reduziert. Der anschließende pyrometallurgische Schmelzprozess führt zu einer Kobaltlegierung, einer Lithium enthaltenden Schlacke und Lithium enthaltenden Flugstäuben. Die Kobaltlegierung wird in einem hydrometallurgischen Verfahren durch Laugung, Fällung und Filtration behandelt, sodass Lithiumcarbonat zurückgewonnen werden kann (Becker et al. 2019: 90 f.; Weyhe 2013: 521 ff.).

Projekt „Demonstrationsanlage für ein kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Li-Ion Batterien der Elektromobilität (EcoBatRec)“ (Abschlussbericht und Ökobilanz: Weyhe et al. 2016; Buchert et al. 2016a):

- Ziel: Entwicklung und Erprobung von wirtschaftlich tragfähigen Recyclingtechnologien für Li-Io Traktionsbatterien, insbesondere Einführung der autothermen Vakuumpyrolyse, Untersuchung von Schleppgasverdampfung und Vakuumverdampfung zur Rückgewinnung von Lithium.
- Umsetzung: Seit 2016 werden die Ergebnisse des Forschungsprojektes durch die Accurec Recycling GmbH am neueröffneten Standort Krefeld verwirklicht und weiterentwickelt, der entwickelte Prozess entspricht weitgehend dem von der Firma Accurec angewandten Verfahren. Zusätzlich wurde die Schleppgasverdampfung mit Stickstoff bzw. Vakuumverdampfung zur Gewinnung von Lithiumoxid bzw. metallischem Lithium aus dem Elektrodenpulver vor der weiteren pyrometallurgischen Behandlung untersucht.
- Partner: Accurec Recycling GmbH (Koordination), RWTH Aachen.
- Zeitraum: April 2012 bis August 2016.
- Förderung: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Laufendes Projekt „Automotive Battery Recycling 2020 – AutoBatRec 2020“ (Fraunhofer ISC 2018):

- Ziel: Verbesserung der Recyclingkette von Li-Io Traktionsbatterien zur Rückgewinnung und Sicherung kostbarer Rohstoffe für die europäische Industrie, Entwicklung ökologisch und ökonomisch vorteilhafter Wege für effizientes Recycling und Skalierung für industrielle Anwendung.
- Umsetzung: In dem europäischen Verbundprojekt soll die gesamte Kette des Batterierecyclings betrachtet werden. Schwerpunkte des Projekts liegen daher auf Sammel- und Transportkonzepten, automatisierten Demontageverfahren, neuen Recyclingverfahren wie beispielsweise dem elektrohydraulischen Trennverfahren, Konzepten für die Wiederverwendung von ganzen Batteriekomponenten statt einzelnen Materialbestandteilen, Design for Recycling und Sicherheitsaspekten. Die einzelnen Verfahren sollen hinsichtlich ihrer Effizienz und Wirtschaftlichkeit sowie ihrer Nachhaltigkeit bewertet werden und zu einer ökonomisch realisierbaren Wertschöpfungskette kombiniert und weiterentwickelt werden.
- Partner: Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC – Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS (Deutschland) (Koordination), Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (Deutschland), UMICORE NV (Belgien), Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives CEA (Frankreich), Technische Universität Bergakademie Freiberg (Deutschland), SAMSUNG SDI Battery Systems GmbH (Österreich), ImpulsTec GmbH (Deutschland), Daimler AG (Deutschland).
- Zeitraum: Januar 2018 bis Januar 2021.
- Förderung: EIT Raw Materials (European Institute of Innovation and Technology) mit Mitteln der EU.

Weitere wichtige Firmen im Bereich des Li-Io-Batterierecyclings, die nicht zwingend auf Traktionsbatterien oder die Rückgewinnung des Lithiums spezialisiert sind, sind: Glencore (vormals Xstrata), Raw

Materials, International Metals Reclamation (Inmetco), Metal Conversion Technologies, American Manganese (Ami), Sitrassa, Tes-Amm, Li-Cycle Technology, Neometals, Recupyl Sas (Market.us 2019).

### 3.5 Prognose über stoffliche Ergebnisse und Abfälle des Recyclings

Aus dem berechneten Altbatterieaufkommen in zwei Szenarien (vgl. Kapitel 3.3) wurden die anfallenden Mengen verschiedener Wertstoffe berechnet. Zugrunde gelegt wurden dabei die generischen Zusammensetzungen der für die Elektromobilität wichtigsten Li-Io-Batterietypen (NMC, NCA, LFP) (vgl. Kapitel 3.2), da sich die Batterien nicht nur nach Zelltypus/Kathodenmaterial, sondern auch nach exakter elektrochemischer Zusammensetzung, Bauform und Größe unterscheiden. Am ehesten entspricht dieser generische Typ (generischer Marktmix) in Bezug auf Kapazität und Größe den jeweiligen Batterien für PHEV. Angenommen wurde dabei ein Szenario mit 35 % NMC, 35 % NCA und 30 % LFP Batterien, wie es auch im Projekt LiBRi verwendet wurde (Treffer et al. 2011).

Untersucht wurden die Wertstoffe Lithium, Kobalt, Nickel, Kupfer, Mangan, Aluminium, Eisen, Edelstahl, Phosphor, Graphit und Kunststoffe. Neben den Zellbestandteilen wurden dabei auch Beiträge äußerer Bestandteile wie Gehäuse, Kabel und Rahmen berücksichtigt, da hier insbesondere größere Mengen an Edelstahl (Gewindestangen, Seitenbleche, Stahlring) und Kunststoffen (Kunststoffrahmen, Anschlüsse Kühlmedium, Schaumstoffzwischenlagen, Modulabdeckung, Zellenabdeckung, Stromleiter) anfallen können (Weyhe et al. 2016: 29). Kupfer, Nickel, Gold und Silber, die im Batteriemanagementsystem enthalten sind, fallen in dieser Aufstellung unter die Kategorie ‚Sonstiges‘. Darüber hinaus wurden die Recyclingeffizienzen der drei in den Forschungsprojekten LiBRi, LithoRec und EcoBatRec entwickelten Verfahren in Bezug auf verschiedene Wertstoffe betrachtet, um den real möglichen Ertrag des Recyclings mit aktuell verfügbaren auf Li-Io-Traktionsbatterien spezialisierten Verfahren abzuschätzen (vgl. *Tabelle 21*).

Tabelle 21: Recyclingeffizienzen der ausgewählten Verfahren nach Wertstoffen in %

	LiBRi/ Umicore	Lithorec II/ Duesenfeld	EcoBatRec/ Accurec
Kunststoff Gehäuse	91	90	0
Aluminium Gehäuse	91	93	
Edelstahl Gehäuse	91	91	86
Kupfer Gehäuse	96	94	
Lithium	62	86	
Kobalt	94	100	96
Nickel	95	97	97
Mangan	0	100	
Eisen			
Graphit			79
Aluminium Kathode	0	70	7
Kupfer Anode	71	94	94
Aluminium Zellgehäuse	0	71	
Phosphor			

Quellen: Becker et al. 2019: 110; Accurec 2018

### 3.6 Ökologische Bewertung

Zur ökologischen Bewertung der Verfahren können grundsätzlich verschiedene Aspekte betrachtet werden. Dazu gehören (Buchert et al. 2016a: 14):

- zurückgewonnene Metalle und Wertschrotte
- Klimawirkung (Strombedarf, direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen)
- Emissionen, die zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht beitragen
- Bildung von Photooxidantien, die zur Entstehung bodennahen Ozons beitragen
- Feinstaubemissionen und andere anorganische Emissionen
- Ökotoxizität
- Humantoxizität
- Emission ionisierender Strahlung
- Versauerung
- Eutrophierung
- Ressourcenverbrauch (Hilfsstoff- und Energieeinsatz, mineralisch, fossil, Wasser)
- Landnutzungsänderungen und Flächenverbrauch
- Abwärme (nutzbar)
- Abfallaufkommen
- Geruchsbelästigung, Lärmbelästigung
- Belastungen am Arbeitsplatz
- allgemeine Auswirkungen auf Naturschönheit und Biodiversität

Die ökologische Bilanz eines Recyclingverfahrens setzt sich damit aus positiven Beiträgen durch die Rückgewinnung von Rohstoffen und damit Vermeidung von Umweltbelastungen, die bei deren Neugewinnung entstünden, einerseits und konkreten Umweltauswirkungen des Recyclingverfahrens andererseits zusammen. Da die positiven Beiträge mit zunehmender Recyclingeffizienz und Qualität der recycelten Materialien steigen und die Zellen nur etwa die Hälfte des Batteriegewichts ausmachen, sind vor allem auch die sorgfältige Demontage der Batterien und das Recycling der Wertstoffe aus Gehäuse, Elektronik und Batteriemanagementsystem (v. a. Aluminium, Kupfer und Edelstahl) essentiell für eine gute ökologische Bewertung. Zudem sind dies einfach zu realisierende Maßnahmen, da entsprechende Recyclingverfahren bereits etabliert sind und daher kein zusätzlicher Entwicklungsaufwand entsteht. Wichtig ist außerdem, hierbei zu beachten, dass der Marktwert vieler Batterierohstoffe nicht mit der ökologischen Belastung, die bei ihrer Gewinnung entsteht, korreliert (Romare et al. 2017: 30). Bei der Abschätzung der ökologischen Wirkung verschiedener Recyclingverfahren bleibt zudem zu beachten, dass sich die Bilanzen sowohl durch die Realisierung der Verfahren auf großtechnischer Ebene, als auch durch die Änderung der Batteriezusammensetzung oder Herstellprozesse der Batteriematerialien ändern können (Buchert et al. 2016a: 39). So ist beispielsweise eine Verringerung des Energieaufwands für pyro- und hydrometallurgische Prozesse bei großindustrieller Anwendung erwartbar (Treffer et al. 2011: 110).

Durch das Ökoinstitut wurden bereits umfangreiche Studien zur ökologischen Bewertung der in den Projekten LiBri, LithoRec und EcoBatRec entwickelten Recyclingverfahren durchgeführt. Als Parameter für die durch die Verfahren entstehenden ökologischen Belastungen wurden dabei das Treibhauspotential, das Versauerungspotential, das Eutrophierungspotential, das photochemische Oxidantienbildungspotential und der Ressourcenverbrauch betrachtet. Die gebrauchten Batterien wurden jeweils als lastenfreier Input in das Modell einbezogen und Ströme, die das Recyclingsystem verlassen (Energie oder stoffliche Produkte) als Gutschriften bewertet. Während für die Ökobilanzen der in den Projekten LithoRec sowie EcoBatRec entwickelten Recyclingverfahren jeweils nur Batterien mit NMC Kathoden betrachtet wurden, basiert die Ökobilanz des LiBri-Recyclingverfahrens auf einem 35:35:30 Mischungsverhältnis von NMC, NCA und LFP Kathoden in den Batterien. Damit sind die vorgestellten Studien zwar nicht exakt vergleichbar, liefern aber in der Gesamtbetrachtung einen guten Anhaltspunkt für die ökologische Bewertung neuentwickelter, auf das Recycling von Li-Io-Batterien spezialisierter Verfahren. Insgesamt ergeben die Studien für die betrachteten Recyclingverfahren gegenüber der Neugewinnung der Rohstoffe meist positive Umweltauswirkungen (vgl. *Tabelle 22*).

Tabelle 22: Vergleich ökologischer Aspekte der Projekte LiBRi, LithoRec und EcoBatRec

	LiBRi (überwiegend pyrometallurgisch)	LithoRec (überwiegend hydrometallurgisch)	EcoBatRec (pyro und hydrometallurgisch)
<b>Treibhauspotential</b> [in kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent/t Batterien]	-1.244	-2.725	-2.841
<b>Zusammensetzung des Treibhauspotentials</b>		75% CO <sub>2</sub> , 8% N <sub>2</sub> O, 7% CH <sub>4</sub> , 9% CF <sub>4</sub>	80% CO <sub>2</sub> , 5% N <sub>2</sub> O, 6% CH <sub>4</sub>
<b>Versauerungspotential</b> [in kg SO <sub>2</sub> -Äquivalent/t Batterien]	-88	-67	-62
<b>Zusammensetzung des Versauerungspotentials</b>		90% SO <sub>2</sub> , 7%NO <sub>x</sub>	91%SO <sub>2</sub> , 6%NO <sub>x</sub>
<b>Eutrophierungspotential</b> [in kg PO <sub>4</sub> -Äquivalent/t Batterien]	-2	-4,8	-3
<b>Zusammensetzung des Eutrophierungspotentials</b>		48% PO <sub>4</sub> , 29% NO <sub>x</sub> , 6% NH <sub>3</sub>	18% PO <sub>4</sub> , 41% NO <sub>x</sub> , 9% NH <sub>3</sub>
<b>Photochemisches Oxidantienbildungspotential</b> [in kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äquivalent/t Batterien]	-4	-4	-3
<b>Zusammensetzung des photochemischen Oxidantienbildungspotentials</b>		69% SO <sub>2</sub> , 16% NMVOC, 7%NO <sub>x</sub> , 4% CO	71% SO <sub>2</sub> , 12% NMVOC, 4% CO
<b>Ressourcenverbrauch (abiotische Ressourcen mineralischen Typs)</b> [in kg Sb-Äquivalent/t Batterien]	-0,2	-0,3	-0,3
<b>Zusammensetzung des Ressourcenverbrauchs</b>		49% Cu, 24% Au, 6% Ag	41% Cu, 15% Au, 11% Ag
<b>Kumulierter Energieaufwand (erneuerbare und nicht erneuerbare Energie)</b> [in MJ/t Batterien]		-46.691	-55.281
<b>Zusammensetzung des Energieaufwands</b>		20% Erdöl, 19% Steinkohle, 17% Erdgas	21% Erdöl, 20% Steinkohle, 18% Erdgas

Quellen: Buchert et al. 2011, Buchert & Sutter 2016a, b

### 3.7 Unternehmenstrategien – Batteriezellhersteller und OEM

An der Fertigung der Batterien für Elektroautos sind in der Zulieferkette für die Batteriezellhersteller Unternehmen in der Rohstoffgewinnung ebenso wie Unternehmen, die Kathodenmaterialien, Anodenmaterialien, Elektrolyte und Separatoren herstellen, beteiligt. Führend sind dabei insbesondere in der Weiterverarbeitung der Rohstoffe zu den Batteriezellbestandteilen Unternehmen aus China, Japan, Südkorea und den USA. Europäische Unternehmen haben bisher in keinem der Bereiche ein global relevantes Produktionsvolumen erreicht (vgl. *Tabelle 23*).

Tabelle 23: Übersicht wichtiger Unternehmen in der Lieferkette für die Batteriezellproduktion

Produkt/Leistung	Wichtige Unternehmen
Lithiumabbau	Tianqi Lithium (China), Jiangxi Ganfeng Lithium (China), Albemarle (USA), SQM (Chile), Livent (USA)
Kobaltabbau	Glencore (Schweiz), China Molybdenum (China), Fleurette Group (Niederlande), Vale (Brasilien), Gécamines (Kongo)
Kathodenmaterialien	Umicore (Belgien), Reshine (China), L&F (Südkorea), ShanShanTech (China), Nichia (Japan), Sumitomo (Japan)
Anodenmaterialien	Hitachi Chemicals (Japan), BTR Energy (China), Nippon Carbon (Japan)
Elektrolyte	CapChem (China), Zhangjiagang Guotai-Huarong (GTHR) (China), Panax-Etec (Südkorea), Mitsui Chemicals (Japan), Ube (Japan)
Separatoren	Asahi Kasei (Japan), Toray (Japan), SK innovation (Südkorea), Celgard (USA), Entek (USA)

Quellen: Lebedeva 2016; Barrera 2019; Kay 2018

## Unternehmensstrategien Batteriezellhersteller

Momentan wird der globale Markt für Lithium-Ionen-Batteriezellen für Elektrofahrzeuge von Herstellern aus Japan, China und Südkorea dominiert. Für die weitere Entwicklung wird erwartet, dass die aktuell führenden Unternehmen ihre Marktposition gegenüber kleineren Zellherstellern zumindest kurzfristig weiter festigen werden, da sie aufgrund der starken Wachstumsprognosen zur Sicherung der Rohstoffversorgung verstärkt in die vorgelagerte Wertschöpfungskette investieren werden. Langfristig können jedoch auch kleinere (auch europäische) Firmen ein wettbewerbsfähiges Technologieniveau erreichen und durch innovative Wettbewerbsvorteile, z. B. einen starken Fokus auf Nachhaltigkeit (vgl. die schwedische Firma Northvolt) oder die Produktion von Feststoffbatterien (vgl. die französische Firma Bolloré) überzeugen (Berger 2018: 4, 16).

Insbesondere wird jedoch langfristig eine starke Marktdominanz der chinesischen Hersteller erwartet. So kündigten neben dem größten chinesischen Produzenten CATL auch weitere Hersteller aus China, u. a. BYD, CALB, Coslight und Lishen, an, ihre Kapazitäten deutlich zu erhöhen (NPE 2016: 9). Grund für das starke Wachstum der chinesischen Hersteller ist vor allem das protektionistische Vorgehen der chinesischen Regierung. So hat im Jahr 2015 das Ministerium für Industrie und Informationstechnologie erstmals eine Liste mit zertifizierten Batterieherstellern für Elektrofahrzeuge herausgegeben und die staatliche Subventionierung von Neuwagenkäufen auf Autos, die Batterien einer gelisteten Firma enthalten, beschränkt. Seit ihrer letzten Aktualisierung enthält die Liste 57 Hersteller, darunter ist jedoch kein einziges ausländisches Unternehmen. Außerdem wurde 2016 ein Mindestproduktionsvolumen von 8GWh jährlich für Batteriezellproduzenten auf dem chinesischen Markt vorgeschrieben, was lange nur von den chinesischen Firmen CATL und BYD erreicht werden konnte. Bei Nichterreichen dieser Vorschrift werden Fahrzeuge mit einer Batterie des entsprechenden Herstellers ebenfalls bei den staatlichen Subventionen nicht berücksichtigt. Auch durch die ausschließliche Subventionierung von Elektrobussen mit LFP Kathode wurden einheimische Hersteller, die die wesentlichen Produzenten dieser Technologie sind, weiter gestärkt. Da alle staatlichen Unterstützungsmaßnahmen jedoch im Jahr 2020 auslaufen werden, um den Wettbewerb und damit die tech-

nologische Entwicklung zu fördern, könnte sich bald auch der chinesische Markt für ausländische Produzenten öffnen (Holzmann 2018, Huang 2019, Kane 2016). Jedoch haben durch die bisherigen Maßnahmen mittlerweile fast alle OEM Verträge mit chinesischen Unternehmen unterzeichnet, um den chinesischen Markt beliefern zu können, was wiederum auch neue Expansionsmöglichkeiten für die chinesischen Firmen auch nach Europa birgt. So baut CATL aufgrund eines neu geschlossenen langjährigen Vertrages mit BMW aktuell ein neues Werk bei Erfurt und könnte damit der erste Batteriezellproduzent für Elektrofahrzeuge in Deutschland werden (Frese 2018). Den OEM ist jedoch auch das Risiko der Abhängigkeit von CATL bewusst und es werden Gegenmaßnahmen wie die Unterstützung chinesischer Konkurrenten und der Ausbau der Beziehungen mit japanischen und koreanischen Firmen nach Ende der Benachteiligung durch das chinesische Subventionierungsprogramm erwartet. Auch Zusammenschlüsse, wie beispielsweise ein gemeinsames Unternehmen zur Kobaltbeschaffung, wie es die japanischen Batteriezell- und Fahrzeughersteller Panasonic, Toyota und Honda planen, können der chinesischen Dominanz entgegen wirken (Elektroauto-News 2019a). Für das Jahr 2021 wird ein Marktanteil auf dem globalen Batteriezellmarkt von 30 % für LG Chem (Südkorea), 22 % für CATL (China), 21 % für Panasonic (Japan), 9 % für Samsung SDI (Südkorea), 4 % für BYD (China), 3 % für Lishen (China) und 2 % für SK Innovation (Südkorea) prognostiziert (Berger 2018: 7).

Wichtig für Batteriezellhersteller ist insbesondere die Sicherung der Rohstoffversorgung. Mögliche Maßnahmen, um die Abhängigkeit von Rohstoffpreisen zu verringern, umfassen die Entwicklung neuer Zelltechnologien mit höherer Energiedichte und reduziertem Rohstoffbedarf (z. B. – nahezu – kobaltfreie Batteriezellen) und die Einführung neuer Fertigungsprozesse mit geringeren Produktionskosten, um steigende Rohstoffkosten auszugleichen. Beide Strategien haben jedoch einen begrenzten langfristig vorbeugenden Effekt, da z. B. Preisanstiege bei anderen Rohstoffen im Zuge der zunehmenden Etablierung alternativer Technologien die Kosten wieder erhöhen können. Als wirksamste Strategie wird von den meisten Zellherstellern die Entwicklung einer vollständig integrierten Lieferkette angesehen, die durch kurzfristige Sicherungsgeschäfte ebenso wie durch langfristig angelegte Investitionen in Abbau- und Raffinationsprojekte umgesetzt werden kann (Berger 2018: 14 f.). Auch das Recycling der Traktionsbatterien wird von immer mehr Unternehmen berücksichtigt, es entstehen Kooperationen zur Ausbildung geschlossener Wertstoffkreisläufe und Forschungsprojekte zum Batterierecycling werden teils von den Firmen unterstützt (z. B. ist Samsung an AutoBatRec beteiligt) (Fraunhofer ISC 2018).

### **Unternehmensstrategien OEM (Fahrzeughersteller)**

Zu den aktuell führenden Fahrzeugherstellern, von denen die meisten bereits Elektroautos anbieten oder in Planung haben, gehören: BMW AG, Daimler AG, VW AG, Groupe PSA, Ford Motor Company, Nissan-Renault-Mitsubishi, Tesla, Hyundai Motor Group, Tata Motors, Volvo Group, General Motors, Toyota Motor Corporation, Honda Motor Company, Fiat Chrysler Automobiles und Mazda (Harendt et al. 2018). Für den chinesischen Markt spielen die chinesischen Firmen BYD und BAIC eine große Rolle.

Die Batteriemodule werden meist in eigener Produktion von den OEM aus den Batteriezellen hergestellt (Lebedeva 2016: 40). Zur Verringerung ihrer Abhängigkeit von Zulieferunternehmen in der Batteriezellfertigung können OEM im Wesentlichen zwei Strategien verfolgen: eine Möglichkeit sind Partnerschaften mit einem vereinbarten Sockel-Liefer-Volumen, welches bei Bedarf durch Eigenfertigung skalierbar ergänzt werden kann. Eine andere Möglichkeit ist der Aufbau einer im Wettbewerb

stehenden Zuliefererstruktur mit mehreren Partnern. Außerdem kann in eine eigene Zellfertigung investiert werden. Diese Option bietet die größte Unabhängigkeit, ist jedoch auch mit einem höheren Risiko aufgrund größerer Investitionen in F&E, Produktionswerke und Rohstoffe verbunden. Insgesamt ist eine Reduktion der Abhängigkeit der OEM von den Zellproduzenten eher schwierig (Berger 2018: 15). Verschiedene OEM wirken aber an Forschungsprojekten zu Batterierecycling mit, so ist zum Beispiel Daimler an AutoBatRec und LiBRi und VW an LithoRec beteiligt (Fraunhofer ISC 2018; Treffer et al. 2011; Kwade et al. 2012).

### **Europäische Initiativen**

Im Jahr 2017 wurde von der Europäischen Kommission die European Battery Alliance gegründet, die mehrere Ziele im Zusammenhang mit einer europäischen Batteriezellproduktion verfolgt. Wesentliche Ziele sind die Sicherung des Zugangs zu importierten Rohstoffen und zu Ressourcen in Europa, die Unterstützung europäischer Batteriezellproduktionen und europäischer Zulieferunternehmen, die Förderung von Nachhaltigkeit und Sicherheit der Batteriezellproduktionen, die Stärkung der führenden Position in der Industrie durch F&E, die Sicherstellung der Kompatibilität der Batteriezellproduktionen mit anderen EU Vorschriften und die Stärkung des Recyclings sowie die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft. Durch den Ausbau der innereuropäischen Industrie rechnet die EU so mit der Sicherung von 250 Milliarden Euro Umsatz im Batteriemarkt pro Jahr und vier bis fünf Millionen Jobs ab 2025. Allein die Deckung des Bedarfs innerhalb der EU benötigt nach Abschätzungen mindestens zehn bis 20 Großfabriken in der Batteriezellproduktion. Für die Umsetzung hat die EU einen strategischen Handlungsplan herausgegeben und stellt umfangreiche Fördermittel zur Verfügung (Europäische Kommission 2019).

Ein europäisches Projekt der Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Unternehmen zur Etablierung eines geschlossenen, nachhaltigen Lebenszyklus für Traktionsbatterien ist die 2018 vereinbarte Kooperation von Northvolt, BMW und Umicore. Wichtige Komponenten des Kreislaufs sind dabei ein recyclinggeeignetes Batteriedesign, eine Batteriezellproduktion unter Verwendung erneuerbarer Energien, die Nutzung der Batterien in Traktionsfahrzeugen, eventuelle second-life-Nutzungen und schließlich das Recycling unter Zuhilfenahme erneuerbarer Energien (Manthey 2018c).

## **3.8 Strategien anderer Wirtschaftsräume**

### **Führende Wirtschaftsräume der Elektromobilität**

Außerhalb Europas, wo insbesondere Frankreich und Deutschland starke Märkte darstellen, sind bislang China, die USA, Japan und Korea die führenden Märkte für Elektromobilität. Die europäischen Märkte nehmen insbesondere im Hinblick auf den technologischen Entwicklungsstand der Fahrzeuge nationaler OEM führende Rollen ein und investieren sowohl in absoluten Zahlen als auch gemessen am BIP am stärksten in F&E. In Bezug auf die regionale Wertschöpfung durch die Produktion von Komponenten und Fahrzeugen im Bereich der Elektromobilität liegen sie jedoch insbesondere aufgrund fehlender inländischer Zellfertigungsunternehmen zurück. Die Absatzzahlen von BEV und PHEV entwickeln sich jedoch in allen genannten Staaten positiv (Berger 2018: 4f.). Auch gibt es in allen genannten Staaten Ansätze zum Recycling der Traktionsbatterien (vgl. *Tabelle 24*).

**Tabelle 24: Beispiele für Recyclingunternehmen und -initiativen in den führenden Wirtschaftsräumen**

Land	Recyclingunternehmen/-initiativen
China	GEM Jingmen, Hunan Brunp Recycling Technology, Quzhou Huayou Cobalt New Material, Ganzhou Highpower Technology, Guangdong Guanghua Sci-Tech
Japan	4R Energy, Japan Auto Recycling Partnership
Korea	Jeju Technopark (Korea Battery Industry Association, Korea Automotive Technology Institute, Jeju National University)
USA	Retriev Technologies, OnTo Technology, American Manganese
Frankreich	z.B. Recupyl
Deutschland	z.B. Accurec

Quelle: Eigene Darstellung

## China

China ist aktuell der größte Markt für Elektromobilität und weist ein sehr starkes Wachstum auf. Im vergangenen Jahr war fast die Hälfte der weltweit über fünf Millionen angemeldeten Elektroautos in China zugelassen, allein 2018 kamen dort über eine Million Elektroautos auf die Straße. Der Markt für Elektroautos wuchs damit um 85 % gegenüber dem Vorjahr (McKinsey 2019). Mit dem Ziel, die chinesische Automobilindustrie gegenüber den insbesondere im Bereich Verbrennungsmotoren kompetenten ausländischen Herstellern zu stärken, die Abhängigkeit von Ölimporten zu verringern und die Luftverschmutzung vor allem in den Städten zu reduzieren, wurde Elektromobilität in China von staatlicher Seite bislang stark gefördert. So hatte die Regierung in Peking bereits 2016 ein fünfjähriges Förderprogramm für Autos mit alternativen Antrieben beschlossen. Ab 2020, wenn diese staatliche Unterstützung, die vor allem einheimischen Firmen Vorteile verschafft hat, auslaufen wird, rechnet die chinesische Regierung mit einem ausreichend starken Markt, der ohne finanzielle Anreize weiter wachsen soll. Durch den Wegfall der Subventionen soll dann der Wettbewerb und der technologische Fortschritt gefördert werden. Nur einige wenige große Firmen mit der höchsten Produktqualität sollen sich durchsetzen und der Gesamtmarkt damit gestärkt werden (Retzer 2018). Doch auch nach Ende der finanziellen Förderung wird der Ausbau der Elektromobilität nicht nur durch die gute Ladeinfrastruktur, sondern auch durch weitere Maßnahmen vorangetrieben. Seit Jahresbeginn 2018 sind in China 553 Automodelle mit hohem Benzinverbrauch verboten und seit Anfang 2019 muss von Fahrzeugherstellern mit einer Produktion von mehr als 30.000 Fahrzeugen im Jahr auf dem chinesischen Markt eine Elektrofahrzeugquote von 10 % eingehalten werden. Diese Vorgabe soll bis 2020 sogar auf 12 % steigen (Koch 2018).

Die nationale Rohstoffversorgung sichert China durch große Projektbeteiligungen im Ausland (für Lithium vor allem in Südamerika und Australien, für Kobalt im Kongo), langfristige Lieferverträge der einheimischen Firmen und treibt ebenso den Ausbau der nationalen Rohstoffproduktion voran. Acht

der 14 größten Kobaltminen im Kongo und damit fast die Hälfte der dortigen Produktion, die zwei Drittel des Weltmarktes ausmacht, ist in der Hand chinesischer Firmen. Allein in den vergangenen zwei Jahren hat China 4,2 Milliarden Dollar in Lithiumabkommen in Südamerika investiert. Doch insbesondere in Bezug auf Lithium besitzt China auch große eigene Reserven, die etwa 20 % des weltweiten Vorkommens ausmachen. So ist China in der Weiterverarbeitung der Batterierohstoffe führend und kontrolliert über 50 % der weltweiten Weiterverarbeitung von Kobalt und besitzt auch den größten Teil der weltweiten Lithiumverarbeitungsanlagen (Miningscout 2018, Chazan 2019, The Digital Times 2018, NPE 2018). Im Mai 2019 hat die chinesische Regierung verkündet, mit Hilfe eines neuen Verfahrens die Kosten für die Lithiumproduktion von einem durchschnittlichen internationalen Preis von 12.000 bis 20.000 Dollar pro Tonne auf knapp über 2.000 Dollar pro Tonne gesenkt zu haben (Elektroauto-News 2019b).

Die chinesische Regierung nimmt aber auch das Thema Batterierecycling bereits sehr ernst, insbesondere im Hinblick auf die Umweltauswirkungen der Entsorgung der Altbatterien, aber auch, um die Wertschöpfung aus dem Recycling zu nutzen. Schätzungen zufolge kann die Batterierecyclingindustrie 2020 bei 200.000 Tonnen Altbatterien bereits einen Wert von 6,5 Milliarden Yuan erreichen. Bis 2025 wird eine Steigerung auf 350.000 Tonnen Altbatterien erwartet (Min-hee 2018). Anfang 2018 wurde daher vom Ministerium für Industrie und Informationstechnologie gemeinsam mit anderen Regierungsabteilungen eine Übergangsregelung zum Batterierecycling beschlossen, welche Fahrzeughersteller zum Aufbau eines Batterierecyclingsystems und zur Vergabe von Recyclinggarantien beim Fahrzeugverkauf verpflichtet. Dabei müssen Lagerungs- und Transportstandards eingehalten werden und das Recycling soll im Sinne der Effizienz möglichst stark automatisiert erfolgen (Retzer et al. 2018).

In diesem Rahmen hat die chinesische Regierung auch ein Pilotprogramm zum Recycling von Traktionsbatterien gestartet, welches die Errichtung von regionalen Recyclingketten durch Kooperationen von Fahrzeugherstellern mit Batterieherstellern und Abfallhändlern fördern soll. Dafür wurden 17 Städte und Regionen ausgewählt, in denen die nachhaltige Verwertung von Batterien durch verschiedene Maßnahmen wie Steueranreize und Unterstützungen bei der Finanzierung erreicht werden soll. Außerdem wurde zeitgleich im August 2018 eine Rückverfolgungsplattform errichtet, bei der alle neuproduzierten Batterien mit einem Code registriert werden müssen, sodass ihr gesamter Lebenszyklus zurückverfolgt werden kann, was auch der Überprüfung der Einhaltung von Vorschriften dient (Tawaki Battery 2018). Zusätzlich wurden erste Industrierichtlinien bezüglich des Batterierecyclings vorgestellt, die eine weiße Liste von Recyclingfirmen, welche von der Regierung gesetzte Standards erfüllen, beinhalten. Aktuell sind dort fünf Firmen verzeichnet (GEM Jingmen, Quzhou Huayou Cobalt New Material, Ganzhou Highpower Technology, Guangdong Guanghua Sci-Tech and Hunan Brunp Recycling Technology). Die Liste soll gegebenenfalls erweitert werden. Die Firmen wurden anhand von Größe, Automatisierungsrate, Energieverbrauch, Umweltstandards, Ressourceneffizienz sowie sauberer und hocheffizienter Technologie ausgesucht. Insbesondere GEM und Brunp stehen in enger Partnerschaft mit BYD und CATL, den größten Batteriezellherstellern. Chinesische Recyclingfirmen setzen bisher vor allem auf Materialrecycling und weniger auf die Aufbereitung gebrauchter Batterien (Anzai 2019). Die Recyclinganlagen sollen jedoch nicht nur wertvolle Materialien recyceln, sondern auch übrige Abfälle besonders umweltschonend entsorgen. In Shenzhen, welches als Demonstrationsstadt für die Umsetzung der Übergangsregelung ausgewählt wurde, wurde bereits ein Recyclingsystem aufgebaut (Miningscout 2018; Chazan 2019; The Digital Times 2018).

## Japan

Japan liegt in Bezug auf den Absatz von Elektroautos auf dritter Stelle nach China und den USA auf einem ähnlichen Niveau wie Deutschland (Berger 2018: 8). Das hochtechnologisierte Land hat eine hohe Bevölkerungsdichte, aber wenige eigene Ressourcen und bemüht sich daher um eine abnehmende Abhängigkeit von Ölimporten (Scherf et al. 2016: 36). So sollen bis 2050 keine Autos mit Verbrennungsmotor mehr auf dem japanischen Markt zu finden sein (Elektroauto-News 2019a). Trotzdem setzen sich in Japan, obwohl japanische Firmen in vielen Bereichen der Elektromobilität führend sind, im Wesentlichen HEV durch. BEV und PHEV haben einen deutlich geringeren Marktanteil. Grund dafür ist unter anderem die hohe Bevölkerungsdichte in den Städten, wo kaum eine ausreichende Ladeinfrastruktur mit Stellplätzen für Elektroautos zur Verfügung gestellt werden kann und vor allem öffentliche Verkehrsmittel oder Car-Sharing-Fahrzeuge elektrisch betrieben werden (Tawaki 2018). Daher legt die japanische Regierung ihren Fokus verstärkt auch auf die Förderung der mehrheitlich von Toyota und Honda produzierten Brennstoffzellautos. Wasserstofftankstellen werden beispielsweise stark gefördert und die olympischen Spiele in Tokyo 2020 sollen als Plattform für die Demonstration des Potentials der Brennstoffzellautos dienen. Während Toyota den Markt für HEV dominiert, ist Nissan bisher der hauptsächliche Hersteller von BEV in Japan. In Bezug auf ausländische Märkte wurden japanische Hersteller jedoch auch durch die Einführung der Elektromobilitätsquote in China gezwungen, noch mehr in Elektromobilität zu investieren (Stark 2018). Als Testgelände für Elektromobilität fungiert in Japan die Insel Goto (Tawaki Battery 2018).

Im Hinblick auf Recycling wurde in Japan kürzlich unter Leitung der von der Automobilindustrie gegründeten Organisation „Japan Auto Recycling Partnership“ ein Projekt zur Errichtung von Batterierecyclingsanlagen in den sieben Präfekturen Hokkaido, Akita, Ibaraki, Aichi, Okayama, Hiroshima, und Yamaguchi gestartet. Das Projekt wurde von den Ministerien für Wirtschaft, Handel und Industrie und dem Verband der japanischen Automobilhersteller initiiert und wird von den Fahrzeugherstellern über Outsourcinggebühren an die „Japan Auto Recycling Partnership“ finanziert. Grund dafür sind die neu eingeführten Regeln zum Recycling von Traktionsbatterien, die die umweltschädigende Wirkung der Batterieentsorgung reduzieren sollen und die Fahrzeughersteller für das Recycling der Batterien verantwortlich machen. Der Zusammenschluss der Hersteller soll die dabei ankommenden Kosten durch die Verteilung auf viele Träger für die einzelnen Firmen reduzieren (Werwitzke 2018; Loughran 2018).

Außerdem wurde 2018 die Errichtung einer Recyclinganlage in Namie, die von der 4R Energy Corporation (Joint Venture von Nissan und Sumitomo) betrieben werden wird, bekannt gegeben. Die neue Recyclinganlage wird die erste neue Fabrik in der beim Erdbeben und Tsunami 2011 zerstörten Region nördlich von Fukushima sein und soll die lokale Wirtschaft wiederbeleben. Dort werden alte Batterien des Herstellers so verarbeitet, dass Batterien, die noch eine Restkapazität von über 80 % aufweisen, zu Ersatzbatterien für Elektrofahrzeuge aufbereitet werden und Batterien mit geringerer Restkapazität einer second-life-Nutzung beispielsweise in Straßenlaternen, Gabelstaplern oder kleineren elektrischen Fahrzeugen zugeführt werden. Dazu sollen Batteriepacks aus einzelnen Modulen neu zusammengestellt werden. Nach der Nuklearkatastrophe in Fukushima 2011 werden Altbatterien von Elektroautos außerdem auch als Speicher für lokal generierte erneuerbare Energie zum Aufbau eines dezentralisierten Energieversorgungssystems verwendet. Auch das Recycling wertvoller Materialien ist, eventuell in Partnerschaft mit einem anderen Unternehmen, für die Zukunft geplant. Die Anlage hat eine jährliche Kapazität von 2.250 Batteriemodulen und soll zunächst nur einige hundert Module

jährlich verarbeiten. Dazu wurde seit der Gründung von 4R Energy 2010 eine Technologie entwickelt, die besonders schnell innerhalb weniger Stunden den Zustand der alten Batterien und einzelner Komponenten bestimmen kann (Manthey 2018b).

## **Korea**

In Korea werden deutlich weniger Elektroautos verkauft als in Deutschland (Berger 2018: 8). In dem hochtechnologisierten Land wurden zwar bereits die Grundlagen für Elektromobilität durch den Ausbau der Ladeinfrastruktur gelegt, doch noch sind keine hohen Absatzzahlen zu verzeichnen. Südkorea nutzt die Insel Jeju als Testgelände für Elektromobilität und strebt dort die vollständige Umstellung auf Elektromobilität und vollständige CO<sub>2</sub>-Neutralität bis 2030 an (Su-a 2017). Auch in der Hauptstadt Seoul ist der Ausbau der Elektromobilität geplant (Scherf et al. 2016: 43 f.). Eine erste Recyclinganlage für EV-Batterien wird gerade auf der Insel Jeju im Jeju Technopark bis 2020 gebaut. Anfang nächsten Jahres soll der Betrieb beginnen. Beteiligt sind unter anderem die Korea Battery Industry Association, das Korea Automotive Technology Institute und die Jeju National University. Das Vorhaben wird vom Ministerium für Handel, Industrie und Energie unterstützt und von den nationalen sowie lokalen Regierungen und aus dem privaten Sektor finanziert. Auch Forschung soll in der Anlage betrieben werden (Manthey 2018b).

## **USA**

In den USA ist die Verantwortlichkeit für das Recycling von Altbatterien aus Elektrofahrzeugen durch die einzelnen Bundesstaaten geregelt. Eines der weltweit führenden Recyclingunternehmen, Retrieval Technologies, ist in den USA und in Kanada tätig und betreibt dort auch Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu modernen Recyclingprozessen, ebenso wie die Firma OnTo Technology (Lebedeva 2016: 60). Auch neue Firmen drängen in den USA auf den Markt, z. B. das amerikanische Unternehmen American Manganese, welches Ende 2018 ein Patent für sein Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien erhalten hat (American Manganese 2018). Außerdem hat das Department of Energy Anfang des Jahres angekündigt, 20,5 Mio. Dollar in Li-Io-Batterie Recycling zu investieren. Das Ziel ist dabei, die Rückgewinnungsraten für Wertmaterialien von 5 % auf über 90 % zu steigern. 15 Mio. Dollar sollen dafür über drei Jahre in den Aufbau eines neuen Forschungs- und Entwicklungszentrums für das Recycling von Lithium-Ionen Batterien, des sogenannten ReCell Center, fließen, welches in Partnerschaft mit dem Argonne National Laboratory, dem National Renewable Energy Laboratory und dem Oak Ridge National Laboratory sowie zahlreichen Universitäten betrieben werden wird (Taylor 2019). Die übrigen 5,5 Mio. Dollar werden als Preisgeld für die Entwicklung von Lösungen für Sammlung, Sortierung, Lagerung und Transport von Lithium-Ionen Batterien für das Recycling verwendet. Der Wettbewerb findet in drei Runden statt und soll den gesamten Prozess von der Entwicklung eines Geschäftskonzepts bis zu Errichtung und Test einer Pilotanlage abdecken. Die Ziele dieser Fördermaßnahmen sind insbesondere Wirtschaftswachstum, Verbesserung der Energieversorgungssicherheit und die Reduktion der Umweltbelastung (U.S. Department of Energy).

In Bezug auf die Rohstoffsicherung stehen die USA vor allem in der Lithiumproduktion unter dem Konkurrenzdruck aus China. Jüngst wurde über eine Gesetzgebung zur Förderung des inländischen Abbaus von Lithium und anderen in Elektrofahrzeugen benötigten Materialien und den Ausbau einer nationalen Lieferkette beraten (Elektroauto-News 2019b).

## 4 Diskussion: Batterierecycling als industrielle Perspektive für die Lausitz?

Welche Chancen die Entscheidung für das Recycling von Traktionsbatterien bietet und mit welchen Risiken sie verbunden wäre, wird nachfolgend unter Rekurs auf endogene Potentiale der Lausitz diskutiert. Dazu erfolgt die zusammenfassende Darstellung technologischer Entwicklungen im Bereich der Elektromobilität, die im Verbund mit dem regulierenden Gesetzesrahmen die Relevanz der Entstehung eines Marktes für das Altbatterie-Recycling begründen. Unter Bezugnahme auf den mittelfristigen, mit dem Ausstieg aus der fossilen Energiewirtschaft korrespondierenden Planungshorizont, werden anschließend Prozesse und Verfahren des Batterierecyclings sowie die zu ihrer Durchführung erforderlichen Kernkompetenzen anhand eines für ein Recyclingwerk exemplarischen Wertschöpfungssystems aufgezeigt und Innovationspotential bergende Aspekte verdeutlicht. Diese Vorgehensweise ermöglicht, zukünftige Beschäftigungseffekte abzuleiten und deren Kompatibilität mit der Qualifikationsstruktur der Lausitzer Beschäftigten abzugleichen. Angeknüpft wird dabei an den übergreifenden Konsens der aktuellen Diskurse, wonach die Lausitz auch nach dem Braunkohleausstieg als Industrie- und Energieregion zu erhalten sei.

### 4.1 Marktentstehung

Wie dargelegt, stellen die gesetzlichen Vorgaben zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen insbesondere die deutschen Braunkohlereviere und die Automobilbranche im Rahmen der Energie- und Mobilitätswende vor massive Herausforderungen. Um die eingegangenen Verpflichtungen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen zu erreichen, scheint die breite Einführung der Elektromobilität geboten und Tendenzen zur Ablösung des Verbrennungsmotors durch elektrische Antriebe lassen sich bereits weltweit beobachten.

Für jede Art der Elektromobilität werden Batterien benötigt, wobei deren Art und Größe (Kapazität) jeweils von der Fahrzeugklasse, der konkreten Technologiekombination und der Marktdurchdringungsrate abhängig sein werden. Eine quantitative Voraussage zur mittelfristigen Marktentwicklung kann gegenwärtig nur unter Unsicherheiten getroffen werden. Gemäß optimistischer Szenarien über den Markthochlauf und im Hinblick auf nationale wie europäische Gesetzesvorgaben ist der Technologiepfad Elektromobilität aber als eingeschlagen zu begreifen, was mittelfristig zu hohen Anteilen von Verbrennungsmotor-Hybrid-Modellen (FCEV) und rein elektrischen Fahrzeugen (BEV) an den PKW-Neuzulassungen führen wird. Daraus erwächst, mit einem der Batterielebensdauer entsprechenden zeitlichen Versatz, ein relevantes Aufkommen an Altbatterien. Für den Zeitraum bis 2030 ist zudem absehbar, dass Lithium-Ionen-Batterien in mobilen Anwendungen die (mit deutlichem Abstand) den Markt dominierende Batterietechnologie im kommerziellen Bereich darstellen werden. Verbaut werden Lithium-Ionen-Batterien in FCEV und BEV darüber hinaus bereits seit mehreren Jahren (vgl. Kapitel 3).

Aufgrund des Nachfragewachstums nach Traktionsbatterien, steigt auch der Bedarf an den zu ihrer Herstellung erforderlichen strategischen Rohstoffen. Entsprechend dem aktuellen technologischen Entwicklungsstand zählen dazu insbesondere Lithium, Kobalt, Nickel und Graphit. Mengenmäßig spielt Lithium dabei die größte Rolle. Bereits rein rechnerisch ist die technologisch erreichbare Primärverfügbarkeit vieler Rohstoffe (insbesondere von Lithium) bei den unterstellten Bedarfen als kri-

tisch einzuschätzen. Gegenwärtig bestehen mitunter erkennbare Lieferengpässe, die politisch-strategisch bedingt sein können oder sich damit begründen lassen, dass die erforderlichen Verfahren zur Förderung und Aufbereitung der benötigten Ressourcen für die Batterie(zell)herstellung mit der dynamischen Nachfrageentwicklung kaum Schritt halten.

Die natürliche Ressourcen verzehrenden, industriellen Strukturen der Batteriezellfertigung für die Elektromobilität werden deshalb möglichst weitgehend in Kreislaufwirtschaftsprozessen zu organisieren sein. Das wirtschaftspolitische Ziel, europäische Industrien von den Rohstoffmärkten volatiler Wirtschaftsräume unabhängiger zu machen, kann – neben der Endlichkeit der Rohstoffe, zu erwartender Lieferengpässe und dem Anspruch, eine nachhaltigere Wirtschaftsweise zu etablieren – als weiterer Treiber für den Aufbau von Recyclingkapazitäten betrachtet werden.

Wichtig im Kontext der Errichtung eines Recyclingwerkes für Altbatterien ist schließlich auch die unbedingte Einhaltung der entsprechenden Umwelt- und Naturschutzanforderungen, da toxische Materialien transportiert, gelagert und auf den Produktionsflächen be- bzw. weiterverarbeitet werden. Mit der Etablierung einer (innereuropäischen) Kreislaufwirtschaft würde das Recycling von Altbatterien durch die effizientere Ressourcennutzung dazu beitragen, den gesetzlichen Vorgaben zur Vermeidung und Verminderung der Produktion von Giftmüll zunehmend gerecht zu werden.

Allerdings ist der Aufbau industrieller Recyclingkapazitäten vergleichsweise kapitalintensiv. Zu treffende Investitionsentscheidungen bedingen erheblichen zeitlichen Vorlauf. Sie können (strukturell bedingt) auch nicht allein durch die regional ansässige KMU-Landschaft gestemmt werden. Wohl aber könnten bestehende und sich neu ansiedelnde KMU von der Standortentscheidung für ein Recyclingwerk in der Lausitz profitieren. Etwa indem sie neue Geschäftsfelder erschließen und zukünftig nachgefragte Kernkompetenzen ausbilden, bspw. im Zuge der Schaffung von Kooperationen mit Batteriezellherstellern, der Automobilbranche (u. a. VW Zwickau als Modellproduktionsstandort batteriegetriebener Autos in relativer räumlicher Nähe), über die Zuführung der Recyclinggüter bis hin zur Weiterverwertung der Altbatterien. Lausitzer Unternehmen knüpfen hier schon heute an bestehende technologische und energietechnische Kompetenzen an und erweitern diese, auch in Kooperation mit regionalen Wissenschaftseinrichtungen wie der BTU Cottbus-Senftenberg.

Die Verfügbarkeit von Altbatterien ist, neben der Technologiebeherrschung, ein entscheidendes Kriterium für unternehmerisch erfolgreiche Recyclingaktivitäten (vgl. Kapitel 3.3). Zur Sicherung der Auslastung und im Sinne späterer Erweiterungsoptionen sollten daher zusätzlich zur batteriegetriebenen Automobilität auch weitere mögliche Altbatterieaufkommen (z. B. Kleinmobile, second-life-Batterien) als Bezugsquelle in Betracht gezogen werden. Es wäre auch zu prüfen, ob der Aufbau eines eigenen Sammelsystems besonders aussichtsreich ist oder einer Zuführlogistik in Kooperation mit Partnern entlang der Wertschöpfungskette der Vorzug zu geben wäre. In jedem Fall würde die Zulieferung gebrauchter Altbatterien (Sicherung der „Rohstoffversorgung“ eines Recyclingwerks) durch Verabredungen mit Batterieherstellern oder Altbatterie-Sammelstellen im Vorfeld einer Standortentscheidung verbindlich zu vereinbaren sein. Neben der Berücksichtigung von Interessen der Fahrzeugproduzenten und einer Evaluation von bereits am Markt bestehenden Sammelsystemen gilt es hier gegenwärtig, gesetzgeberische Initiativen abzuwarten.

**Exkurs: Rechtliche Situation des Batterierecyclings in Deutschland**

nationales Gesetz	Einführungszeitpunkt der aktuellen Fassung	zugehörige EU-Richtlinie	Vorschrift
Altfahrzeugverordnung (AltfahrzeugV)	2002	2000/53/EG	Definiert auf Altfahrzeuge bezogene Zielvorgaben für Wiederverwendung und Verwertung sowie weitere Pflichten
Batteriegelgesetz (BattG)	2009	2006/66/EG 2008/12/EG	Klassifiziert Traktionsbatterien als Industriebatterien und definiert Rücknahmepflichten der Hersteller.
Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)	2012	2008/98/EG Waste Framework Directive	Definiert den Abfallbegriff und priorisiert Verwertungsverfahren
Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB)	2016	2008/68/EG	Regelt den nationalen und internationalen Transport von Gefahrgut (wie etwa Lithium-basierten Traktionsbatterien) und bestimmt Rollen und Pflichten der Beteiligten
Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR)	2017	2008/68/EG	Detailliert Anforderungen an den nationalen und internationalen Transport und verweist auf zu erfüllende Testanforderungen

Quelle: Becker 2019

Im Zentrum der rechtlichen Rahmenbedingungen für das Recycling von Li-Io-Batterien in Deutschland steht das Batteriegelgesetz, das die EU-Richtlinien 2006/66/EG und 2008/12/EG umsetzt. Ziel ist es, Umweltauswirkungen von Altbatterien zu minimieren und Regeln für den Umgang mit Altbatterien und deren Sammlung, Recycling und Entsorgung zu definieren. Lithium-Ionen-Batterien werden nicht einzeln aufgeführt, aber für die vorgeschriebenen Sammelraten zu den „industrial batteries“ gezählt und für die Recyclingraten den „other waste batteries“ zugeordnet. Die Entsorgung von Batterien auf Mülldeponien oder in Müllverbrennungsanlagen ist untersagt.

Außerdem wird das Extended Producer Responsibility Prinzip (EPR) eingeführt, welches den Produzenten mit dem Umgang mit der Batterie am EoL verantwortlich macht. Häufig werden dafür gemeinsame Verfahren mit einer Producer Responsibility Organisation (PRO) in Anspruch genommen. Dies sind Organisationen, die den Umgang mit dem Abfall der Produzenten gegen Gebühren übernehmen (z. B. Rebat-System der CCR AG oder Öcorecell). Die Altfahrzeugverordnung schreibt zudem die Wiederverwendung oder das Recycling von 85 Gewichtsprozent eines Fahrzeuges vor und seit 2016 gibt es eine gesetzlich vorgeschriebene Sammelquote für Batterien von 45 %.

Die EU-Batterierichtlinie speziell für Antriebsbatterien der Elektromobilität wird aktuell weiterentwickelt, auch um auf diese Weise spezifische Recyclingraten für Rohstoffe wie Lithium, Kobalt, Nickel und Graphit festzuschreiben. Die aktuell gültige EU-Batterierichtlinie, die das Recycling regelt, stammt aus dem 2006 und wird aktuell überarbeitet.

Der zweite Bericht der EU-Kommission zur Batterierichtlinie sieht vor, diesen EU-Rechtsakt aus dem Jahr 2006 daraufhin zu prüfen, ob er den aktuellen Entwicklungstrends noch gerecht wird. In Beurteilung der Auswirkungen auf Umwelt und Binnenmarkt sowie der Bewertung der bisherigen Umsetzung der Batterie-Richtlinie kommt die EU-Kommission zu dem Schluss, dass ihre Ziele – wie Sammlung von Altbatterien und Effizienz der stofflichen Verwertung – aufgrund der nun festgestellten Unzulänglichkeiten verfehlt wurden. Der Richtlinie mangle es an Relevanz bei Aspekten wie Kreislaufwirtschaft, Klimazielen und im Hinblick auf den technologischen Fortschritt. Lithium-Ionen-Batterien fallen zwar bereits unter die Richtlinie, sind aber nicht gesondert kategorisiert. Ebenso blieb die second-life-Thematik bislang ganz ausgespart. Die Bestimmungen über die Einrichtung von Sammelsystemen sind unzureichend, die erweiterte Herstellerverantwortung ist nur ungenügend definiert.

Der dem Bericht beigefügte „Strategische Aktionsplan für Batterien“ sieht deshalb eine Novellierung auf Basis der Richtlinie vor. Die Erkenntnis zur Notwendigkeit eines Übergangs in die Kreislaufwirtschaft, die mittlerweile vorgegebenen Reduzierungen von CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Initiative der „Europäischen Batterie-Allianz“, die auf Schaffung einer EU-Batterie-Wertschöpfungskette abzielt, müssten Berücksichtigung finden, so die Empfehlung.

In den kommenden Jahren werden die bereits bestehenden Kapazitäten für das Recycling anfallender Altbatterien von Elektrofahrzeugen zunächst ausreichen, weshalb umgehende kapital- und zeitintensive Großinvestitionen in einen neuen Standort zumindest fraglich scheinen. Die Inbetriebnahme eines industriell ausgelegten Batterie-Recyclingwerkes mit signifikanter Arbeitsplatzrelevanz ist deshalb frühestens ab dem Jahr 2030 zu erwarten.

Gemäß Prognosen der EU-Kommission<sup>32</sup> wird allerdings davon ausgegangen, dass zukünftig rund 800.000 Tonnen Batterien jährlich für die Elektrifizierung von Autos nach Europa importiert werden. Diese gilt es schließlich zu recyceln. Um die Bedeutung dessen für einen potentiellen Recycling-Arbeitsmarkt zu verdeutlichen, sei an dieser Stelle auf folgende Relation verwiesen: Das belgische Recyclingunternehmen Umicore erwartet, dass die Zahl der Elektrofahrzeuge auf den Straßen weltweit im Jahr 2030 etwa 40-mal höher sein wird als im Jahr 2017. Entsprechend wird eine massive Erweiterung der derzeitigen Recyclingkapazitäten von 7.000 Tonnen Altbatterien vorbereitet, was auch entsprechende Beschäftigungseffekte nach sich ziehen wird (Elektroauto-News 2018).

Frühestens 2020 sind im Zuge einer Novellierung der EU-Batterierichtlinie Konkretisierungen zu Fragen der Hersteller-Rücknahmeverpflichtung von Altbatterien, zur Etablierung von Sammelsystemen und obligatorischen Recyclingquoten für die in Traktionsbatterien verwendeten Rohstoffe zu erwarten. Von einer zukünftig strengeren Regulierung und einer Implementierung in nationales Recht ist (aus o.g. Gründen) ebenso auszugehen wie davon, dass Eingaben der Europäischen Batterie-Allianz (EBA)<sup>33</sup> berücksichtigt werden. Dem Grunde nach wäre damit die Verfügbarkeit von Altbatterien, als

---

32 Vgl. European Commission (2019): Environment. Batteries & Accumulators. Online: <https://ec.europa.eu/environment/waste/batteries/>.

33 Vgl. Europäische Kommission (15.10.2018): Europäische Batterie-Allianz: Große Fortschritte beim Aufbau einer europäischen Batterieproduktion nach nur einem Jahr. Pressemitteilung. Online: [https://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-18-6114\\_de.htm](https://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-6114_de.htm).

Ausgangsprodukt für ein Traktionsbatterie-Recyclingwerk, rechtlich garantiert und neben ökologischen würden auch ökonomische Anreize für Investitionen gesetzt.

## 4.2 Wertschöpfungskette

Nachfolgend wird die Wertschöpfungskette (WSK) industriellen Recyclings von Traktionsbatterien dargestellt (vgl. *Abbildung 5*). Sie ist (hier exemplarisch) unterteilt in die dem Recycling vor- und nachgelagerten und die zusätzlich als Querschnittsaufgaben identifizierten Aktivitäten sowie das Recycling selbst.

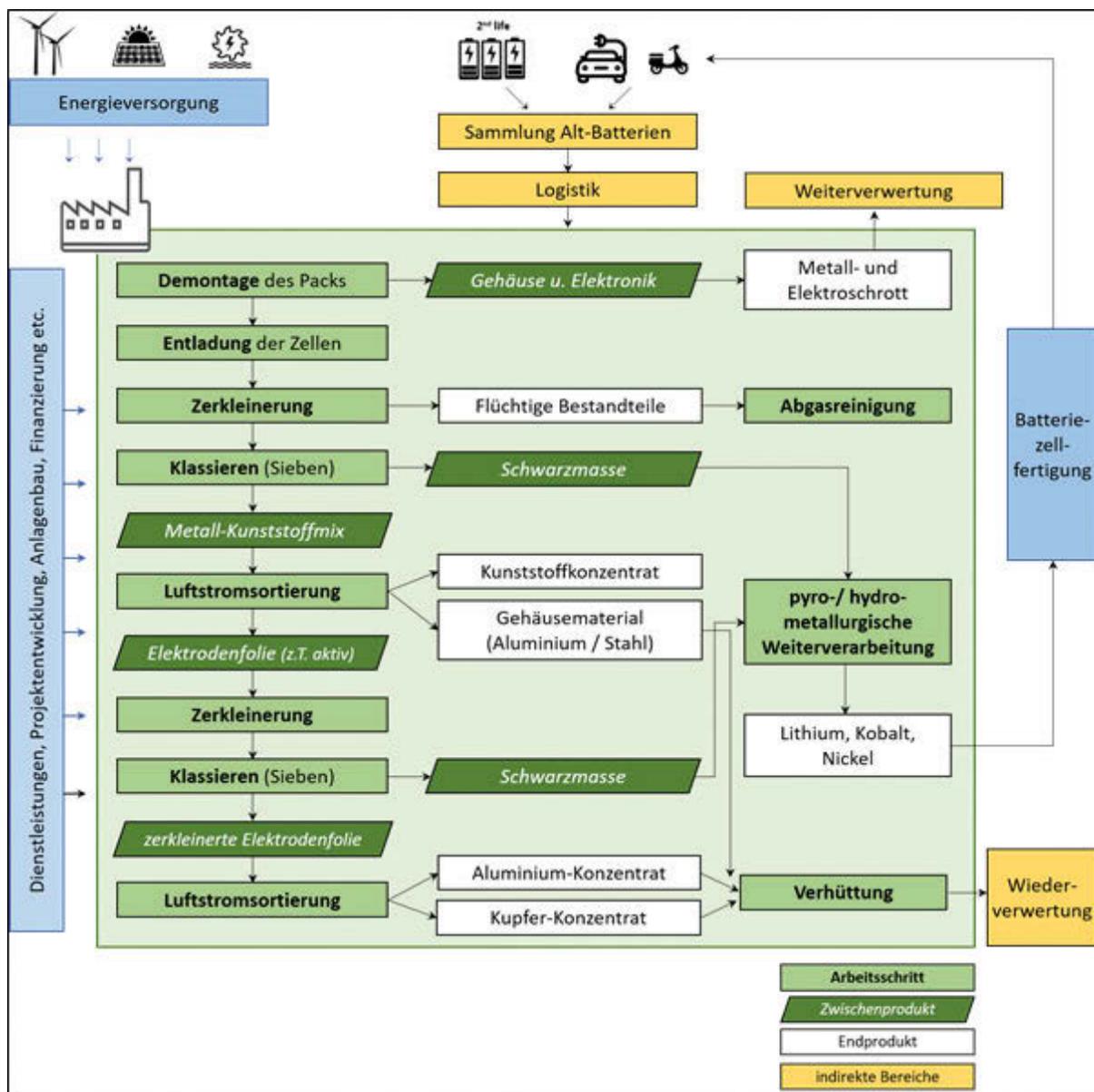
Zu den Prozessen, Technologien, Verfahren und Produkten der Wertschöpfungskette vor dem Recyclingwerk zählen zunächst der Ausbau der Altbatterien aus den Elektro(auto)mobilen, ihre Sammlung und die Prüfung der Traktionsbatterien im Hinblick auf eine mögliche second-life-Nachnutzung. Mittels eines logistischen Zuführsystems würde anschließend die Anlieferung der für das Recycling vorgesehenen Altbatterien von den verschiedenen Sammelstandorten in ein Umschlaglager erfolgen, von wo aus die Recyclingware dem Werk zugestellt wird.

Im Recyclingwerk selbst findet zunächst die Demontage statt, bei der Gehäuse und Elektronik von der Batterie getrennt werden. Da der Standardisierungsgrad von Lithium-Ionen-Batterien im Bereich der kommerziellen Anwendungen der Elektromobilität noch sehr gering ist, ist dies aus Kosteneffizienzpunkten derzeit noch vorwiegend manuell zu bewältigen. Hier bleibt abzuwarten, ob im Bereich der Fertigung von (Traktions-)Batterien aufgrund ökonomischer Erwägungen zeitnah Standardisierungsprozesse stattfinden<sup>34</sup> oder ob sie im Zuge regulatorischer Maßnahmen durchgesetzt werden, was den Bereich der Demontage stärker automatisieren könnte. Damit würde gleichzeitig zur Reduzierung des hohen Gefahrenpotentials für Beschäftigten beigetragen, was daraus resultiert, dass die zu demontierenden Batterien nicht vollständig entladen sind.

Die demontierten Zellen der Li-Io-Batterien müssen dann vor der pyro- oder hydro- und metallurgischen Weiterverarbeitung (grundsätzlich wäre auch ein mechanisches Verfahren zur Weiterverarbeitung möglich) vollständig entladen, zerkleinert und gesiebt (klassiert) werden. Die aus der Schwarzmasse wiedergewonnenen Rohstoffe Lithium, Kobalt und Nickel können dann erneut der Batteriezellfertigung zugeführt oder für andere Verwendungszwecke zur Verfügung gestellt werden. Aussortierte Kupfer- und Aluminiumkonzentrate sind zu verhütten, um sie als Rohstoffe wieder zu verwerten.

<sup>34</sup> VW etwa möchte seinen Modularen „E-Antriebs-Baukasten“ als Industriestandard etablieren und bietet ihn deshalb auch Wettbewerbern zur Nutzung an (Volkswagen AG 2019); Handelsblatt 30.01.2019.

Abbildung 5: Wertschöpfungskette Batterierecycling



Quelle: Eigene Darstellung IMU-Institut nach Gellner et al. (2015)

Neben dem Recycling des auch anfallenden Elektro- und Metallschrotts lässt sich dessen Aufbereitung, Verkauf und seine Wieder- bzw. Weiterverwertung innerhalb des Wertschöpfungs-systems den Prozessen und Produktionsschritten zurechnen, die vor bzw. nach dem eigentlichen Recyclingprozess wiederum außerhalb des Werkes stattfinden. Zusätzlich sind als Bestandteile eines Recycling-Wertschöpfungs-systems industriellen Maßstabs die Energieversorgung, die F&E-Abteilungen und die (unternehmensnahen) Dienstleistungen als Querschnittsaufgaben auszumachen.

Da beim Recycling von Altbatterien nach heutigem Kenntnisstand metallurgische Verfahren ein wesentliches Prozesselement bilden, gehört Batterierecycling zu den energieintensiven Industrien. Auch diese stehen grundsätzlich vor der Herausforderung, auf CO<sub>2</sub>-freie Fertigungsprozesse umzu-

stellen. Mit der Errichtung von Batterierecycling-Kapazitäten würde also zugleich angeknüpft an die traditionelle Rolle der Lausitz als Energielieferant, denn die für die Recyclingprozesse erforderliche Energie aus erneuerbaren Quellen in der Region zu generieren und bereitzustellen, wäre eine weitere, zukunftsweisende Entwicklungschance.

Die Lausitz bietet beschäftigungsseitig, natur- und kulturräumlich sowie industrie-historisch hohes Potential, um neue Technologien erstmals großtechnisch einzusetzen. Vorteilhaft und von großem Wert ist die bereits vorhandene, auf den Energiesektor zugeschnittene Netzinfrastruktur – vor allem für Unternehmungen mit hohem Energieverbrauch (wie Batterierecycling) und im Bereich der Entwicklung von Energieerzeugungsanlagen und Energietechnologien. Zudem weisen die Tagebaufolgelandschaften hohes Flächennutzungspotential auf. Teile der Bestandsanlagen zur Energieproduktion und -speicherung ließen sich ebenso wie die Netze künftig weiter- und alte Industriestandorte umnutzen. Mit dem zusätzlichen Ausbau der regionalen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien sowie dem Einsatz von Speichertechnologien könnten die Bedarfe neuer Industriestandorte gedeckt und ggf. auch Bedarfsspitzen ausgeglichen werden.

Entsprechend dem gegenwärtigen Entwicklungsstand des Batterierecyclings ist davon auszugehen, dass Investitionen in Produkt- und Verfahrensinnovationen fortwährend von hoher Bedeutung sein werden, vor allem was die Standardisierung von Prozessen betrifft. Innovationspotentiale leiten sich aus den Fortschritten in der Batteriefertigung – u. a. im Hinblick auf materialrelevante Zielgrößen in der Batterieforschung (u. a. Reduzierung Gewicht, Reduzierung Einsatz Metalle und seltene Erden) – ab. Innovationsbedarfe bestehen in den Bereichen der (Weiter-)Entwicklung der Verarbeitungsfähigkeit der Altbatterien, in Bezug auf den Automatisierungsgrad im Zusammenhang mit der Demontagegeschwindigkeit oder bei der Nachnutzung (von Bestandteilen) von Traktionsbatterien im Zuge eines second-life-Cycles u.a.m.

Systemische Fragestellungen könnten darauf abstellen, welche Möglichkeiten der Produktdiversifizierung und der Technikintegration bestehen oder wie eine Steigerung der Umweltverträglichkeit und Verbesserung der Öko-Bilanzen des gesamten Recyclingprozesses realisierbar wäre. Neue (Li-Io) Batterietechnologien erfordern dann wiederum ihnen nachgelagerte, anzupassende Recyclingtechnologien. Batterierecycling ist deshalb als bedeutsamer Standortfaktor zur Herstellung von Wettbewerbsfähigkeit bewertbar, da es sich positiv auf die Innovationskraft der Region auswirken und mit einer tendenziell erhöhten F&E-Personalintensität einhergehen würde. Dies auch zugunsten der Schaffung qualitativ hochwertiger Arbeitsplätze, um dem Abbau industrieller Beschäftigungsverhältnisse (im Zuge des Kohleausstiegs) etwas entgegenzusetzen.

### 4.3 Beschäftigungseffekte

Traktionsbatterierecycling schafft neue Arbeitsplätze in der Industrie und in F&E. Um abzuleiten, in welchen Bereichen direkte, indirekte und induzierte Beschäftigung entsteht, wird ausgehend von gegenwärtig am Markt tätigen Recyclingunternehmen und unter Rekurs auf die einschlägigen Analysen betrachtet, welche Tätigkeitsbereiche sich den einzelnen Prozessen und Verfahren entlang der Wertschöpfungskette auf dem Gebiet des Batterierecyclings zuordnen lassen und in welchem Verhältnis sie nachgefragt werden. Demnach ist absehbar, dass etwa 80 % aller Tätigkeiten im Bereich der Logistik und Sammlung sowie der Demontage der Altbatterien und rund 20 % im Bereich des Recyclingprozesses selbst angesiedelt sein könnten (vgl. *Tabelle 25*).

Tabelle 25: Tätigkeitsfelder industriellen Batterierecyclings entlang der Wertschöpfungskette

Beschäftigungsart	Hauptsächliche Tätigkeiten	Anteil an allen Tätigkeiten
Direkte Beschäftigung	Demontage, Entladung, pyro-/hydro-/ metallurgische Weiterverarbeitung, Verhüttung und Waschung	ca. 20%
Indirekte Beschäftigung	Logistik; Sammlung, Elektro- und Metallschrottreycling, Aufbereitung, Verkauf, Wieder-/Weiterverwertung	ca. 80%
Induzierte Beschäftigung	Dienstleistungen, Verwaltung (steigende Steuereinnahmen und Kaufkraft)	

Quellen: Umicore Deutschland. Online: <https://www.umicore.de/de/karriere/>; Duesenfeld GmbH. Online: <https://www.duesenfeld.com>; Buchert / Sutter 2016; TU Braunschweig 2017.

Direkte Beschäftigung entsteht im Recyclingwerk in den Bereichen der Demontage, bei der aufwendigen Prüfung der Altbatterien und der anspruchsvollen Zellentladung. Zudem bei der pyro- bzw. hydrologischen und metallurgischen Weiterverarbeitung sowie in Verhüttung und Waschung. Bemerkenswert ist, dass sich hier deutliche Zuwächse in hochqualifizierten Tätigkeitsbereichen in der F&E ergeben dürften: Da es sich um eine Zukunftstechnologie handelt, stellen die Weiterentwicklung und Standardisierung der Prozesse und Verfahren in diesem Zusammenhang ein relevantes Tätigkeitsfeld dar.

Indirekte Beschäftigung entsteht vorwiegend in den Tätigkeitsfeldern der Logistik und Sammlung, wo etwa Personal für ein Umschlaglager der gebrauchten Lithium-Ionen-Batterien benötigt wird. In den Bereichen des Elektro- und Metallschrott-Recyclings, bei der Aufbereitung der recycelten Materialien, ihres Verkaufs und der Wieder- bzw. Weiterverwertung der Rohstoffe (im Sinne einer Kreislaufwirtschaft bspw. neuerlich in der Batteriezellfertigung) entstehen Industriearbeitsplätze. Die Weiterverwertung und das Recycling der weiteren Batteriekomponenten (Gehäuse und Elektronik) werden als ebenfalls relevant für die Schaffung von Arbeitsplätzen innerhalb der neuen Wertschöpfungskette angenommen. Weitere Beschäftigungseffekte ergeben sich durch den benötigten hohen Energieaufwand für den Betrieb des Recyclingwerkes im Feld der regenerativen Energieerzeugung.

Als grobe Prognose für einen Industriestandort mittlerer Dimension lässt sich, analog zur Größe aktuell bestehender Batterierecycling-Standorte und basierend auf Schlussfolgerungen aus Wissenschaft und Forschung, für die Lausitz ein Beschäftigungspotential im niedrigen bis mittleren dreistelligen Bereich ableiten. Mit Erhalt und Schaffung attraktiver Beschäftigungsverhältnisse in der Industrie wird die regionale Kaufkraft gesteigert, was wiederum die Ansiedlung oder den Erhalt zusätzlicher Unternehmen, bspw. des Dienstleistungssektors, begünstigt und somit zur weiteren Beschäftigungssicherung beiträgt.<sup>35</sup> Damit wird Beschäftigung zusätzlich induziert. Sie fällt umso größer aus, desto umfassender die Etablierung einer eigenständigen Wertschöpfungskette gelingt.

Um Orientierung darüber zu erlangen, welche Ausbildungs- oder Studiengänge und Weiterbildungsangebote zur Fachkräftesicherung für ein Batterierecyclingwerk geeignet scheinen, wird ebenfalls auf den Ist-Zustand rekurriert. In *Tabelle 26* ist dargestellt, welche Berufe gegenwärtig in den relevanten Branchen der Rohstoffverwertung, der Metallverarbeitung und Metallbearbeitung nachgefragt werden.

<sup>35</sup> Ihr tatsächliches Ausmaß zu bestimmen muss weiteren, zukünftigen Untersuchungen vorbehalten bleiben.

Deutlich wird, dass es sich bei den nachgefragten Studien- und Ausbildungsberufen überwiegend um Qualifikationen handelt, über die bereits heute viele der Beschäftigten verfügen, die in der fossilen Energiewirtschaft und anderen Lausitzer Industriezweigen ihr Auskommen finden. Bei den Tätigkeitsprofilen der Metallbearbeitung, der Mechatronik, mit Energie- und Elektroberufen und Tätigkeiten im Logistikbereich handelt es sich um Berufe, denen in der Lausitz momentan (lokal sogar überproportional) häufig nachgegangen wird.

**Tabelle 26: Berufsbilder industriellen Batterierecyclings**

Qualifikationsart	Fachliche Ausprägungen (Auswahl)
Studienberufe	Ingenieure Maschinenbau / Verfahrenstechnik, Werkstoffsysteme, Elektrotechnik, Metallurgie, Wirtschaftsinformatik, Chemieingenieurwesen, BWL (Industrie), Controlling
Ausbildungsberufe	Elektroniker für Automatisierungstechnik, Industriekaufmann, Industriemechaniker, Maschinen- und Anlagenführer, Energieelektroniker Betriebstechnik, Verfahrensmechaniker, Chemikant, Produktionsfachkraft Chemie, Chemielaborant, Werkgehilfen, Fachkraft für Lagerlogistik
Weiterbildung	Industriemeister, Meister für Kreislauf- und Abfallwirtschaft, Techniker

Quellen: Umicore Deutschland. Online: <https://www.umicore.de/de/karriere/>; Duesenfeld GmbH. Online: <https://www.duesenfeld.com/karriere.html>; Arcelor Mittal Bremen. Online: <https://bremen.arcelormittal.com/Karriere/>; Riva Stahl GmbH. Online: [https://www.rivastahl.com/de/konzern/arbeiten\\_bei\\_der\\_riva\\_stahl\\_gmbh](https://www.rivastahl.com/de/konzern/arbeiten_bei_der_riva_stahl_gmbh)

Es ist davon auszugehen, dass die erforderlichen Kompetenzen und Qualifikationen, über die Fachkräfte eines zukünftigen Traktionsbatterie-Recyclingwerks und Beschäftigte entlang der Wertschöpfungskette verfügen müssten, sich dem technologischen Fortschritt entsprechend in den kommenden zehn bis 15 Jahren noch wandeln. Heute lassen Qualifikations- und Tätigkeitsstruktur der Beschäftigten in der Lausitz (vgl. Kapitel 2.2) aber darauf schließen, dass die gut ausgebildete Facharbeiterschaft der Region den Ansprüchen neuer, hochwertiger, qualifizierter Tätigkeitsprofile gerecht würde. Mit der Schaffung neuer, hochwertiger Industriearbeitsplätze an einem Recyclingstandort in der Region könnte somit ein Beitrag dazu geleistet werden, den Wegfall von Beschäftigung in der fossilen Energiewirtschaft adäquat zu kompensieren und dem seit Beginn der 1990er Jahre in der Lausitz erfolgten Abbau industrieller Beschäftigungsverhältnisse etwas entgegenzusetzen.

#### 4.4 Quintessenz und Ausblick

Dem Anspruch eines nachhaltigen Wandels der wirtschaftlichen Basis der Lausitz entsprechend ist bei Standortentscheidungen neben der wirtschaftlichen sowie der beschäftigungsrelevanten und regionalpolitischen auch die ökologische Dimension zu berücksichtigen. Jedwede Vorhaben zur Gestaltung des Strukturwandels sollten deshalb umfassend analysiert und im Hinblick darauf bewertet werden, ob sie dieser Anforderung möglichst umfassend genügen.

Die Skizzierung des entstehenden Marktes, des regulatorischen Rahmens und der Wertschöpfungskette hat erste Rückschlüsse auf Innovationspotential und Beschäftigungsfelder industriellen Batterierecyclings zugelassen und auf notwendigerweise voraussetzende Variablen in Unternehmen und Unternehmensumwelt verwiesen: Das Recycling von Traktionsbatterien kann aufgrund des entste-

henden Marktvolumens, der Grenzen der Rohstoffverfügbarkeit und zunehmender ökologischer wie regulatorischer Anforderungen eine attraktive industrielle Perspektive darstellen.

Von der Standortentscheidung für ein Traktionsbatterie-Recyclingwerk kann die Lausitz profitieren, wenn dadurch vor Ort neue Geschäftsfelder in Zukunftstechnologien erschlossen und eine Wertschöpfungstiefe erreicht würde, die zuließe, dass zukünftig nachgefragte Kernkompetenzen in dem und um das Recyclingwerk herum ausgebildet werden. Vorteilhaft ist, dass in der Region an vorhandene Potentiale, wie leistungsstarke und flexible KMU, die Netzinfrastruktur und verfügbare Flächen, angeknüpft werden kann.

Außerdem ist der Strukturwandel in der Lausitz bereits in vollem Gange: Rund um den Erneuerbare-Energien-Sektor ist bereits heute eine nachhaltiger wirtschaftende Unternehmenslandschaft entstanden. Die vorgesehenen Ansiedlungen zusätzlicher Forschungseinrichtungen wie der Fraunhofer Gesellschaft und des Deutschen Instituts für Luft- und Raumfahrt werden zur besseren Ausschöpfung der Innovationspotentiale und einer Erhöhung der F&E-Dichte beitragen. KMU erweitern ihre Kernkompetenzen und nutzen ihre Flexibilität, um im Rahmen der sich neu etablierenden Wertschöpfungsketten an zukunftsfähige Geschäftsfelder anzudocken: Batteriehersteller wie ACCUmotive mit aktuell schon über 2.200 Beschäftigten<sup>36</sup> beweisen, dass die Ansiedlung von Batterietechnologie in der Region erfolgreich sein kann. Die technologischen (Verfahrens-)Kompetenzen für das industrielle Recycling von Lithium-Ionen-Alt-Batterien und erste Pionierunternehmen für kommerzielles Recycling existieren bereits in Europa, auch in Deutschland.

Die Qualifikationsprofile der Beschäftigten in der Lausitz verweisen außerdem darauf, dass die Region gerade in der Metall- und Elektroindustrie über hoch qualifizierte Fachkräfte verfügt, auf deren wertvolles Prozess- und Verfahrenswissen zurückgegriffen werden kann: Ihre Kenntnisse und ihr berufliches Erfahrungswissen urbar zu machen, stellt für die Entwicklung der Region einen wertvollen Zusatzbeitrag dar, um Zukunftstechnologien wie das Recycling erfolgreich zu verankern. Erfolgen Unternehmensansiedlungen unter Berücksichtigung des Nachhaltigkeitsgedankens in der traditionellen Energieregion, können Beschäftigungsperspektiven zudem langfristig erschlossen werden.

Ein industrieller Batterierecycling-Standort in der Lausitz würde aufgrund der mit ihm erreichten Wertschöpfungstiefe nicht zuletzt auch ermöglichen, die gesamte automotiv Produktionsskette auch weiterhin innerhalb Europas abzubilden. Damit käme man dem Ziel der Etablierung einer effizienten Kreislaufwirtschaft näher. Die Ressourceneffizienz würde optimiert, aufgrund hoher Wiedergewinnungsquoten zu einer Reduzierung der Abhängigkeit von volatilen Rohstoffmärkten beigetragen und zugleich das Aufkommen umweltschädlicher Reststoffe minimiert. Schließlich trägt das Recycling dazu bei, auch die Ökobilanz des Verkehrssektors zu verbessern (und somit die Einhaltung der UN-Klimaziele zu unterstützen) – vorausgesetzt die für die Recyclingprozesse benötigten Energien stammen aus nichtfossilen Quellen.

Die Entscheidung zur Errichtung eines Batterie-Recyclingwerks stellt sich aus heutiger Sicht zwar als eine Entscheidung unter großer Unsicherheit dar, die neben hohen Investitionen einen langfristigen Planungshorizont erfordert. Es sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt zahlreiche, vielfach noch nicht abschätzbare (und von regionalen Akteuren auch kaum oder nicht beeinflussbare) Risiken festzustellen. Umgekehrt bestehen aber gerade jetzt die Gestaltungsspielräume, die es zu nutzen gilt, um durch das geöffnete „Window of Opportunity“ Zukunftsperspektiven zu erschließen und notwendige Entscheidungen vorzubereiten.

---

36 Stand: DGB Lausitzkonferenz, 22. August 2019

## 5 Gestaltungsfelder

Der Strukturwandel wirft Grundfragen gesamtgesellschaftlicher Entwicklung auf, die vor dem Hintergrund der kulturellen, wirtschaftlichen, industriellen und sozialen Identität der Lausitz (über singuläre Standortentscheidungen hinaus) systemisch zu beantworten sind. Seine Gestaltungsfähigkeit eröffnet zugleich die Chance, die Lausitz als Energieregion der Zukunft zu profilieren. Zur Bewältigung des Wandels ist deshalb ein integrativer Ansatz zu wählen, der die Gleichwertigkeit von Industrie-, Arbeitsmarkt- und Innovationspolitik im Sinne einer *Just Transition* – also einer gerechten Transformation, die soziale nicht gegen ökologische Interessen ausspielt – reflektiert. Es gilt, die mit dem Ausstieg aus Braunkohleförderung und -verstromung verbundenen Risiken für die Beschäftigten, auch in den Zulieferindustrien, zu minimieren und eine Strategie zu entwickeln und umzusetzen, die Zukunftsperspektiven für die Region schafft und ihren identitätsstiftenden Charakter erhält. Für die drei Gestaltungsfelder regional- und strukturpolitische Rahmenbedingungen (5.1), Wirtschafts- und Innovationsförderung (5.2) sowie Arbeitsmarktpolitik (5.3) sind demgemäß folgende Anforderungen zu berücksichtigen:

- Der Charakter der Lausitz als Energie-Region bleibt erhalten.
- Die mit dem Strukturwandel verbundenen Risiken für die Beschäftigten werden minimiert.
- Beschäftigungspolitische Perspektiven werden unter der Prämisse *Guter Arbeit* geschaffen.
- Die pro-aktive Gestaltung des Strukturwandels erfolgt sozial- und umweltverträglich.

Als Eckpunkte für eine beschäftigungsorientierte Entwicklungsstrategie werden in dem jeweiligen Gestaltungsfeld dazu nachfolgend Handlungskorridore aufgezeigt.

### 5.1 Gestaltungsfeld regional- und strukturpolitische Rahmenbedingungen

Die Nachwundererfahrungen in der Lausitz wirken bis heute nach. Der Niedergang ganzer Industriezweige wie dem Bergbau, der Textil- oder Glasindustrie und der Verlust von zehntausenden Arbeitsplätzen, verbunden mit Zukunftsängsten und fehlenden Beschäftigungsperspektiven, die gerade in den 1990er Jahren starke Abwanderung nach sich zogen, sind vielfach präsent. Umso bedeutsamer ist es – gerade in Zeiten zunehmender politischer Polarisierung, die den gesellschaftlichen Zusammenhalt zu gefährden droht – die grundgesetzlich verankerte Herstellung gleichwertiger Lebensverhältnisse mit Nachdruck anzustreben. In dem Maße, wie es gelingt, sich diesem Ziel für alle Bewohner der Lausitz merklich anzunähern, ließen sich auch Vorhaben wie die Schaffung einer „europäischen Modellregion für den Strukturwandel“ (BMWi o. J.) glaubwürdig vermitteln.

#### *Handlungsansätze*

##### **Herstellung gleichwertiger Lebensverhältnisse**

Damit die Menschen in der Lausitz nicht zu Verlierern der Energie- und Verkehrswende werden, stellen Erhalt und Stärkung der öffentlichen Daseinsvorsorge eine vordringliche Aufgabe dar: Neben der Gas-, Wasser- und Elektrizitätsversorgung, einer funktionierenden Müllabfuhr und Abwasserbeseitigung sind flächendeckend vertretbare Wegezeiten für die Notfallversorgung (Feuerwehr, Krankenhäuser) vorzusehen. Die darüber hinausgehende Bereitstellung öffentlicher Bildungs- und Kultureinrichtungen als Teil der Leistungsverwaltung ist insbesondere im ländlichen Raum von nicht zu

unterschätzender Bedeutung. Zusätzlich weisen die Vorschläge der KWSB zum Infrastrukturausbau von Verkehrswege- und Kommunikationsnetzen hier in die richtige Richtung.

### **Koordination**

Der Rahmen für den Strukturwandel wurde durch die Kommission für Strukturwandel, Wachstum und Beschäftigung (KWSB) abgesteckt. Die im Abschlussbericht vorgesehenen Maßnahmen werden sich in dem aktuell in der Beschlussfassung befindlichen Strukturstärkungsgesetz widerspiegeln. Ihre Umsetzung obliegt dann den jeweils zuständigen Akteuren.

Um den Strukturwandel in der Lausitz möglichst reibungsarm und effektiv zum Erfolg zu führen, sind die Vorhaben und Aktivitäten der im politischen Mehrebenen-System auf regionaler, Landes-, Bundes- und EU-Ebene interagierenden Entscheidungsträger\*innen dabei zwingend zu koordinieren, ihre Ansätze zu bündeln und Abstimmungsbedarfe aufzuzeigen. Zur Herstellung von Planungssicherheit und Verlässlichkeit für die Gestaltungsvorhaben, sind ihre Aktivitäten zu koordinieren. Für Gestaltungserfolge erscheint die Entwicklung einer geeigneten Governance-Struktur (Benz 2004: 125 ff.) ebenso ratsam wie die Festlegung eines verbindlichen Zeitrahmens für die möglichst vollständige Umsetzung der Empfehlungen der KWSB.

### **Interessenvermittlung**

Zur Stärkung der Idee einer „Energierregion der Zukunft“ (einschließlich der Zukunftstechnologie Batterierecycling) sollten Möglichkeiten der Einflussnahme auf verschiedene regulatorische Ebenen im Rahmen von Interessenvermittlungsprozessen nicht ungenutzt bleiben.

Auf europäischer Ebene sollte auf die Novellierung der Batterierichtlinie mit der Zielstellung einer Kreislaufwirtschaft im Feld der Elektromobilität hingewirkt werden. Auf Bundes- und Länderebene gilt es, den beschlossenen Strukturwandel verlässlich umzusetzen. Darüber hinaus sollte die länderübergreifende Zusammenarbeit, orientiert am brandenburgisch-sächsischen Grundsatzpapier „Gemeinsam für die Zukunft der Industrieregion Lausitz“ fortgesetzt werden.

### **Leitbild**

Gegenwärtig wird im Rahmen der „Zukunftswerkstatt Lausitz“ in einem mehrstufigen Prozess, moderiert von der Wirtschaftsregion Lausitz (WRL), ein Leitbild entwickelt. Nach Kritik an intransparentem Vorgehen und einer zu geringen Beteiligung der Bevölkerung lädt die „Zukunftswerkstatt Lausitz“ mittlerweile öffentlich auch Bürger\*innen zum Dialog ein. Dies ist zu begrüßen, denn bei der Schaffung der Lausitzer „Energierregion der Zukunft“ kann ein gemeinsames Leitbild dann unterstützend wirken, wenn es partizipativ erarbeitet wird. Dazu sind alle regionalen Akteure, einschließlich der Bevölkerung und betroffener Beschäftigtengruppen, sowohl in die Erarbeitung als auch in die Identifizierung und Definition der sich aus dem Leitbild abzuleitenden Maßnahmen einzubinden. Die Sozialpartner sind aufgefordert, den Leitbildprozess sowie dessen Implementierung politisch zu flankieren.

Im Erarbeitungsprozess bieten sich Räume, um gute Beispiele zu reflektieren und den Austausch mit anderen, von Strukturwandel betroffenen Regionen, zugunsten des Wissenstransfers zu suchen. Damit ließe sich zugleich die Zielstellung verknüpfen, die Informationsbasis der an der Erarbeitung beteiligten, vom Strukturwandel betroffenen Zielgruppen zu erweitern. Ein stabiler, den gesellschaftlichen Zusammenhalt stärkender Konsens kann identitätsstiftend wirken und mittel- wie langfristig eine Orientierungshilfe für die Regionalentwicklung darstellen, wenn er auf der aktiven Mit-

gestaltung des Prozesses durch die betroffenen Einwohner\*innen basiert. Ein so erstelltes Leitbild vermag zur (überregionalen) Imagebildung der Region beitragen und deren Bekanntheitsgrad zu steigern.

Neben der Fixierung industrieller Zukunftsschwerpunkte wie dem Batterierecycling sollte ein Leitbild-Prozess dazu genutzt werden, arbeits- und beschäftigungsorientierte Schwerpunkte zu verankern. Die isolierte Betrachtung infrastruktureller, ökonomischer, ökologischer, sozial- oder beschäftigungspolitischer Aspekte des Strukturwandels sollte überwunden werden.

Untersetzt werden sollte eine aktive Regional- und Strukturpolitik durch geeignete Maßnahmen, die zwischen kommunaler, Landes- und Bundesebene abgestimmt sein sollten. Als solche sind auch Instrumente der technischen Hilfe zu verstehen, die zur fachbereichsübergreifenden Stärkung der (Beschäftigung in) Zukunftstechnologien genutzt werden können.

### **Gerechte Transformation (Just Transition)**

Energie- und Mobilitätswende bieten der Lausitz Chancen, sich Zugänge zu den Wertschöpfungsketten der Elektromobilität zu erschließen und diese im Sinne eines nachhaltigen sozial-ökologischen Umbaus zu nutzen. Damit ökologische nicht gegen soziale Interessen ausgespielt werden, wird das Konzept der Just Transition als Prämisse des Strukturwandels vorgeschlagen. Erklärtes Ziel sollte die Schaffung und Rekultivierung eines einzigartigen Wirtschafts- und Kulturraumes sein, in dem auch nachfolgende Generationen gerne leben und ein gerechtes Auskommen finden.

### **Partizipation**

Ausgehend davon, dass Strukturwandel dann erfolgreich gestaltbar ist, wenn Umwälzungen und Neuerungen von den Betroffenen mitgetragen und befürwortet werden, stellt die stete Weiterentwicklung der Informationsbasis für die vor Ort lebenden Menschen einen wichtigen Baustein dar. Die Identifizierung der einheimischen (sich seit der Wiedervereinigung in Teilen auch abgehängt fühlenden) Bevölkerung mit der Tagebaukultur und die Schaffung von neuen, auf regenerativen Energien basierenden Märkten bilden insofern ein Spannungsfeld, welches es in partizipativ ausgerichteten Dialogformaten zu bestellen gilt.

In diesem Sinne sollte auch die Bündelung lokaler und regionaler Interessenlagen und Zielsetzungen der unterschiedlichen Akteure erfolgen und vermieden werden, Entwicklungen vordergründig „von oben“ zu initiieren. Dabei kooperativ vorzugehen ermöglicht schließlich, im politischen Prozess und gegenüber der Öffentlichkeit mit „einer Stimme“ zu sprechen. Um Glaubwürdigkeit herzustellen wird ausschlaggebend sein, Konsens auch im Rahmen von „Bottom-up“-Prozessen herbeizuführen und Entscheidungskompetenzen auch regional so zu verankern, dass sie wirksam sind.

### **Öffentlichkeitsarbeit**

Zur Verbesserung der Imagebildung der Region sind Öffentlichkeits- und Lobbyarbeit zu optimieren. Es muss glaubhaft vermittelt werden, dass die Erschließung von Zukunftsmärkten als Entwicklungsziel mittel- und langfristig mit dem Anspruch des Erhalts der Lebensgrundlagen einhergeht, indem mittels Zukunftstechnologien für eine Energieregion der Zukunft auch zum Schutz und zur Stärkung der Erholungsfunktion sowie der ökologischen wie sozialen Umwelt beigetragen wird. Die Nähe zur Hauptstadt Berlin und die wirtschaftsstrategisch günstige Lage an der Schnittstelle zu Osteuropa sollten bundesweit und international verstärkt als vorteilhaft herausgestellt werden.

## 5.2 Gestaltungsfeld Wirtschafts- und Innovationsförderung

Angesichts einer sich global verstärkenden Standortkonkurrenz ist für Unternehmen eine Investitions- und Innovationspolitik von Vorteil, die sich auf Technologieplanung stützt, die Etablierung verlängerter Wertschöpfungsketten anstrebt, eine Einbindung in regionale Kompetenzzentren und Cluster von Schlüsselbranchen befürwortet sowie die strategische Sicherung ihrer Ressourcen vorsieht, damit sie über die zur Produktion benötigten Roh- und Einsatzstoffe verfügen.

### *Handlungsansätze*

#### **Wertschöpfungssystem**

Vielpersprechende und zukunftsweisende Aktivitäten in Energieerzeugung (Solar, Wasserstoff) und Energiespeicherung (Batterietechnologie), die bereits über die regionalen Kompetenzen in der fossilen Energieerzeugung hinausweisen, sind in der Lausitz vielfach zu beobachten. Diese Ansätze gilt es zu vernetzen und weiterzuentwickeln. Die Etablierung langer Wertschöpfungsketten der Produktion ist als eine industriepolitische Aufgabe zu verstehen, die als qualitativ neue Herausforderung ggf. auch eine Weiterentwicklung der Instrumente der Wirtschaftsförderung erfordert. Die Maßnahmen sollten der Ansiedlung von Zukunftstechnologien, der Herstellung von Wettbewerbsfähigkeit und zur langfristigen Standort- und Beschäftigungssicherung in Guter Arbeit dienen.

Nur wenn es gelingt, anders als bspw. in der Solarzellenproduktion in den 2000er Jahren, vor Ort nicht nur Produktionsstätten als verlängerte Werkbänke, sondern gesamte Wertschöpfungssysteme aufzubauen, können Beschäftigungswirkung und Standortsicherung langfristig erfolgreich sein. Entwicklungsvorhaben in Richtung des Batterierecyclings können an traditionelle und neu entstehende Lausitzer Schlüsselbranchen anknüpfen und die Kernkompetenzen der KMU erweitern.

#### **Kreislaufwirtschaft**

Aus ökologischer aber auch aus industriepolitischer Sicht ist der Aufbau einer Recyclingstrecke für Traktionsbatterien der Elektromobilität im Sinne einer Kreislaufwirtschaft zu denken: Gelänge es mittel- und langfristig die gesamte Wertschöpfungskette der Elektromobilität – von der Rohstoffversorgung, über die Batterieherstellung, die eigentliche Automobilproduktion und die Energieerzeugung für den Fahrzeugbetrieb bis hin zum Recycling von Batterien und Fahrzeugen – innerhalb Deutschlands (und Europas) abzubilden, würde dies sowohl strukturelle Abhängigkeiten von anderen Akteuren auf dem Weltmarkt reduzieren und die Verfügbarkeit strategischer Rohstoffe verbessern, als auch die Chance auf nachhaltigeres Wirtschaften und langfristige Beschäftigungssicherung erhöhen. Wichtiges Know-how ließe sich vor Ort halten.

Dabei kann in der Lausitz an vorhandenes (Erfahrungs-)Wissen und Kompetenzen der Beschäftigten angeknüpft und damit zugleich vermieden werden, dass wertvolles Prozess- und Verfahrenswissen verloren geht. Die Region ist gerade in der Metall- und Elektroindustrie überdurchschnittlich von hochwertiger, qualifizierter Facharbeit geprägt. Dieses hohe Fachkräftepotential gilt es zu nutzen, gezielt zu transformieren und zu stärken. Durch eine rechtzeitige und umfangreiche Einbindung der Beschäftigten kann die Akzeptanz für die Prozesse des Strukturwandels gesichert werden. Ebenso können durch Mitgestaltung und Mitbestimmung in der Region verankerte Innovationspotentiale gehoben werden, die entscheidend zum Gelingen der Transformation beitragen können.

**Clusterpolitik**

Unterstützung bei der Etablierung neuer Wertschöpfungsketten kann eine weitsichtige Clusterpolitik bieten. Die fachliche und länderübergreifende Erweiterung bestehender Cluster (bspw. dem Berlin-Brandenburger Cluster Energietechnik) wäre dahingehend hilfreich, die bundesländerübergreifende Lausitz als einen Wirtschaftsraum zu begreifen und neue Energie(speicher)technologien zu fördern. Dies wiederum ließe sich nutzen, um strategisch weiterführende Kooperationen zwischen Forschungseinrichtungen, KMU und Global Playern verstärkt überregional zu denken und um eine noch stärkere Anbindung der Lausitz an die Wissenschaftslandschaften der Metropolen Berlin, Dresden und Wrocław zu erreichen. Anknüpfungspunkte zeigt u. a. der Masterplan des Clusters Energietechnik (Clustermanagement Energietechnik 2017) auf.

Clusterstrukturen können etwa bei der Verabredung von Beschaffungs Kooperationen oder der Entwicklung gemeinsamer Marketingstrategien und von Aus- und Weiterbildungsinitiativen ermöglichend wirken. Ebenso können sie zur Steigerung von Innovationspotential durch geteilte F&E-Projekte beitragen und die bessere Wahrnehmbarkeit der entlang der Wertschöpfungskette beteiligten Schlüsselbranchen, bzw. der produzierenden Clusterunternehmen, gegenüber der Politik und anderen (konkurrierenden wie komplementären) Wirtschaftsbereichen unterstützen.

**Kompetenzzentren**

Investitions- und Innovationsförderung haben die Aufgabe, den Aufbau neuer Technologien insbesondere für KMU mit Zuschüssen, Zulagen oder Beihilfen zu ermöglichen bzw. zu erleichtern. Um die Innovationsstärke der KMU und ihre Flexibilität zu erhalten und dazu zu nutzen, ihre Anschlussfähigkeit an Zukunftstechnologien sicherzustellen, können regionale Kompetenzzentren und niedrigschwellige Fördermöglichkeiten einen relevanten Beitrag leisten. Aus arbeitsorientierter Sicht ist zu betonen, dass bei der Vergabe von Strukturhilfen Kriterien Guter Arbeit und die Anschlussfähigkeit an ein Leitbild „Energie region der Zukunft“ ausschlaggebend sein sollten.

**Forschung und Entwicklung**

Die Intensivierung der Batterie- und Batterierecyclingforschung (bspw. BTU Cottbus-Senftenberg, u. a. am Fachgebiet Physikalische Chemie) und der Forschung zum Themenfeld Erneuerbare Energien und deren Speicherung (zukünftig auch an den neuen Instituten der Fraunhofer Gesellschaft oder des DLR) ist sinnvoll. Die regionale Innovationskraft gilt es durch relevante F&E weiter zu stärken.

**Kooperation, Vernetzung und Wissenstransfer**

Stetige, multidirektionale Wissenstransfers und die enge Vernetzung zwischen Forschungs- und Unternehmensstandorten sind anzustreben, um anschlussfähig an neue technologische Trends und Produktionsweisen der Zukunftstechnologien wie Batterierecycling, Energiespeichersysteme oder Elektromobilität zu bleiben. Die Wissenschaftseinrichtungen der Lausitz bieten diesbezüglich zahlreiche Anknüpfungspunkte für Wissenschaft-Unternehmens-Kooperationen, die sich in verstärkten Innovations- und Technologietransfers niederschlagen könnten. Kluge et al. (2014a) verweisen darauf, dass bereits umfangreiche Kooperationen zwischen Unternehmen und Hochschulen bestehen.

Die Kapazitäten der zahlreichen, kleinen KMU sind deshalb in den Bereichen Produkt-, Verfahrens- und Organisationsinnovationen zu bündeln und mit dem Ziel urbar zu machen, dauerhaft wettbewerbsfähig zu bleiben. Die Beteiligung an F&E-Verbundprojekten ist zu fördern. Das Innovations-

potential der KMU ist durch Kooperationen und Spezialisierung sowie mittels industrienaher Projektentwicklung weiter steigerbar (Markwardt & Zundel 2017: 21).

### **Flächenmanagement**

Für die (Neu-)Ansiedlung von (Industrie-)Unternehmen ist die Bereitstellung geeigneter Flächen maßgebliche Voraussetzung. Planungsbehörden und die Flächenbetreiber bzw. -eigentümer sind im Hinblick auf die teilweise kritische Verfügbarkeit größerer, zusammenhängender Industrieflächen (neue, um- oder nachnutzbare Areale) gefordert, Unterstützung bei der Ausweisung im Rahmen eines dynamischen Gewerbeflächenmanagements zu leisten. Dabei kann und sollte auch eine Umwidmung von Flächen, die bisher Braunkohleabbau und -verstromung gewidmet waren, zu modernen Industrieflächen geprüft werden.

## **5.3 Gestaltungsfeld Arbeitsmarktpolitik**

Die Industrieregion Lausitz sollte im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung so gestärkt und weiterentwickelt werden, dass zukunftssichere Beschäftigungsperspektiven erschlossen werden können. Zur Sicherung daraus entstehender Fachkräftebedarfe und zur Vermeidung strukturell bedingter Arbeitslosigkeit sollte eine aktive Arbeitsmarktpolitik umgesetzt werden, die darauf abzielt, Brücken in neue Beschäftigung zu bauen. Bis zum Ausstieg aus der Braunkohle verbleibt ein Zeitfenster von maximal 19 Jahren, welches prozessbegleitend dazu genutzt werden sollte, die Lausitz als Industrie- und Energieregion zu erhalten, indem Beschäftigung in industriellen, innovativ wertschöpfenden Strukturen zu Bedingungen Guter Arbeit entsteht.

### ***Handlungsansätze***

#### **Industriearbeitsplätze**

Maßnahmen zum Erhalt und zur Schaffung nachhaltiger und zukunftssicherer (Industrie-)Arbeitsplätze sollten bis 2038, insbesondere mit Blick auf die indirekt Beschäftigten der Braunkohlewirtschaft, den Kern der arbeitsmarktpolitischen Aktivitäten bilden.

Integrierte Regionalentwicklung muss, über den Kernbereich industrieller Konversion<sup>37</sup> hinaus, auch Zulieferer und Dienstleister in den Blick nehmen: Liquiditäts- und Beschäftigungsprobleme treten bei ihnen nicht erst mit dem Zurückfahren der Braunkohletagebauaktivitäten auf, sondern schlagen sich – etwa durch verändertes Beschaffungsverhalten aufgrund veränderter Qualitäts- und Wartungsstrategien der direkt betroffenen Auftraggeber (etwa der LEAG als größtem Arbeitgeber der Region) – bereits jetzt in deren Auftragsbüchern nieder.

#### **Regionale Fachkräftestrategie**

Der Wandel betrieblicher Altersstrukturen und sich verändernde fachliche Anforderungen an die Beschäftigten führen zu einer sich abzeichnenden erhöhten Nachfrage nach Fachkräften. Die kontinu-

---

37 Laut des Berichts der KWSB sollen zur Absicherung direkt Beschäftigter der Braunkohlewirtschaft betriebsbedingte Kündigungen in Kraftwerken und Tagebauen ausgeschlossen sein. Fällt ein Arbeitsplatz weg, werden die Betroffenen, unter Ausgleich eventueller Gehaltseinbußen, in neue Arbeit vermittelt. Ältere Beschäftigte können, ebenfalls unter Ausgleich möglicher Rentenabschläge, in den vorzeitigen Ruhestand wechseln. Es wurde vorgesehen, dass Gewerkschaften und Unternehmen in Tarifverträgen ergänzende Ausgleichszahlungen regeln.

ierliche Weiterqualifizierung und Ausbildung von Mitarbeiter\*innen ist dringend geboten. Der absehbare Fachkräftemangel bildet eine der größten Herausforderungen der Region, zumal einem zukünftig (noch) höheren Fachkräftebedarf weiterhin die erwartete überdurchschnittlich hohe Abwanderung junger Menschen gegenübersteht (Frondelet al. 2017: 74).

Um auf den erwarteten Rückgang des Erwerbpersonalspotentials passgenau zu reagieren, wird die Schaffung funktionierender Arbeitsstrukturen als hilfreich eingeschätzt. Dazu wird, als Teil des Leitbildes „Energierregion der Zukunft“, die Entwicklung einer integrierten, regionalen Fachkräftestrategie vorgeschlagen. Eine „Fachkräfte-Allianz“<sup>38</sup> sollte bei deren Implementierung koordinierend wirken und unterstützend dazu beitragen, Fachkräftebedarfe frühzeitig zu erkennen, Ausbildungsgänge zu konzipieren sowie Weiterbildungs- und Qualifizierungsmaßnahmen für Berufseinsteiger\*innen und Beschäftigte gemeinsam zu planen.

### **Betriebliche und akademische Ausbildung**

Um der demographischen Entwicklung zu begegnen und Fachkräftesicherung zu befördern, sollte die berufliche und akademische Ausbildung in Zukunftsfeldern gestärkt werden. Angezeigt scheint nach Jahren andauernder Schrumpfung des Bildungs- und Erziehungssektors wiederum die Stärkung der Bildungsinfrastruktur. Eine exzellente Ausbildung in Zukunftsfeldern kann nur so befördert werden. Aufbaustudien- und Meisterlehrgänge sind ebenso bereit- wie geeignetes Lehr- und Schulungspersonal einzustellen. Es ist außerdem eine hohe (Eigen-)Ausbildungsquote der Betriebe anzustreben, mit der die Unternehmen ihrer regionalen Verantwortung gerecht werden und zugleich in der Lage sind, ihren Fachkräftebedarf weitgehend eigenständig zu decken. Sinnvoll erscheinen auch duale oder überbetriebliche Ausbildungsmöglichkeiten (Verbundausbildungen).

### **Weiterbildung und Qualifizierung**

Besonderes Augenmerk ist arbeitsmarktpolitisch darauf zu legen, vorhandene und zukünftige Arbeitnehmer\*innen vor Ort bedarfsgerecht zu qualifizieren und weiterzubilden. Der Anspruch „lebenslanges Lernen“ sollte durch wirksame Weiterbildungs- und Qualifizierungsinstrumente unteretzt werden. Der Umgang mit neuen Technologien muss auch berufsbegleitend erlernbar sein, um mit Digitalisierung und Automatisierung einhergehende Herausforderungen zu meistern.

Neben fachlich passenden Angeboten ist der zielgruppenspezifische Zuschnitt der Maßnahmen zu berücksichtigen. Ebenso entscheidend ist es, den Zielgruppen einen praktikablen Zugang zu Weiterbildungs- und Qualifizierungsmöglichkeiten zu ermöglichen. Diese können sich bspw. als kostenfreie (öffentlich geförderte) Angebote innerhalb der Arbeitszeit an Unternehmensleitungen und Personalverantwortliche, an Beschäftigten und innerbetriebliche Multiplikatoren, an technische Leitungen, Meister\*innen oder auch Betriebsrät\*innen richten.

### **Erhöhung der Erwerbsbeteiligung**

Aufgrund der kontinuierlichen Abnahme der Arbeitslosenzahlen haben sich die Möglichkeiten zur Ausschöpfung des Arbeitsmarktpotentials zuletzt verringert. Dennoch bilden Arbeitsuchende, unter-

38 Ein aus regionalen Expert\*innen gebildetes, unabhängiges intermediäres Arbeitsgremium, welches sich der Aufgabe einer aktiven, integrierten und bedarfsgerechten Fachkräftesicherung widmet und zusätzlich die Funktion wahrnimmt, Vertreter anderer beschäftigungs- und arbeitsmarktpolitisch relevanter Institutionen (wie bspw. Bundesagentur für Arbeit, IHK, HWK, Hochschulen, Bildungsträger, Sozialpartner) einzubinden.

beschäftigte und gering qualifizierte Menschen eine sehr relevante Zielgruppe für Weiterbildung und Qualifizierung. Diese Zielgruppe sollte sowohl qualifiziert werden, um das Reservoir der Fachkräfte aufzustocken, als auch um den Betroffenen eine Perspektive zu bieten und Altersarmut abzuwenden.

Eine weitere Erhöhung der Erwerbsbeteiligung kann beispielsweise durch eine Arbeitszeitaufstockung für Teilzeitkräfte, die Re-Aktivierung von Langzeitarbeitslosen und die gezielte Qualifizierung von Beschäftigten, die dem Anforderungsniveau nach bislang Hilfstätigkeiten ausführen, gelingen.

### **Arbeitsgestaltung**

Die Ansiedlung neuer Technologien erfordert eine ihnen entsprechende Gestaltung der Arbeitsplätze, die sich im Sinne des präventiven Arbeits- und Gesundheitsschutzes an den Bedürfnissen der Beschäftigten ausrichten sollte. Gerade in ökologisch und ökonomisch zukunftsweisenden Branchen wie dem Batterierecycling sind die Arbeitsbedingungen gemäß der zwingend zu integrierenden Gestaltungsfelder Technik, Organisation und Personal so zu entwerfen, dass sie auf sichere und gesundheitsgerechte Gestaltungslösungen (§2 Arbeitsschutzgesetz: menschengerechte Arbeitsgestaltung) abzielen, *gleichermaßen* Berücksichtigung finden und gemäß einer systematischen Maßnahmenhierarchie umsetzbar werden (Barth, Gruber & Kittelmann 2018).

Demnach sind Gefahrenquellen zu vermeiden und sicherheitstechnische Maßnahmen dort umzusetzen, wo sie nicht vermeidbar sind. Organisatorische Maßnahmen wirken zur Gefahrenvermeidung ebenso ergänzend wie persönliche Schutzausrüstungen der Beschäftigten, flankiert von Betriebsan- und -unterweisungen, einschließlich der Sicherstellung ihrer Einhaltung. Neben der Reduzierung physischer Belastungen und der Beseitigung von Gefahrenquellen für die körperliche Unversehrtheit gilt es auch, psychische Belastungen zu vermeiden, die aus der Arbeitsaufgabe, der Arbeitsorganisation, den sozialen Beziehungen, dem Arbeitsumfeld oder auch neuen Arbeitsformen erwachsen können.

Zur weiteren Reduzierung von Gefahren für die menschliche Gesundheit und die Umwelt unterliegen besonders risikoreiche Produktgruppen (zu denen auch Batterien zählen) Vorschriften zu ihrer Erfassung, Behandlung und ihrem Recycling. In Deutschland werden mit dem zuletzt im Jahr 2017 in Teilen geänderten Batteriegesetz entsprechende EU Vorgaben umgesetzt.

### **Mitbestimmung**

Durch die rechtzeitige und umfangreiche Einbindung von Beschäftigten der KMU, ihre Mitgestaltung und Mitbestimmung, lassen sich Innovationspotentiale heben und Akzeptanz für Prozesse des Strukturwandels herstellen, die entscheidend für das Gelingen der Transformation sein können. Der Austausch zwischen Beschäftigten und Interessenvertretungen trägt zusätzlich zur Thematisierung regionaler Branchentrends bei und lässt sich dazu nutzen, industrielle Perspektiven für Zukunftsthemen wie das Batterierecycling zu entwickeln.

Schließlich lassen sich Belegschaften auch als Innovationspartner gewinnen, indem durch ein innovationsfreundliches Betriebsklima ihre Beteiligung gefördert und Initiative honoriert wird, bspw. durch die Institutionalisierung von Verfahren des betrieblichen Vorschlagswesens.

### **Gute Arbeit**

Im sich intensivierenden Wettbewerb um Fachkräfte werden zunehmend auch weiche Faktoren, wie die Vereinbarkeit von Beruf und Privatem, wesentlich für eine erfolgreiche Mitarbeitergewinnung sein. Beschäftigungsaufbau sollte deshalb nachhaltig und gemäß der Prinzipien Guter Arbeit erfolgen; dazu sind einheitliche, tariflich geschützte arbeitspolitische Standards in sozialpartnerschaftlichem Dialog zu entwickeln und zu implementieren.

Eine Prekarisierung von Arbeit (u. a. Ausweitung von Leiharbeit, Werkverträgen, Befristungen) ist im Zuge von Umstrukturierungen von Unternehmen bzw. ganzer Branchen und der Schaffung neuer Wertschöpfungssysteme dringend zu vermeiden.

## 6 Fazit

Zeitlich korrelierend mit dem für 2038 vorgesehenen Ausstieg aus der fossilen Energiewirtschaft spannen der Markthochlauf der Elektromobilität und das daraus anfallende Recyclingvolumen an Traktionsbatterien den in der Studie betrachteten Planungshorizont von rund 20 Jahren auf. Unter Berücksichtigung der endogenen Potentiale der Lausitz konnten mögliche Perspektiven im Zuge des Aufschwungs der Elektromobilität analysiert und Handlungskorridore aufgezeigt werden, die eine Ansiedlung der Zukunftstechnologie Batterierecycling begünstigen würden.

Als traditionelle Energieregion verfügt die Lausitz u. a. über die in der energieintensiven Batterietechnologie (dies gilt für Herstellung wie für Recycling gleichermaßen) erforderlichen gut ausgebauten Netzinfrastrukturen. Ökologisch sinnvoll können Elektromobilität und Batterie(recycling)technologien nur durch den intensiven Einsatz erneuerbarer Energien realisiert werden. Auch hier bieten sich in der Lausitz Anknüpfungspunkte an vorhandene Ansätze der regenerativen Stromerzeugung.

Als weiterer Standortvorteil ist der überdurchschnittlich hohe Anteil qualifizierter Fachkräfte zu begreifen. Industrielles Batterierecycling kann für hoch qualifizierte Fachkräfte, insbesondere für jene aus den Metall- und Energiebereichen, zukunftsfähige Beschäftigungsperspektiven bieten. Es wird künftig allerdings mit teilweise erheblichen Anstrengungen verbunden sein, das hohe Qualifikationsniveau durch intensivierete Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen zu halten und an sich stetig verändernde Anforderungen anzupassen.

Im Zuge der Etablierung einer Wertschöpfungskette rund um einen Batterierecycling-Standort würde die Expertise der gut qualifizierten Lausitzer Fachkräfte aus den Bereichen Metall und Energie der vor Ort tätigen KMU einen relevanten Beitrag dazu leisten, diese Zukunftstechnologie – unterfüttert mit dem Know-how jahrzehntelanger Berufserfahrung – anzusiedeln und somit zugleich mitbestimmt die Akzeptanz für die Energiewende unter den Beschäftigten und damit auch in der Bevölkerung zu erhöhen.

Für die Beschäftigten im Zuge des Strukturwandels Gute Arbeit zu erhalten und unter der Prämisse einer Just Transition zu schaffen, ressourcenschonende Wertschöpfungssysteme zu etablieren und regional zu verankern sowie das Innovationspotential mittels Investitionen in Zukunftstechnologien und Bildung zu steigern, bilden dabei den integrierenden Kern der hier dargelegten Eckpunkte einer arbeits- und beschäftigungsorientierten Regionalentwicklungsstrategie für den Ausbau der Lausitz zur „Industrie- und Energieregion der Zukunft“.

Aufgrund der erreichten Wertschöpfungstiefe könnte ein industrieller Batterierecycling-Standort in der Lausitz nicht zuletzt dazu beitragen, die gesamte Automotive-Produktionskette innerhalb Europas abzubilden. Damit käme man auch dem Ziel der Etablierung einer nachhaltigeren Kreislaufwirtschaft näher, indem die Ressourceneffizienz erhöht und aufgrund hoher, wiederverwendbarer Ausbeuten eine relative Unabhängigkeit von (volatilen) Rohstoffmärkten hergestellt und die Produktion großer Mengen Giftmüll vermieden würden. Schließlich trägt das Recycling dazu bei, die Ökobilanz des Verkehrssektors zu verbessern und somit die Einhaltung der UN-Klimaziele zu unterstützen – sofern die Speisung der Produktionsprozesse aus Erneuerbaren Energien gelingt.

Zugleich hat die Untersuchung zahlreiche Unwägbarkeiten verdeutlicht – vom Markthochlauf der Elektromobilität über den zukünftig eingeschlagenen Technologiepfad bis hin zu den daraus resultierenden Altbatterie-Aufkommen in ihrer jeweils anzunehmenden Zusammensetzung. Aussagen zu

relevanten Recyclingverfahren stehen unter dem Vorbehalt zeitlich nachlaufender und von der weiteren Batterieentwicklung induzierter technologischer Reifungsprozesse, woraus sich wiederum Einschränkungen bei der Identifizierung konkreter Beschäftigungsperspektiven ergeben.

Ebenso offen ist der regulatorische Rahmen zum Umgang mit den zukünftig anfallenden Recyclingaufkommen, da eine Novellierung der EU Batterierichtlinie – mit den entscheidenden Fragen, wie die der Herstellerrücknahmeverpflichtung, einzurichtender Sammelsysteme, zu Recyclingquoten und zur Standardisierung (der Bestandteile und Zusammensetzung) von Traktionsbatterien beantwortet würden – noch aussteht. Im Hinblick auf das zukünftig industriell zu organisierende Recycling von Traktionsbatterien bleibt auch abzuwarten, welche Bedeutung der Kreislaufwirtschaft speziell im Hinblick auf Lithium-Ionen-Batterien tatsächlich zugeordnet wird und wie rechtliche Rahmenvorgaben in nationale Gesetzgebung überführt werden. Auch das Datum für den Ausstieg aus der Braunkohleförderung in der Lausitz war zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Studie ebenso ungeklärt wie die Zustimmung von Bundestag und Bundesrat zum Strukturstärkungsgesetz.

Trotz dieser Unsicherheiten ist es als unbedingt notwendig zu erachten, die mit ihnen ebenso verbundenen Gestaltungschancen jetzt zu ergreifen, Stärken weiterzuentwickeln und neue Felder zu erschließen. Dazu sind auch die Empfehlungen der KWSB möglichst vollständig in regionale Maßnahmen zu überführen. Das Ziel „in gemeinsamem Engagement von Bund, den Ländern Brandenburg und Sachsen, Kommunen und Landkreisen, Sozialpartnern sowie zivilgesellschaftlichen Akteuren eine attraktive und zukunftsgerichtete Wirtschaftsregion mit neuen Wertschöpfungsketten aufzubauen“ (KWSB 2019: 74) bildet, verbunden mit dem Anspruch, die Lausitz als Industrie- und Energie-region zu erhalten, den Konsens der aktuellen Diskurse um die Zukunft der Region. Nachhaltigkeit ist dabei voran- und die Langfristigkeit des Unterfangens in Rechnung zu stellen, denn erfolgreich gestalteter Strukturwandel erfordert neben innovativen Ideen, einer hohen Investitionsbereitschaft und qualifizierten, motivierten Beschäftigten vor allem einen langen Atem.

Batterierecycling kann dabei eine Zukunftstechnologie und -perspektive für die Lausitz sein.

## Literatur- und Quellenverzeichnis

Accurec (2018): Battery Recycling Datasheet. Online: [https://accurec.de/wp-content/uploads/2018/04/Li-ion-RE\\_2018.pdf](https://accurec.de/wp-content/uploads/2018/04/Li-ion-RE_2018.pdf).

ADAC-Stiftung (Hrsg.) (2019): Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen in Deutschland. Berlin.

AGORA Energiewende (2017): Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2017. Online: [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Jahresauswertung\\_2017/Agora\\_Jahresauswertung-2017.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Jahresauswertung_2017/Agora_Jahresauswertung-2017.pdf).

American Manganese (14.12.2018): American Manganese gelingt mit der Patentierung seines Lithiumionen-batterien-Recyclings ein bedeutender Meilenstein. Online: <https://americanmanganeseinc.com/american-manganese-gelingt-mit-der-patentierung-seines-lithiumionenbatterien-recyclings-ein-bedeutender-meilenstein/>.

Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2017): Arbeitslosigkeit (lange Reihen). Online: <https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/statistiken/langereihen.asp?Ptyp=450&Sageb=13002&creg=BBB&anzwer=5>.

Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2016): Verdienststrukturerhebung im Land Brandenburg 2014. Online: [https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/publikationen/stat\\_berichte/2016/SB\\_N01-05-00\\_2014j04\\_BB.pdf](https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/publikationen/stat_berichte/2016/SB_N01-05-00_2014j04_BB.pdf).

Amt für Statistik Berlin-Brandenburg und Landesamt für Bauen und Verkehr (2018): Bevölkerungsvoraus-berechnung für das Land Brandenburg. Online: [https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/publikationen/stat\\_berichte/2018/SB\\_A01-08-00\\_2018u00\\_BB.pdf](https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/publikationen/stat_berichte/2018/SB_A01-08-00_2018u00_BB.pdf).

Anzai, Akihito (04.04.2019): China scrambles to tap EV battery recycling opportunity. Nikkei Asian Review. Online: <https://asia.nikkei.com/Spotlight/Electric-cars-in-China/China-scrambles-to-tap-EV-battery-recycling-opportunity2>.

Arbeitskreis Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung der Länder VGRdL (2019): Bruttowertschöpfung, Einkommen. Online: <https://www.statistik-bw.de/VGRdL/>.

Barrera, Priscila (07.05.2019): Top Lithium-mining Companies. Online: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/battery-metals-investing/lithium-investing/top-lithium-producers/>.

Barth, Christof; Gruber, Harald & Kittelmann, Marlies (2018): Leitfaden für die Gefährdungsbeurteilung.

Battery University (o.J.): How to Recycle Batteries. Online: [https://batteryuniversity.com/learn/article/recycling\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/recycling_batteries).

Becker, Jörg; Beverungen, Daniel; Winter, Martin & Menne, Sebastian (Hrsg.) (2019): Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien.

Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (Hrsg.) (2016): Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen. Frankfurt am Main.

Benz, Arthur (2004): Multilevel Governance – Governance in Mehrebenensystemen. In: Benz A. (Hrsg.) Governance – Regieren in komplexen Regelsystemen. Governance. Wiesbaden.

Berger, Roland (2018): Studie Index Elektromobilität 2018. Automotive Competence Center & Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen.

Bilitewski, Bernd; Wagner, Jörg & Reichenbach, Jan (2018): Bewährte Verfahren zur kommunalen Abfallbewirtschaftung. Umweltbundesamt [Hrsg.]. Dresden.

Braun, Philipp (2016): Modellierung von All-Solid-State Batterien. Karlsruher Institut für Technologie – KIT, Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffe der Elektrotechnik. Online: [https://www.iam.kit.edu/wet/forschung\\_4150.php](https://www.iam.kit.edu/wet/forschung_4150.php).

Brünglinghaus, Christiane & Burkert, Andreas (2015): Quant auf dem Prüfstand. Online: <https://www.springer-professional.de/fahrzeugtechnik/quant-auf-dem-pruefstand/6561790>.

Buchert, Matthias & Sutter, Jürgen (2016a): Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren EcoBatRec für Lithium-Ionen-Batterien. Ökoinstitut [Hrsg.]. Berlin, Darmstadt.

Buchert, Matthias & Sutter, Jürgen (2016b): Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien. Ökoinstitut [Hrsg.]. Berlin, Darmstadt.

Buchert, Matthias; Jenseit, Wolfgang; Merz, Cornelia & Schüler, Doris (2011): Verbundprojekt: Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LIBRI – Teilprojekt: LCA der Recyclingverfahren. Ökoinstitut [Hrsg.]. Darmstadt.

Bundesagentur für Arbeit (2019a): Regionalreport über Beschäftigte. Online: [https://statistik.arbeitsagentur.de/nn\\_217688/Statischer-Content/Rubriken/Beschaeftigung/Beschaeftigte/Beschaeftigte-nach-Regionen-Kreise-kreisfreie-Staedte-und-Agenturen-fuer-Arbeit.html](https://statistik.arbeitsagentur.de/nn_217688/Statischer-Content/Rubriken/Beschaeftigung/Beschaeftigte/Beschaeftigte-nach-Regionen-Kreise-kreisfreie-Staedte-und-Agenturen-fuer-Arbeit.html).

Bundesagentur für Arbeit (2019b): Saisonbereinigte Zeitreihen – Deutschland, West/Ost und Länder (Monatszahlen). Online: [https://statistik.arbeitsagentur.de/nn\\_669046/Statischer-Content/Rubriken/Arbeitsmarkt-im-Ueberblick/Saisonbereinigte-Zeitreihen.html](https://statistik.arbeitsagentur.de/nn_669046/Statischer-Content/Rubriken/Arbeitsmarkt-im-Ueberblick/Saisonbereinigte-Zeitreihen.html).

Bundesagentur für Arbeit (2018a): Geringfügig entlohnte Beschäftigte nach Arbeits- und Wohnort – Deutschland, Länder, Kreise und Gemeinden (Jahreszahlen) – Juni 2018. Online: [https://statistik.arbeitsagentur.de/nn\\_31966/SiteGlobals/Forms/Rubrikensuche/Rubrikensuche\\_Suchergebnis\\_Form.html?view=processForm&resourceId=210358&input\\_=&pageLocale=de&topicId=746740&regionInd=d&region=&year\\_month=201806&year\\_month.GROUP=1&search=Suchen](https://statistik.arbeitsagentur.de/nn_31966/SiteGlobals/Forms/Rubrikensuche/Rubrikensuche_Suchergebnis_Form.html?view=processForm&resourceId=210358&input_=&pageLocale=de&topicId=746740&regionInd=d&region=&year_month=201806&year_month.GROUP=1&search=Suchen).

Bundesagentur für Arbeit (2018b): Regionalreport über Beschäftigte (Quartalszahlen). Stichtag: 30. September 2018. Online: <https://statistik.arbeitsagentur.de/Navigation/Statistik/Statistik-nach-Themen/Beschaeftigung/Beschaeftigte/Beschaeftigte-Nav.html>.

Bundesagentur für Arbeit (2013): Geringfügig entlohnte Beschäftigte nach Arbeits- und Wohnort – Deutschland, Länder, Kreise und Gemeinden (Jahreszahlen) – Juni 2013. Online: [https://statistik.arbeitsagentur.de/nn\\_31966/SiteGlobals/Forms/Rubrikensuche/Rubrikensuche\\_Suchergebnis\\_Form.html?view=processForm&resourceId=210358&input\\_=&pageLocale=de&topicId=746740&regionInd=d&region=&year\\_month=201306&year\\_month.GROUP=1&search=Suchen](https://statistik.arbeitsagentur.de/nn_31966/SiteGlobals/Forms/Rubrikensuche/Rubrikensuche_Suchergebnis_Form.html?view=processForm&resourceId=210358&input_=&pageLocale=de&topicId=746740&regionInd=d&region=&year_month=201306&year_month.GROUP=1&search=Suchen).

Bundesagentur für Arbeit (o.J.): Statistik nach Regionen. Online: <https://statistik.arbeitsagentur.de/Navigation/Statistik/Statistik-nach-Regionen/Politische-Gebietsstruktur-Nav.html>.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2017): Deutschland altert unterschiedlich. Online: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Service/Medien/2017/2017-alterung.html>.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi (2019): Jahresbericht der Bundesregierung zum Stand der Deutschen Einheit 2019. Online: <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Publikationen/Neue-Laender/jahresbericht-zum-stand-der-deutschen-einheit-2019.html>.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (o.J.): Eckpunkte zur Umsetzung der strukturpolitischen Empfehlungen der Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ für ein „Strukturstärkungsgesetz Kohleregionen“. S. 5. Online: [https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunkte-strukturwandel.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunkte-strukturwandel.pdf?__blob=publicationFile).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit BMU (2019): Klimaschutzplan 2050. Sektorziele. Online: <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/#c11681>.

Bundeszentrale für politische Bildung (2019): Arbeitslose und Arbeitslosenquote. In absoluten Zahlen und in Prozent aller zivilen Erwerbspersonen, 1980 bis 2018. Online: <http://www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/soziale-situation-in-deutschland/61718/arbeitslose-und-arbeitslosenquote>.

Carstensen, Jeanette; Seibert, Holger; Weyh, Antje; Jost, Oskar; Sujatan Uwe & Wiethölter, Doris (2018): Die Lausitz. Eine Region im Wandel. IAB-regional Berlin-Brandenburg 3/2018. Institut für Arbeitsmarkt und Berufsforschung (Hrsg.).

Chazan, Yigal (23.02.2019): China Rushes to Dominate Global Supply of Lithium. The Diplomat. Online: <https://thediplomat.com/2019/02/china-rushes-to-dominate-global-supply-of-lithium/>.

Clustermanagement Energietechnik Berlin-Brandenburg (Hrsg.) (2017): Die Region voller Energie. Masterplan für das Cluster Energietechnik Berlin-Brandenburg. Wirtschaftsförderung Land Brandenburg GmbH und Berlin Partner für Wirtschaft und Technologie GmbH. Online: [http://innovatives-brandenburg.de/sites/default/files/downloads/masterplan2017\\_1.pdf](http://innovatives-brandenburg.de/sites/default/files/downloads/masterplan2017_1.pdf).

Dehio, Jochen & Schmidt, Torsten (2018): Gesamt- und regionalwirtschaftliche Bedeutung des Braunkohlesektors und Perspektiven für die deutschen Braunkohleregionen. Diskussionspapier. RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung (Hg.). RWI-Materialien (Heft 126). Essen.

Der Bundeswahlleiter (2019): Europawahlen 2019. Strukturdaten. Online: <https://www.bundeswahlleiter.de/europawahlen/2019/strukturdaten/bund-99.html>.

Der Tagesspiegel (10.09.2018): Batteriezellen für die Elektromobilität. Altmaier plant Großinvestition in der Lausitz. Online: <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/batteriezellen-fuer-die-elektromobilitaet-altmaier-plant-grossinvestition-in-der-lausitz/23015218.html>.

DGB-Deutscher Gewerkschaftsbund (2019): Kommission für Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung. Echte Erfolge – echte Lasten. Blitzinformation zum Abschlussbericht. Online: <https://www.dgb.de/themen/++co++e-1803b3e-22df-11e9-8258-52540088cada>.

Elektroauto-News (2019a): Toyota, Honda und Panasonic planen japanische Allianz zur Kobalt-Beschaffung. Online: <https://www.elektroauto-news.net/2019/toyota-honda-panasonic-japanische-allianz-kobalt-beschaffung/>.

Elektroauto-News (2019b): Durchbruch: China vermag die Lithium-Produktionskosten auf ein Rekordtief zu senken. Online: <https://www.elektroauto-news.net/2019/durchbruch-china-lithium-produktionskosten-rekordtief-senken/>.

Elektroauto-News (2018): Materialtechnologie- und Recyclingkonzern Umicore bereitet sich auf steigende Akku-Recycling-Nachfrage vor. Online: <https://www.elektroauto-news.net/2018/recyclingkonzern-umicore-steigende-akku-recycling-nachfrage/>.

Energie Experten (03.12.2018): Redox-Flow-Batterie als Stromspeicher. Online: <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/redox-flow-batterie.html>.

Engel, Hauke; Hertzke, Patrick & Siccario, Giulia (2019): Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage. McKinsey Center for Future Mobility [Hrsg.].

Europäische Kommission (2019): European Battery Alliance. Online: [https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/european-battery-alliance\\_de](https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/european-battery-alliance_de).

Europäische Kommission (2017): Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017. Online: <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/DE/COM-2017-490-F1-DE-MAIN-PART-1.PDF>.

European Association for Storage of Energy – EASE (2016): Lithium-Metal-Polymer Battery. Online: [http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE\\_TD\\_Electrochemical\\_LMP.pdf](http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE_TD_Electrochemical_LMP.pdf).

Fischhaber, Sebastian; Regett, Anika; Schuster, Simon & Hesse, Holger (2016): Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen – Analyse von Nachnutzungsanwendungen, ökonomischen und ökologischen Potentialen. Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW) – Ergebnispapier Nr.18 [Hrsg.].

Fraunhofer ISC Institut für Silicatforschung (28.05.2018): Presseinformation: „AutoBatRec2020“: Altbatterien aus E-Fahrzeugen intelligent wiederverwerten – EU fördert Forschung für ressourceneffizientes Recycling von Traktionsbatterien. Online: <https://www.isc.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/auto-batrec2020-altbatterien-intelligent-wiederverwerten.html>.

Fraunhofer ISC Institut für Silicatforschung (06.09.2016): Effiziente Wiederverwertung von Lithium-Ionen-Batterien – Forschungsprojekt gestartet. Online: <https://www.isc.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/pressearchiv/pressearchiv-2016/effiziente-wiederverwertung-von-lithium-ionen-batterien.html>.

Fraunhofer IWKS Institut für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie (2019): Batterierecycling – aktuelle Herausforderungen und Lösungsansätze. Online: <https://www.iwks.fraunhofer.de/de/iwks-abteilungen/Energie-materialien/Batterien-und-PV-Module/batterierecycling.html>.

Frese, Alfons (10.09.2018): Batteriezellen für die Elektromobilität – Altmaier plant Großinvestition in der Lausitz. Der Tagesspiegel. Online: <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/batteriezellen-fuer-die-elektromobilitaet-altmaier-plant-grossinvestition-in-der-lausitz/23015218.html>.

Freudenberg Performance Materials (04.10.2019): Keine Chance für Kurzschlüsse. Online: <https://www.freudenberg-pm.com/Innovationen/Seperatoren>.

Frieske, Benjamin et al. (2019): Strukturstudie BWe mobil 2019. Transformation durch Elektromobilität und Perspektiven der Digitalisierung. E-mobil BW GmbH (Hg.). Stuttgart.

Frondel, Manuel; Budde, Rüdiger; Dehio, Jochen; Janßen-Timmen, Ronald; Rothgang, Michael & Schmidt, Torsten (2017): Erarbeitung aktueller vergleichender Strukturdaten für die deutschen Braunkohleregionen. Projektbericht für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung (Hrsg.). Essen.

Gellner, Martha; Wuschke, Lutz; Jäckel, Hans-Georg & Peuker, Urs (2015): Akkus mechanisch aufbereiten. In.: Recycling Magazin (16) 2015. S. 26-29.

Greib, Martina; Wörten, Christine; Richter, Fabian; Ötsch, Rainald; Witt, Uwe und Troost, Axel (2019): Struktur- und industriepolitische Alternativen für die Lausitz. In: Rosa-Luxemburg-Stiftung (2019): Nach der Kohle. Alternativen für einen Strukturwandel in der Lausitz. Berlin.

Hagelüken, Christian (2011): Recycling von Elektroaltgeräten – Lösungsansätze in Deutschland und der EU. Präsentation im Deutschen Bundestag am 30.11.2011 in Berlin.

Handelsblatt (26.06.2019): Neue Wohnungen, die Rückkehr der Depots und Deutschland als digitales Mittelmaß. S. 24-25. Online: <https://www.handelsblatt.com/infografiken/grafik/handelsblatt-grafiken-des-monats-juni-2019-neue-wohnungen-urlaub-in-der-heimat-und-die-renaissance-des-depots/24520254.html?ticket=ST-36346287-IHbf32JwbxEZgPYQhDv9-ap1>.

Handelsblatt (04.05.2019): E-Autobatterien Elektroschrott: Europas heimliche Rohstoffquelle. Online: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/e-autobatterien-elektroschrott-europas-heimliche-rohstoffquelle/24284052.html>.

Handelsblatt (29.04.2019): Brüssel will die eigene Batteriezelle. Online <https://www.handelsblatt.com/politik/international/zellproduktion-eu-macht-druck-auf-altmaier-wegen-batteriezellenfabrik/24260718.html>.

Handelsblatt (15.04.2019): Sieben Millionen E-Autos bis 2030: Autoriesen fordern Staatshilfen. Online: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/elektromobilitaet-sieben-millionen-e-autos-bis-2030-autoriesen-fordern-staatshilfen/24214158.html?ticket=ST-2019963-f4BcZEICzhMRBikXI2dB-ap1>.

Handelsblatt (30.01.2019): Volkswagen will seinen Elektro-Baukasten als Industriestandard etablieren. Deshalb sind die Wolfsburger auch bereit, die Technik mit Wettbewerbern zu teilen. Online: [3677 https://edison.handelsblatt.com/erleben/vw-oeffnet-elektro-plattform-fuer-die-konkurrenz/23928568.html](https://edison.handelsblatt.com/erleben/vw-oeffnet-elektro-plattform-fuer-die-konkurrenz/23928568.html).

Hanisch, C.; Haselrieder, W. & Kwade, A. (2014): Recycling von Lithium-Ionen-Akkus. Online: <https://www.elektroniknet.de/elektronik/power/recycling-von-lithium-ionen-akkus-106499.html>.

Harendt, Bertram; Dietrich, Nina; Doser, Jan Wolfgang; Mayer, Christian A. & Erling, Uwe M. (2018): Elektromobilitätsgesetz (EmoG) – Gesetz zur Bevorrechtigung der Verwendung elektrisch betriebener Fahrzeuge – Bericht-erstattung 2018. Deutsches Dialog Institut GmbH, Noerr LLP [Hrsg.]. Frankfurt am Main.

heise online (26.10.2015): Joint Venture: Speicher aus gebrauchten E-Auto-Akkus. Online: <https://www.heise.de/autos/artikel/Joint-Venture-baut-Speicher-aus-gebrauchten-E-Auto-Akkus-2854938.html>.

Hermann, Hauke; Schumacher, Katja & Förster, Hannah (2018): Beschäftigungsentwicklung in der Braunkohle-industrie: Status quo und Projektion. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit / Climate Change 18/2018. Öko-Institut Berlin im Auftrag des Umweltbun-desamtes.

Holzmann, Anna (24.10.2018): China's battery industry is powering up for global competition. Online: <https://www.merics.org/en/blog/chinas-battery-industry-powering-global-competition>.

Hornyak, Tim (26.02.2019): How Toyota is helping Japan with its multibillion-dollar push to create a hydrogen-fueled society. Veröffentlicht von: CNBC. Online: <https://www.cnbc.com/2019/02/26/how-toyota-is-helping-japan-create-a-hydrogen-fueled-society.html>.

Hoyer, Claas (2015): Strategische Planung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in Deutschland. Dissertation Technische Universität Braunschweig.

Huang, Echo (25.06.2019): China's breaking up the EV battery monopoly it carefully created. Online: <https://qz.com/1651944/china-ends-policy-steering-ev-makers-to-local-battery-firms/>.

IAB Institut für Arbeitsmarkt und Berufsforschung (Hrsg.) (2018): Die Lausitz. Eine Region im Wandel. IAB-Regional 03/2018.regional Berlin-Brandenburg 3/2018.

ifo Institut (2019): Die Diskussion um Batterieproduktion in der Lausitz geht am Problem vorbei. Pressemitteilung vom 10.07.2019. Online: <https://www.ifo.de/node/43699>.

ifo Institut (2014): Industrie- und Wirtschaftsregion Lausitz: Bestandsaufnahme und Perspektiven. Dresden.

IG Metall (2019): Die Lausitz muss Industrie- und Energieregion bleiben. In: prägnant 05. Newsletter zur Wirt-schafts-, Struktur- und Sozialpolitik der IG Metall Berlin-Brandenburg-Sachsen. Berlin.

IHK Cottbus und Handwerkskammer Cottbus (2019): Wirtschaftsentwicklung im Zahlenspiegel 2018/2019. Online: [https://www.cottbus.ihk.de/blob/cbihk24/standortpolitik/zahlen\\_fakten /3560506/ 10d09342bbece-3b47251e8988c8c7591/Zahlenspiegel-Download-data.pdf](https://www.cottbus.ihk.de/blob/cbihk24/standortpolitik/zahlen_fakten /3560506/ 10d09342bbece-3b47251e8988c8c7591/Zahlenspiegel-Download-data.pdf).

Kane, Mark (13.04.2016): Samsung SDI and LG Chem have a battery problem in China where subsidies were redi-rected to LFP-type cells. Online: <https://insideevs.com/news/329724/samsung-sdi-and-lg-chem-have-a-battery-problem-in-china-where-subsidies-were-redirected-to-lfp-type/>

Karlsruher Institut für Technologie KIT (2018): Expertenforum am 6. Juni 2018. Recycling aktueller und zukünftiger Batteriespeicher – Technische, ökonomische und ökologische Implikationen. Karlsruhe.

Kay, Amanda (18.07.2018): 5 Top Cobalt-mining Companies. Online: <https://investingnews.com/daily/resour-ce-investing/battery-metals-investing/cobalt-investing/top-cobalt-producing-companies/>.

KBA Kraftfahrt-Bundesamt (2019a): Neuzulassungen von Pkw im Jahr 2018 nach ausgewählten Kraftstoffar-ten. Online: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Umwelt/2018\\_n\\_umwelt\\_dusl.htm-l?nn=652326](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Umwelt/2018_n_umwelt_dusl.htm-l?nn=652326).

KBA Kraftfahrt-Bundesamt (2019b): Bestand an Pkw in den Jahren 2010 bis 2019 nach ausgewählten Kraftstoffar-ten. Online: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2019\\_b\\_umwelt\\_z.html?nn=663524](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2019_b_umwelt_z.html?nn=663524).

Ketterer, B.; Karl, U.; Möst, D. & Ulrich, S. (2009): Lithium-Ionen Batterien: Stand der Technik und Anwendungs-potenzial in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Institut für Materialforschung I, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH [Hrsg.]. Karlsruhe.

KLiB Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e.V. (2019): Lexikon Batterieforum Deutschland, Stand 08/2019. Online: <https://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/>.

Kluge, Jan; Lehmann, Robert; Ragnitz, Joachim & Rösel, Felix (2014a): Industrie- und Wirtschaftsregion Lausitz: Bestandsaufnahme und Perspektiven. ifo Dresden (Hg.): Studien (No. 71). Dresden.

Kluge, Jan; Lehmann, Robert & Rösel, Felix (2014b): Mehr als nur Kohle? Die Wirtschafts- und Industrieregion Lausitz – Teil 1: Branchen- und Unternehmensstruktur. ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung (ifo Dresden berichtet 2/2014). Dresden.

Kluge, Jan; Lehmann, Robert; Rösel, Felix & Gäbler, Stefanie (2014c): Mehr als nur Kohle? Die Wirtschafts- und Industrieregion Lausitz – Teil 2: Wachstumsprojektion und Zukunftsperspektiven bis 2030. ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung (ifo Dresden berichtet 2/2014). Dresden.

Koch, Alexander (25.04.2018): China verbietet erste Verbrenner. Online: <https://www.autozeitung.de/china-elektroquote-136922.html>.

Korthauer, Rainer [Hrsg.] (2013). Handbuch Lithium-Ionen-Batterien.

Kunde, Dirk (28.05.2019): Viel zu wertvoll zum Wegwerfen. Online: <https://www.golem.de/news/batterierecycling-viel-zu-wertvoll-zum-wegwerfen-1905-140943.html>

Kwade, Arno & Bärwaldt, Gunnar (2012): Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Recycling von Lithium-Ionen-Batterien im Rahmen des F&E-Programms „Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität“.

Kwade, Arno; Spengler, Thomas; Herrmann, Christoph; Scholl, Stephan & Kurrat, Michael et al. (2016): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – LithoRec II – Abschlussberichte der beteiligten Verbundpartner.

KWSB Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ (2019): Abschlussbericht. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.). Online: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abschlussbericht-kommission-wachstum-strukturwandel-und-beschaeftigung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abschlussbericht-kommission-wachstum-strukturwandel-und-beschaeftigung.pdf?__blob=publicationFile).

Land Brandenburg (20.08.2019): Entwicklungsgesellschaft für die Zukunft der Lausitz. Pressemitteilung. Online: [https://www.brandenburg.de/media\\_fast/1167/190820%20PM%20Kabinett%20Strukturentwicklungsgesellschaft.pdf](https://www.brandenburg.de/media_fast/1167/190820%20PM%20Kabinett%20Strukturentwicklungsgesellschaft.pdf).

Land Brandenburg (02.07.2018): Lausitz-Beauftragter jetzt mit Sitz in Cottbus. Online: <https://www.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.601616.de>.

Landtag Brandenburg (16.11.2016): Antwort der Landesregierung auf die Kleine Anfrage Nr. 2182 des Abgeordneten Dierk Homeyer der CDU-Fraktion Drucksache 6/5271. Ausbau der Breitbandversorgung in Brandenburg. Drucksache 6/5453.

Land Brandenburg und Freistaat Sachsen (2017): Grundsatzpapier Gemeinsam für die Zukunft der Industrieregion Lausitz. Online: [https://www.smwa.sachsen.de/download/Grundsatzpapier\\_Gemeinsam\\_fuer\\_die\\_Zukunft\\_der\\_Industrieregion\\_Lausitz.pdf](https://www.smwa.sachsen.de/download/Grundsatzpapier_Gemeinsam_fuer_die_Zukunft_der_Industrieregion_Lausitz.pdf).

Landesregierung Brandenburg (2019): Bericht zur Wirtschaftslage der Lausitz. Drucksache 6/10238.

Lausitzer Rundschau (02.05.2019): Korken-Knall auf die Statistik bleibt aus. Online: [https://www.lr-online.de/nachrichten/wirtschaft/arbeitslosigkeit-sinkt-strukturschwaeche-bleibt-kein-korkenknall-in-der-lausitz\\_aid-38483901](https://www.lr-online.de/nachrichten/wirtschaft/arbeitslosigkeit-sinkt-strukturschwaeche-bleibt-kein-korkenknall-in-der-lausitz_aid-38483901).

LEAG Lausitz Energie Bergbau AG (o.J.): Geschäftsfelder. Kraftwerke. Online: <https://www.leag.de/de/geschaeftsfelder/kraftwerke/>.

Lebedeva, Natalia; Di Persio, Franco & Boon-Brett, Lois (2016): Lithium ion battery value chain and related opportunities for Europe. Europäische Kommission [Hrsg.].

Leisinger, Christopher & Runkel, Matthias (2019): Die Klimaverantwortung der Automobilkonzerne. Wie VW, Mercedes und Co. die deutsche CO<sub>2</sub>-Bilanz ruinieren. Greenpeace 2019 (Hrsg.). Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft e. V.

- Loughran, Jack (27.03.2018): Japan's first electric car battery recycling plant to sell old batteries at half price. Online: <https://eandt.theiet.org/content/articles/2018/03/japan-s-first-electric-car-battery-recycling-plant-to-sell-old-batteries-at-half-price/>.
- Maisch, Marija (12.07.2019): Lithium-ion recycling rates far higher than some statistics suggest. Online: <https://www.pv-magazine.com/2019/07/12/lithium-ion-recycling-rates-far-higher-than-some-statistics-suggest/>.
- Manthey, Nora (26.03.2018/2018a): Nissan opens recycling plant to swap EV batteries with 4R. Online: <https://www.electrive.com/2018/03/26/nissan-opens-recycling-plant-for-ev-batteries-with-4r/>.
- Manthey, Nora (05.07.2018/2018b): Korea's first EV battery recycling centre on Jeju island. Online: <https://www.electrive.com/2018/07/05/koreas-first-ev-battery-recycling-centre-on-jeju-island/>.
- Manthey, Nora (15.10.2018/2018c): BMW, Northvolt & Umicore to create green battery. Online: <https://www.electrive.com/2018/10/15/bmw-northvolt-umicore-to-create-green-battery/>.
- Market.us (08.01.2019): Global Lithium-ion Battery Recycling Market. Online: <https://www.marketwatch.com/press-release/research-lithium-ion-battery-recycling-market-with-top-players-umicore-retriev-technologies-and-glencore-2019-08-01>.
- Markwardt, Gunther & Zundel, Stefan (2017): Strukturwandel in der Lausitz – Eine wissenschaftliche Zwischenbilanz. In: ifo Institut (Hg.). ifo Dresden berichtet (Vol. 24, Iss. 3).
- McKinsey (2019): Ergebnisse des aktuellen Electric Vehicle Index (März 2019) von McKinsey. Online: <https://www.mckinsey.de/branchen/automobil-zulieferer/electric-vehicle-index>.
- MDR Sachsenspiegel (29.12.2018): Abschluss nach 20 Jahren Leipziger Neuseenland ist vollständig geflutet. Online: <https://www.mdr.de/sachsen/leipzig/leipzig-leipzig-land/abschluss-flutung-neuseenland-100.html>
- Min-hee, Jung (29.11.2018): SK Innovation to Enter Chinese EV Battery Recycling Market. BusinessKorea. Online: <http://www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=27009>.
- Mindestlohnkommission (2016): Erster Bericht zu den Auswirkungen gesetzlichen gesetzlichen Mindestlohns an die Bundesregierung nach § 9 Abs. 4 Mindestlohngesetz.
- Miningscout (04.12.2018): China baut Dominanz in der Kobalt-Branche aus. Online: <https://www.miningscout.de/blog/2018/12/04/china-baut-dominanz-in-der-kobalt-branche-aus/>.
- NPE Nationale Plattform Elektromobilität (2018): Fortschrittsbericht 2018 – Markthochlaufphase. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung – GGEMO [Hrsg.].
- NPE Nationale Plattform Elektromobilität (2016): Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung – GGEMO [Hrsg.].
- Öko-Institut (2017): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität – Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende. Berlin.
- Peters, Jens F.; Baumann, Manuel & Weil, Marcel (2018): Recycling aktueller und zukünftiger Batteriespeicher: Technische, ökonomische und ökologische Implikationen – Ergebnisse des Expertenforums am 6. Juni 2018 in Karlsruhe. KIT.
- Plazzo, Michaela (22.09.2016): Vattenfall, BMW und Bosch testen second-use-Batteriespeicher. Online: <https://www.euwid-energie.de/vattenfall-bmw-und-bosch-testen-second-use-batteriespeicher/>.
- Prognos AG (2019): Zukunftsatlas. Das Ranking für Deutschlands Regionen. Berlin.
- Proton Motor Fuel Cell GmbH (o.J.): Funktionsweise Brennstoffzelle. Online: <https://www.proton-motor.de/zero-emission-loesungen/funktionsweise-brennstoffzelle/>.
- Rahimzei, Ehsan; Sann, Kerstin & Vogel, Moritz (2015): Kompendium: Li-Ionen-Batterien – Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen. Veröffentlichung im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic durch den Verband für Elektrotechnik (VDE).

Reitberger, Josef (03.12.2017): Neue Akku-Technik für E-Autos: So soll der Stromer bezahlbar werden – Wie kommt der Strom ins Auto?. Online: [https://www.chip.de/artikel/Neue-Akku-Technik-fuer-E-Autos-So-soll-der-Stromer-bezahlbar-werden\\_120295623.html](https://www.chip.de/artikel/Neue-Akku-Technik-fuer-E-Autos-So-soll-der-Stromer-bezahlbar-werden_120295623.html).

Rennhak, Carsten & Nufer, Gerd (2012): Die Batterie als Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität der Zukunft Herausforderungen – Potentiale – Ausblick. Online: [https://www.esb-business-school.de/fileadmin/user\\_upload/Fakultaet\\_ESB/Forschung/Publikationen/Diskussionsbeitraege\\_zu\\_Marketing\\_Management/2012-3-Reutlinger-Diskussionsbeitraege-Mark-Mngmt-E-Mobility-Batterie.pdf](https://www.esb-business-school.de/fileadmin/user_upload/Fakultaet_ESB/Forschung/Publikationen/Diskussionsbeitraege_zu_Marketing_Management/2012-3-Reutlinger-Diskussionsbeitraege-Mark-Mngmt-E-Mobility-Batterie.pdf).

Retzer, Sandra; Huber, Martin & Wagner, Markus (2018): The E-Mobility Race and China's Determination to Win – Measures by the Chinese government to accelerate e-mobility development. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH – GIZ [Hrsg.]. Peking.

Retriev Technologies (o.J.): <https://www.retrievtech.com>.

Romare, Mia & Dahllöf, Lisbeth (2017): The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries. Stockholm.

Sächsische Zeitung (29.01.2019): Sachsen will Struktur in den Strukturwandel bringen. In den nächsten Wochen werden die 171 Vorschläge für den Kohleausstieg geprüft. Online: <https://www.saechsische.de/freistaat-bringt-struktur-in-den-strukturwandel-5029224.html>.

Scherf, Christian & Wolter, Frank (2016): Electromobility – Overview, Examples, Approaches – Sustainable Urban Transport Technical Document #15. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) [Hrsg.].

Seibt, Torsten (18.05.2019): Duesenfeldt Batterie-Recycling – Schreddern für die Elektroauto-Zukunft. Online: <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/duesenfeld-batterie-recycling-von-elektroautos/>.

Smith, Samantha (2017): Just Transition. A Report for the OECD. Just Transition Centre. Online: <https://www.oecd.org/environment/cc/g20-climate/collapsecontents/Just-Transition-Centre-report-just-transition.pdf>.

Spiegel Online (25.06.2019): Klimaschutz: Scheuer will zehn Millionen Elektroautos – bis 2030. Online: <https://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/verkehrsministerium-will-zehn-millionen-e-autos-bis-2030-a-1274272.html>.

Spiegel Online (05.04.2019): Strukturhilfen für die Länder. So will der Bund die Milliarden für den Kohleausstieg verteilen. Online: <https://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/kohleausstieg-wie-der-bund-die-milliarden-verteilen-will-a-1261524.html>.

Stark, Alexander (25.05.2018): Analysis of Electromobility in Six Countries— Where to Invest Next. Online: <https://www.spotlightmetal.com/analysis-of-electromobility-in-six-countries-where-to-invest-next-a-718387/>.

Statista (2017): Bevölkerung – Zahl der Einwohner\*innen in Deutschland nach Altersgruppen am 31. Dezember 2017 (in Millionen). Online: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1365/umfrage/bevoelkerung-deutschlands-nach-altersgruppen/>.

Statistik der Kohlenwirtschaft (Hrsg.) (2016): Zur Lage des Kohlenbergbaus in der Bundesrepublik Deutschland. Online: [https://www.kohlenstatistik.de/files/lb\\_statistik\\_2016\\_jan\\_sept.pdf](https://www.kohlenstatistik.de/files/lb_statistik_2016_jan_sept.pdf).

Statistisches Bundesamt (2019): diverse Statistiken. Online: [www.destatis.de](http://www.destatis.de).

Statistisches Bundesamt (2016): Fortschreibung des Bevölkerungsstandes. Ergebnisse auf Grundlage des Zensus 2011. Kreise (31.12.2017). Online: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Publikationen/Downloads-Bevoelkerungsstand/bevoelkerungsfortschreibung-2010130167004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Publikationen/Downloads-Bevoelkerungsstand/bevoelkerungsfortschreibung-2010130167004.pdf?__blob=publicationFile&v=4).

Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen (2017): Verdienststrukturerhebung im Freistaat Sachsen 2014. Online: [https://www.statistik.sachsen.de/download/100\\_Berichte-N/N\\_I\\_5\\_4j14\\_SN.pdf](https://www.statistik.sachsen.de/download/100_Berichte-N/N_I_5_4j14_SN.pdf).

Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen. (o.J.): Kreisfreie Städte und Landkreise. Online: <https://www.statistik.sachsen.de/html/46985.htm>.

Su-a, Kim (27.06.2017): Jeju Government plans to turn Jeju into world's first carbon-free island by 2030. Online: <http://www.koreapost.com/news/articleView.html?idxno=4213>.

Tawaki Battery (04.10.2018): China will launch a pilot electric vehicle battery recycling scheme. Online: <http://www.tawaki-battery.com/china-electric-vehicle-battery-recycling-scheme>.

Taylor, Brian (18.02.2019): DOE opens lithium-ion battery recycling center. Online: <https://www.recyclingtoday.com/article/doe-argonne-lithium-ion-battery-recycling-research/>.

The Digital Times (06.03.2018): China to recycle used battery of EV – Korea in hesitation. Online: [http://eng.dt.co.kr/contents.html?article\\_no=20180306103510001431](http://eng.dt.co.kr/contents.html?article_no=20180306103510001431).

Thielmann, Axel; Sauer, Andreas & Wietschel, Martin (2015): Gesamt Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung – ISI [Hrsg.].

Treffer, Frank et al. (2011): Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – Lithium-Ionen Batterierecycling Initiative – LiBRi – im Rahmen des F&E-Programms „Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität“. Hanau.

TU Braunschweig et al. (2017): LithoRec II. Abschlussbericht. Braunschweig.

TU Braunschweig et al. (2012): LithoRec. Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Abschlussbericht des Verbundprojektes. Braunschweig.

Tübke, Jens; Möller, Kai-Christian et al. (2017): Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität. Fraunhofer-Allianz Batterien [Hrsg.], Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung – ISI.

Umicore Deutschland (2019): Standorte. Karriere. Online: <https://www.umicore.de/>.

U.S. Department of Energy. (o.J.): Lithium-Ion Battery Recycling Prize. Online: <https://americanmadechallenges.org/batteryrecycling/>.

VDA Verband der Automobilindustrie (23.05.2017): Wissmann: Deutsche Automobilindustrie bei Forschung und Entwicklung ganz vorn. Online: <https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/20170523-wissmann-deutsche-automobilindustrie-bei-forschung-und-entwicklung-ganz-vorn.html>.

Viehmann, Sebastian (21.06.2018): 4 Euro für 100 Kilometer: Revolutioniert der Flüssig-Akku das Elektroauto?. In: Fokus-Online. Online: [https://www.focus.de/auto/elektroauto/nanoflowcell-quantino-5-euro-fuer-100-kilometer-elektroauto-mit-fluessig-akku-vor-dem-marktstart\\_id\\_9129442.html](https://www.focus.de/auto/elektroauto/nanoflowcell-quantino-5-euro-fuer-100-kilometer-elektroauto-mit-fluessig-akku-vor-dem-marktstart_id_9129442.html).

Volkswagen AG – VW Newsroom (12.07.2019): „Wir wollen den MEB als Industriestandard etablieren“. Online: <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/stories/wir-wollen-den-meb-als-industriestandard-etablieren-5187>.

Werwitzke, Cora (06.09.2018): Japan: Autobauer streben vereintes Akku-Recycling an. Online: <https://www.electrive.net/2018/09/06/japan-autobauer-streben-vereintes-akku-recycling-an/>.

Weyhe, Reiner et al. (2016): Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Demonstrationsanlage für ein kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Li-Ionen Batterien aus der Elektromobilität – EcoBatRec.

Weyhe, Reiner (2013): Recycling von Lithium-Ion Batterien. In: Konferenzband zur 6. Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz 04.-05.03.2013 in Berlin.

Wirtschaftsregion Lausitz – WRL (2019): Zukunftswerkstatt Lausitz – Eine Strategie. Ein Leitbild. Eine Zukunft. Online: <https://zw-lausitz.de/leitbild/>.

WSI Verteilungsmonitor 2019 (2019): Verfügbare Einkommen in Deutschland. Online: [https://www.boeckler.de/wsi\\_118958.htm](https://www.boeckler.de/wsi_118958.htm).

## Abkürzungsverzeichnis

ADR	Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße	HEV	Hybrid Electric Vehicle, Hybridelektroauto
AltfahrzeugV	Altfahrzeugverordnung	HWK	Handwerkskammer
BA	Bundesagentur für Arbeit	IAB	Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung
BASF	BASF SE (ehemals: Badische Anilin- & Soda-Fabrik)	ifo	Institut für Wirtschaftsforschung e.V.
BattG	Batteriegelgesetz	IG BCE	Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung	IG Metall; IGM	Industriegewerkschaft Metall
BEV	Battery Electric Vehicle; Elektroauto	IHK	Industrie- und Handelskammer
BIP	Bruttoinlandsprodukt	iRL	Innovationsregion Lausitz GmbH
BTU	Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg	KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid	KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
DEBRIV	Deutscher Braunkohlen-Industrie-Verein; auch: Bundesverband Braunkohle	KWBS	Kommission für Wachstum, Beschäftigung und Strukturwandel
DGB	Deutscher Gewerkschaftsbund	LEAG	Marke der Lausitz Energie Verwaltungs GmbH, Lausitz Energie Bergbau AG und der Lausitz Energie Kraftwerke AG
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.	Li-Io	Lithium-Ionen
EG	Europäische Gemeinschaft	MW	Megawatt
EPH	Energetický a průmyslový holding a.s.	OEM	Original Equipment Manufacturer - Originalausrüstungshersteller
EPR	Extended Producer Responsibility Prinzip	PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
EU	Europäische Union	PRO	Producer Responsibility Organisation
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle; Brennstoffzellenfahrzeug	RWI	Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung
FHG	Fraunhofer Gesellschaft	sv-pflichtig	sozialversicherungspflichtig
F&E	Forschung und Entwicklung	UN	United Nations; Vereinte Nationen
GGVSEB	Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt	UVBB	Vereinigung der Unternehmerverbände Berlin-Brandenburg
GRW	Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der regionalen Wirtschaftsstruktur	WiL	Wirtschaftsinitiative Lausitz
		WRL	Wirtschaftsregion Lausitz GmbH
		WZ	Wirtschaftszweig
		ZDW	Zentrum für Dialog und Wandel

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lage, Strukturdaten und VerkehrswegeNetz der Lausitz .....	7
Abbildung 2:	Entwicklung der Lausitzer Landkreise im Gesamt-ranking des Zukunftsatlas.....	8
Abbildung 3:	Anteile sv-pflichtiger Beschäftigung in der Lausitz nach Sektoren .....	13
Abbildung 4:	Beschäftigung nach ausgewählten Berufen.....	18
Abbildung 5:	Wertschöpfungskette Batterierecycling.....	82

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anzahl Einwohner*innen 2017 und Veränderung 2017 bis 2030 nach Altersklassen .....	9
Tabelle 2:	Umsatzentwicklung im Verarbeitenden Gewerbe (WZ C) sowie Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden (WZ B) .....	12
Tabelle 3:	Anteile der sv-pflichtig Beschäftigten zum 30.09.2018.....	15
Tabelle 4:	Sv-pflichtige Beschäftigung nach Anforderungsniveau der ausgeübten Tätigkeit .....	15
Tabelle 5:	Verfügbares Einkommen der privaten Haushalte und Arbeitnehmerentgelt je Arbeitsstunde .....	19
Tabelle 6:	Forschungsintensität und F&E-Personalintensität in der Lausitz.....	22
Tabelle 7:	Regional und überregional involvierte Akteure und Akteursgruppen (Auswahl) .....	26
Tabelle 8:	Umsatzsteigerung Branche „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen“ 2009 bis 2017.....	30
Tabelle 9:	Emissionsgrenzwerte Deutschland 2021 bis 2030.....	30
Tabelle 10:	Übersicht Technologien Elektroantrieb .....	32
Tabelle 11:	Neuzulassungen 2017 und Neuzulassungen BEV Entwicklung in EU-28 .....	34
Tabelle 12:	Neuzulassungen batterieelektrischer PKW in der EU-28.....	34
Tabelle 13:	Markthochlaufszenerarien DLR.....	35
Tabelle 14:	Wesentliche Batterieparameter .....	38
Tabelle 15:	Übersicht über Eigenschaften der gängigen Kathodenmaterialien von Li-Io Batterien .....	43
Tabelle 16:	Generische Zellzusammensetzung der Kathoden der für Elektromobilität relevanten Li-Io-Batterietypen in Massenprozent .....	50
Tabelle 17:	Relevante Rohstoffdaten für die kritischen Rohstoffe in Li-Io Batterien.....	51
Tabelle 18:	LBST Szenario 1.....	57
Tabelle 19:	LBST Szenario 2.....	58
Tabelle 20:	Überblick über vorgestellte Firmen und Forschungsprojekte im Zusammenhang mit dem Recycling von Li-Io-Traktionsbatterien .....	61
Tabelle 21:	Recyclingeffizienzen der ausgewählten Verfahren nach Wertstoffen in %.....	67
Tabelle 22:	Vergleich der Ökobilanzen der Projekte LiBRi, LithoRec und EcoBatRec .....	69
Tabelle 23:	Übersicht wichtiger Unternehmen in der Lieferkette für die Batteriezellproduktion ..	70
Tabelle 24:	Beispiele für Recyclingunternehmen und -initiativen in den führenden Wirtschaftsräumen .....	73
Tabelle 25:	Tätigkeitsfelder industriellen Batterierecyclings entlang der Wertschöpfungskette ...	84
Tabelle 26:	Berufsbilder industriellen Batterierecyclings.....	85

## Hinweise zu den Autor\*innen

**Katrin Nicke** ist ausgebildete Siebdruckerin und Politikwissenschaftlerin. Als Stipendiatin der Hans-Böckler-Stiftung studierte sie Governance (M.A.) und Politik- und Verwaltungswissenschaften (B.A.) an der Universität in Hagen und ist seit 2019 im IMU-Institut tätig. Katrin Nickes fachliche Tätigkeitsfelder liegen im Bereich Zukunft der Arbeit, in der Politikfeldanalyse, der Regionalentwicklung sowie in der qualitativen und quantitativen Sozialforschung. Ebenso arbeitet sie zu branchenpolitischen Aufgabenstellungen, zu Fragen der Raumordnung und der Daseinsvorsorge.

**Gregor Holst** hat sein Studium an der Humboldt-Universität zu Berlin und der Rijksuniversiteit Groningen als Diplom Geograph abgeschlossen. Seit 2005 ist er im IMU-Institut tätig und hat dort seit 2017 auch die Funktion der Geschäftsführung inne. Seine fachlichen Arbeitsschwerpunkte liegen in der handlungsorientierten und praxisbezogenen Wirtschafts-, Regional-, Arbeitsmarkt- und Struktur-forschung und -entwicklung. In zahlreichen Forschungs- und Umsetzungsprojekten hat Gregor Holst zu quantitativen und qualitativen Fragen in der Branchen-, Fachkräfte- und Strukturpolitik sowie in der innovations- und arbeitsbezogenen Kooperation in Netzwerken und Clustern gearbeitet.

**Tabea Gleiter** legte 2018 ihren Bachelorabschluss in Physik an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel ab und studiert seitdem im Masterstudium mit Schwerpunkt Meteorologie an der Ludwig-Maximilians-Universität in München. Neben ihrem Studium ist sie bei der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH tätig.

**Lutz Reichelt** studierte Verkehrswirtschaft an der TU Dresden und arbeitet seit 1992 bei der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Niederlassung Dresden. Seine fachlichen Arbeitsschwerpunkte finden sich u. a. in der Koordinierung von bzw. Managementunterstützung in Verbundprojekten insbesondere mit KMUs, in der fachlichen Begleitung von Strategieprojekten im Technologiefeld, Wasserstoff und Brennstoffzellen sowie im Bereich zukunftsfähiger Energie- und Mobilitätskonzepte.

**Dr. Werner Zittel** hat an der Ludwig-Maximilians-Universität in München Physik studiert und im Rahmen eines Promotionsstipendiums am Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching promoviert. Er ist seit 1989 Mitarbeiter der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. Seine fachlichen Schwerpunkte liegen u. a. in Umweltaspekten der Energieversorgung und energiewirtschaftlichen Grundsatzfragen. Ebenso beschäftigt er sich mit Analysen derzeitiger und künftiger Energieversorgungssysteme (insbesondere kommunale Analysen und Umsetzungskonzepte) sowie mit Analysen von Potenzialen und Versorgungsmöglichkeiten mit fossilen Brennstoffen sowie erneuerbaren Energien.

## Die Otto Brenner Stiftung ...

... ist die gemeinnützige Wissenschaftsstiftung der IG Metall. Sie hat ihren Sitz in Frankfurt am Main. Als Forum für gesellschaftliche Diskurse und Einrichtung der Forschungsförderung ist sie dem Ziel der sozialen Gerechtigkeit verpflichtet. Besonderes Augenmerk gilt dabei dem Ausgleich zwischen Ost und West.

... initiiert den gesellschaftlichen Dialog durch Veranstaltungen, Workshops und Kooperationsveranstaltungen (z. B. im Herbst die OBS-Jahrestagungen), organisiert Konferenzen, lobt jährlich den „Brenner-Preis für kritischen Journalismus“ aus, fördert wissenschaftliche Untersuchungen zu sozialen, arbeitsmarkt- und gesellschaftspolitischen Themen, vergibt Kurzstudien und legt aktuelle Analysen vor.

... informiert regelmäßig mit einem Newsletter über Projekte, Publikationen, Termine und Veranstaltungen.

... veröffentlicht die Ergebnisse ihrer Forschungsförderung in der Reihe „OBS-Arbeitshefte“ oder als Arbeitspapiere (nur online). Die Arbeitshefte werden, wie auch alle anderen Publikationen der OBS, kostenlos abgegeben. Über die Homepage der Stiftung können sie auch elektronisch bestellt werden. Vergriffene Hefte halten wir als PDF zum Download bereit.

... freut sich über jede ideelle Unterstützung ihrer Arbeit. Aber wir sind auch sehr dankbar, wenn die Arbeit der OBS materiell gefördert wird.

... ist zuletzt durch Bescheid des Finanzamtes Frankfurt am Main V (-Höchst) vom 29. Mai 2018 als ausschließlich und unmittelbar gemeinnützig anerkannt worden. Aufgrund der Gemeinnützigkeit der Otto Brenner Stiftung sind Spenden steuerlich absetzbar bzw. begünstigt.

## Unterstützen Sie unsere Arbeit, z. B. durch eine zweckgebundene Spende

Spenden erfolgen nicht in den Vermögensstock der Stiftung, sie werden ausschließlich und zeitnah für die Durchführung der Projekte entsprechend dem Verwendungszweck genutzt.

### Bitte nutzen Sie folgende Spendenkonten:

Für Spenden mit zweckgebundenem Verwendungszweck zur Förderung von Wissenschaft und Forschung zum Schwerpunkt:

- Förderung der internationalen Gesinnung und des Völkerverständigungsgedankens

Bank: HELABA Frankfurt/Main  
IBAN: DE11 5005 0000 0090 5460 03  
BIC: HELA DE FF

Für Spenden mit zweckgebundenem Verwendungszweck zur Förderung von Wissenschaft und Forschung zu den Schwerpunkten:

- Angleichung der Arbeits- und Lebensverhältnisse in Ost- und Westdeutschland (einschließlich des Umweltschutzes)
- Entwicklung demokratischer Arbeitsbeziehungen in Mittel- und Osteuropa
- Verfolgung des Zieles der sozialen Gerechtigkeit

Bank: HELABA Frankfurt/Main  
IBAN: DE86 5005 0000 0090 5460 11  
BIC: HELA DE FF

Geben Sie bitte Ihre vollständige Adresse auf dem Überweisungsträger an, damit wir Ihnen nach Eingang der Spende eine Spendenbescheinigung zusenden können. Oder bitten Sie in einem kurzen Schreiben an die Stiftung unter Angabe der Zahlungsmodalitäten um eine Spendenbescheinigung. Verwaltungsrat und Geschäftsführung der Otto Brenner Stiftung danken für die finanzielle Unterstützung und versichern, dass die Spenden ausschließlich für den gewünschten Verwendungszweck genutzt werden.

## Aktuelle Ergebnisse der Forschungsförderung in der Reihe „OBS-Arbeitshefte“

- **OBS-Arbeitsheft 100**  
Tim Engartner  
**Wie DAX-Unternehmen Schule machen**  
Lehr- und Lernmaterial als Türöffner für Lobbyismus
- **OBS-Arbeitsheft 99\***  
Tobias Gostomzyk, Daniel Moßbrucker  
**„Wenn Sie das schreiben, verklage ich Sie!“**  
Studie zu präventiven Anwaltsstrategien gegenüber Medien
- **OBS-Arbeitsheft 98\***  
Lutz Frühbrodt, Annette Floren  
**Unboxing YouTube**  
Im Netzwerk der Profis und Profiteure
- **OBS-Arbeitsheft 97\***  
Wolfgang Schroeder, Stefan Fuchs  
**Neue Mitglieder für die Gewerkschaften**  
Mitgliederpolitik als neues Politikfeld der IG Metall
- **OBS-Arbeitsheft 96**  
Rainer Faus, Simon Storks  
**Im vereinten Deutschland geboren –  
in den Einstellungen gespalten?**  
OBS-Studie zur ersten Nachwendegeneration
- **OBS-Arbeitsheft 95\***  
Bernd Gäbler  
**AfD und Medien**  
Erfahrungen und Lehren für die Praxis
- **OBS-Arbeitsheft 94\***  
Olaf Hoffjahn, Oliver Haidukiewicz  
**Deutschlands Blogger**  
Die unterschätzten Journalisten
- **OBS-Arbeitsheft 93\***  
Michael Haller  
**Die „Flüchtlingskrise“ in den Medien**  
Tagesaktueller Journalismus zwischen  
Meinung und Information
- **OBS-Arbeitsheft 92\***  
Bernd Gäbler  
**AfD und Medien**  
Analyse und Handreichungen
- **OBS-Arbeitsheft 91\***  
Alexander Hensel, Florian Finkbeiner u. a.  
**Die AfD vor der Bundestagswahl 2017**  
Vom Protest zur parlamentarischen Opposition
- **OBS-Arbeitsheft 90\***  
Hans-Jürgen Art, Martin Kempe, Sven Osterberg  
**Die Zukunft der Arbeit als öffentliches Thema**  
Presseberichterstattung zwischen  
Mainstream und blinden Flecken

\* Printfassung leider vergriffen; Download weiterhin möglich.

## Die Stiftung neue Länder

Die Stiftung zur Förderung arbeitsmarktpolitischer Vorhaben in den neuen Bundesländern, kurz „**Stiftung neue Länder**“ (SNL), ist eine nicht rechtsfähige Stiftung in Verwaltung der Otto Brenner Stiftung.

Die **Stiftung Neue Länder** unterstützt ihrem Stiftungszweck entsprechend Vorhaben in den neuen Bundesländern mit folgenden Schwerpunkten:

- Projekte zur Reintegration von Langzeitarbeitslosen auf den Arbeitsmarkt.
- Projekte zur Berufsorientierung von Schülern.
- Projekte zur Vermeidung von Ausbildungsabbrüchen/Begleitung von Auszubildenden.
- Studien zu den Themen demographischer Wandel und Fachkräftesicherung.

Weitere Publikationen der **Stiftung Neue Länder**:

- Integration von Langzeitarbeitslosen – gemeinsam aktiv, Ergebnisse aus der wissenschaftlichen Begleitung eines Modellprojektes im Landkreis Leipzig
- Berufswünsche und Zukunftsvorstellungen von Jugendlichen, Ergebnisse aus der wissenschaftlichen Begleitung eines Modellprojektes zur Berufsorientierung
- Im Zeichen des Fachkräftemangels, Neue Entwicklungen im Agieren vor allem jüngerer Arbeitnehmer speziell am ostdeutschen Arbeitsmarkt
- Arbeitskräftesicherung in der ostdeutschen Automobilindustrie
- Kennziffer „Produktivität“, Bedeutung und Anwendungsmöglichkeiten am Beispiel der Metall- und Elektroindustrie in Ostdeutschland
- Aktives Altern in Brandenburg und Sachsen gestalten, Ein Praxisleitfaden, Analysen – Tipps – Gute Praxis
- Fit durch Neue Arbeit im Gesundheitswesen, Ein arbeitsmarktpolitisches Vorhaben zur Unterstützung Pflegebedürftiger und ihrer Angehörigen, Erfahrungen und Ergebnisse eines Projektes
- ZIEL – Zielgerichtete Integration junger Langzeitarbeitsloser, Erfahrungen und Ergebnisse eines Projektes
- Zukunft sichern, Wie Sie als Betriebsrat eines KMU die Auswirkungen des demographischen Wandels mitgestalten können, Erfahrungen und Ergebnisse eines Projektes

**Katrin Nicke/Gregor Holst/Tabea Gleiter/Lutz Reichelt/Werner Zittel**

**Batterierecycling als Beschäftigungsperspektive  
für die Lausitz**

Ansätze einer arbeits- und beschäftigungsorientierten  
Regionalentwicklungsstrategie