



Dokumentation

Einzelaspekte der Batterietechnologie in Elektroautos

Einzelaspekte der Batterietechnologie in Elektroautos

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 010/19
Abschluss der Arbeit: 19. März 2019
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und
Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Zukunftsaspekte der Batterietechnologie	4
3.	Literatur zum Rohstoffbedarf für Batterietechnologie sowie Energievergleichsanalyse und Ökobilanzierung	4
3.1.	Übersichtsartikel und Auftragsstudien	4
3.2.	Auswahl wissenschaftlicher Primärliteratur	10

1. Einleitung

Aktuell werden kontroverse Debatten zum Umweltvorteil von Elektroautos geführt. Diese reichen von Bewertungen, dass es sich hierbei um eine sehr große Errungenschaft in Hinblick auf den Klimawandel handle bis dahin, dass Elektroautos gar umweltschädlicher seien als Autos mit Verbrennungsmotoren. Die Kritik liegt zumeist darin begründet, dass ggf. Emissionen von der Fahrzeugnutzung auf die Fahrzeugproduktion und Stromerzeugung verlagert werden könnten, wodurch sich die Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit an anderer Stelle potenziell erhöhen könnten, sich die Umweltbilanz also verschiebt. Hierzu werden immer wieder Studien angeführt, die das mediale Bild zum Thema Umweltfreundlichkeit von Elektroautos schnell verschieben können. Die vorliegende Dokumentation beschäftigt sich mit einzelnen Fragen, die für eine Ökobilanzierung von Elektroautos eine Rolle spielen, beispielsweise die jeweils verwendete Batterietechnologie.

Ein aktueller Sachstand der Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages beschäftigt sich mit Fragen der Lithium-Ionen-Batterietechnologie (kurz Li-Ionentechnologie), die weit über die Verwendung in Elektroautos hinausgeht.¹

2. Zukunftsaspekte der Batterietechnologie

Eine verlässliche Vorhersage, dass und vor allem welche andere Batterietechnologie in der Zukunft die Li-Ionentechnologie ersetzen wird, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt schwer möglich.² Tatsächlich ist derzeit eine Vielzahl alternativer chemischer Modelle in der Erprobungsphase. Ein spezifisches Markteintrittsdatum ist für diese alternativen Technologien bislang nicht bekannt. Auf der anderen Seite ist auch eine Extrapolation des Lithiumbedarfs, basierend auf der heutigen Technologie, bis 2050 nicht verlässlich möglich.³ Auf Szenarien in näherer Zukunft wird im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit eingegangen.

3. Literatur zum Rohstoffbedarf für Batterietechnologie sowie Energievergleichsanalyse und Ökobilanzierung

3.1. Übersichtsartikel und Auftragsstudien

Die Umweltauswirkungen von **batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge (BEVs)** werden typischerweise durch eine standardisierte Ökobilanzmethode (Life Cycle Assessment, LCA) bewertet. Eckard Helmers und Martin Weiss haben 2017 einen Übersichtsartikel (Review) mit dem Titel „**Advances and critical aspects in the life-cycle assessment of battery electric cars**“ verfasst, in

1 Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages: Großbatteriespeicher. Einzelfragen zur Lithium-Ionen-Batterietechnologie WD 8 - 3000 - 002/19 vom 28. Januar 2019. Abrufbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/627424/74e15e4e6f393a030176b8cb29effc24/WD-8-002-19-pdf-data.pdf>

2 Persönliche Informationen der Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld vom 24. Januar 2019.

3 Ebd.

dem sie die Ökobilanz-Literatur zusammengetragen haben, die die wichtigsten Trends und Herausforderungen bei der Folgenabschätzung von BEVs beleuchten.⁴ Sie stellen fest, dass BEVs in der Regel energieeffizienter und umweltfreundlicher sind als herkömmliche Autos. Die Verwendung von BEVs führt zu einer geringeren Luftverschmutzung, da ihre Auswirkungen weitgehend auf die Fahrzeugproduktion und die Stromerzeugung außerhalb von Stadtgebieten zurückzuführen sind. Der CO₂-Fußabdruck reagiert empfindlich auf die Kohlenstoffintensität des Strommixes. Daher kann sich dieser im Hinblick auf BEVs in Zukunft verbessern, wenn eine Umstellung auf erneuerbare Energien und allgemeine technologische Verbesserungen erfolgen. Allerdings bildet nur eine Minderheit der Ökobilanzmethoden andere Wirkungskategorien als den CO₂-Fußabdruck ab, wodurch ein heterogenes Bild entsteht. Bisher wurde bei der Ökobilanz wenig auf den Effizienzvorteil der BEVs im Stadtverkehr, die Lücke zwischen dem Energieverbrauch auf der Straße und dem zertifizierten Energieverbrauch, die lokale Belastung durch Luftschadstoffe und Lärm und die Alterung der Emissionskontrolltechnologien in konventionellen Autos eingegangen.

Die Problematik der Fokussierung von Klimabilanzrechnungen auf den CO₂-Ausstoß thematisieren auch Hinrich Helms, Julius Jöhrens und Udo Lambrecht in einem Artikel („**Elektrofahrzeug und Verbrenner im Umweltcheck**“) in der Zeitschrift „Internationales Verkehrswesen“: „Die Fokussierung einer Klimabilanz auf den CO₂-Ausstoß am Auspuff greift also für einen Umweltvergleich zu kurz, der gesamte Lebensweg eines Fahrzeugs muss betrachtet werden. Dieser Ansatz einer Ökobilanz (engl. Life-Cycle Assessment = LCA) schließt die Herstellung und Entsorgung des Fahrzeugs inklusive Gewinnung und Verarbeitung der benötigten Rohstoffe ebenso ein wie die Energiebereitstellung und deren Emissionen. Für die Nutzungsphase muss dabei auch ein realitätsnaher Kraftstoff- und Stromverbrauch berücksichtigt werden.“⁵ Hierbei verweisen sie auf eine Umweltbilanzierung des Instituts für Energie- und Umweltforschung (ifeu), das im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) erstellt wurde.⁶

-
- 4 E. Helmers, M. Weiss (2017): Advances and critical aspects in the life-cycle assessment of battery-electric cars (review), Energy and Emission Control Technologies, Vol. 5, pp 1—18; im Internet abrufbar unter: <https://www.umwelt-campus.de/ehelmers/> [zuletzt abgerufen am 7. März 2019].
 - 5 Hinrich Helms, Julius Jöhrens und Udo Lambrecht: Elektrofahrzeug und Verbrenner im Umweltcheck, Internationales Verkehrswesen (68) 3 | 2016; im Internet abrufbar unter: http://www.emobil-umwelt.de/images/pdf/helms_et_al_2016_elektrofahrzeug_und_verbrenner_im_umweltcheck.pdf [zuletzt abgerufen am 7. März 2019].
 - 6 ifeu: Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Hinrich Helms, Julius Jöhrens, Claudia Kämper, Jürgen Giegrich, Axel Liebich, Regine Vogt, Udo Lambrecht. ifeu- Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu). Umweltbundesamt. UBA Texte., Dessau-Roßlau, 2016. Abrufbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_27_2016_umweltbilanz_von_elektrofahrzeugen.pdf

Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit wurde eine Studie zu Klimaschutzszenarien mit dem Titel „**Klimaschutzszenario 2050**“⁷ vom Öko-Institut e.V.⁸ sowie Fraunhofer ISI⁹ erstellt.¹⁰ In Hinblick auf den Elektroverkehr wird hier festgestellt: „Der Fokus politischer Maßnahmen liegt bis 2030 auf der Förderung effizienterer Verkehrsträger (öffentlicher Verkehr, Schiene, Fahrrad) sowie auf einer Effizienzsteigerung bei Pkw und Lkw. Zur Vermeidung von Rebound-Effekten werden die durch steigende Effizienz sinkenden Kilometerkosten im Straßenverkehr ausgeglichen, z. B. durch Erhöhung der Mineralölsteuer bzw. fahrleistungsabhängige Maut. Zusätzlich ist die Elektrifizierung des Verkehrs von hoher Bedeutung. Im Luftverkehr muss ein wirksamer Emissionshandel etabliert werden.“

Das Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu) hat 2016 einen Bericht im Auftrag des Umweltbundesamtes unter dem Titel „**Aktualisierung `Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2035´ (TREMODO) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014)**“ veröffentlicht.¹¹ Zur Abschätzung des Emissionsverhaltens wird ein Berechnungsmodell für die verkehrsbedingten Emissionen aller Verkehrsträger benötigt. Deshalb veranlasste das Umweltbundesamt die Erstellung des „Transport Emission Model“ (kurz: TREMOD). Bei der aktualisierten Fassung wurde ein zunehmender Anteil an Elektro- und Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen für die Trendberechnung berücksichtigt: „Im Trendszenario wird unterstellt, dass der Anteil der Hybrid-Pkws, batterie-elektrischen Fahrzeugen (BEVs) und plug-in-elektrischen Fahrzeugen (PHEVs) an den Neuzulassungen kontinuierlich zunehmen wird. Grundannahme hierbei ist, dass das Ziel der Bundesregierung von 6 Mio. Elektrofahrzeugen in 2030 erreicht wird. Das Ziel von 1 Mio. Elektrofahrzeuge wird hingegen nicht bis 2020, sondern wenige Jahre später erreicht. Bis zum Jahr 2035 haben so Fahrzeuge mit externer Stromversorgung (BEV und PHEV) einen Anteil von 35 % an den Neuzulassungen, während der Anteil der konventionellen Fahrzeuge mit Benzin- und Dieselantrieb auf 46 % zurückgeht. Die restlichen Fahrzeuge sind im wesentlichen Hybride (HEV). Der elektrische Fahranteil der PHEV wird gegenüber 2014 konstant angenommen. Für die Entwicklung gasbetriebener Pkw orientieren sich an den Marktpotenzialanalysen für CNG und LPG im „mittleren“ Szenario in [ifeu, 2015]¹². Die Neuzulassungen bzw. Umrüstungen nehmen somit bis 2025 leicht zu und gehen anschließend zurück. [...] Mit diesen Annahmen wird für das

-
- 7 Öko-Institut e.V ; Fraunhofer ISI: Klimaschutzszenario 2050 2. Endbericht; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit; 18. Dezember 2015; <https://www.oeko.de/oeko-doc/2451/2015-608-de.pdf> [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].
- 8 Öko-Institut e.V.; Büro Berlin; www.oeko.de [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].
- 9 Fraunhofer ISI www.isi.fhg.de [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].
- 10 Zentrale Fragestellungen waren: (1) Welche Emissionsminderung könnte erreicht werden, wenn die aktuelle Energie- und Klimapolitik fortgeschrieben wird? (2) Welche Maßnahmen und Strategien sind notwendig, um die Klimaziele zu erreichen? (3) Welche Kosten/Nutzen-Relationen ergeben sich daraus für die Verbraucher und die Volkswirtschaft?
- 11 Im Internet abrufbar unter: [https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Endbericht TREMOD 2016 160701.pdf](https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Endbericht_TREMODO_2016_160701.pdf) [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].
- 12 ifeu (2015): Entwicklung der Energiesteuereinnahmen im Kraftstoffsektor. Heidelberg.

Jahr 2020 zum Jahresende ein Bestand von rund 500.000 Fahrzeugen mit externer elektrischer Aufladung erreicht. Im Jahr 2035 sind es rund 9 Mio. Fahrzeuge.“¹³

Das Umweltbundesamt hat 2016 eine umfassende Studie zur „**Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen**“ publiziert.¹⁴ Zusammenfassend schreiben die Autoren: „Vorteile haben Elektrofahrzeuge potenziell in der Nutzungsphase durch die hohe Energieeffizienz des Antriebsstrangs und insbesondere durch den zukünftig steigenden Anteil erneuerbarer Energien in der Strombereitstellung. Klimabilanz und kumulierter Energieaufwand werden überwiegend durch die Nutzungsphase beeinflusst und zeigen daher in der Gesamtbetrachtung Vorteile für Elektrofahrzeuge. Nachteile für Elektrofahrzeuge ergeben sich vor allem bei der Fahrzeugherstellung. Kumulierter Rohstoffaufwand, Wasserbedarf sowie Versauerung und gesundheitliche Belastungen werden überwiegend durch die Herstellung der Fahrzeuge beeinflusst und zeigen daher aktuell in der Gesamtbetrachtung Nachteile für Elektrofahrzeuge. Die Vorteile von Elektrofahrzeugen werden sich nach den Analysen in den nächsten Jahren weiter erhöhen (insbesondere durch den Ausbau erneuerbarer Energien) und die Nachteile verringern (durch Verbesserung spezifischer Batterieeigenschaften und verstärktes Recycling auch aus ökonomischen Gründen). Voraussetzung dafür ist ein konsequenter Umbau der Energiewirtschaft sowie Anreize für eine rohstoffeffiziente Produktgestaltung und weitgehende Kreislaufwirtschaft.“¹⁵ Im Hinblick auf die Ressourcenbewertung wird in der Studie auf die Herstellung der Batterien verwiesen, wobei verschiedene Rohstoffe eingesetzt würden, die bislang nicht oder nur unzureichend rückgeführt würden. „Kritische Materialien in Elektrofahrzeugen, die nicht in konventionellen Fahrzeugen eingesetzt werden, sind dabei vor allem Kobalt und Seltene Erden. Als ‚bedingt kritisch‘ werden heute u. a. die Kathodenmaterialien Nickel und Lithium eingestuft. Hier könnte zukünftig ein relevanter Anteil an der globalen Förderung durch die Elektromobilität beansprucht werden (bei Kobalt z. B. 38 % bei 10 Mio. produzierten Fahrzeugen jährlich), so dass dann auch diese Materialien als kritisch eingestuft werden könnten. [...] Strategien zur Minderung der Kritikalität können u. a. a. auf eine Reduktion des absoluten Materialeinsatzes an sich, b. auf eine Reduktion des Einsatzes von Primärmaterialien (Recycling) oder c. die Verwendung alternativer Materialien abzielen.“¹⁶ Zudem wird in der Studie auf verschiedene Vergleichsszenarien mit unterschiedlicher Motorisierung eingegangen, beispielsweise Treibhausgasemissionen, Versauerungspotenzial, Sommersmogpotenzial, Potenzial terrestrischer Eutrophierung, Feinstaubemissionen, Humantoxizität.¹⁷

13 Im Internet abrufbar unter: https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Endbericht_TREMOD_2016_160701.pdf [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].. S. 69f.

14 Hinrich Helms, Julius Jöhrens, Claudia Kämper, Jürgen Giegrich, Axel Liebich, Regine Vogt, Udo Lambrecht, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg: Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen; Texte 27/2016; https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_27_2016_umweltbilanz_von_elektrofahrzeugen.pdf [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].

15 Ebd., Seite 5.

16 Ebd., Seite 22f.

17 Vgl. Hierzu ebd., Seiten 78 ff.

In einem Papier mit dem Titel „**Social, economic and environmental challenges in primary lithium and cobalt sourcing for the rapidly increasing electric mobility sector**“, das im Rahmen des durch das Rahmenforschungsprogramm der EU geförderte Horizon 2020-Projekt STRADE (Strategic Dialogue on Sustainable Raw Materials for Europe, Laufzeit 1.12.2015 bis 30.11.2018¹⁸) verfasst wurde, wird die Frage nach der Verfügbarkeit von Rohstoffen vor dem Hintergrund des wachsenden Elektroverkehrssektors besprochen:¹⁹ Seit einiger Zeit werde der steigende Materialbedarf zur Herstellung von Komponenten für Elektrofahrzeuge verbunden mit prognostizierten Engpässen und verschiedenen Risikoszenarien diskutiert. Dabei stehen insbesondere Lithium, Kobalt, Nickel, Mangan, Graphit und Kupfer im Fokus der Debatte. Wenn das Ziel verfolgt werde, erhebliche Batteriefertigungskapazitäten in Europa zu erreichen, müsse der derzeitige Produktionsschwerpunkt, der vor allem bei japanischen, südkoreanischen und chinesischen Unternehmen liege, im Weltmarkt verschoben werden. Die europäische Industrie müsse sich dabei zwei Hauptherausforderungen mit Blick auf die rasche globale technologische Weiterentwicklung stellen: stabile Rohstoffbeschaffung und die zeitnahe Entwicklung von Spitzentechnologien, die mit der asiatischen und US-amerikanischen Industrie konkurrierten. Neben den Rohstoffversorgungsaspekten spielten aber auch Umweltaspekte und soziale Herausforderungen eine wichtige Rolle bei der Bewertung der Zukunft des Elektromobilitätssektors. Hierbei seien besonders die Rohstoffe Lithium und Kobalt zu nennen. Allerdings werden auch andere Rohstoffe genannt: die Weltbank prognostiziere einen mindestens verzehnfachten Nachfrageanstieg für Aluminium, Nickel, Eisen und Mangan in Hinblick auf Energiespeichertechnologien.²⁰ Die Gesamtnachfrage nach Aluminium, Eisen und Mangan werde allerdings aufgrund der höheren Nachfrage in anderen Sektoren (Bau, Infrastruktur, Maschinen usw.) nicht stark von neuen Energiespeicherkapazitäten beeinflusst. Dahingegen hätten Nickel, Graphit und Platin (für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge) eine höhere Relevanz. Insbesondere Nickel sei ein wichtiger Ersatz für Kobalt in aktuellen und zukünftigen Lithium-Ionen-Batterie-Technologien. Darüber hinaus entstünden alternative zukünftige Batterietechnologien wie die Redox-Flow-Batterie, wozu Nickel benötigt werde. In einer Studie des Öko-Institut e.V. wird auf den Rohstoffengpass von Nickel, Graphit und Platin ausgeführt eingegangen.²¹ In der Studie wird ein Zukunftsszenario für den Absatz und Einsatz von Elektroautos entwickelt. Das Szenario geht davon aus, dass Lithium-Ionen-Batterien auch in den 2030er Jahren die dominante Energiespeichertechnologie bleiben werden. Hierbei wird auch auf

18 Projektseite: <http://stradeproject.eu/index.php?id=4> [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].

19 Doris Schüler, Peter Dolega, Stefanie Degreif: Social, economic and environmental challenges in primary lithium and cobalt sourcing for the rapidly increasing electric mobility sector; Strategic Dialogue on Sustainable Raw Materials for Europe (STRADE) No. 06 / 2018; http://www.stradeproject.eu/fileadmin/user_upload/pdf/STRADE_PB_Li_Co_EMobility.pdf [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].

20 World Bank (2017). The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future. Im Internet verfügbar unter: <http://documents.worldbank.org/curated/en/207371500386458722/The-Growing-Role-of-Minerals-and-Metals-for-a-Low-Carbon-Future> [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].

21 Öko-Institut e.V.: Ensuring a Sustainable Supply of Raw Materials for Electric Vehicles. A Synthesis Paper on Raw Material Needs for Batteries and Fuel Cells, März 2018, im Internet abrufbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Rohstoffstrategien_EN_WEB.pdf [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].

Studien anderer Autoren mit ähnlichen Ergebnissen verwiesen.²² Es bestehe ein breiter Konsens darin, dass ein schneller Anstieg der Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge auch zu einem starken Anstieg der Nachfrage nach Lithium und Kobalt führen werde. Dabei sei die Prognose bis 2030 relativ sicher, vorausgesetzt, dass die globale Politik den Einsatz von Elektrofahrzeugen begünstige und keine schnellen unerwarteten technologischen Entwicklungen stattfänden. Die Trendabschätzung bis 2050 weise jedoch ein viel größeres Maß an Unsicherheit auf, insbesondere in Hinblick auf die Technologieentwicklung. Einzelheiten zur Analyse des Bedarfs und der Bedarfsdeckung für Lithium und Kobalt finden sich in der zitierten Studie des Öko-Institut e.V.²³ Hier wird auch auf Einzelheiten der Ressourcenlokalisierung eingegangen. Die zu beachtenden Umweltaspekte hingen stark von der Lokalisierung der Ressource ab. Mit den auf Australien und China zutreffenden Umweltrisiken in Hinblick auf Hartgesteinsabbau (Lithium) beschäftigt sich eine Studie aus dem Jahr 2016, die ebenfalls im Rahmen des STRADE-Projekts entstanden ist.²⁴ In Lateinamerika spielen Aspekte des Wasserverbrauchs und Hydrologie eine entscheidende Rolle. Eine VN-Expertengruppe wies 2010 darauf hin, dass die Gewinnung von Lithium durch Verdampfung von Sole in Salinen erhebliche Auswirkungen auf das oft empfindliche Gleichgewicht von angrenzendem Süß- und/oder Grundwasser habe und forderte, umfassende Studien anzufertigen und Überwachungen zur Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen, um negative Auswirkungen auf Flora, Fauna und Ökosysteme in den Salars und dem angrenzenden Gebiet zu verhindern, zu minimieren und abzumildern.²⁵ Aktuelle Überlegungen zu den Bestrebungen in Lateinamerika, Umweltrisiken einzudämmen, werden in der Studie des Öko-Institut e.V. kurz geschildert.²⁶ Sozial-ökonomische Aspekte werden ebenfalls diskutiert,

-
- 22 Pehlken A, Albach S, Vogt T (Berlin Heidelberg 2015). Is there a resource constraint related to lithium ion batteries in cars? (Assessing and managing life cycles of electric vehicles). Tisserant A, Pauliuk S (2016). Matching global cobalt demand under different scenarios for co-production and mining attractiveness. *Journal of Economic Structures*:1–19. Im Internet verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1186/s40008-016-0035-x>; Baylis R (2017). LIB raw material supply chain bottlenecks: looking beyond supply/demand/price. (advanced automotive battery conference). Mainz: [publisher unknown]; Levin Sources (August 2017). Hybrid Electric, Plug-in Hybrid Electric and Battery Electric Vehicles. Im Internet verfügbar unter: <http://www.levinsources.com/assets/papers/GreenEconomy-Series-Electric-Vehicles-CC-Aug29.pdf> [zuletzt abgerufen am 18.03.2019].
- 23 Seiten 4 ff. in: Öko-Institut e.v.: Ensuring a Sustainable Supply of Raw Materials for Electric Vehicles. A Synthesis Paper on Raw Material Needs for Batteries and Fuel Cells, März 2018, im Internet abrufbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Rohstoffstrategien_EN_WEB.pdf [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].
- 24 http://www.stradeproject.eu/fileadmin/user_upload/pdf/PolicyBrief_04-2016_Sep2016_FINAL.pdf [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].
- 25 United Nations Department of Economic and Social Affairs (DESA) & United Nations Economic Commission for Latin America and the Caribbean (10-11 November 2010). Senior Expert Group Meeting on Sustainable Development of Lithium Resources in Latin America: Emerging Issues and Opportunities - Conclusions and Recommendations. Available from: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Conclusions%20and%20Recommendations%20Lithium%20EGM%20-%20English%20-%20Final.pdf> [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].
- 26 Seite 8 f in: Öko-Institut e.v.: Ensuring a Sustainable Supply of Raw Materials for Electric Vehicles. A Synthesis Paper on Raw Material Needs for Batteries and Fuel Cells, März 2018, im Internet abrufbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Rohstoffstrategien_EN_WEB.pdf [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].

insbesondere auch mit Verweis auf eine Studie aus dem Jahr 2016.²⁷ Sozio-ökonomische Bedenken beziehen sich u. a. auf Landbesitz, Ressourcenlizenzen, lokale Vorteilsausgleiche aus dem industriellen Bergbau, eine potenziell schwere Wasserkrise und Umweltschäden durch giftige Chemikalien und eine unzureichende Lithiumabfallwirtschaft. Ein weiteres soziales Problem, das im Hinblick auf die Kobaltproduktion diskutiert wird, ist „Kinderarbeit“. So heißt es, die größte soziale Herausforderung in der Kobalt-Lieferkette sei die Kinderarbeit im ASM²⁸-Sektor (der etwa 20 % der Produktion in der Demokratischen Republik Kongo ausmache). Damit erreiche der ASM-Sektor weltweit einen Anteil von rund 10 Prozent.

3.2. Auswahl wissenschaftlicher Primärliteratur

In der wissenschaftlichen Zeitschrift *Journal of Power Sources* ist 2017 ein Artikel mit dem Titel „**Life cycle assessment of lithium sulfur battery for electric vehicles**“ erschienen. Hierin präsentieren die Autoren eine neue Ökobilanzierungsmethodik. Die Lithium-Schwefel (Li-S)-Batterie gelte weithin als die vielversprechendste Batterietechnologie für zukünftige **Elektrofahrzeuge (EVs)**, (englisch: Electric Vehicle). Um die Umweltverträglichkeitsleistung der Li-S-Batterie bei zukünftigen EVs zu verstehen, präsentieren die Autoren ein Ökobilanzmodell für eine umfassendere Umweltverträglichkeitsprüfung.²⁹

In der wissenschaftlichen Zeitschrift *Resources, Conservation and Recycling* ist 2017 ein Artikel mit dem Titel „**Life cycle assessment of lithium-ion batteries for greenhouse gas emissions**“ erschienen.³⁰ Hierin stellen die Autoren neue Lithium-Ionen-Sekundärbatterien vor. Die CO₂-Bilanz der Batterien wurde in vier Stufen ermittelt, und es wurden relevante Minderungsstrategien eingesetzt. In dieser Studie wurden die CO₂-Fußabdrücke von drei verschiedenen Batterien verglichen: Lithium-Ionen-Sekundärbatterie, Nickel-Metallhydrid-Batterie und Solarzelle. Das Ergebnis zeigt, dass die Kohlendioxidäquivalenz des Montageprozesses für die Rohstoffsequenz einer Nickel-Metallhydrid-Batterie (124 kg CO₂eq) größer ist als für die Solarzelle (95,8 kg CO₂eq) und diese größer ist als für die Lithium-Ionen-Sekundärbatterie (12,7 kg CO₂eq).

27 Quellenverweis: http://www.stradeproject.eu/fileadmin/user_upload/pdf/PolicyBrief_05-2016_Oct2016_FINAL.pdf [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].

28 ASM= artisanal and small-scale miners

29 Yelin Deng; Jianyang Li; Tonghui Li; Xianfeng Gao; Chris Yuan: Life cycle assessment of lithium sulfur battery for electric vehicles; *Journal of Power Sources*; Volume 343, 1 March 2017, Pages 284-295; <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775317300368> [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].

30 Yuhan Liang, Jing Su, Beidou Xi, Yajuan Yu, Danfeng Jia, Yuanyuan Sun, Chifei Cui, Jianchao Zhu: Life cycle assessment of lithium-ion batteries for greenhouse gas emissions; *Resources, Conservation and Recycling*; Volume 117, Part B, Februar 2017, Seiten 285-293; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344916302324> [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].

In der Zeitschrift *Joule* ist 2017 ein Artikel mit dem Titel „**Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals**“ erschienen.³¹ Der Artikel beschäftigt sich mit der Bedarfsdeckung von Rohstoffen für Batterien. Für die meisten Materialien, die in Lithium-Ionen-Batterien enthalten sind, gelte, dass die Versorgung aller Wahrscheinlichkeit nach in naher Zukunft gedeckt sein werde. Mit der Lieferung von Kobalt seien jedoch potenzielle Risiken verbunden. Darüber hinaus könne die Nachfrage bei einer raschen Einführung von Elektrofahrzeugen (Anreize durch politische Maßnahmen wie eine CO₂-Steuer, höhere Kraftstoffsteuern und weitere Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung in Unternehmen) das Angebot für einige batterietaugliche Materialien übersteigen (sehr kurzfristig auch für Lithium). Das habe Auswirkungen auf die Weiterentwicklung bzw. den Forschungssektor. Erstens sei die weitere Erforschung von Kathodenmaterialien, die einige dieser Lieferprobleme lindern, von Interesse (insbesondere solche, die kobaltfrei sind). Die Erforschung der Lieferkette und Untersuchungen im Bereich der Politik könnten auch dazu beitragen, Wege zu finden, wie die Materialverfügbarkeit in Zukunft gesichert werden könne.

In einem Übersichtsartikel aus dem Jahr 2018, der unter dem Titel „**Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries**“ in der Zeitschrift *Nature Energy* erschienen ist,³² stellen die Autoren fest, dass zur Reichweitenverbesserung von Elektroautos eine Verbesserung der Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) in Hinblick auf die Energiedichte und -kosten entlang der Batterie-Wertschöpfungskette erforderlich sei. Zudem müssten andere wichtige Leistungsindikatoren wie Lebensdauer, Sicherheit, Schnellladefähigkeit und Tieftemperaturleistung verbessert werden oder zumindest nachhaltig sein. In dem Artikel werden die Fortschritte und Herausforderungen bei Lithium-Ionen-Batterie-Werkstoffen für Automobilanwendungen, insbesondere in Bezug auf Kosten- und Leistungsparameter, dargestellt. Die Produktionsprozesse von Anoden- und Kathodenmaterialien werden diskutiert, wobei der Schwerpunkt auf Materialbereitstellung und Kosten liegt. Vorteile und Herausforderungen verschiedener Elektrolyttypen für Automobilbatterien werden untersucht. Schließlich werden Energiedichten und Kosten vielversprechender Batteriechemikalien kritisch bewertet und das Potenzial des Elektrofahrzeugantriebs begutachtet.

In der Zeitschrift *Nature Energy* ist 2017 ein Artikel mit dem Titel „**The future cost of electrical energy storage based on experience rates**“ erschienen.³³ In diesem Artikel werden Erfahrungskurven aufgestellt, um zukünftige Preise für elf elektrische Energiespeichertechnologien zu prognostizieren.

-
- 31 Elsa A. Olivetti, Gerbrand Ceder, Gabrielle G. Gaustad, Xinkai Fu: Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals; Volume 1, Issue 2, 11 October 2017, Pages 229-243; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435117300442> [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].
- 32 Richard Schmuch, Ralf Wagner, Gerhard Hörpel, Tobias Placke, Martin Winter: Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries *Nature Energy*; volume 3, pages 267–278 (2018); <https://www.nature.com/articles/s41560-018-0107-2> [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].
- 33 O. Schmidt, A. Hawkes, A. Gambhir, I. Staffell: The future cost of electrical energy storage based on experience rates; *Nature Energy*; volume 2, Article number: 17110 (2017); <https://www.nature.com/articles/nenergy2017110> [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].

In der Zeitschrift *Journal of Cleaner Production* ist 2018 ein Artikel mit dem Titel „**Supply risks associated with lithium-ion battery materials**“ erschienen.³⁴ Eine Möglichkeit zur Elektrifizierung des Straßenverkehrs bestehe in der Kombination von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen mit kohlenstofffreien Stromquellen. Mit hoher Wahrscheinlichkeit würden Lithium-Ionen-Batterien die Grundlage für diese Entwicklung bilden. In der Arbeit wird ein neues semi-quantitatives Bewertungsschema vorgestellt, um die relativen Versorgungsrisiken zu bewerten, die mit den in den Funktionsmaterialien von sechs verschiedenen Lithium-Ionen-Batterietypen verwendeten Elementen verbunden sind. Auf jedes Element werden elf verschiedene Indikatoren in vier Angebotsrisikokategorien angewendet. Die höchsten Versorgungsrisikowerte werden für Lithium und Kobalt erreicht, die niedrigsten für Aluminium und Titan. Kupfer, Eisen, Nickel, Kohlenstoff Graphit Mangan und Phosphor bilden die mittlere Gruppe. Eine Unsicherheitsanalyse zeigt, dass nur Lithium-Eisen-Phosphat ein messbar geringeres Versorgungsrisiko hat als die anderen Batterietypen. Für die sogenannte "Cost-Share"-Aggregation mit sieben Elementen hat Lithium-Kobalt-oxid ein wesentlich höheres Versorgungsrisiko als die meisten anderen Typen.

In einem Artikel aus dem Jahr 2017, der unter dem Titel „**Can Li-Ion batteries be the panacea for automotive applications?**“ in der Zeitschrift *Renewable and Sustainable Energy Reviews* erschienen ist,³⁵ werden verschiedene Aspekte von Lithium-Ionen-Batterien in Bezug auf Leistung, Haltbarkeit, Energiemanagement und Sicherheit im Zusammenhang mit Automobilanwendungen diskutiert. Auch werden Möglichkeiten, Li-Ionen-Akkus für Kraftfahrzeuge in stationären Anwendungen in Richtung Second Life zu entwickeln, besprochen.

-
- 34 Christoph Helbig; Alex M. Bradshaw; Lars Wietschel; Andrea Thorenz; Axel Tuma: Supply risks associated with lithium-ion battery materials; *Journal of Cleaner Production*; Volume 172, 20 January 2018, Pages 274-286; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617324228> [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].
- 35 A. Opitz, P. Badamia, L. Shen, K. Vignarooban, A. M. Kannan: Can Li-Ion batteries be the panacea for automotive applications? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Volume 68, Part 1, February 2017, Pages 685-692; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116306694> [zuletzt abgerufen am 18. März 2019].