Bürgerinitiative
„Lebenswerte Heimat rund ums Saaletal“

Rudolstadt, 22.03.2023

**Mail: info@buergerinitiative-slf-ru.de**

TLUBN Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz
Göschwitzer Straße 41
07745 Jena

Außenstelle Weimar, Dienstgebäude 1
**Harry-Graf-Kessler-Straße 1**
**99423 Weimar**

# Einwendung

Einwendungsfrist: bis einschließlich 23.03.2023

*zur 2. Beteiligung der Öffentlichkeit im Verfahren:*
Antrag auf immissionsrechtliche Genehmigung gem. § 8 i.V.m. §4 BImSchG zur Anlage „Errichtung und Betrieb der Recyclinganlage für Lithium-Ionen-Batterien (Black-Mass-Anlage) im Industriegebiet „Schwarza“ (Gemeinde Rudolstadt, Gemarkung Schwarza, Flurstücke 319/82, 319/83, 319/162, 319/174, 319/16) des Antragstellers SungEel Recycling Park Thüringen GmbH, Breitscheidstraße 148, 07407 Rudolstadt

Sehr geehrte Damen und Herren,

die Bürgerinitiative „Lebenswerte Heimat rund ums Saaletal“ hat sich in Sorge um die Gesundheit und Lebensqualität unserer Familien, Kinder, Enkel und Nachbarn zusammengeschlossen.

Die hier vorgebrachten Einwendungen der benannten Bürgerinitiative spiegeln die Sorgen und Ängste der Bevölkerung wider, welche durch direkte Mitarbeit in der Bürgerinitiative zusammengestellt und mit diesem Einwand gebündelt übermittelt werden. Weiterhin bekunden eine große Anzahl der Bürgerinnen und Bürger von Rudolstadt ihren Widerspruch mit der Unterschrift in den beigefügten Unterschriftenlisten.

Die nachfolgend aufgeführten Punkte werden als Einwand eingebracht. Wir behalten uns vor, alle Einwendungen im laufenden Verfahren zu konkretisieren, insbesondere nach Fristablauf und auf Nachfrage der Verfahrensbeteiligten, wenn Unklarheiten bestehen sollten.

## a) Frühzeitige Bürgerbeteiligung

Gemäß Punkt (3) des § 25 Verwaltungsverfahrensgesetzes ist das Ziel der frühzeitigen Bürgerbeteiligung, die betroffene Öffentlichkeit frühzeitig über die Ziele des Vorhabens, die Mittel, es zu verwirklichen, und die voraussichtlichen Auswirkungen des Vorhabens zu unterrichten. Es sollten bereits Ergebnisse der frühen Öffentlichkeitsbeteiligung in den Antrag eingearbeitet werden. Dies erfolgte nicht und wird als Verfahrensfehler gesehen.

**b) Standortprüfung nach §34 BauGB**

Aufgrund eines nicht vorhandenen Bebauungsplanes fehlt eine konkrete Standortprüfung, inwieweit sich der Bau (als Störfallbetrieb) in seiner Eigenart in die nähere Umgebung einfügt. Hierbei müssen Anforderungen an gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse gewahrt bleiben.
In nördliche Richtung schließt sich direkt ein eingeschränktes Gewerbegebiet an, in westliche Richtung eine Gemengelage, wo sich auch ein Wohnhaus mit 5 Wohnungen befindet. Der Trennungsgrundsatz wird verletzt. Eine Bebaubarkeit nach § 34 BauGB wird angezweifelt.

**c) Bündelung im Genehmigungsantrag (Antrag Pkt. 1.3.8)**

Im Gegensatz zur 1. öffentlichen Auslegung, bei der die Baugenehmigung gemäß Bauantragsunterlagen und die Eingriffsgenehmigung nach BNatSchG gebündelt werden sollten, fehlt in der 2. öffentlichen Auslegung die genannte Bündelung und lediglich die Bauantragsunterlagen werden hierbei noch als ausreichend erachtet. Dies halten wir für unbegründet, der aus dem 1. Auslegungsexemplar eingereichte Antragsteil ist wieder in die Antragstellung aufzunehmen.

**d) Verletzung des Abstandsgebotes in Verbindung mit KAS-18 und Art. 13 der Seveso-III-Richtlinie**

Gemäß § 50 BImSchG ist es erforderlich, gewisse Zwischenräume zu schaffen, welche erhebliche Belästigungen durch Luftverunreinigungen oder Geräusche sicher ausschließen.

Gemäß Art. 13 der Seveso-III-Richtlinie ist es das Ziel, die Flächennutzungen so auszuweisen, dass schwere Unfälle und ihre Folgen für die menschliche Gesundheit und die Umwelt begrenzt werden. Bei der Ansiedlung von Betrieben soll ein angemessener Sicherheitsabstand zwischen dem anzusiedelnden Betrieb auf der einen Seite und andererseits den schutzbedürftigen Nutzungen, wie Wohnbebauungen, öffentlich genutzte Gebäude, Freizeitgebiete, wichtige Verkehrswege und naturschutzrechtlich besonders empfindliche Gebiete, gewahrt werden. Diesen Grundsatz sehen wir hier als verletzt an. Durch die Fluor-Emission ist hier nach KAS-18, Anhang 2 ein Abstand von 500 m (Abstandsklasse 2) erforderlich, welcher bezüglich aller schutzbedürftigen Nutzungen unterschritten ist.

**e) Lärm**

Die Aufnahme der Lärmvorbelastung durch die bereits vorhandenen Industrie- und Gewerbeansiedlungen wurde nicht durchgeführt. Innerhalb von Industrie- und Gewerbegebieten hat sich eine *Gebietskontingentierung* als Stand der Technik herausgestellt. Aufgrund der fehlenden Ermittlung der Vorbelastungen ist auch eine Zuteilung innerhalb der Kontingentierung an SungEel nicht möglich.
Ebenfalls blieb die in Umsetzung der EU-Umgebungslärm-Richtlinie 2022/49/EG und die vorhandene Lärmkartierung der Hauptverkehrswege (Bundesstraße und Bahn) aus dem Jahr 2022 unberücksichtigt. Die hier ermittelte Vorbelastung wirkt bereits auf schutzbedürftige Nutzungen (siehe Pkt. d) und ist zwingend mit zu berücksichtigen.
Dass keinerlei Vorbelastungen ermittelt und vorhandene nicht berücksichtigt wurden, dem wird widersprochen. Die Ermittlung der Vorbelastung wird eingefordert.

**f) An- und Abtransport gefährlicher Abfälle**

Der An- und Abtransport ausschließlich gefährlicher Abfälle von 166.000 kg (vgl. Pkt. 2.2.4.2 des Antrages) mit tgl. 30 LKW ist über das Industriegebiet erschwert, da über die „Jass – Brücke“ nicht nach allen Richtungen eine Auf- und Abfahrt möglich ist. Bleiben die Zufahrten über die Spielbornbrücke bzw. die Westrampe. Beide Fahrtrouten führen durch bzw. tangieren direkt bewohntes Gebiet. Die Transporte stellen somit eine Gefahr für das Schutzgut Mensch und die menschliche Gesundheit dar. Es ist nicht nachvollziehbar, dass die An- und Abfahrten bis zu einem Abstand von 500 m betrachtet werden (vgl. Punkt 8 des Antrages). Hier ist der gesamte Bereich bis zum Erreichen der Bundesstraße bzgl. einer Gefahrenbeurteilung zu unterziehen. Außerdem sind schalltechnisch die vorab erwähnten Vorbelastungen mit zu berücksichtigen (vgl. Pkt. e).

## g) Subrosion

Lt. Topografischer Karte und Flächennutzungsplan der Stadt Rudolstadt sind Subrosionsflächen bzw. Grundwasserleiter innerhalb des Baugebietes vorhanden. Es kann nicht nachvollzogen werden, wieso dieser Fakt in der 2. Auslegung gegenüber der 1. Auslegung gestrichen wurde. Hier sind besondere Vorkehrungen zum Schutz des Grundwassers auch bezüglich einer hierdurch bestehenden direkten Verbindung zur Saale erforderlich. Diese Grundwasserleiter reagieren besonders sensibel bezüglich des Eintrages wassergefährdender Stoffe. Die hier vorgesehene Lagerung von ausschließlich gefährlichen Stoffen ohne besondere bauliche Vorkehrung wird kritisiert. Das Nichtvorhandensein baulicher Schutzmaßnahmen stellt eine erhebliche Gefährdung für die Umwelt und die menschliche Gesundheit dar. Es werden weiterführende Untersuchungen gefordert, um diese Möglichkeit des Schadstoffeintrages in die Saale auszuschließen.

## h) Luftschadstoffe Staub

Es besteht seitens der Bevölkerung große Sorge, dass durch den Bau der Recyclinganlage eine Beeinträchtigung des Schutzgutes „Mensch“, insbesondere der „menschlichen Gesundheit“ eintreten wird. Begründet wird dies auch mit der Aussage unter Punkt 6.2.5 der UVP zum Thema „Wirkungen auf das Schutzgut Mensch und die menschliche Gesundheit“, wo steht, ***„Geringe Beeinflussungen wurden nicht ermittelt“*****,** heißt im Umkehrschluss, die Wirkung auf die menschliche Gesundheit ist erheblich. Dies kann im Sinne der Bürger von Rudolstadt und dem Städtedreieck nicht hingenommen werden.

Durch das Chemieunglück vom 10.07.1976 in der Nähe von Mailand, auch „Seveso-Unglück“ bezeichnet, wurden strenge Richtlinien geschaffen (s.o. Punkt d) und diese werden auch im Sinne der menschlichen Gesundheit weiter verschärft (vgl. auch WHO-globale Luftqualitätsleitlinien von 2021 – gesündere Luft für alle).

Freiwerdende Stoffe dieser Recyclinganlage berufen sich ausschließlich auf Annahmen. Was tatsächlich emittiert wird, stellt ein nicht kalkulierbares Risiko dar.
Es ist bekannt, dass dioxinhaltige Emissionen hochgiftige Verbindungen darstellen, welche Nerven-, Immunsystem und Leber nachhaltig schädigen. Metallische Feinstaubpartikel ($PM_{2,5}$ und $PM_{10}$) gelangen durch Atmung in den Körper bis in die Mitochondrien der Herzzellen, überwinden die Blut-Hirn-Schranke und sammeln sich in inneren Organen. $PM_{10}$ wird hierbei als „inhalierbarer“ Feinstaub bezeichnet, $PM_{2,5}$ als „lungengängiger Feinstaub“. Es ist dem Stoffwechsel nicht möglich, diese auszuscheiden bzw. abzubauen.

Eine weitere Zunahme von umweltverursachten Erkrankungen, wie Krebs, Demenz, Alzheimer und Autoimmunerkrankungen, kann durch die Hinnahme auch von „irrelevanten“ Überschreitungen von Grenzwerten nicht akzeptiert werden und wird abgelehnt.

In dem Zusammenhang wäre erst einmal eine glaubhafte Grundlage zu schaffen, indem man die Luft- und Klimasituation in Rudolstadt auf echte, in Rudolstadt aufgenommenen Messdaten abstellt.

Gemäß Antragstellung Pkt. 5.2 wurde unter Absatz 3 „Lokale Windverhältnisse“ festgestellt: „Ein Einmischen der Abluft in die Kaltluftschichten kann als wahrscheinlich gelten, eine Durchmischung und damit Verdünnung der mitgeführten Schadstoffe (wird) unterbunden bzw. erschwert.“
In der Antragstellung wird die Kaltluftmasse als stabil bezeichnet, was ein Absinken der Giftstoffe erschwert. Die Kaltluftmasse fließt unverdünnt nach Norden ab.
Somit wandern die Schadstoffe in Richtung bebaute Gebiete von Rudolstadt, ungeklärt bleibt die Frage, wo sich die Schadstoffe ablagern, und zwar unverdünnt.

Neben den berücksichtigten lokalen Windverhältnissen aus dem Antrag Immissionsprognose TA Luft, Seite 22, wurde in Anlehnung des Hinweises der Stadt Rudolstadt vom 06.01.2023 die Wetterstation am „Saalemaxx“ mitzuverwenden, diese in der Darstellung des Planers GICON am 10.03.2023 im Stadthaus Rudolstadt präsentiert. Daraus wurde ersichtlich, dass die Wind- und Abtransportwege gegenüber der Version in der Antragsunterlage sich doch wesentlich unterscheiden.

Wir, die Bürgerinitiative, haben anhand der Beobachtung und Auswertung der beiden hohen Kamine am Industriestandort mittels Fotos die Richtung der Abgasfahnen dokumentiert ***(vgl. Anlage 1)***.

Nach Auswertung der Fotos lag der Westwindanteil im Bereich des Industriegebietes bei 42%, während im gleichen Zeitraum bei Erfurt (nördlich des Flughafens) der Westwindanteil 58% betrug. Die Messstation Erfurt-Bindersleben (Erfurt-Weimar) ist die Referenzstation für GICON. Das heißt, der Westwind ist in Rudolstadt weniger stark ausgeprägt als erwartet. Zudem ergab die Auswertung mehr Winde Richtung Westen und Norden. Damit rücken Wohngebiete von Schwarza (ggf. Bad Blankenburg) sowie Volkstedt, Rudolstadt und Cumbach in den Vordergrund.

Dies beweist, dass die vorgelegten Modelle nur bedingt die Gegebenheiten am Standort wiedergeben. Die Forderung nach einer Ist-Messung an kritischen Punkten (Industriestandort, Schwarza, Volkstedt, Preilipp) von 1 Jahr wird hiermit bekräftigt und wurde auch von einer großen Anzahl von Bürgern der Stadt Rudolstadt zur Veranstaltung im Stadthaus Rudolstadt ausdrücklich gefordert.

Darüber hinaus sind die ermittelten Schornsteinhöhen aufgrund der vorab beschriebenen Situation nicht plausibel und werden als viel zu niedrig eingeschätzt.

**i) Stoffbeschreibung gefährliche Abfälle (Abwasser)**

Der Gefahrstoff (Abwasser aus dem Nasswäscher und der Wasserentladung) wird in nicht plausiblen Mengen angegeben. (vgl. 6 Stoffbeschreibung, - 14/52 - mit Kapitel 2.2.5 Tabelle 2-7: „Stoffbilanz für Recyclingprozess“). In der Stoffbeschreibung sind **10,5 Tonnen pro Jahr** vermerkt, der „Stoffbilanz“ sind **960 Tonnen pro Jahr** zu entnehmen. Das ist ein gravierender Unterschied, der eine Wertung dieses Gefahrstoffes hinsichtlich des daraus resultierenden Transportaufkommens und eine Gefahrenabschätzung unmöglich macht. Die BI erhebt hiermit Einwand, da unklar ist, wie die Differenz der Tonnage zu Stande kommt und welche Menge Abwasser auf welchem Weg entsorgt werden soll.

**j) Stoffbeschreibung gefährliche Abfälle (Transformatoren und Kondensatoren, die PCB enthalten)**

Laut „Tabelle 1, Punkt 6 Stoffbeschreibung: Charakterisierung der gehandhabten Stoffe“ findet sich unter dem Tabellenkopf **„gefährliche Abfälle“ für den Gefahrstoff *Transformatoren und Kondensatoren, die PCB enthalten*** die Menge von 43,1 Tonnen pro Jahr. Unter 2.2.9.2.2 Abfallmengen findet sich die Angabe von 45 Tonnen pro Jahr für 1 Produktionslinie, in Summe ergeben sich dann also 90 Tonnen pro Jahr für 2 Produktionslinien, deklariert als **gefährliche Abfälle** unter 16 02 09* und 16 02 15*. Die BI entschlüsselt diese Angaben wie folgt:
*16 02 09* Transformatoren und Kondensatoren, die PCB enthalten* und *16 02 15** sind *aus gebrauchten Geräten entfernte gefährliche Bestandteile*.

Durch diese Darstellung in den Antragsunterlagen ist die **Menge der gefährlichen Abfälle, die PCB enthalten,** unplausibel. Ebenfalls ist die **Gefährlichkeit des Abfallstoffes, der PCB enthält,** nicht deutlich sichtbar. Die BI erhebt Einwendung und fordert eine klare und eindeutige Darstellung der Stoffmengen und der Stoffeigenschaften des gefährlichen Abfalls speziell im Hinblick auf den **Gefahrstoff PCB**.

**k) Stoffbeschreibung Abfallschlüssel**

Die an verschiedenen Stellen im Antrag verwendeten Abfallschlüsselnummern sind irreführend und teilweise falsch angewandt worden. Da es sich um gefährlichen Abfall handelt, gibt es hier verwirrende Aussagen zu den beantragten und angenommenen Materialien. Die Materialbandbreite der Input-Materialien ist nicht eindeutig definierbar, dies wurde auch im Stadthaus am 10.03.2023 so dargestellt. Dies beeinflusst im entscheidenden Maße die beantragten Schadstoffemissionen. Da keine kontinuierliche Kontrolle / Messung des Schadstoffausstoßes vorgesehen ist, bleibt dies unbemerkt. Beispielhaft wird der Punkt 2.2.4.2 des Antrages angeführt, hier wurde der Abfallschlüssel 16 02 16 nicht plausibel differenziert (als Klassifizierung ungefährlich), es wird dabei unterstellt, dass hier ein „ungefährlicher Abfall“ vorliegt, dessen Herkunft aus der Demontage oder anderweitigen Prozessen, bei denen bereits eine Separation der Materialien erfolgt ist, vorliegt.
Alle angelieferten Materialien und Komponenten, die einem Behandlungsprozess unterzogen werden sollen, sind **gefährliche Abfälle** oder treten als Mischung innerhalb einer mechanisch vereinigten Baugruppe von gefährlichen und / oder ungefährlichen Abfällen auf.

Einwendung: Im Szenario der Verarbeitung muss vom ungünstigsten Fall ausgegangen werden, das heißt: Alles, was an Batteriematerial angeliefert wird, muss zwingend als gefährlich gelten, alle anderen

Einordnungen konterkarieren die als ungenügend eingeschätzte Kontrolle der Input- Materialen in den Recyclingprozess noch zusätzlich.

Einwendung der BI: Es muss eine transparente Kontrolle der Eingangsmaterialien geben, sonst sind alle Angaben bezüglich der erwarteten Emissionen als Larifari zu werten und es drängt sich der Eindruck eines technologischen Versuches auf, der die Umwelt mit der in Rede stehenden Technologie extrem schädigen kann, das gilt es zu verhindern.

## l) Sicherheitsdatenblatt Black-Mass

**Fixiert wird:** Das Sicherheitsdatenblatt für den Gefahrstoff Black-Mass wurde vom Antragsteller **selbst erstellt,** anhand einer Referenzanlage in Ungarn, weil es offenbar noch keine valide Datenlage zum Zielprodukt gibt. Damit zerstört sich der Antragsteller seine Reputation.
Einwendung der BI: Wenn es keine validen Daten zum beantragten Zielprodukt gibt, dann muss so eine Datenbasis durch ein unabhängiges Institut erstellt werden, alle anderen Darstellungen vom Antragsteller selbst sind eine „No-go-Area". Anderenfalls läuft man sonst Gefahr, dass dieses Produkt verharmlosend bei Transport- und Lagervorgängen gehandhabt wird. Nicht spezifizierte Inhaltsstoffe aus einem Prozess, dessen Eingangsstoffe nicht definierbar sind, können im Zielprodukt auftreten. Stoffe wie **PAK** (Polyaromatisierte Kohlenwasserstoffe), **PCB** (Polychlorierte Biphenyle) oder andere als **krebserregend bekannte Stoffe** sind nicht auszuschließen, da das verwendete Temperaturprofil des Prozesses keine Zersetzung dieser Stoffe ermöglicht.
Die BI fordert ein neues Datenblatt, das durch ein unabhängiges Institut erstellt wurde. Genügend Black-Mass dürfte aus den Firmen des Antragstellers vorhanden sein, so dass Stichproben durch unabhängige Institute vorgenommen werden können.

## m) Messverfahren, messtechnische Überwachung

Eine kontinuierlich betriebene Anlage, die Schadstoffemissionen verursacht, muss auch dauerhaft überwacht werden und die Messwerte müssen transparent dargestellt und jederzeit öffentlich abrufbar sein, das ist Stand der Technik im 21. Jahrhundert. Der Antragsteller schließt dies aus.

Einwendung der BI: Der Prozess muss transparent gestaltet werden!

## n) Störfallrelevanz

Da die Eingangsstoffe nicht sicher definiert werden können und somit die Emissionswerte als Schätzwerte aus Vergleichsanlagen herangezogen werden, kann auch den Angaben, dass im bestimmungsgemäßen Betrieb vgl. Kapitel 2.2.8, Tabelle 2-10, welche mit einer Maximalmenge von 198.000 kg angegeben wurde, nicht vertraut werden.

Die Angabe zu unklaren Eingangsstoffen stellte sich auch in der Bürgerfragestunde am 10.03.2023 heraus, so dass der Planer sich nochmals mit dem Investor abstimmen möchte, um hier zielgenauere Werte zu erhalten.

Es liegt somit die Vermutung nahe, dass man die 198.000 kg „schönrechnete", um gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008, unter 200.000 kg zu kommen.

Somit liegt die Vermutung nahe, dass der Störfall nicht nach dem ungünstigsten Fall berechnet wurde. Dem wird widersprochen. Es ist vom ungünstigsten Szenario auszugehen. Außerdem ist nicht nachvollziehbar, wieso Eingangsstoffe gemäß Pkt. 2.2.8 kein Störfallpotenzial aufweisen sollen. Der Hinweis, dass gefährliche Inhaltsstoffe in der Regel nicht freigesetzt werden können, ist nicht nachvollziehbar. Dies ist auf das Störfallszenario abzustellen. Hier ist der „Störfall" zu betrachten und nicht die „Regel".

**o) Einwendungen durch BUND und NABU**

Die Bürgerinitiative schließt sich inhaltlich den Einwendungen von BUND Kreisverband Saalfeld-Rudolstadt und NABU Kreisverband Saalfeld-Rudolstadt e.V. an. Diese beinhalten weitere naturschutzrechtliche Aspekte, welche von der Bürgerinitiative mitgetragen werden.

**p) Zusammenfassung über Verstöße eines vergleichbaren Werkes der gleichen Investorengruppe SungEel in Ungarn**

Im vorliegenden BImSchG-Antrag für die geplante Recyclinganlage Rudolstadt stützt man sich auf Referenzwerte der Anlagen in Ungarn, da keine andere valide Datenbasis vorliegt.

In den ungarischen Anlagen wurden seit der Inbetriebnahme 2021 zahlreiche Ereignisse registriert, welche erhebliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt zur Folge hatten.

Im öffentlichen Bürgerforum am 10.03.2023 wurde dieser Fakt thematisiert. Der Antragsteller SungEel stellte diese Vorfälle als menschliches Versagen dar.

Die Bürgerinitiative verweist hierzu auf ***Anlage 2***.

**q) Umweltauswirkungen von Lithium-Ionen-Batterien (LIB´s), Wirkung auf die menschliche Gesundheit**

In der Quelle: https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/ee/d1ee00691f, welche von der Bürgerinitiative teilübersetzt wurde und in der ***Anlage 3*** beigefügt wird, wurden rot die Punkte gekennzeichnet, welche die vorab benannten Einwendungen in wesentlichen Punkten noch untermauern und spezifizieren. Hier wird in einem Gesamtüberblick beschrieben, welche Umweltauswirkungen und -gefahren von Altbatterien, (LIB´s) ausgehen.

Eine Chemikerin hat die blau untermauerten Hinweise freundlicherweise der Bürgerinitiative zur Verfügung gestellt. Diese Hinweise sowie die Inhalte des Dokumentes werden von der Bürgerinitiative im vollen Umfang mitgetragen. Für die hier aufgezeigten negativen Wirkungen auf die menschliche Gesundheit gilt es, dass diese in Rudolstadt zwingend zu verhindern sind.
Es wird hierdurch auch besonders deutlich, dass die in den Antragsunterlagen angenommenen Stoffdaten, wie bereits beschrieben, nicht validierbar sind und vermutlich auch nicht den wahren Emittenten entsprechen bzw. zu Gunsten von SunEel „schöngerechnet“ wurden.

Es werden in der Dokumentation u.a. folgende Schadstoffpfade aufgezeigt:
„LIBs gelten aufgrund der mit Schwermetallen verbundenen potenziellen Umwelt- und Gesundheitsrisiken als gefährliche Abfälle (insbesondere solche aus Elektrofahrzeugen). Die Entsorgung und Verarbeitung von LIBs sowie deren Eigenschaften (*z. B.* Chemie) werden erhebliche Auswirkungen auf verschiedene Umweltkompartimente haben. LIBs enthalten eine Vielzahl von Chemikalien, darunter reaktive Salze, flüchtige organische Elektrolyte und Zusatzstoffe.
Während der Demontage und des Recyclings können feine Partikel aus LIBs in die Luft freigesetzt werden. Feinstaub mit aerodynamischen Durchmessern von weniger als 10 oder 2,5 µm ($PM_{10}$ und $PM_{2,5}$) kann die menschliche Gesundheit gefährden, das Klima beeinträchtigen und die Sichtbarkeit auf lokaler und regionaler Ebene beeinträchtigen. Feinstaub kann stoffgebundene Metalle wie Arsen, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer oder Blei enthalten, die durch die Zersetzung von wiederverwertbaren Batterien, Altmetallen und Elektroschrott entstehen. Staub kann in die Atemwege gelangen und nachteilige Auswirkungen auf die Gesundheit haben, wie z. B. Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen, Karzinogenität oder Störungen des endokrinen Systems.“

---

**Hinweis und Beachtung:**
Bei der Verwendung der personenbezogenen Daten wird auf § 12 Abs: 2 der 9. BImSchV Bezug genommen.

Wir beantragen eine schriftliche Bestätigung des Eingangs dieser Einwendungen sowie die Zusendung des Abwägungsprotokolls für alle eingebrachten Einwendungen.

Wir weisen ausdrücklich darauf hin, dass die hier mitwirkenden Bürger ggf. eigene Einwendungen eingebracht haben. In dem Fall handelt es sich um private Einwendungen. Diese könnten

- *in manchen Punkten anders formuliert sein,*
- *nicht alle den erwähnten Einwendungen entsprechen,*
- *zusätzliche Einwendungen eingebracht worden sein.*

Die Unterschrift ist eine Willensbekundung für diese Einwendung in inhaltlicher Übereinstimmung mit den Zielen der Bürgerinitiative „Lebenswerte Heimat rund ums Saaletal“.

# Anlage 1

# Bestimmung der Windrichtung über dem Industriegebiet Schwarza-Rudolstadt mit Hilfe fotografischer Nachweise der Rauchfahnen aus den Kaminen von HKW, TVS und Jass in der Zeit vom 20.01. bis 11.03.2023

## Daten der Messsationen von Meteostat

**Wetterstation Erfurt-Bindersleben (Entfernung 41 km, Höhe 322 m )**
https://meteostat.net/de/place/de/erfurt?s=10554&t=2023-01-20/2023-02-12
**Wetterstation Krölpa, 07387Rockendorf (Entfernung 14 km, Höhe 277 m)**
https://meteostat.net/de/station/D3711?t=2023-02-13/2023-02-26
**Wetterstation Schwarzburg (Entfernung 11 km, Höhe 316 m)**
https://meteostat.net/de/place/de/saalfeld?s=D4605&t=2023-02-13/2023-02-27

- Die Windrichtungen werden bei der Erfassung den vier Haupt- und Nebenhimmelsrichtungen zugeordnet.
- Bei der Auswertung werden Nebenhimmelsrichtungen wechselweise den Haupthimmels-richtungen zugeordnet: Beispiel: N**W** = W, am Folgetag **N**W = N.
- Keine Übereinstimmung liegt vor, wenn der Unterschied 90 Grad oder mehr entspricht.
- Wesentliche Windrichtungsunterschiede bei den Messstationen erscheinen in Rot.

| *Datum (2023)* | *Krölpa Wind aus Richtung* | *Schwarzburg Wind aus Richtung* | *Erfurt-B. Wind aus Richtung* | *Fotos Wind aus Richtung* | *Überein-stimmung mit Erfurt* | *Kaltluft-schicht* | *Anzahl der Fotos* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20.01. | W | W | **W** | **W** - O | | | 2 |
| 21.01. | NO | N | N | k.A. | | | |
| 22.01. | NO | NO | N | k.A. | | | |
| 23.01. | NO | NO | NO | k.A. | | | |
| 24.01. | NO | NO | NO | k.A. | | | |
| 25.01. | O | SW | SO | S | | | 1 |
| 26.01. | N**W** | **N**W | W | W | | | 1 |
| 27.01. | N | N**O** | **N** | **O** | nein | | 1 |
| 28.01. | N | **N**O | **N** | **O** | nein | | 1 |
| 29.01. | SW | SW | SW | k.A. | | | |
| 30.01. | W | W | W | k.A. | | | |
| 31.01. | W | W | W | k.A. | | | |
| 01.02. | W | W | W | k.A. | | | |
| 02.02. | W | W | W | k.A. | | | |
| 03.02. | W | W | **W** | **O** | nein | | 1 |
| 04.02. | N | N | NW | k.A. | | | |
| 05.02. | SW | SW | SO | k.A. | | | |
| 06.02. | **N**W | N | N**W** | W | | | 1 |
| 07.02. | O | SO | NO | k.A. | | | |
| 08.02. | **S**O | S | S**O** | SO-**S** | | **extrem** | 7 |
| 09.02. | S**W** | S**W** | **S**W | S**W** | | **x** | 8 |
| 10.02. | **S**W | **S**W | W | W | | | 3 |
| 11.02. | S**W** | S**W** | S**W** | W | | **x** | 2 |
| 12.02. | W | S | W | W | | | 2 |
| 13.02. | S | **S**W | **S**W | **S** bis W | | | 5 |
| 14.02. | **O** | S**W** | **S** | S bis **O** | | | 4 |
| 15.02. | W | **S**W | W | **S** bis O | nein | **x** | 5 |

Auswertung der Rauchfahnenbilder 2

| ***Datum (2023)*** | ***Krölpa*** *Wind aus Richtung* | ***Schwarzburg*** *Wind aus Richtung* | ***Erfurt-B.*** *Wind aus Richtung* | ***Fotos*** *Wind aus Richtung* | *Überein-stimmung mit Erfurt* | *Kaltluft-schicht* | *Anzahl der Fotos* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 16.02. | W | S**W** | W | S bis **O** | nein | | 3 |
| 17.02. | W | SW | W | k.A. | | | 0 |
| 18.02. | W | **S**W | W | W | | | 1 |
| 19.02. | W | W | W | **S** bis O | nein | | 4 |
| 20.02. | W | W | W | W | | | 2 |
| 21.02. | W | W | W | S bis **W** | | | 3 |
| 22.02. | SW | S | SO | **S** bis W | | **x** | 6 |
| 23.02. | W | S**W** | W | S bis **W** | | | 3 |
| 24.02. | W | W | W | W | | | 3 |
| 25.02. | N**W** | **N**W | N**W** | W | | | 4 |
| 26.02. | N | N**O** | N | N | | | 1 |
| 27.02. | O | **N**O | **N**O | **N**-O-S | nein | | 8 |
| 28.02. | O | N**O** | N**O** | O | | | 2 |
| 01.03. | O | **N**O | **N**O | O | | | 5 |
| 02.03. | O | N**O** | N**O** | O | | | 3 |
| 03.03. | N | N | **N**O | O | | | 4 |
| 04.03. | W | N**W** | W | N-**W** | | | 2 |
| 05.03. | W | W | W | N | nein | | 2 |
| 06.03. | W | **S**W | **S**W | W | | | 2 |
| 07.03. | W | S**W** | S**W** | W | | | 1 |
| 08.03. | W | SW | NW | SW - **N** | | **x** | 3 |
| 09.03. | **N**W | S**W** | **W** | N**W** | | | 3 |
| 10.03. | S**W** | **S**W | S**W** | W | | | 3 |
| 11.03. | W | W | **W** | **N**W | | | 3 |
| **38 Tage effektiv** | | | | | **8** | **6** | **115** |
| **Davon Westwind** | **21** | **17** | **26** | **16** | | | |
| | | **4** | | **1** | **2** | **3** | |

Windrichtungsanteile der Messstationen und der Fotoauswertung :

| ***Messstation Windrichtung*** | ***Krölpa*** | ***Schwarzburg*** | ***Erfurt-B.*** | ***Fotos*** |
|---|---|---|---|---|
| **Westwind** | **55 %** | **45 %** | **58 %** | **42 %** |
| **Ostwind** | **16 %** | **11 %** | **11 %** | **26 %** |
| **Südwind** | **11 %** | **26 %** | **13 %** | **18 %** |
| **Nordwind** | **16 %** | **18 %** | **18 %** | **13 %** |
| *Kontr.** | *98 %* | *100 %* | *100 %* | *99 %* |

*Werte unter 100 % ergeben sich aufgrund von Abrundungen.

Zu 1:
An 16 von 38 Tagen wehte der Wind am Standort aus dem Westen. Dieser Wert ist mit 42 % wesentlich niedriger als der von der offiziellen Station in Erfurt ausgegebene mit 58 %. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass Ostwind mit einem Anteil von 26 % ziemlich oft anzutreffen ist. **D.h. jeden vierten Tag weht der Wind genau entgegengesetzt der `erwarteten´ Windrichtung, also nach Westen. Davon sind Schwarza und Bad Blankenburg betroffen.**
Nach Norden weht der Wind mit einem Zeitanteil von 18 %. Addiert man zu diesem Wert den Zeitanteil der nach Norden abließende Kaltluftschicht (vgl. Anm. zu 3), die mit 16 % festgestellt wurde, so **wird die Luft zusammen mit den Schadstoffen zu einem Drittel des Jahres (34 %) aus dem Industriegebiet nach Norden Richtung Rudolstadt und Cumbach bewegt.**

Zu 2:
An 8 von 38 Tagen (21 %) unterscheiden sich die beobachtete Windrichtungen von denen der Messstation Erfurt-Weimar um 90 Grad oder mehr. **Jeden fünften Tag weht der Wind am Standort aus einer anderen Richtung als der offiziellen.**

Zu 3:
An 6 von 38 Tagen (16 %) war eine Inversion (Kaltluftschicht) nachweisbar. Die Kamine, besonders der 120-Meter-Kamin, reichen über die Kaltluftmasse hinaus. Die emittierten Stoffe bleiben auf dieser stabilen Schicht liegen oder reichern sich in ihr an, falls diese mächtiger als 120 Meter ist.
**In Bezug auf die Kamine der Black-Mass-Anlage mit Maximalhöhen unter 30 Metern kann man für Inversionswetterlagen voraussagen, dass die Abgase am Abziehen gehindert werden. Zu den bereits vorhandenen Immissionen, die sinnenhaft über den Geruch wahrgenommen werden, addieren sich die Staubpartikel der Black-Mass-Anlage und sonstigen Gase und Schwebstoffe**.

Zu 4:
**Die Messstation in Schwarzburg kommt den von uns beobachteten Windrichtungen recht nahe.**

Anmerkung:
Die *Messstation Erfurt-Weimar* ist identisch mit der **Messstation Erfurt-Bindersleben**, 5 km westlich des Stadtzentrums. (roter Punkt)

---
13.03.2023

Stand 13.03.2023

## Im Industriegebiet fehlt eine Messstation

Im Industrie- und Gewerbepark Rudolstadt-Saalfeld sind bereits sieben (?) Betriebe angesiedelt, die dem Bundesimmissionsschutzgesetz verpflichtet sind. Ein weiterer Betrieb, ein Black-Mass-Werk, soll folgen.
Grundlage der Frage:
„Nach TA Luft können sowohl gemessene als auch mit Modellsimulation erzeugte meteorologische Daten für Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Ausbreitungsklasse verwendet werden. Dabei sollten bevorzugt geeignete Messungen am Standort verwendet werden.“ Quelle: https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/luft/ausbreitung/aus

### Frage:

### Weshalb besitzt der Industriestandort keine nach den Richtlinien des Deutschen Wetterdienstes zertifizierte Messstation?

**Zusatzfrage:**
**Die Messstation Schwarzburg liefert in Bezug auf die Windrichtung weit zuverlässigere Werte als die Messstation Erfurt.**
**Weshalb spricht gegen die Messstation Schwarzburg?**

## Der Windrichtungsmesser (Ersatzanemometer EAP) befindet sich außerhalb des Rechengebietes

> „Das Rechengebiet nach Nr. 8 Anhang 2 TA Luft ist so festgelegt, dass es das Beurteilungsgebiet nach Nr. 4.6.2.5 TA Luft umfasst. Bei dieser Vorgabe handelt es sich um die Mindestanforderung an die Ausdehnung des Rechengebiets. Je nach Situation kann auch ein größeres Rechengebiet erforderlich sein. Bei orographisch gegliedertem Gelände kann eine Vergrößerung des Rechengebiets notwendig sein, um Einflüsse des Geländes auf das Windfeld zu berücksichtigen.“
> https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/luft/ausbreitung/ausbreitungsrechnung-nach-ta-luft-modell/ausbreitungsrechnung >Rechengebiet und Aufpunkte

GICON hätte von sich aus den Radius des Rechengebietes vergrößern können, so dass die Ersatzanemometerpositin innerhalb zu liegen käme.

Der Mindestradius ergibt sich aus dem 50fachen des höchsten Kamins.
29 m x 50 = **1450 m**

**Im Antrag Teil 1 pdf S. 303** ist **das Rechengebiet** abgebildet. Es wird ein Radius von **1.650 m** angegeben, also 200 Meter mehr als die TA Luft als Mindestmaß verlangt.

An anderer Stelle wird darauf hingewiesen, dass die EAP **1,7 km** südöstlich des Standortes liegt. Genaue Position: 666050 | 5617550

**Auch in der Abbildung ist ersichtlich, dass sich die EAP knapp außerhalb des bereits erweiterten Beurteilungsgebietes liegt.**

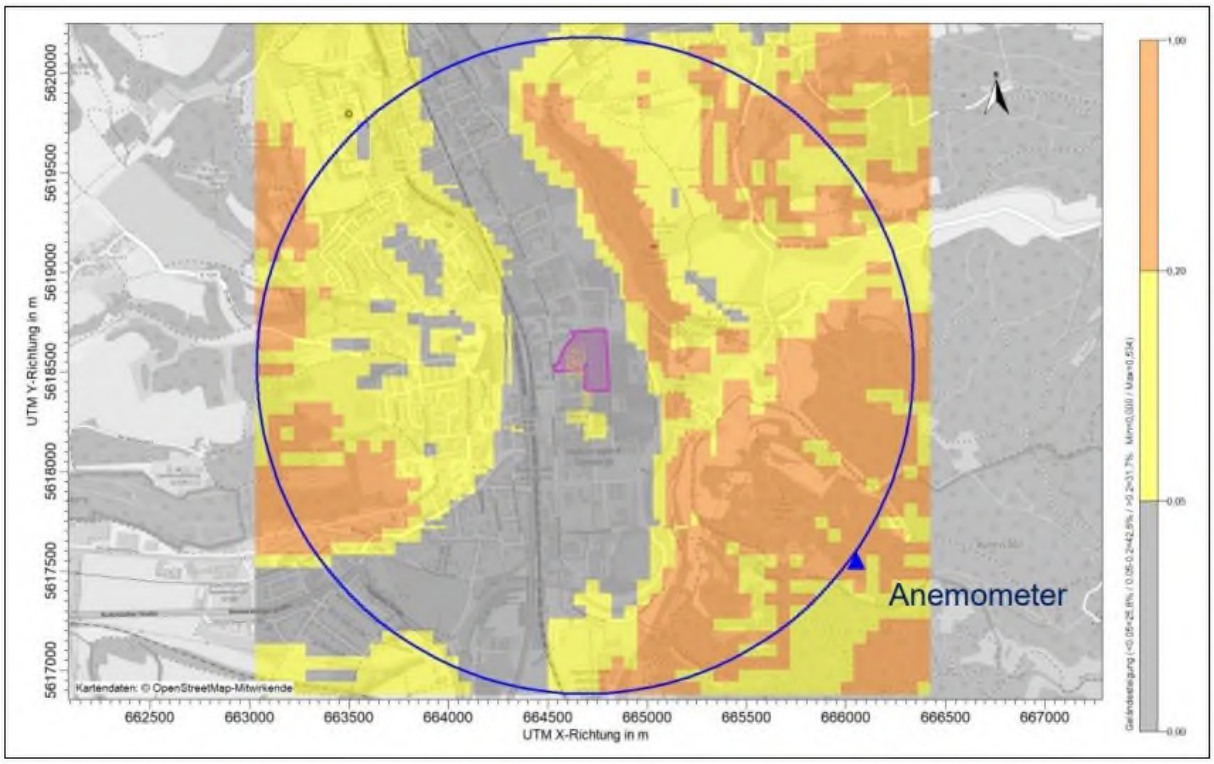


**Abbildung 7:** **Geländesteigung im Beurteilungsgebiet (Radius 1.650 m), Standort (magenta) und Anemometerstandort (blaues Dreieck)**

# Frage:

# Aufgrund welcher Überlegungen verorten Sie das fiktive Ersatzanemometer außerhalb des Rechengebietes bzw. weshalb vergrößerten Sie den Radius des Rechengebietes nicht, so dass das Anemometer innerhalb liegt?

Meine Vermutung:
Durch Vergrößerung des Rechengebietes würden zunehmende Höhenlagen, besonders Richtung Kulm, berücksichtigt werden müssen. Die Berge sorgen für ein Umlenken der erwarteten Westwinde nach Norden oder Wirbelbildung in entgegensgesetzte Richtung nach Westen.

## Kaltluftschichten wurden unzureichend erfasst

Im GICON-Antrag (pdf S. 306) werden Aussage zu den Kaltluftschichten getroffen.

„Kaltluftflüsse … können meist nur durch Messungen am Standort erkundet, im Falle von nächtlichen Kaltluftflüssen aber auch durch Modellrechnungen erfasst werden."

### Frage:

### Welche Messungen haben Sie durchgeführt, um die Kaltluftflüsse <u>auch am Tage</u> zu bestimmen?

Hinweis:
Wir konnten an 16 % der Tage Kaltluftschichten über dem Standort nachweisen. Sie sind stabil und behindern eine Auffrischung der Luft. Nach meiner vorsichtigen Prognose muss in dem Gebiet mit 50 Tagen stehender Luft im Jahr gerechnet werden.

## Widersprüchliche Aussagen zur Durchmischung

Im GICON-Antrag (pdf S. 306) heißt es verkürzt:
Ein „Einmischen der Abluft in die Kaltluftschichten" kann als „wahrscheinlich" gelten, eine „Durchmischung und damit Verdünnung der mitgeführten Schadstoffe (wird) unterbunden bzw. erschwert".

### Frage:

### Weshalb wird das Einmischen der Kaminabluft in die Kaltluftschicht erleichtert, das Durchmischen aber erschwert?

## Unklare Aussage zum Abtransport der mit Abluft gemischten Kaltluft

Hinweis: Im Antrag (ebda) wird die Kaltluftmasse als stabil bezeichnet, was ein Absinken der Abfallstoffe erschwert. Die Kaltluftmasse fließt mit den unverdünnten Stoffen nach Norden ab.

## Frage:

## Wo lagern sich die unverdünnten Abfallstoffe ab, die von der Saale abwärts fließenden Kaltluft mitgeführt werden?

### Hinweis:

Wenn die Kaltluftmasse dem Tal der Schwarza folgt, wären Volkstedt, Rudolstadt und Cumbach betroffen.

# Anlage 2

Betrifft: BlmSchG Antrag Black-Mass-Anlage SungEel in Rudolstadt-Schwarza Batterierecyclinganlage

hier eine Zusammenfassung über Verstöße in Ungarn durch den Investor und seinen Kooperationspartner Samsung. Es ist erschreckend, wie mit Mensch und Natur seit Jahren, trotz Millionenstrafen, umgegangen wird.

Verstöße der Firma SungEel in Ihrem Werk in Batonyterenye:

Trotz der großen Menge an Gefahrstoffen, wurde das Werk ohne Katastrophenschutzlizenz betrieben.
Während des Testbetriebes kam es zu einer folgenschweren Technologischen Explosion. Vier Personen wurden verletzt einer schwer drei leicht.
Weiterhin kam es zu mehreren Geldstrafen, da mehrere Mitarbeiter ernsthaften Gefahren ausgesetzt wurden.
Unter anderen durch Grenzwertüberschreitungen der Luftverschmutzung, Exposition von Arbeitern gegenüber krebserregenden Stoffen,Serienverstöße gegen Arbeitsschutzvorschriften.
Auch sind Big Bags mit metalloxidhaltigen, schwermetallhaltigen Abfällen im Freien gelagert worden.
Zwei luftverunreinigende Stoffe überschritten die Grenzwerte.
Es wurde festgestellt, dass der AG nicht darauf geachtet hat, dass die verwendeten Materialien die Arbeitsumgebung nicht kontaminieren,
die Luftfilteranlagen funktionierten nicht richtig, so dass Staub mit gefährlichen Stoffen aus ihnen austrat, nicht alle Arbeiter trugen Schutzausrüstung und wurden auch nicht informiert, dass sie mit krebserregenden Stoffen arbeiten.

Verstöße des Direktinvestors Samsung:

Mehr als 1000 Mitarbeiter in ihrem Werk in Göd wurden gefährdet. Sie wurden monatelang Belastungen durch erhöhte Luftschadstoffe ausgesetzt. Es gab Verstöße gegen Karzinogene, weil Luftreinhaltungsgeräte nicht ordnungsgemäß funktionierten. Die Verwendung angemessener Schutzausrüstung wurde nicht sichergestellt. Es wurden mit Karzinogenen kontaminiertes Arbeitsgerät nicht gereinigt. Grenzwerte für Pathogene Faktoren wurden um 10 % für länger als einen Monat überstiegen.
Brandmelde- und Schutzanlagen fehlen.
Am 08.05.2021 fingen 36 Batterien Feuer.
Im Oktober 2021 kam es erneut zu einem Brand. Die Feuerlöscher funktionierten nicht,Löschfahrzeuge fehlen Mobilfunkgeräte.
Ein Gasmessgerät detektierte keinen Fluorwasserstoff.
Können wir solchen Firmen vertrauen?

Anlage:
ein Artikel aus Ungarn

# Das Unternehmen, das Altbatterien aus der Samsung-Fabrik in Göd verarbeitet, hat seine Arbeiter mit krebserregenden Stoffen gefährdet

7. März 2023 8 Minute

•

Zsuzsa Bodnar

**Die SungEel Hitech Hungary Kft. aus Bátonytereni, die Lithium-Ionen-Batterien recycelt, gefährdete ihre Arbeiter ernsthaft, weshalb die Arbeitsschutzbehörde das Unternehmen zu einer Geldstrafe von achteinhalb Millionen Forint verurteilte. Laut Bußgeldbescheid waren 13 Personen einer ernsthaften Gefahr ausgesetzt. Die Behörden haben den Abfallverarbeiter, der seine Kapazität nun auf 52.000 Tonnen pro Jahr erhöhen will, bereits wegen gravierender Versäumnisse bestraft. Die Menge an Schrott und defekten Batterien wird zunehmen, da die Samsung-Beteiligung in Göd kürzlich eine Katastrophenschutzgenehmigung für ihr neues Werk erhalten hat und die Batteriefabrik von SK Innovation in Iváncsi bald den Betrieb aufnehmen wird.**

Grenzwertüberschreitungen der Luftverschmutzung, Exposition von Arbeitern gegenüber krebserregenden Stoffen, Serienverstöße gegen Arbeitsschutzvorschriften – das sind einige Punkte aus dem umfangreichen Beschluss , der die Arbeitsschutzverstöße der südkoreanischen SungEel Hitech Hungary Kft auflistet. in den vergangenen Jahren.

Die ungarische Regierung hat 2,8 Milliarden HUF an nicht rückzahlbarer Unterstützung für die Investition in Bátonyterenye mit einem Gesamtwert von 9,3 Milliarden HUF

bereitgestellt, die im Juli 2021 übergeben wurde, schrieb kormany.hu vor zwei Jahren . Bei der Eröffnungsveranstaltung hieß es, SungEel Hitech sei im Jahr 2000 in Südkorea gegründet worden, zunächst für das Recycling von Edelmetallen. 2008 begannen sie mit dem Recycling von Lithiumbatterien, und 2014 begann die globale Expansion, Recyclingparks wurden in Malaysia, Indien und Ungarn eröffnet.

Ju Suk Koh, Vizepräsident der Samsung C&T Corporation, Bürgermeister József Nagy-Majdon, Min In Hwan, Präsident der KDB Bank Europe Zrt., Park Chul Min, Botschafter der Republik Korea in Ungarn, Ji Kang Mjung, Präsident von SungEel Hitech Kft., Menczer Tamás, Staatssekretär des Ministeriums für auswärtige Angelegenheiten und Handel, zuständig für Informationen und die internationale Präsentation Ungarns, Hjun Jung, Vizepräsident von Samsung SDI Hungary Zrt., Mirtyll Oszlánszki, Vertreter der National Investment Agency (HIPA ), Kil Jung Szong, Direktor von LG Electronics Polen und Park Jung Csull, der Geschäftsführer von SungEel Hitech Kft. (bj) schneiden das nationale Band bei der Eröffnung des zweiten Werks von SungEel HiTech Hungary Kft. im Industriepark Bátonyterenye durch 7. Juli 2021 (Foto: MTI/Péter Komka)

Das Werk ist die zweite ungarische Fabrik der südkoreanischen SungEel Hitech Hungary Kft., die erste in Szigetszentmiklós. In Bátonytereny im Komitat Nógrád werden hauptsächlich Altbatterien aus den Fabriken von Samsung SDI in Göd und SK Battery in Komárom in einer Menge von 28.000 Tonnen pro Jahr angenommen und verarbeitet .

Bei der Verarbeitung werden aus den Abfällen von Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge Wertstoffe (Metalloxid bestehend aus Nickel-, Kobalt-, Mangan- und Lithiumelementen sowie Graphit) zurückgewonnen. Bei der Batterieproduktion fallen Abfälle als Produktionsausschuss, fehlerhafte Produkte und Zwischenabfälle an. Darüber hinaus wird auch der Abwasserschlamm von NMP (N-Methyl-2-Pyrrolidon), einem giftigen Lösungsmittel aus der Batterieproduktion, aufbereitet und recycelt.

Dies ist nicht das erste Mal, dass wir mit dem Unternehmen in Átlátszó zu tun haben. In einem Artikel vom letzten August berichteten wir , dass es im Juli bei der Probeinbetriebnahme einer neuen Produktionslinie zu einer „technologischen Explosion“ kam, bei der vier Personen verletzt wurden; Ein Mann wurde schwer und zwei leicht verletzt ins Krankenhaus gebracht. Nach damaliger Aussage der Katastrophenschutzbehörde wurde kein bevölkerungsgefährdender Stoff in die Luft freigesetzt.

Wir schrieben auch, dass das Unternehmen bereits vor dem Unglück mit einer Geldstrafe belegt worden sei, weil es ohne Katastrophenschutzgenehmigung seinen Betrieb

aufgenommen habe. Wir haben die von uns angeforderten relevanten öffentlichen Daten erst nach der Veröffentlichung des Artikels erhalten; Demnach wurde SungEel Kft. eine Geldbuße von 3 Mio. HUF für Aktivitäten auferlegt, die ohne Lizenz durchgeführt wurden . Im Bußgeldbescheid heißt es weiter, dass die sogenannten Big Bags mit metalloxidhaltigen schwermetallhaltigen Abfällen im Freien gelagert wurden und kein Sicherheitsdatenblatt für die gefährlichen Stoffe vorweisen konnten.

## Massengefährdung

Laut der Unternehmensdatenbank von Opten wurde SungEel Hungary Kft. in zwei Fällen mit Arbeitsschutzstrafen in Höhe von mehreren Millionen Forint belegt. Als Ergebnis unserer öffentlichen Datenanfrage erhielten wir die jüngste Geldbuße in Höhe von 8,5 Millionen HUF vom Regierungsamt des Kreises Pest . In 24 Punkten listet er die schwerwiegenden Versäumnisse auf, durch die das Unternehmen die Gesundheit und körperliche Unversehrtheit seiner Mitarbeiter gefährdet hat.

Gemäß der Entscheidung, Ltd. der biologische Überwachungstest von achtzehn seiner Mitarbeiter im März letzten Jahres zeigte Ergebnisse über dem Grenzwert, und die Luftverschmutzung am Arbeitsplatz überstieg die zulässigen Werte deutlich.

Az ellenőrzés és a lefolytatott bizonyítási eljárás során megállapításra került, hogy:

1.) A munkáltató kérésére az éves időszakos munkaköri orvosi vizsgálatot megelőzően, soron kívül 2022. március hónap 18. napján biológiai monitoring vizsgálatot végeztek a munkavállalóknál. A munkáltató az ellenőrzés alkalmával tett nyilatkozata alapján a vizsgálat több munkavállaló esetében is határérték feletti eredményt mutatott, a fokozott expozíciós esetek kivizsgálása azonban nem történt meg. A hatóság a foglalkozás-egészségügyi szolgáltatót a PE-06/MV/005528-8/2022 ügyiratszámú levelében tájékoztatásra hívta fel az elvégzett biológiai monitoring vizsgálatok eredményéről. A megküldött eredmények alapján 18 fő munkavállaló fokozott expozíciós esete volt bizonyított.

A munkáltató a fokozott expozíciós esetek kivizsgálását a körülmények által lehetővé tett legrövidebb időn belül nem kezdte meg, a lehetséges okokat nem tárta fel, és intézkedéseket nem tett a további fokozott expozíciós esetek megelőzése érdekében. A tömeges fokozott expozíciós esetek a munkáltató az esetről való tudomásszerzést követően – telefonon, telefaxon, e-mailben vagy személyesen – nem jelentette be a fokozott expozíció kialakulásának helyszíne szerint illetékes munkavédelmi hatóságnak. 2022 szeptemberében újabb biológiai monitoring vizsgálatra került sor, melynek eredményeire tekintettel a munkáltató nyilatkozata alapján a fokozott expozíciós esetek kivizsgálását megkezdték.

Auszug aus dem Beschluss des Regierungsamtes des Komitats Pest vom 4. November 2022. (Quelle: Entscheidung )

Obwohl die Namen der gefährlichen Stoffe in der Entscheidung weggelassen wurden, ist an mehreren Stellen zu lesen, dass die Arbeiter krebserregenden Stoffen ausgesetzt waren.

Im ersten Punkt verpflichtet die Regierungsstelle den Betrieb zur „Beseitigung der festgestellten **Mängel “, damit der Arbeitgeber unweigerlich die Arbeitsschutzbehörde informiert, wenn die Messwerte krebserzeugender Stoffe den Grenzwert überschreiten.**

Auf der sechsten Seite des Bescheids überschreiten auch zwei luftverunreinigende Stoffe mit dem Namen katkart den Grenzwert, die nach Angaben der Behörde nicht den einschlägigen

gesetzlichen Anforderungen genügen. Unter der einschlägigen Vorschrift beruft sich die Regierungsstelle auf die Verordnung zum *Schutz vor arbeitsbedingten Karzinogenen und zur Verhütung von durch sie verursachten Gesundheitsschäden* .

Die behördlichen Ermittlungen und Vor-Ort-Begehungen fanden mehrfach statt, im August und Oktober 2022; nach diesen

In der Entscheidung heißt es, dass **Arbeiter mehr als einen Monat lang einer erhöhten Exposition ausgesetzt waren.**

„Der Arbeitgeber hat nicht darauf geachtet, dass die verwendeten Materialien die Arbeitsumgebung nicht kontaminieren, und hat nicht darauf geachtet, gesundheitsschädigende Wirkungen durch geeignete technische und technologische Maßnahmen zu verhindern“, heißt es in dem Text.

A teljes műszakidő 12 óra, azonban a személyi mérés időszaka 180-210 percig tartott. Minden mérőponton és koncentráció mérését végezték el.

| Vizsgált munkaterület | Légszennyező anyag | Koncentráció (mg/m³) | Határérték (mg/m³) |
|---|---|---|---|
| kezelő | | | 0,01 |
| | | | 0,02 |
| | | | 0,2 |
| | | | 10 |
| kezelő | | | 0,01 |
| | | | 0,02 |
| | | | 0,2 |
| | | | 0,05 |
| | | | 10 |
| gépsor | | | 0,01 |
| | | | 0,02 |
| | | | 0,2 |
| | | | 10 |
| Szétszerelés | | | 0,01 |
| | | | 0,02 |
| | | | 0,2 |
| | | | 0,1 |
| Takarító | | | 0,01 |
| | | | 0,01 |

Im Bußgeldbescheid zu unserem Auskunftsersuchen wurden die Namen der Gefahrstoffe und die Konzentration der Luftschadstoffe weggelassen. (Quelle: Entscheidung )

Unter den begangenen Versäumnissen wird aufgeführt, dass die Luftfilteranlagen nicht richtig funktionierten, Staub mit gefährlichen Stoffen aus ihnen austrat, nicht alle Arbeiter Schutzausrüstung trugen und nicht alle darüber informiert wurden, dass sie mit krebserregenden Stoffen arbeiten würden.

**Eine erhöhte Exposition** tritt auf, wenn die Konzentration bestimmter chemischer Substanzen im Körper des Arbeitnehmers während der Arbeit bestimmte biologische Grenzwerte überschreitet.**Biologische Überwachung** : An Arbeitsplätzen, an denen mit gefährlichen Stoffen gearbeitet wird, müssen Laboruntersuchungen biologischer

Expositionsindikatoren durchgeführt werden. Dabei werden die biologischen Expositionsindikatoren im Blut oder Urin der Arbeiter in einer festgelegten Frequenz gemessen. (Quelle: labor.hu )

## Eine Mühle explodierte: Drei Menschen wurden verletzt

Laut anderen offiziellen Dokumenten, die aufgrund unserer Datenanfragen erhalten wurden, hat das Unternehmen jedoch auch mehrfach gegen die behördlichen Vorschriften verstoßen.

In einem Dokument der Katastrophenschutzdirektion des Komitats Nógrád wurde im Zusammenhang mit den Umständen des Explosionsunglücks im Juli 2022 eine Geldstrafe von 1 Million HUF verhängt . Dem amtlichen Beschluss zufolge explodierte während des Teststarts eine Vorrichtung zum Mahlen und Trocknen von Batteriezellen, wodurch ein Arbeiter schwer, ein weiterer leicht und ein Feuerwehrmann verletzt wurde. Dabei wird das Batterieaggregat auf eine Temperatur von ca. 500-600 Grad Celsius erhitzt und mit Stickstoff versetzt, um eine Verbrennung zu verhindern. Laut Protokoll der Katastrophenschutzdirektion

die maschine benötigt zum betrieb auch erdgas, war aber zum zeitpunkt des teststarts noch nicht installiert.

Die Untersuchung ergab auch, dass die explodierte Maschine nicht in der Sicherheitsdokumentation enthalten war, für die das Unternehmen die Genehmigung für den Katastrophenschutz erhielt, und daher nicht hätte verwendet werden können.

Der Betreiber gab weiter an, dass es im Werksbereich „durch unsachgemäße Entladung der Zellen“ zu kleineren Bränden gekommen sei, diese Zellbrände aber laut Aussage nicht mit gefährlichen Stoffen in Berührung gekommen seien.

Nach Angaben des Nationalen Umweltschutzinformationssystems (OKIR) hat die Umweltschutzbehörde des Regierungsamtes des Komitats Nógrád auch die SungEel Kft. mit einer Geldbuße belegt. Das Unternehmen hatte keine Lizenz zum Betrieb von Luftverschmutzungs-Punktquellen, daher wurde ihm eine Geldstrafe von 1,5 Millionen HUF auferlegt.

Für die Datenanfrage von öffentlichem Interesse haben wir die von Átlátszó betriebene **KiMitTud-** Website zur öffentlichen Datenanfrage verwendet. Mit Hilfe von KiMitTud können jedoch nicht nur wir, sondern jedermann einfach und transparent Daten von öffentlichem Interesse von jedem Staat, jeder Kommunalverwaltung oder anderen öffentlichen Einrichtung anfordern, die sich an der Tätigkeit des Staates beteiligt oder öffentliche Gelder ausgibt.

## Die Katastrophenschutzbehörde hält die Kapazitätserweiterung für nicht gerechtfertigt

Im Oktober 2022 beantragte SungEel Kft. bei den Behörden die Genehmigung zur Kapazitätserweiterung. Bisher hatten sie eine Genehmigung für die Behandlung von 28.000 Tonnen Abfall pro Jahr, aber sie wollen diese Menge auf 52.000 Tonnen pro Jahr erhöhen, von denen 23.000 Tonnen gefährliche Abfälle pro Jahr wären. Aufgrund des verfahrensabschließenden Beschlusses ist durch den Ausbau mit erheblichen Umweltauswirkungen zu rechnen , so dass eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchgeführt und dem Unternehmen ein betrieblicher Schadensminderungsplan vorgelegt werden muss.

Die ergangene Entscheidung enthält aber auch erstaunliche Daten. Das Metropolitan Disaster Management Directorate gibt beispielsweise an, dass im April 2022 an sechs Stellen im Anlagengebiet Grundwasserproben aus provisorischen Bohrungen entnommen und den Untersuchungen zufolge eine Reihe von Stoffen (Sulfat, TPH, Toluol, Arsen, Acenaphthylen) entnommen wurden , Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren, Anthracen, alle PAK ohne Naphthalin, Dichlorethane Bestandteilkreise) im Grundwasser den zulässigen Grenzwert überschritten; Daher forderte die Wasserbehörde den Bau eines Überwachungssystems. In den Kommentaren der Abfallwirtschaftsabteilung des Regierungsamtes des Komitats Nógrád heißt es:

„Leider hat die Gesellschaft mit beschränkter Haftung im letzten Jahr ihres Bestehens keine aktuelle und auswertbare Aufzeichnung vorweisen konnte, die den gesetzlichen Anforderungen entspricht.

Die Katastrophenschutzdirektion des Komitats Nógrád ging in ihrer Strenge sogar noch weiter. Das Unternehmen habe die Katastrophenschutzbehörde nicht über die Änderung der Gefahrstoffmenge informiert und keine Änderung seiner Katastrophenschutzgenehmigung beantragt . Zudem seien die Ermittlungen zu der Explosion im Juli 2022 noch nicht abgeschlossen, die genauen Ursachen und Folgen des Unglücks seien nicht bekannt, so die Behörde: „Aufgrund des Vorstehenden halte ich es derzeit nicht für gerechtfertigt die Kapazität des Standorts erweitern."

Darüber hinaus wurde am 1. Dezember 2022 ein umfassendes Umweltprüfungsverfahren eingeleitet , dessen Dokumentation Daten über die bisherigen Aktivitäten des Unternehmens, die eingesetzte Technologie und die Menge an gefährlichen Stoffen enthält. Dies zeigt, dass die größte Menge zu verarbeitender Altbatterien aus der Samsung-Batteriefabrik in Göd im Werk Bátonyterenye der SungEel Kft. angekommen ist: Im ersten und zweiten Quartal 2022 beträgt diese Menge ca. Es fielen 3.300 Tonnen Abfall an.

29. táblázat

| Azonosító kód | Megnevezés | Kezelési kód | Átadó | Mennyiség (kg) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 2021 | 2022 |
| 06 03 15* | Nehézfémeket tartalmazó fémoxid | R4 | ÉLTEX Kft. | 202 995 | 159 332 |
| 06 03 15* | Nehézfémeket tartalmazó fémoxid | R4 | SK Battery Manufacturing Kft. | - | 305 507 |
| 12 01 04 | Nemvas fém részek és por | R4 | LG Energy Solution Sp.z o.o. | - | 389 338 |
| 16 02 16 | Kiselejtezett berendezésből eltávolított anyag, amely különbözik a 16 02 15-től | R4 | Samsung SDI Magyarország Zrt. | - | 1 714 240 |
| 16 02 16 | Kiselejtezett berendezésből eltávolított anyag, amely különbözik a 16 02 15-től | R4 | ÉLTEX Kft. | - | 78 959 |
| 16 06 05 | Egyéb elemek és akkumulátorok | R4 | ÉLTEX Kft. | - | 2 372 868 |
| 16 06 05 | Egyéb elemek és akkumulátorok | R4 | Samsung SDI Magyarország Zrt. | - | 1 651 255 |
| 16 06 05 | Egyéb elemek és akkumulátorok | R4 | LG Energy Solution Sp.z o.o. | - | 96 259 |

Die Abfallmenge, die SungEel Hitech Hungary Kft. im Jahr 2021 sowie im ersten und zweiten Quartal 2022 erhalten hat. (Quelle: Dokumentation für eine vollständige Umweltprüfung .)

Da auch Samsungs zweites Werk in Göd die für seinen Betrieb notwendige Katastrophenschutzgenehmigung erhalten hat , wird auch das Werk von SK Innovation in Iváncsa bald in Betrieb gehen , das Werk in Komárom wird voraussichtlich erweitert , und auch die Abfallmenge, die bei der Batterieproduktion anfällt, wird zunehmen. Und dafür wird es notwendig sein, diese steigende Menge irgendwo entgegennehmen und verarbeiten zu können.

Laut Unternehmensdaten von Opten begann SungEel Hitech Hungary Kft. deutlich zu wachsen. Im Jahr 2020 beendete das Unternehmen neben einem Nettoumsatz von 1,7 Milliarden das Jahr mit einem Verlust von 622 Millionen HUF, aber im Jahr 2021 konnte es einen Umsatz von 5,4 Milliarden HUF und einen Gewinn von 152 Millionen HUF verzeichnen.

*Wir haben versucht, SungEel Hitech Hungary Kft. zu finden, aber wir konnten das Unternehmen unter keiner der angegebenen Kontaktdaten erreichen. Die E-Mail-Adressen in amtlichen Dokumenten und Firmendatenbanken funktionieren nicht, die angegebene Telefonnummer ist falsch.*

**Zsuzsa Bodnar**

# Anlage 3

Quelle: https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/ee/d1ee00691f

**Umweltauswirkungen, Verschmutzungsquellen und Entsorgungswege für verbrauchte Lithium-Ionen-Batterien**

Wojciech Mrozik, *abc Mohammad Ali Rajaeifar,ab Oliver Heidrichab und Paul Christensena

Received 5th March 2021 , Accepted 12th October 2021
First published on 13th October 2021

*Auszüge / Zusammenfassung für BI Batterierecycling (zusammengestellt von* einer Chemikerin
*Die Seitenzahlen beziehen sich auf den nachfolgenden ausführlicher teilübersetzten Text in selben Dokument ab S. 4.*

Das Hauptziel dieser Studie ist es, einen aktuellen Überblick über die Umweltauswirkungen und -gefahren von Altbatterien zu geben.

S. 9 **2.1.3 Recyclingspezifische Verschmutzung und mögliche Umweltauswirkungen.**
Die Materialrückgewinnung ist keine umweltfreundliche Tätigkeit. So ist beispielsweise die Pyrometallurgie ein sehr energieaufwändiger Prozess, der zu Treibhausgasemissionen und der Entstehung giftiger Gase oder gefährlicher Schlacken führt, die unter Umständen deponiert werden müssen.[31] Darüber hinaus kann das Zwischenprodukt, die so genannte "schwarze Masse" (ein schlammiges Gemisch aus Lithium, Mangan und Kobalt), auch andere gefährliche Stoffe wie Alkylfluorphosphate enthalten, die ein ernsthaftes Gesundheitsrisiko darstellen.[59]

Mohr et al. (2020) verglichen die Umweltauswirkungen des Recyclings verschiedener Batterietypen (d. h. NMC, NCA, LFP und Festkörperbatterien) unter Verwendung eines konventionellen pyrometallurgischen, eines konventionellen hydrometallurgischen und eines fortschrittlichen hydrometallurgischen Prozesses (der Graphit und Elektrolyt zurückgewinnt). [60] Die Ergebnisse zeigten, dass das fortschrittliche hydrometallurgische Verfahren aufgrund der zusätzlichen Rückgewinnung von Graphit und Elektrolyt am besten abschneidet (in Bezug auf die Auswirkungen auf die globale Erwärmung), während das pyrometallurgische Verfahren aufgrund des hohen Energieverbrauchs und der fehlenden Li-Rückgewinnung am schlechtesten abschneidet.

S. 11 **2.2.1 Mülldeponiebrände**. ... Bei Hohlraumbränden handelt es sich um eine Form der Verbrennung (Pyrolyse), bei der die thermische Reaktion unter anoxischen (sauerstofffreien) Bedingungen tief unter der Deponieoberfläche stattfindet.[77,88]

*Anmerkung Simone Post: Entspricht den Bedingungen im Drehrohrofen!*

Die Gefahren durch beschädigte LIBs kommen zu den herkömmlichen Deponiebränden hinzu, bei denen ein Gemisch aus toxischen Gasen und Rauch[77,93] entsteht, das aus polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK),[94-96] Dioxinen/Furanen,[97-101] flüchtigen organischen Verbindungen (VOC),[102,103] Schwermetallen[104,105] polychlorierten Biphenylen oder chlororganischen Pestiziden[104] und schließlich Feinstaub (PM) mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 2,5 µm besteht.[106,107] Unterirdische Brände begünstigen die Entstehung schädlicher Gase wie CO, $SO_2$ oder $H_2S$[77] - einige dieser Gase entstehen auch in brennenden Batterien.[7,20-24]

S. 13-14 **2.4 Zwischenfälle mit LIBs**
Im Wesentlichen produzieren LIBs im thermischen Durchgehen Gase, die ein Gemisch aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, HF, kurzkettigen Alkanen und Alkenen, HCN, NOx und Tröpfchen von Lösungsmitteln darstellen,[21,23,138,140-142] wobei letztere dem Gemisch das Aussehen einer weißen Wolke verleihen.[143]
….
Feuerlöschmittel (Wasser, Schaum usw.), die zur Eindämmung von Unfällen verwendet werden, sind Träger aller von LIBs freigesetzten Schadstoffe. Dadurch kann sich der Wirkungsbereich

erweitern. Beispielsweise kann HF, das bei einem Brand freigesetzt wird, mit dem Löschmittel eine Lösung bilden und so bei Konzentrationen von nur 0,01 % bereits nach 5 Minuten Exposition Verletzungen an den empfindlichsten Stellen der menschlichen Haut verursachen.[148] Wenn wir hinzufügen, dass zwischen 20 und 200 mg HF pro W h eines EV-Batteriepacks freigesetzt werden können,[22] ist eine solche Lösung oder sogar noch höhere Konzentrationen nicht verwunderlich.
….
Wenn das Feuer gelöscht ist, bleiben die Reste der verbrannten Batterien zurück. Derzeit gibt es keine Daten, die direkt Aufschluss darüber geben, welche Art von Schadstoffen aus solchen Abfällen freigesetzt werden können. In Anbetracht der typischen Analyse nach einem Brand[132,149] und der Zusammensetzung von LIBs können wir vermuten, dass es sich um Reste von Nanooxiden, Metallen, PAKs und VOCs handeln könnte.

S. 15-16 **3.1.1 Staub.** Feinstaub kann von LIBs während der Demontage und des Recyclings in die Luft freigesetzt werden;…..
Feinstaub mit aerodynamischen Durchmessern von weniger als 10 oder 2,5 µm (PM10 und PM2,5) kann die menschliche Gesundheit gefährden, das Klima nachteilig beeinflussen und die Sicht auf lokaler und regionaler Ebene verringern.[169-171] Partikel können stoffgebundene Metalle wie Arsen, Kadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer oder Blei enthalten, die bei der Zersetzung von wiederverwertbaren Batterien, Altmetallen und Elektronikschrott anfallen.[172-174] Staub kann in die Atemwege gelangen und gesundheitsschädliche Auswirkungen wie Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen, Karzinogenität oder Störungen des Hormonsystems verursachen.[175-187]
…..
Darüber hinaus können sich Partikel und Chemikalien (z. B. PAK), die aus Batterien freigesetzt werden, in der Atmosphäre zusammenballen, über größere Entfernungen transportiert werden und sich absetzen und so beispielsweise den Boden verschmutzen. ……..
Die potenziellen negativen Auswirkungen von drei Batteriematerialien - Lithiumeisenphosphat (LFP), Lithiumtitanoxid (LTO) und Lithiumkobaltoxid (LCO) - wurden anhand von Mäuse-Bioassays untersucht.[188] Die in den Kathoden von LIBs vorhandenen gemischten Metalloxide könnten Partikel freisetzen, die klein genug sind, um in die Lunge einzudringen und Entzündungen hervorzurufen. Das Ausmaß der Auswirkungen hängt von der Chemie des LIB ab.

In einer anderen Studie[191] wurde festgestellt, dass thermisch missbrauchte prismatische NMC-Zellen für Kraftfahrzeuge PM freisetzen, die Schwermetalle enthalten. Die Autoren stellten fest, dass Nickel und Kupfer in allen gesammelten Fraktionen (1,45 bis 500 µm) nachgewiesen wurden, während sich Zink und Chrom in größeren Fraktionen (50 bis 500 µm) absetzten. Ni hatte den größten Massenanteil, gefolgt von Cu, Zn und Cr. Bezogen auf die gesamte emittierte Menge machten die PM 1,7 % der Zellmasse aus. …...

S.16 **3.1.2 Fluorwasserstoffsäure.** Von den verschiedenen gefährlichen Gasen, die aus LIBs in die Luft freigesetzt werden, ist HF am bedenklichsten und muss mit größter Vorsicht behandelt werden. Sie kann über die Haut oder die Atemwege in den menschlichen Körper eindringen und schwere ätzende Wirkungen und systemische Toxizität verursachen.[192] Das Einatmen von nur wenigen ppm HF kann zu schweren toxischen Wirkungen führen. …..
HF entsteht in LIBs während der ersten Ladung und durch anschließende Zyklen, ein Phänomen, das als Begasung bekannt ist.[197-200] Die Säure kann auch durch versehentliches Verschütten und somit durch die Exposition des LiPF6 im Elektrolyten gegenüber feuchter Luft entstehen[158]
S. 17 ….handelsübliche LIB-Elektrolyte enthalten häufig Zusätze ….. Es ist nicht klar, wie sich diese auf Zersetzungsreaktionen auswirken, wie giftig sie sind oder welche Produkte bei ihrer Verbrennung entstehen.

S. 18 **3.2.1 Deponie-/Deponiesickerwasser**.
Unter saureren Bedingungen ist die tatsächliche Toxizität von Schwermetallen höher, als es die Metallkonzentration allein vermuten ließe.[221]
…..
Es ist bekannt, dass Schwermetalle, die Pflanzen, Früchte oder Staub verunreinigen, genetische Schäden bei Kindern hervorrufen[229,230] und zu schlechteren schulischen Leistungen führen.[231]

S. 18 In die Umwelt freigesetztes Nickel bindet sich stark an kleine feste Partikel, insbesondere an solche, die Eisen oder Mangan enthalten. Nickel hat eine geringe Tendenz, sich in Fischen und Kleintieren anzureichern. Was die menschliche Gesundheit betrifft, so ist Nickel das häufigste allergische Metall.

S. 21 **3.2.3 Abbauprodukte von Batterien**
……. Die so genannte "schwarze Masse" [Hier nur geschredderte Batterien ohne Vorbehandlung mit Elektrolyt!] wurde über 20 Monate lang durch regelmäßige Analysen von Gasen, Flüssigkeiten und Restsalzen überwacht. Die Ergebnisse zeigten, dass die Weißblechdosen einer schnellen Korrosion unterlagen - erste Flecken waren bereits nach wenigen Tagen sichtbar, und nach fünf Monaten waren einige der Dosen bereits von Rost durchlöchert. Kunststoffdosen zeigten keine sichtbaren Anzeichen von Zersetzung. Neben HF fanden die Autoren auch Spuren von Phosphorsäuren, LiPF6, anderen Additiven (z. B. Cyclohexylbenzol) und Lösungsmitteln - DMC, EC, EMC und deren Abbauprodukte. Noch wichtiger ist, dass sie mehrere Alkylfluorophosphate identifiziert haben, darunter Dimethylfluorophosphat (DMFP) und Diethylfluorophosphat (DEFP). Alkylfluorophosphate sind besorgniserregend, da sie ähnliche Strukturen wie chemische Kampfstoffe wie Sarin aufweisen.[260] DMFP und DEFP wurden auch von Kraft et al. (2015 und 2016) nachgewiesen, die den thermischen Abbau von LIB-Elektrolyten untersuchten.[160,261] Obwohl sie in überschaubar niedrigen Konzentrationen vorhanden sind, können sie dennoch ein toxisches Potenzial für Mensch und Umwelt haben.

Diese Studien verdeutlichen das wichtige Thema der Lagerung von verbrauchten und verarbeiteten Batteriematerialien.

S. 21 **3.2.4 Zusatzstoffe** So gelten die meisten ionischen Flüssigkeiten in Batteriesystemen als toxische und biologisch schwer abbaubare Verbindungen.[276,277]

S. 25 aus **5. Schlussfolgerung**
…..
Zu den identifizierten Gefahren, die von LIBs freigesetzt werden, gehören Dämpfe und Gase (z. B. HF, CO oder HCN), Metallnanoxide (z. B. LMO, NMC), Abbauprodukte des Elektrolyten (Alkylfluorophosphate) und mögliche Spuren von Zusatzstoffen. Diese Schadstoffe können in den Boden, das Wasser (Grundwasser) und die Luft freigesetzt werden, je nach Recycling, Entsorgungsmethode oder Missbrauchsfall. Freigesetzte Schadstoffe können eine ernsthafte Bedrohung für wild lebende Tiere und Menschen darstellen und haben oft unmittelbare Auswirkungen, wie z. B. im Falle eines Kontakts mit HF bei einem EV-Brand. Die Zersetzung des Batterieinhalts (insbesondere des Elektrolyts) kann in einigen Fällen zur Entstehung von Chemikalien führen, die strukturell chemischen Kampfstoffen ähneln. Die ersten Studien zur (Öko-)Toxizität der Kathoden-Nanomaterialien zeigten, dass LIBs eine Gefahr für lebende Organismen und die menschliche Gesundheit darstellen können. Der Ersatz toxischer Metalle (Co und Ni) durch weniger toxische (Mn) könnte jedoch die Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit der nächsten Generation von Lithiumbatteriematerialien verbessern.

Quelle: https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/ee/d1ee00691f
vom 13. Oktober 2021

**Umweltauswirkungen, Verschmutzungsquellen und Entsorgungswege für verbrauchte Lithium-Ionen-Batterien**

Wojciech Mrozik, *abc Mohammad Ali Rajaeifar,ab Oliver Heidrichab und
Paul Christensena

## Zusammenfassung

Die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) für den elektrischen Verkehr und zur Unterstützung der Nutzung erneuerbarer Energien durch zusätzliche Energiespeichersysteme steigt. Dieser Nachfrageschub erfordert eine gleichzeitige Steigerung der Produktion und führt im Laufe der Zeit zu einer großen Anzahl verbrauchter LIBs. Der immer größer werdende Batterieabfall muss entsprechend verwaltet werden. Derzeit gibt es keine universellen oder einheitlichen Standards für die Entsorgung von LIBs auf der ganzen Welt. Jedes Land wendet eine oder eine Kombination von Praktiken an, wie z. B. Deponierung, Verbrennung und vollständiges oder teilweises Recycling, je nach der Anzahl der Batterien, die den Markt verlassen, der geltenden Gesetzgebung und den Infrastrukturen. Die informelle Entsorgung oder Wiederaufbereitung ist keine seltene Tätigkeit. In diesem Bericht werden die Umweltauswirkungen, Quellen und Verschmutzungspfade von verbrauchten LIBs erfasst, identifiziert und kategorisiert. Die Nachteile der Entsorgungspraktiken werden hervorgehoben und die damit verbundenen Gefahren erörtert. Die hier präsentierten Beweise stammen aus realen Vorfällen und zeigen, dass eine unsachgemäße oder unvorsichtige Verarbeitung und Entsorgung von Altbatterien zu einer Verschmutzung von Boden, Wasser und Luft führt. Die Toxizität des Batteriematerials stellt eine direkte Bedrohung für Organismen auf verschiedenen trophischen Ebenen sowie eine direkte Bedrohung für die menschliche Gesundheit dar. Die identifizierten Verschmutzungswege sind Auslaugung, Zersetzung und Abbau der Batterien, aber auch gewaltsame Zwischenfälle wie Brände und Explosionen sind von Bedeutung. Abschließend werden einige der wichtigsten Wissenslücken für künftige Bewertungen erörtert. Die aktuelle Studie bietet einen umfassenden Überblick über die Bedrohungen und Gefahren, die es zu bewältigen gilt, um die Konzeption und Umsetzung sicherer Entsorgungs- und Aufbereitungsoptionen für verbrauchte LIBs zu gewährleisten.

## Weiterer Kontext

Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) dringen immer tiefer in unser Leben ein - von tragbaren Geräten und Elektroautos bis hin zu netzgebundenen Energiespeichersystemen, was Bedenken hinsichtlich der Sicherheit und des Risikos ihrer Entsorgung aufwirft. Ausgediente LIBs werden derzeit auf Deponien gelagert, verbrannt, teilweise/vollständig recycelt oder in einer Kombination aus diesen Verfahren entsorgt, je nach bestehender Infrastruktur, Gesetzgebung usw. des betreffenden Landes. Verbrauchte LIBs gelten aufgrund der potenziellen Risiken für die Umwelt und die menschliche Gesundheit als gefährliche Abfälle (insbesondere solche aus Elektrofahrzeugen). Diese Studie bietet einen aktuellen Überblick über die Umweltauswirkungen und Gefahren von Altbatterien. Sie kategorisiert die Umweltauswirkungen, Quellen und Verschmutzungspfade von verbrauchten LIBs. Zu den identifizierten Gefahren gehören Feuer und Explosionen, die Freisetzung giftiger Gase (z. B. HF und HCN), die Auslaugung giftiger Metallnanooxide und die Bildung gefährlicher Abbauprodukte aus dem Elektrolyten. Letztlich können die Schadstoffe den Boden, das Wasser und die Luft kontaminieren und eine Bedrohung für das Leben und die Gesundheit der Menschen darstellen. In dieser Arbeit erörtern wir einige der wichtigsten Wissenslücken und gehen Fragen zu den Umweltauswirkungen von verbrauchten LIBs nach, die dazu beitragen könnten, diese in Zukunft besser zu bewältigen, um sichere Entsorgungs- und Verarbeitungsoptionen für verbrauchte LIBs zu entwerfen und umzusetzen.

## 1. Einleitung

Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) sind in allen Bereichen unseres Lebens zu finden - von kleinen tragbaren elektronischen Geräten über Elektrofahrzeuge bis hin zu Batteriespeichersystemen (BESS). LIBs werden als entscheidend für die breite Einführung von erneuerbaren Energiequellen angesehen, da diese BESS benötigen, um die Schwankungen in der Energieversorgung für einen zuverlässigen Betrieb des Stromnetzes zu bewältigen. Die Anwendung von LIBs in der elektrischen Traktion hat eine Revolution in der Automobilindustrie ausgelöst, die den Verkehrssektor dekarbonisieren und die lokale Luftverschmutzung reduzieren soll. Im Jahr 2009 wurden fast 25,6 GWh (ca. 134 000 Tonnen) an LIB-Energiespeicherkapazität auf dem Weltmarkt platziert, im Jahr 2019 waren es etwa 218 GWh (über 1,2 Millionen Tonnen), und Schätzungen zufolge werden im Jahr 2030 mehr als 2500 GWh (über 12,7 Millionen Tonnen) auf dem Markt sein, was zu einer enormen Menge an Abfall aus den verbrauchten LIBs führt.[1]

Verschiedene internationale und nationale Initiativen wie der europäische Green Deal in der EU[2] , die Zusage der britischen Regierung, bis 2030 keine neuen ICE-Autos mehr zuzulassen (Hybride bis 2035)[3] oder die Notwendigkeit, die emissionsfreie Mobilität als dringende Priorität zu etablieren[4] , erfordern einen sehr starken Anstieg der Produktion neuer LIBs. Außerdem erfordert der Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft[5] den Bau neuer, leistungsfähigerer BESS auf der ganzen Welt. Diese Anlagen werden zur Speicherung von intermittierendem Solar-, Wind- oder Wellenstrom, zur Netzunterstützung, zur Frequenzstabilisierung und zur Speicherung hinter dem Zähler eingesetzt werden und herkömmliche Technologien ersetzen. Einerseits hat die steigende Zahl von LIBs zu Bedenken hinsichtlich der Verfügbarkeit einiger kritischer Metalle und ihrer wilden kurzfristigen Preisschwankungen geführt, die die nachhaltige Versorgung mit solchen Energiespeichern beeinträchtigen könnten.[6] Es gibt auch einige ethische und ökologische Bedenken hinsichtlich der Gewinnung einiger Metalle für LIBs.[7] Andererseits wird dieser Nachfrageschub nach Batterien eine gleichzeitige Steigerung der Produktion und eine große Zahl von LIBs erfordern, die das Ende ihrer Lebensdauer erreichen. Dies führt zu einer immer größeren Menge an Batterieabfällen, die entsprechend entsorgt werden müssen.[8] Derzeit landen jedoch viele Batterietypen auf Mülldeponien oder werden verbrannt, was in erster Linie auf das Fehlen angemessener Normen, die Durchsetzung gesetzlicher Kontrollen und ineffiziente oder fehlende nationale Batteriesammel- und -recyclingsysteme zurückzuführen ist.[9] Infolgedessen könnten die menschliche Gesundheit und die Umweltqualität gefährdet sein, da bei der unsachgemäßen Entsorgung von Batterien eine Vielzahl von Schadstoffen wie Schwermetalle oder Flusssäure (HF) freigesetzt werden könnten.

Das Hauptziel dieser Studie ist es, einen aktuellen Überblick über die Umweltauswirkungen und -gefahren von Altbatterien zu geben. In diesem Papier werden der Verbleib, die Entsorgungswege und die potenziellen Verschmutzungsquellen und -pfade von verbrauchten LIBs berichtet und diskutiert. Trotz der eindeutigen Bedeutung dieses Bereichs sind die Daten über die Umweltauswirkungen von gebrauchten LIBs äußerst begrenzt, weshalb diese Studie die möglichen Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit gebrauchten Batterien aufzeigt. Es besteht ein dringender Bedarf seitens der Hersteller, der Abfallverwertungsunternehmen, der Recyclingfirmen und der öffentlichen Interessengruppen, diese Angelegenheit zu verstehen, da falsche Entsorgungspraktiken, fehlende Daten oder eine unsachgemäße Identifizierung von Gefahren die Anzahl von Zwischenfällen, Bränden und potenziell tödlichen Unfällen drastisch erhöhen werden. Die möglichen Emissionswege und Verschmutzungspfade, z. B. in der Luft, im Wasser und im Boden, werden im Rahmen dieser Studie ebenfalls bewertet. Wir haben auch mögliche Gefahren für die menschliche Gesundheit und die Qualität der Ökosysteme erkannt, die sich aus den verschiedenen Verfahren zur Behandlung und Entsorgung von Batterien ergeben. Schließlich

werden die Wissenslücken aufgezeigt, die geschlossen werden müssen, wenn die richtigen Entsorgungspraktiken und Managementsysteme eingeführt werden sollen.

2. Beseitigung von Altbatterien
Die Entsorgung verbrauchter LIBs umfasst Wiederverwendung, Recycling, Deponierung, Verarbeitung oder (leider) illegale Entsorgung (Abb. 1). Die lokalen Entsorgungswege hängen von den nationalen Gesetzen und Vorschriften, den Recyclingkapazitäten, den Sammelsystemen, dem Verbraucherverhalten und den Einzelhandelsmärkten für Batterien ab.[10] Es ist klar, dass für kleine Batterien andere Ansätze erforderlich sind als für große Batterien.

*Abb. 1: Entsorgungswege von LIBs*
…..
Große LIBs werden in der Regel von professionellen Dienstleistern transportiert, sobald sie aus den Elektrofahrzeugen entfernt wurden[19] , wobei ihr Gesundheitszustand in der Regel unbekannt ist. Wenn sie innerlich beschädigt sind, befinden sie sich in einem langsamen thermischen Durchgehen und bleiben daher lange Zeit unbemerkt, woraufhin sie entweder in Flammen aufgehen oder Gase und Tröpfchen eines Lösungsmittels, den "weißen Dampf", freisetzen können, der aus giftigen und explosiven Gasen besteht.[7,20-24] Diese Ereignisse können während des Transports, der Lagerung, des Recyclings oder der Deponierung auftreten.

**2.1 Wiederverwertung**

**2.1.1 Geringe Verwertungsquoten**. Die stoffliche Verwertung von EoL-Batterien ist die bevorzugte Option gegenüber den anderen Entsorgungswegen[10,25,26] , da LIBs heute als strategisch wertvoller Abfallstrom gelten, der relativ wertvolle Metalle wie Kobalt, Nickel oder Lithium enthält.[27,28] Diese sind von beträchtlichem Wert, vor allem angesichts des schrumpfenden globalen Angebots an kritischen Materialien.[29-32] Die stoffliche Verwertung ist auch der Weg, um weniger abhängig vom Rohstoffabbau in anderen Ländern zu sein oder die eigenen kleinen Reserven zu schützen. So könnte beispielsweise der Lithiumbedarf an LIBs, der in China bis 2050 produziert wird, zu 60 % durch Recycling gedeckt werden.[33] Derzeit ist China der größte Verbraucher und Hersteller von LIBs, und mit dem Recycling von verbrauchten LIBs wurde erst vor kurzem begonnen.[34] Obwohl etwa 14 Rechtsvorschriften versuchen, die Emissionspfade aller Arten von Batterieabfällen zu regeln, steckt eine wirksame Regulierung der Kontrolle verbrauchter LIBs noch

in den Kinderschuhen.[34] In den USA ist die Bewirtschaftung und Regulierung von LIBs aufgrund der Bundesstaaten ebenfalls fragmentiert, wobei einige Bundesrichtlinien die Batterieentsorgung regeln, insbesondere der Mercury-Containing and Rechargeable Battery Management Act von 1996, der Zertifizierungen und Standards für Batterien regelt.[35] Insgesamt handelt es sich jedoch um einen Flickenteppich aus einzelstaatlichen Vorschriften mit unterschiedlichem Reifegrad und Kontrollniveau.[36] In der EU treten 2022 neue Rechtsvorschriften in Kraft, die die Rohstoffbeschaffung, die Entsorgung und das Recycling von LIBs regeln und kontrollieren.[1]

Die stoffliche Verwertung sollte die Umweltbelastung durch den Erzabbau und die Aufbereitung der in LIBs verwendeten Metalle abwenden, indem die recycelten Metalle in der Produktionskette ersetzt werden[37] , und könnte auch die Umweltbelastung durch andere schädliche Entsorgungswege vermeiden. Im Jahr 2018 wurden weltweit schätzungsweise 97 000 Tonnen LIBs recycelt,[19] darunter LIBs aus tragbarer Elektronik sowie LIBs aus Elektrofahrzeugen und BESS-Anwendungen. Kleine LIBs dominieren derzeit das Recycling (d. h. mehr als 80 % der recycelten Batterien), da die Zahl der Batterien, die den tatsächlichen Lebenszyklus von Elektrofahrzeugen erreichen, relativ gering ist.[38] Dies ist auf die relativ junge Anwendung von LIBs in Elektrofahrzeugen und die Tatsache zurückzuführen, dass LIBs aus Elektrofahrzeugen, wenn sie den Endverbrauch erreicht haben, immer noch für andere Anwendungen, wie z. B. die Unterstützung des Stromnetzes oder die Erzeugung erneuerbarer Energien, verwendet werden können, da sie in der Regel bis zu 80 % ihrer ursprünglichen Kapazität behalten.[39] Daher können LIBs aus Elektrofahrzeugen bis zu 10 Jahre nach ihrer ersten Lebensdauer entsorgt werden.[40]

Ein genauerer Blick auf die Einziehung von LIBs zeigt, dass die tatsächlichen Einziehungsquoten im Vergleich zur Menge der auf dem Weltmarkt platzierten LIBs recht niedrig sind. So liegt die durchschnittliche Einziehungsquote in der EU, einem der gut regulierten Märkte, bei fast 40 %, während nur 12 % auf LIB entfallen.[41] Auch auf einigen anderen, weniger regulierten Märkten wie Australien und den USA sind die durchschnittlichen Einziehungsquoten niedriger.[29,42] Dennoch gibt es einige Märkte, die besser abschneiden als die EU. Insbesondere Südkorea und China weisen zusammen bessere Verwertungsquoten auf. Tatsächlich sind diese Länder das Ziel der meisten exportierten Batterien (entweder in Form einer separaten Batterie oder als Teil von elektronischen Geräten) aus vielen Teilen der Welt, insbesondere aus Europa und Nordamerika. Dies spiegelt sich auch in der Gesamtmenge der recycelten LIBs wider: Von 97 000 Tonnen, die im Jahr 2018 weltweit behandelt wurden, wurden 67 000 in China und 18 000 in Südkorea verarbeitet.[19] Es wird jedoch geschätzt, dass weniger als 40 % der gesamten Batteriematerialien nach dem derzeitigen Materialflussschema tatsächlich recycelt werden können.[43] So wurden 2016 in China nur etwa 30 % des Nickels, 33 % des Kobalts, 23 % des Lithiums und 5 % des Graphits verwertet.[44] Diese mangelhafte Bewirtschaftung führte zu wirtschaftlichen Verlusten aufgrund des freien Abflusses wertvoller Materialien sowie zu Schäden für die Umwelt und die menschliche Gesundheit.[45,46] Es wurden verschiedene nationale und internationale Initiativen ergriffen, um dieses Problem der geringen Verwertung anzugehen, wie z. B. die EU-Batterierichtlinie[47] aus dem Jahr 2006 und die vorgeschlagene neue EU-Verordnung, die sich auf Batterien und Altbatterien bezieht.[48] Die größte Herausforderung ist jedoch der Mangel an Recycling-Infrastrukturen auf der ganzen Welt; es gibt nur wenige Recyclinganlagen in vollem Umfang (Tabelle 1).[49,50] Ein Beispiel für dieses Problem ist die Situation im Vereinigten Königreich. Vor dem Austritt aus der EU am 31. Dezember 2020 war es gängige Praxis, Batterien zum Recycling auf das europäische Festland zu schicken, z. B. zu Umicore in Belgien. Angesichts des eingeschränkten Zugangs zum EU-Markt und der strengen Vorschriften, die große LIBs als gefährliche Materialien behandeln, muss das Vereinigte Königreich ohne eine geeignete Recycling-Infrastruktur seine Batterien entweder deponieren[51] oder sie in speziellen Anlagen zwischenlagern, bis geeignete Anlagen gebaut werden oder bis ein entsprechendes Handelsabkommen mit der EU vereinbart wird.

*Tabelle 1: Derzeitige Recyclinganlagen in der ganzen Welt, übernommen aus Ref. [49] und [50]*
*[Auszug; Bitte Originaldokument nutzen.]*

| Company name | Location | Process[a] | Capacity (tonne of battery per year) |
|---|---|---|---|
| Accurec Recycling | Germany | P, M | 4000 |
| Akkuser | Finland | M | 1000 |
| Aubermacher Redux | Germany | M | 1000 |
| Bangpu Ni\\& Co High Tech | China | H | 3600 |
| Batrec | Switzerland, Wimmis | P | 200 |
| Dowa Eco-System Co. Ltd | Japan | P, H | 1000 |
| Duesenfeld | Germany | M | 3000 |
| …. | | | |
| SungEel Hitech | South Korea | H | 8000 |
| Sungeel Hi-tech | Hungary | M, H in South Korea | 3000 |
| Taisen Recycling | China & South Korea | H | 6000 |
| Tele Recycle | China | H | 2000 |
| TES (Recupyl) | France | M, H in Singapore | 1000 |
| Umicore | Belgium | P, H | 7000 |
| Ute Vilomara | Spain | H | >53.32 |

[a] P – pyrometallurgy, H – hydrometallurgy, M – physical separation.

Sowohl die Deponierung als auch die Lagerung haben potenziell negative Auswirkungen auf die Umgebung, da sie Schadstoffe und Verunreinigungen freisetzen und unfallbedingte Brände verursachen können, die im Folgenden erörtert werden.

**2.1.2 Recycling-Methoden**. Die Materialrückgewinnung aus EoL-LIBs erfolgt derzeit nach einem von drei Hauptverfahren: Pyrometallurgie, Hydrometallurgie und direktes Recycling.[25,40] Bei der Pyrometallurgie wird das Material in einem Hochtemperaturprozess geschmolzen, der in der Regel eine Verbrennung und anschließende Trennung beinhaltet, um eine Mischmetalllegierung aus Co, Cu, Fe und Ni zu erzeugen.[52] Dies ist eine etablierte Technologie, die häufig bei kleinen und großen LIBs, insbesondere bei kobaltreichen Batterien, angewendet wird. In der Regel ist bei dieser Methode keine Vorsortierung der Batterietypen erforderlich, allerdings muss die entstehende Legierung weiterverarbeitet werden. Bei der Hydrometallurgie werden die gewünschten Metalle aus dem Kathodenmaterial durch Auslaugen in einer sauren oder basischen wässrigen Lösung gewonnen. Später sind weitere Schritte wie die anschließende Konzentration und Reinigung erforderlich. Dieses Verfahren ermöglicht die Rückgewinnung fast aller LIB-Bestandteile mit hoher Reinheit.[53] Allerdings erfordert die Trennung der Metalle voneinander zusätzliche Reinigungsschritte: Außerdem ist im Gegensatz zur Pyrometallurgie eine Sortierung erforderlich. Schließlich beinhaltet das direkte Recycling die direkte Wiederverwendung des Kathoden- und/oder Anodenmaterials aus den Elektroden verbrauchter LIBs nach der Wiederaufbereitung. Diese Technologie ist zwar prinzipiell vielversprechend, da sie die einfache Rückgewinnung und

Wiederverwendung (ohne weitere Verarbeitung) der meisten Batteriebestandteile ermöglicht,[25,54,55] ist aber noch nicht ausgereift. Es gibt auch alternative Technologien, die derzeit untersucht werden, wie z. B. die Plasmaschmelztechnologie,[37] die Biolaugung,[56] das Materialrecycling auf der Grundlage von Redoxzielen,[57] usw.

Jede der aufgeführten Technologien hat ihre eigenen Grenzen bei der Rückgewinnung von LIB-Materialien. Daher sollte der endgültige Prozess eine Kombination verschiedener Techniken mit einem genau definierten Materialflussdiagramm beinhalten, um die höchste Effizienz des Recyclings zu gewährleisten.[58] Die enormen Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen sollten dieses Problem in Angriff nehmen, doch der allmähliche, aber ständige Wandel in der Batteriechemie wird es erforderlich machen, dass die Anlagen ihre Betriebsweise in nur wenigen Jahren ändern. Ist das Verfahren mit der neuen Chemie sicher zu betreiben? Gibt es gefährliche Neben- und Endprodukte, die entsprechend behandelt werden müssen? Diese und andere Fragen müssen beantwortet werden, um die Sicherheit der Arbeitnehmer zu gewährleisten und die Umweltauswirkungen des Prozesses zu mindern.

**2.1.3 Recyclingspezifische Verschmutzung und mögliche Umweltauswirkungen.** Die Materialrückgewinnung ist keine umweltfreundliche Tätigkeit. So ist beispielsweise die Pyrometallurgie ein sehr energieaufwändiger Prozess, der zu Treibhausgasemissionen und der Entstehung giftiger Gase oder gefährlicher Schlacken führt, die unter Umständen deponiert werden müssen.[31] Darüber hinaus kann das Zwischenprodukt, die so genannte "schwarze Masse" (ein schlammiges Gemisch aus Lithium, Mangan und Kobalt), auch andere gefährliche Stoffe wie Alkylfluorphosphate enthalten, die ein ernsthaftes Gesundheitsrisiko darstellen.[59] Das pyrometallurgische Recyclingverfahren könnte Umweltrisiken in den Wirkungskategorien globale Erwärmung, photochemische Ozonbildung, karzinogene und nicht karzinogene Wirkung, Abbau der Ozonschicht und Eutrophierung mit sich bringen.[18] Eine kürzlich durchgeführte Studie über das Recycling durch Plasmaschmelzen zeigte, dass die eingesetzte Energiequelle (für die Schmelzanlage), die Recyclingeffizienz, die Qualität der recycelten Materialien, die Aluminiumrückgewinnung und die Einführung eines Verfahrens zur Verbesserung der Batterieabfälle die Gesamtumweltauswirkungen der Pyrometallurgie erheblich beeinflussen könnten.[37]

Im Gegensatz dazu verursacht die Hydrometallurgie weitaus weniger Treibhausgasemissionen, erfordert aber eine zusätzliche Abwasserbehandlung, um sicherzustellen, dass die aufnehmenden Gewässer nicht zusätzlich belastet werden, z. B. durch Säuren. Es wurde berichtet, dass hydrometallurgische Recyclingverfahren Umweltrisiken in Bezug auf die Versauerung von Süßwasser und Böden mit sich bringen.[18] Mohr et al. (2020) verglichen die Umweltauswirkungen des Recyclings verschiedener Batterietypen (d. h. NMC, NCA, LFP und Festkörperbatterien) unter Verwendung eines konventionellen pyrometallurgischen, eines konventionellen hydrometallurgischen und eines fortschrittlichen hydrometallurgischen Prozesses (der Graphit und Elektrolyt zurückgewinnt). [60] Die Ergebnisse zeigten, dass das fortschrittliche hydrometallurgische Verfahren aufgrund der zusätzlichen Rückgewinnung von Graphit und Elektrolyt am besten abschneidet (in Bezug auf die Auswirkungen auf die globale Erwärmung), während das pyrometallurgische Verfahren aufgrund des hohen Energieverbrauchs und der fehlenden Li-Rückgewinnung am schlechtesten abschneidet. Die Autoren schlugen auch vor, dass ein zellchemiespezifischer Ansatz für das Recycling in Betracht gezogen werden sollte, da einige Recyclingverfahren bei der Behandlung bestimmter Chemikalien zu ungünstigen Auswirkungen auf die Umwelt führen könnten. So könnte das hydrometallurgische Recycling von LFP- und Natrium-Ionen-Batterien (SIB) zu einer zusätzlichen Belastung des abiotischen Ressourcenverbrauchs führen, oder das pyrometallurgische Recycling von LFP-Zellen könnte die Auswirkungen auf die globale Erwärmung erhöhen.

Da sich das direkte Recycling noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befindet, gibt es keine realen Daten über die potenzielle Verschmutzung. Laut Dunn et al. (2015) könnte die Verwendung eines direkten Recyclingverfahrens für NMC-, LCO-, LFP- und LMO-Batterien die Emissionen von Treibhausgasen und SOx (aus der Batterieproduktion) erheblich reduzieren und somit die globale Erwärmung und das Versauerungspotenzial des gesamten Batterie-Lebenszyklus verringern.[61] Es ist zu beachten, dass bei der Betrachtung der Umweltauswirkungen eines bestimmten Recyclingverfahrens in der Regel die Nettoauswirkungen auf die Umwelt berücksichtigt werden, die durch Subtraktion der freigesetzten Emissionen von den vermiedenen Emissionen (Recyclingvorteile) berechnet werden. So kann ein Recyclingverfahren selbst eine negative Auswirkung auf die Umwelt in einer bestimmten Umweltwirkungskategorie haben, während die Gutschriften aus den recycelten Materialien (vermiedene Umweltauswirkungen aufgrund der Rückführung des zurückgewonnenen Materials auf den Markt) diese negativen Auswirkungen kompensieren und die Netto-Umweltauswirkungen positiv gestalten können. Insgesamt ist anzumerken, dass die Umweltauswirkungen verschiedener Recyclingverfahren je nach der verarbeiteten Zellchemie, der eingesetzten Emissionsminderungstechnologie, der Recyclingeffizienz und der Qualität der zurückgewonnenen Materialien variieren können.

**2.1.4 Vergleich mit Recyclingverfahren für Nicht-Lithium-Ionen-Batterien**. Schließlich können auch Lehren aus den bereits etablierten Recyclingverfahren für andere Batterietypen gezogen werden. So ist beispielsweise die Verarbeitung von Blei-Säure-Batterien vor allem in Entwicklungsländern[62] sehr bedenklich, da das Recycling dort häufig ohne Kontrolle der Bleiemissionen erfolgt.[63] Außerdem fehlt es häufig an geeigneten Vorschriften, was dazu führt, dass es informelle und umweltschädliche Recyclingindustrien gibt. In Ermangelung angemessener Normen und/oder mangelnder Durchsetzung gesetzlicher Kontrollen führt das aus Batterien recycelte Blei daher selbst in etablierten Recyclinganlagen im industriellen Maßstab zu einer erheblichen Umweltverschmutzung und Exposition des Menschen.[64] Schätzungen zufolge sind die langfristigen Auswirkungen der Bleiexposition auf die Gesundheit mit über 495 000 Todesfällen und mehr als 9 Millionen um Behinderungen bereinigten Lebensjahren (DALYs) verbunden. Aus Berichten geht auch hervor, dass Länder mit niedrigem und mittlerem Einkommen die höchsten Sterberaten im Zusammenhang mit der Bleiexposition aufweisen.[65] Eine vergleichende Analyse zeigt, dass der derzeitige ökologische und soziale Einfluss des Blei-Säure-Batteriesystems (z. B. Rohstoff-/Metallverbrauch, Energiebedarf, Schrottemissionen, Recycling- oder Entsorgungskosten) größer ist als der des LIB-Systems.[66] Es sollte jedoch betont werden, dass solche Studien auf der Grundlage retrospektiver Daten (z. B. für China im Jahr 2016) durchgeführt wurden und die Zukunft mit einer viel höheren Anzahl von LIBs in Produktion und Recycling/Entsorgung nicht vollständig widerspiegeln. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, alle Wissens- und Technologielücken sowie sozioökonomische Fragen im Detail zu bewerten und auf die künftige LIB-Recyclingindustrie anzuwenden. Dies ist nicht nur für die Industrieländer wichtig, sondern noch mehr für die Schwellenländer, die in der Regel über eine laxe oder schwache Umweltgesetzgebung verfügen.[67]

## 2.2 Mülldeponien

Die Deponierung ist die wichtigste Methode zur Beseitigung fester Abfälle[68] - mit Ablagerungsraten von 53 % in den USA,69 79 % in China70 bis 94 % in Malaysia.[71] Davon sind etwa 4 % Elektronikabfälle (E-Schrott), die häufig Batterien enthalten.[72] In Anbetracht der weltweit niedrigen Verwertungsquoten ist klar, dass die meisten Elektroabfälle, die kleine LIBs enthalten, auf Deponien entsorgt und nicht verwertet werden.[73-76] Dies gilt nicht nur für viele Schwellenländer, sondern auch für Industrieländer aufgrund (wie oben erwähnt) laxer oder schwacher Vorschriften sowie der fehlenden Recycling-Infrastruktur. Daher ist es zumindest kurzfristig sicher, dass LIBs

(insbesondere die aus kleinen tragbaren Geräten) vergraben werden. Derzeit werden aufgrund der relativ geringen Anzahl von E-Fahrzeugen in der Regel große LIBs verwertet.[44] Angesichts des raschen Mengenwachstums und der immer noch unzureichenden Infrastruktur könnten jedoch auch leistungsstarke Batterien entweder deponiert oder zwischengelagert werden. Langfristig ist es jedoch wahrscheinlicher, dass sie verwertet und nicht deponiert werden, da dies eine Verschwendung einer bedeutenden Ressource wertvoller Materialien wäre.[67]
Die Deponie selbst kann sowohl eine Senke als auch eine Quelle der Verschmutzung sein, die negative Auswirkungen auf die umliegenden Gemeinden haben kann.[68] Die wichtigsten Emissionsquellen von Deponien sind Oberflächenstaub, Deponiegase (z. B. Biogas), Sickerwasser und Brände.[77,78] Das Ausmaß der von einer Deponie ausgehenden Verschmutzung hängt vom Standort, von der Zusammensetzung und dem Alter der Abfälle sowie von den geoklimatischen Bedingungen ab.[51,79-81] Es ist jedoch möglich, dass Deponien in Zukunft ein Ort wertvoller Ressourcen für das Urban Mining sein könnten - die Senke für seltene und benötigte Metalle, die ohne eigentlichen Abbau gewonnen werden können.

**2.2.1 Mülldeponiebrände**. Deponiebrände sind eindeutig unerwünscht, kommen aber leider recht häufig vor.[82-86] Es gibt zwei Arten von Bränden, Oberflächenbrände und Brände unter der Oberfläche (Hohlraumbrände), die in den meisten Fällen auf die spontane Selbstentzündung von Methan zurückzuführen sind.[87] Oberflächenbrände breiten sich außerhalb des Deponiebereichs aus, sind aber relativ leicht zu löschen. Bei Hohlraumbränden handelt es sich um eine Form der Verbrennung (Pyrolyse), bei der die thermische Reaktion unter anoxischen Bedingungen tief unter der Deponieoberfläche stattfindet.[77,88] Diese Brände sind schwer zu erkennen und können große Hohlräume in der Deponie bilden, die zu einem Einsturz der Deponieoberfläche führen können. Eingegrabene LIBs, die möglicherweise noch geladen sind und brennbare Elektrolyte enthalten, können Deponiebrände auslösen, verstärken und verlängern.
…

Die Gefahren durch beschädigte LIBs kommen zu den herkömmlichen Deponiebränden hinzu, bei denen ein Gemisch aus toxischen Gasen und Rauch[77,93] entsteht, das aus polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK),[94-96] Dioxinen/Furanen,[97-101] flüchtigen organischen Verbindungen (VOC),[102,103] Schwermetallen[104,105] polychlorierten Biphenylen oder chlororganischen Pestiziden[104] und schließlich Feinstaub (PM) mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 2,5 µm besteht.[106,107] Unterirdische Brände begünstigen die Entstehung schädlicher Gase wie CO, $SO_2$ oder $H_2S$[77] - einige dieser Gase entstehen auch in brennenden Batterien.[7,20-24] Deponiebrände beeinträchtigen nicht nur die Luft in der Umgebung des Standorts, da der Rauch Feinstaub und Chemikalien in weitere Entfernungen tragen kann: So wurde beispielsweise nachgewiesen, dass es in Gewässern in der Nähe von Verbrennungsstätten zu einem kurzfristigen Anstieg der Konzentrationen von Schwermetallen und des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) oder von PAK[86] kommen kann. Daher muss die Vermeidung der Deponierung von Batterien oder zumindest die Neutralisierung/Immobilisierung des gefährlichen Inhalts ernsthaft in Betracht gezogen werden. Das könnte zum Beispiel sein: (i) vollständige Entladung - kein Überschuss an Energie, Immobilisierung von Kupfer auf Aluminiumfolie; (ii) Entfernung des brennbaren Elektrolyten aus der Batterie - verminderte Brandgefahr, Bildung gefährlicher Gase und Explosion der Dampfwolke; (iii) Verwendung zusätzlicher Liner (Bentonit-Ton usw.), die Schwermetalle binden können - kein Transport durch die Deponieschichten.

**2.3 Illegale Entsorgung und Verarbeitung**
Überall dort, wo es die Möglichkeit gibt, Gewinne zu erzielen, wird versucht, die offiziellen Wege der Geschäftsabwicklung zu umgehen. Da das Recycling von LIBs zumindest bis zu einem gewissen Grad profitabel sein wird, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass es zu einer illegalen

Verarbeitung kommt, wie es bei Elektronik-Altgeräten der Fall war. Solche Aktivitäten führen zu Umweltverschmutzung in der Umgebung des Verarbeitungsstandorts, zu schlechten Arbeitsbedingungen für die Arbeiter und damit zu einer Verschlechterung ihrer Gesundheit und Lebensqualität. Illegale Entsorgung findet statt, wenn das Recycling oder die offizielle Deponierung für einige "Unternehmen" zu "teuer" ist. Die Deponien werden an sehr willkürlichen Orten eingerichtet, die für den Zweck völlig ungeeignet sind, was zu starker Umweltverschmutzung, unerwarteten Bränden und enormen zusätzlichen Kosten für die Anwohner/Gemeinden - Nutzung und Sanierung des Gebiets - führen wird. Unerwartete Zwischenfälle (z. B. Brände) können sogar noch Monate nach der Entsorgung auftreten, was die Suche nach den Verantwortlichen/Schuldigen sehr schwierig macht.

…

**2.3.1 Das Problem des Elektroschrotts**. Interessanterweise ist es selbst jetzt, wo die Zahl der EoL-Elektrofahrzeuge relativ gering ist, möglich, gebrauchte LIB-Zellen und -Module auf beliebten Online-Auktionsportalen zu kaufen. Das bedeutet, dass sie außerhalb der offiziellen Sammel- und Recyclingsysteme verkauft werden, auch wenn sie ihr erstes Lebensende erreicht haben. Angesichts der wachsenden Nachfrage von Privatpersonen, z. B. für die Energiespeicherung hinter dem Zähler, werden einige der Batterien möglicherweise illegal verkauft, vor allem in Ländern mit schwachen oder gar keinen Vorschriften, und es stellt sich die offensichtliche Frage: Was geschieht mit solchen selbstgebauten Systemen, wenn sie ihr tatsächliches Endlager erreichen? Werden sie an zugelassene Recyclingzentren weitergeleitet oder entsorgt? Und welche Auswirkungen hätte die illegale Verarbeitung von LIBs auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt? Diese Fragen lassen sich anhand der derzeitigen informellen Elektro- und Elektronik-Altgeräte-Verarbeitung veranschaulichen - oft wird das Recycling ohne jeglichen Umwelt- und Gesundheitsschutz durchgeführt, was zu einer Verunreinigung von Boden, Luft und Wasser und zu schwerwiegenden Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit führt.[108,113-121] Zu den Erkenntnissen gehört die Tatsache, dass Schwermetalle (z. B. Blei oder Kadmium) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe in den Böden oder Wasserläufen in der Umgebung solcher Zentren deutlich über den nationalen Sicherheitsgrenzen liegen. Kobalt, Kupfer und Nickel sind ebenfalls Schwermetalle, die in LIBs enthalten sind und bei einer unsachgemäßen Behandlung Gefahren verursachen können. Die informelle Verarbeitung von Blei-Säure-Batterien kann potenzielle Probleme für LIBs in der Zukunft aufzeigen. So haben Schätzungen ergeben, dass es in 90 Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen zwischen 10 000 und 30 000 informelle Recycler für Blei-Säure-Batterien geben könnte, die eine große Gefahr für bis zu 16 Millionen Menschen darstellen.[122] Solche Standorte erhöhen den Bleigehalt in Böden und Pflanzen[123] und haben in Serbien,[124] Australien,[125] China[126] und Indien zu höheren Konzentrationen des Metalls im Blut von Kindern geführt.[127,128] Informelle Standorte kontrollieren ihre schädlichen Emissionen nur selten, unterliegen nur schwachen oder gar keinen Vorschriften und befinden sich häufig in Wohngebieten.[124,129,130]

**2.4 Zwischenfälle mit LIBs**

Bei Zwischenfällen mit LIBs geht es meist um Brände und die Freisetzung von giftigen Gasen. Neben dem Risiko dieser Gefahren für Ersthelfer und Zuschauer, z. B. bei einem Verkehrsunfall, gibt es auch das breitere Spektrum der Umweltauswirkungen solcher Brände. Abb. 2131.[132] zeigt typische Emissionspfade von einem brennenden LIB in die Umgebung. Neben Hitze, Feuer oder einer toxischen und potenziell explosiven Dampfwolke besteht auch die Möglichkeit des Lufttransports von Stoffen und mit der Zeit deren Ablagerung an anderen, weiter entfernten Orten. Die nähere Umgebung ist ebenfalls von den Brandrückständen, dem Transport von Schadstoffen durch Löschmittel und der Freisetzung von Restkontaminationen aus verbrannten Kadavern betroffen - je nach Art und Ort der Entsorgung.

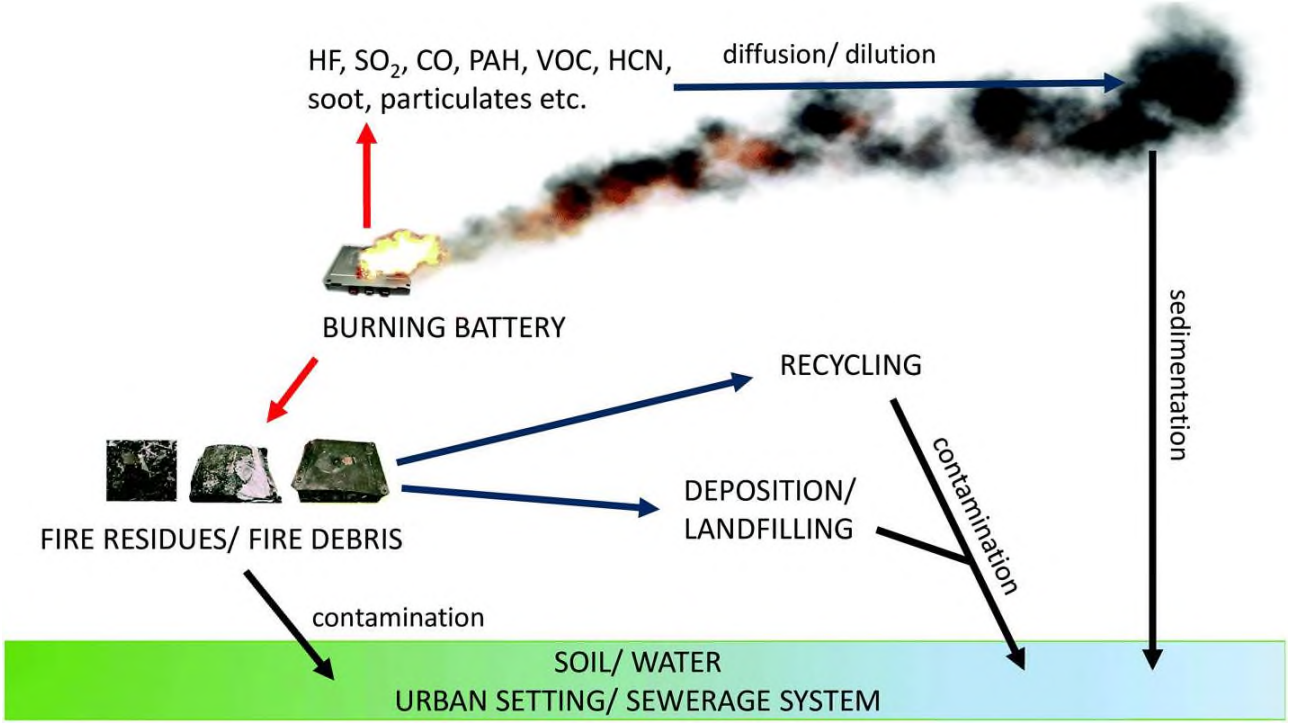


*Abb. 2 Emissionspfade bei Bränden (angepasst aus ISO, 2011; Stec et al., 2019).*

Das mitunter explosive Versagen von LIBs ist immer auf irgendeine Form von Missbrauch zurückzuführen, der durch Hitze, Eindringen, stumpfe Verletzungen oder Überladung verursacht werden kann, und in der Literatur finden sich Beispiele für die Folgen dieser Vorfälle zu Lande, zu Wasser und in der Luft.[133,134] Es wurde auch über die spontane Entzündung von LIBs berichtet, insbesondere im Zusammenhang mit Elektrofahrzeugen;[135] die Ereignisse, die dazu führen, sind im Wesentlichen unbekannt, doch wird häufig eine Verunreinigung während der Produktion oder eine schlechte Konstruktion angeführt. Ein zunehmendes und leicht besorgniserregendes Phänomen ist das Auftreten von Bränden und Explosionen in großen LIB-Energiespeichersystemen (LIBESS). Der erste Vorfall dieser Art ereignete sich 2012 in Arizona in einem neuen 1,5-MW-LIBESS, das sich im Besitz der Arizona Public Services befand.[136] Nach dem Vorfall wurden mehrere Konstruktionsmängel festgestellt, darunter das Fehlen einer angemessenen Belüftung und eine unzureichende Überwachung, die alle behoben worden sein sollten[137] , als im April 2019 ein zweiter LIBESS im Besitz von APS explodierte und vier Ersthelfer verletzte, zwei davon schwer. Es wird nun angenommen, dass es sich bei dem Vorfall um eine Dampfwolkenexplosion handelte.[138,139] Wir haben in Tabelle 2 einige weitere Beispiele für LIBESS-Vorfälle aufgeführt, um das zunehmende Problem zu veranschaulichen.

Tabelle 2 Liste einiger größerer Vorfälle mit LIBESS und auf See

….

Im Wesentlichen produzieren LIBs im thermischen Durchgehen Gase, die ein Gemisch aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, HF, kurzkettigen Alkanen und Alkenen, HCN, NOx und Tröpfchen von Lösungsmitteln darstellen,[21,23,138,140-142] wobei letztere dem Gemisch das Aussehen einer weißen Wolke verleihen.[143] Im Großen und Ganzen variiert die Zusammensetzung des weißen Dampfes nur wenig in Abhängigkeit von der Zellchemie, dem Formfaktor oder dem Hersteller.[138] Das Gasgemisch wird entweder beim Auslösen von Sicherheitsventilen/Blast Caps oder beim Bersten einer Pouch-Zelle freigesetzt: Bei hohem SOC und bei Vorhandensein von ausreichend Sauerstoff entzündet sich der weiße Dampf und erzeugt fackelartige Flammen. Bei niedrigem SOC oder bei Abwesenheit von ausreichend Luft (z. B. wenn die Luft durch den Dampf

oder durch ein Brandbekämpfungsmittel verdrängt wird) entzündet sich der weiße Dampf nicht[144], so dass in einem geschlossenen Raum die Möglichkeit einer Stichflamme, der Entwicklung von Feuerbällen oder im Extremfall sogar einer Dampfwolkenexplosion besteht.

Auch im Schiffsverkehr werden LIBs immer häufiger eingesetzt. Sie können als Antriebssystem für Fähren oder sogar U-Boote,[145] Energierückgewinnungssysteme oder Hybridsysteme eingesetzt werden. Der Vorteil ist in der Regel ein geringeres Gewicht und ein besserer Wirkungsgrad im Vergleich z.B. zu Blei-Säure-Systemen.[146] Wie bei den EVs und BESS besteht die Möglichkeit von Störungen, Zwischenfällen, Bränden und damit der Verschmutzung von Wasserökosystemen. Ein Beispiel für einen solchen Vorfall ist ein Feuer und eine anschließende Gasexplosion an Bord einer dieselelektrischen Fähre in Norwegen am 10. Oktober 2019[147] - das Feuer wurde während der Überfahrt entdeckt, aber die Fähre kehrte mit eigener Kraft in den Hafen zurück, wo alle Personen sicher evakuiert wurden. In der Nacht kam es jedoch zu einer schweren Gasexplosion im Batterieraum, die erhebliche Schäden verursachte. Es wurde berichtet, dass zwölf Feuerwehrleute ins Krankenhaus eingeliefert wurden, weil sie gefährlichen Gasen ausgesetzt waren, die von den brennenden Batterien ausgingen. Tabelle 2 zeigt auch einige andere bekannte aktuelle Vorfälle.

Feuerlöschmittel (Wasser, Schaum usw.), die zur Eindämmung von Unfällen verwendet werden, sind Träger aller von LIBs freigesetzten Schadstoffe. Dadurch kann sich der Wirkungsbereich erweitern. Beispielsweise kann HF, das bei einem Brand freigesetzt wird, mit dem Löschmittel eine Lösung bilden und so bei Konzentrationen von nur 0,01 % bereits nach 5 Minuten Exposition Verletzungen an den empfindlichsten Stellen der menschlichen Haut verursachen.[148] Wenn wir hinzufügen, dass zwischen 20 und 200 mg HF pro W h eines EV-Batteriepacks freigesetzt werden können,[22] ist eine solche Lösung oder sogar noch höhere Konzentrationen nicht verwunderlich. Diese Reaktion sollte auch bei der Entwicklung und dem Einsatz von Löschsystemen an Orten, an denen größere Mengen von LIBs gehandhabt werden, berücksichtigt werden. Die Ersthelfer müssen sich ebenfalls der zusätzlichen Gefahren bewusst sein, weshalb eine angemessene persönliche Schutzausrüstung (PSA) und entsprechende Arbeitsverfahren vorhanden sein sollten.

Wenn das Feuer gelöscht ist, bleiben die Reste der verbrannten Batterien zurück. Mit Ausnahme einiger Stahlteile (Packungsdeckel, Modulgehäuse usw.) stellen sie keinen Wert für das Recycling dar und werden daher wahrscheinlich entsorgt/auf einer Deponie gelagert. Diese Kadaver können als Brandschutt gemäß Abb. 2 behandelt werden. Derzeit gibt es keine Daten, die direkt Aufschluss darüber geben, welche Art von Schadstoffen aus solchen Abfällen freigesetzt werden können. In Anbetracht der typischen Analyse nach einem Brand[132,149] und der Zusammensetzung von LIBs können wir vermuten, dass es sich um Reste von Nanooxiden, Metallen, PAKs und VOCs handeln könnte.

## 3. Quellen und Verschmutzungspfade

Verbrauchte LIBs gelten aufgrund der potenziellen Risiken für die Umwelt und die menschliche Gesundheit, die mit Schwermetallen verbunden sind, als gefährliche Abfälle (insbesondere aus Elektrofahrzeugen).[74,150-154] Die Entsorgung und Verarbeitung von LIBs sowie ihre Eigenschaften (z. B. chemische Zusammensetzung) haben erhebliche Auswirkungen auf verschiedene Umweltbereiche (Abb. 3). LIBs enthalten eine Vielzahl von Chemikalien, darunter reaktive Salze, flüchtige organische Elektrolyte und Additive: Letztere sind häufig Geschäftsgeheimnisse, so dass ihre Toxizität und Verbrennungsprodukte weitgehend unbekannt sind.[155,156] Darüber hinaus können Batteriebrände in Kombination mit Biogas aus Deponien Giftstoffe in die Luft freisetzen oder die schädlichen Inhaltsstoffe in den Boden, das Grundwasser und Oberflächengewässer auslaugen.[118,157,158] Einmal freigesetzt, stellen sie allein oder in Kombination mit anderen Schadstoffen ein Risiko für die Umgebung dar.[159-165]

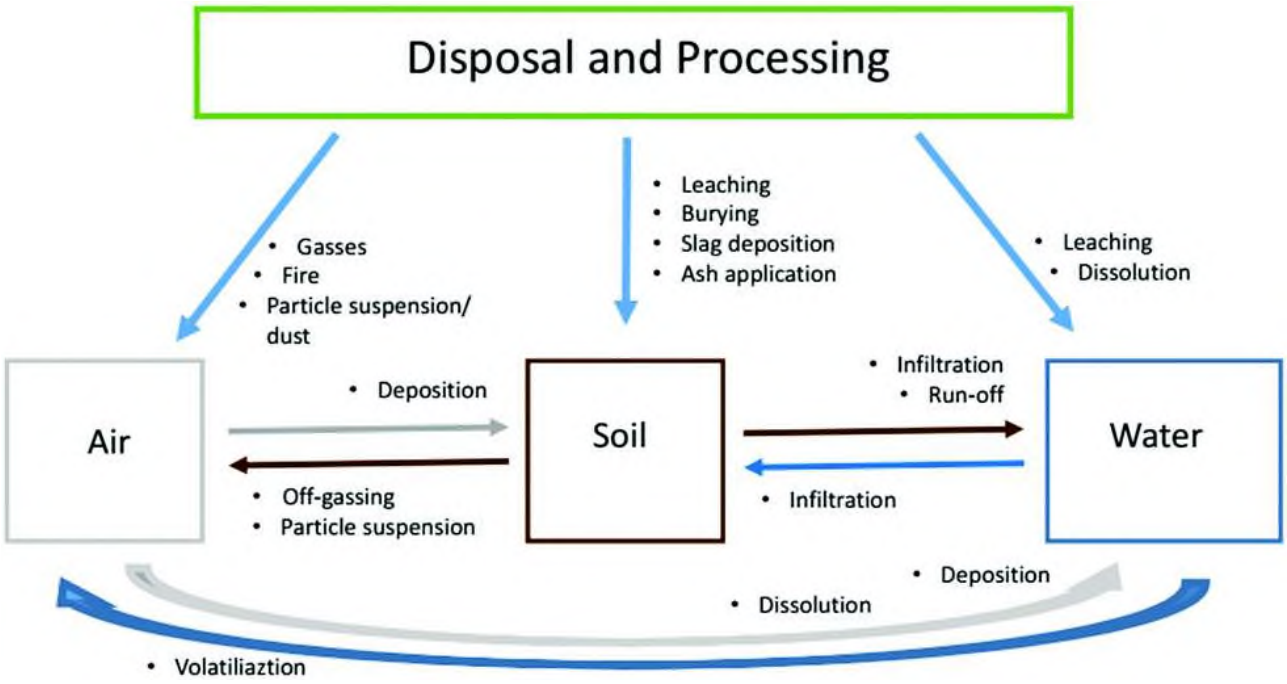


*Abb. 3 Mögliche Emissionswege von Schadstoffen aus LIBs in die Umwelt.*

Abb. 3 zeigt die wahrscheinlichen Verschmutzungswege (aus der Entsorgung/Verarbeitung von EoL-LIBs) in die Umwelt und die mögliche Kreuzkontamination innerhalb verschiedener Kompartimente. Schadstoffe, die aus LIBs freigesetzt werden, können zunächst in ein Kompartiment gelangen und später in ein anderes transportiert werden. So können beispielsweise Schwermetalle vom Sickerwasser der Deponie aufgenommen und in den Boden oder das Grundwasser außerhalb des ursprünglichen Standorts transportiert werden. Wird eine Batterie hingegen auf offenem Gelände ausgelaugt, können die Schwermetalle mit dem Regen in einen nahe gelegenen Fluss oder See abfließen. Aufgrund von Wissens- und Datenlücken konnten in dieser Arbeit jedoch nicht alle Wege vollständig untersucht werden.

### 3.1 Emissionen in die Luft

**3.1.1 Staub.** Feinstaub kann von LIBs während der Demontage und des Recyclings in die Luft freigesetzt werden; von einer Deponie oder einem Ablagerungsplatz durch Abbau oder Feuer/Explosion; und wird als Teil der gesamten Staubemissionen betrachtet.[166] Im Allgemeinen ist Staub ein Gemisch aus festen Partikeln und Flüssigkeitströpfchen mit einer großen Bandbreite an Größen (Nanometer bis wenige Mikrometer) und chemischer Zusammensetzung, die alle zusammen in der Atmosphäre schweben.[167,168] Feinstaub mit aerodynamischen Durchmessern von weniger als 10 oder 2,5 µm (PM10 und PM2,5) kann die menschliche Gesundheit gefährden, das Klima nachteilig beeinflussen und die Sicht auf lokaler und regionaler Ebene verringern.[169 -171] Partikel können stoffgebundene Metalle wie Arsen, Kadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer oder Blei enthalten, die bei der Zersetzung von wiederverwertbaren Batterien, Altmetallen und Elektronikschrott anfallen.[172-174] Staub kann in die Atemwege gelangen und gesundheitsschädliche Auswirkungen wie Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen, Karzinogenität oder Störungen des Hormonsystems verursachen.[175-187]

Bei der Demontage und Materialrückgewinnung von LIBs ist das Schreddern die wichtigste mechanische Verarbeitungsoption[25] , bei der Staubemissionen entstehen könnten. Diese Emissionen könnten eine Gefahr für die Atemwege der Arbeiter in den Recyclingzentren sowie für die in der Nähe lebenden oder arbeitenden Menschen darstellen. Darüber hinaus können sich Partikel und

Chemikalien (z. B. PAK), die aus Batterien freigesetzt werden, in der Atmosphäre zusammenballen, über größere Entfernungen transportiert werden und sich absetzen und so beispielsweise den Boden verschmutzen. Da die Partikel von LIBs aus verschiedenen Materialien und in unterschiedlichen Größen bestehen können, ist es zwingend erforderlich, ihre mögliche Toxizität und Atemwegsgefährdung zu bewerten und zu untersuchen.

Die potenziellen negativen Auswirkungen von drei Batteriematerialien - Lithiumeisenphosphat (LFP), Lithiumtitanoxid (LTO) und Lithiumkobaltoxid (LCO) - wurden anhand von Mäuse-Bioassays untersucht.[188] Die in den Kathoden von LIBs vorhandenen gemischten Metalloxide könnten Partikel freisetzen, die klein genug sind, um in die Lunge einzudringen und Entzündungen hervorzurufen. Das Ausmaß der Auswirkungen hängt von der Chemie des LIB ab. Von den von Sironval et al. (2018) getesteten Materialien war LTO am wenigsten schädlich, während LCO die stärkste Entzündung auslöste. Infolgedessen wurden die fibrotischen Reaktionen in Zellen mit höheren Entzündungsraten beobachtet.[188]

Eine weitere Quelle von Staub und Partikeln sind Explosionen und Brände. Während des thermischen Durchgehens werden die Partikel zunächst zusammen mit anderen Gasen aus der Sicherheitsentlüftung ausgestoßen, was zu starkem Rauch mit schwarzer Farbe führt.[189,190] Nach dem Abkühlen setzen sie sich als Oberflächenstaub ab. Die Zusammensetzung dieser Pulver aus Lithium-Nickel-Kobalt-Mangan (NMC)-Zellen bestand hauptsächlich aus C, O, Al, Mn und F. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass vor allem die negativen Kohlenstoffpartikel der Batterie sowie die oxidierten positiven Substanzen der Elektrode bei der Gasentweichung ausgestoßen werden.[190] In einer anderen Studie[191] wurde festgestellt, dass thermisch missbrauchte prismatische NMC-Zellen für Kraftfahrzeuge PM freisetzen, die Schwermetalle enthalten. Die Autoren stellten fest, dass Nickel und Kupfer in allen gesammelten Fraktionen (1,45 bis 500 µm) nachgewiesen wurden, während sich Zink und Chrom in größeren Fraktionen (50 bis 500 µm) absetzten. Ni hatte den größten Massenanteil, gefolgt von Cu, Zn und Cr. Bezogen auf die gesamte emittierte Menge machten die PM 1,7 % der Zellmasse aus. Sobald sich diese Partikel abgesetzt haben, können sie mit den umliegenden Gewässern und Böden interagieren und letztendlich eine Gefahr für die Pflanzen darstellen.

**3.1.2 Fluorwasserstoffsäure.** Von den verschiedenen gefährlichen Gasen, die aus LIBs in die Luft freigesetzt werden, ist HF am bedenklichsten und muss mit größter Vorsicht behandelt werden. Sie kann über die Haut oder die Atemwege in den menschlichen Körper eindringen und schwere ätzende Wirkungen und systemische Toxizität verursachen.[192] Das Einatmen von nur wenigen ppm HF kann zu schweren toxischen Wirkungen führen. HF durchdringt leicht die Haut und dringt schnell in die tieferen Gewebeschichten ein, wo es das frei dissoziierbare Fluoridion freisetzt. Dieses Ion ist aufgrund seiner starken Reaktivität äußerst giftig.[193] Darüber hinaus ist HF-Gas hygroskopisch und leicht wasserlöslich.[158,194,195] Konzentrierte HF-Lösungen wirken stark ätzend auf die Haut und das darunter liegende Gewebe, und es wurde berichtet, dass eine versehentliche Exposition der Haut beim Menschen zum Tod führte.[148,196]

HF entsteht in LIBs während der ersten Ladung und durch anschließende Zyklen, ein Phänomen, das als Begasung bekannt ist.[197-200] Die Säure kann auch durch versehentliches Verschütten und somit durch die Exposition des LiPF6 im Elektrolyten gegenüber feuchter Luft entstehen[158] gemäß:

$$LiPF_6 + H_2O \rightarrow LiF + 2HF + POF_3 \qquad (1)$$

obwohl dies umstritten ist.[201]

Neben der direkten Reaktion von $LiPF_6$ mit Wasser steht $LiPF_6$ bei Raumtemperatur in den verwendeten organischen Karbonatlösungsmitteln mit seinen Zersetzungsprodukten im Gleichgewicht gemäß:

$$LiPF_6 \leftrightarrow LiF + PF_5 \qquad (2)$$

$PF_5$ neigt dazu, sich bei Kontakt mit Spuren von Wasser, Feuchtigkeit oder Alkoholen[202] zu HF zu zersetzen, das ebenfalls sehr giftig ist:[158]

$$PF_5 + H_2O \leftrightarrow POF_3 + 2HF \qquad (3)$$

Um die Auswirkungen der Reaktion (3) abzuschwächen, enthalten handelsübliche LIB-Elektrolyte häufig Zusätze von bis zu 5 Massen- oder Volumenprozent, von denen einige die $PF_5$-Bildung unterdrücken. Andere werden hinzugefügt, um vor Überladung zu schützen, einen Feuerschutz zu bieten oder die Bildung oder Qualität der Festelektrolyt-Zwischenphase (SEI) zu verbessern.[203] Es ist nicht klar, wie sich diese auf Reaktion (2) oder andere Zersetzungsreaktionen auswirken, wie giftig sie sind oder welche Produkte bei ihrer Verbrennung entstehen.

Die zweite wahrscheinliche Quelle für HF aus LIBs ist ein thermisches Durchgehen und ein Brand. Die bei einem Zwischenfall entstehende HF-Menge hängt von der Größe der Zelle und ihrer Chemie ab[21,23,142,204-206] und kann die endotherme Zersetzung des Binders - Polyvinylidenfluorid (PVDF) - einschließen.[159]

Sturk et al. (2015) wiesen bei brennenden Pouch-Zellen des Typs NMC und LFP erhebliche Mengen an HF nach.[141] Überraschenderweise erzeugten LFP-Zellen die höchsten Mengen an Flusssäuredämpfen. Bislang galt dieser Chemietyp als einer der sichersten, da er die höchste Zersetzungstemperatur der Kathode aufweist;[135] die in der LIBESS, die im März 2020 an der Griffiths University explodierte, verwendeten Zellen waren jedoch LFP-Zellen.[207]

Larsson et al. (2017) haben geschätzt, dass zwischen 20 und 200 mg HF pro W h eines EV-Batteriepakets freigesetzt werden könnten.[22] Damit könnte die HF-Menge mehr als das 80-800-fache des US National Institute for Occupational Safety and Health Immediate Danger to Life or Health (IDLH)-Werts betragen.[208]

**3.1.3 Dämpfe und Gase**. Es ist inzwischen klar, dass beim Entlüften der Zellen ein weißer Dampf entsteht, der im Wesentlichen unabhängig von der Chemie, dem Formfaktor und dem Hersteller ist.[139] Dieser weiße Dampf enthält $H_2$, $SO_2$, $NO_2$, HF, HCl, CO, $CO_2$, Tröpfchen organischer Lösungsmittel (die für die weiße Farbe verantwortlich sind) und ein breites Spektrum an kleinkettigen Alkanen und Alkenen.[7,20-24] Die genaue Zusammensetzung des weißen Dampfes scheint vom Ladezustand (State of Charge, SoC) und der Batteriechemie abzuhängen.[20,142,209,210] Der weiße Dampf entsteht bei der Entlüftung der Zelle als Ergebnis verschiedener chemischer Prozesse, die bei sukzessive höheren Temperaturen ausgelöst werden.[135] Wenn die Kathodenstruktur zusammenbricht, wird nicht genügend Sauerstoff produziert, um ein Feuer aufrechtzuerhalten, aber wenn der weiße Dampf aus den Zellen entweicht, kann er sich entzünden oder auch nicht: bei SoC > 50 % und wenn genügend Sauerstoff vorhanden ist, kann sich der Dampf entzünden und strahlenförmige Flammen erzeugen.[144] Wenn jedoch nicht genügend Sauerstoff vorhanden ist, z. B. im Inneren eines LIBESS, in dem die Luft durch den Dampf und/oder ein Unterdrückungsmittel verdrängt wird,[138] stellt der Dampf eine völlig neue Gefahr für LIBs dar; wenn der weiße Dampf mit einer Zündquelle in Berührung kommt, besteht die Möglichkeit eines Stichflammenfeuers, der Entwicklung von Feuerbällen oder in Extremfällen sogar einer Dampfwolkenexplosion.[211]

### 3.2 Emissionen in Boden und Wasser

Nach der physischen Entsorgung laugen LIBs ihren Inhalt in die umliegenden Böden ein, infiltrieren in tiefere Schichten, verschmutzen das Grundwasser und können in Oberflächengewässer abfließen. Da Wasser sehr häufig ein Träger von Schadstoffen im Boden ist, ist es schwierig, die Auswirkungen von LIBs auf diese beiden Bereiche einzeln zu bestimmen, weshalb wir die Auswirkungen auf beide Bereiche gemeinsam diskutieren.

**3.2.1 Deponie-/Deponiesickerwasser**. Eine der wichtigsten Gefahren im Zusammenhang mit der Deponierung und illegalen Verarbeitung ist die Entstehung von Sickerwasser: Es entsteht durch verschiedene biologische und chemische Abbauprozesse und durch Regen, der durch den Abfall versickert. Sickerwasser ist ein komplexes Gemisch aus erheblichen Mengen an gelösten organischen Stoffen, anorganischen Salzen, Ammoniak, Schwermetallen und xenobiotischen organischen Verbindungen, die Reste von Körperpflegeprodukten, Arzneimitteln, Industrie- und Haushaltschemikalien sowie deren Umwandlungs- und Abbauprodukten sind, vor allem aus Deponien.[212-214] Sickerwasser kann die Umwelt ernsthaft belasten, da es als Transportmedium für gefährliche Arten dienen kann. Es kann Böden oder Grundwasser verunreinigen und Schadstoffe über beträchtliche Entfernungen, oft viele Kilometer vom Standort entfernt, transportieren[215-219] und möglicherweise das Grundwasser kontaminieren.[212]

LIB-Sickerwässer können verschiedene Schadstoffe wie Schwermetalle, Zusatzstoffe, Abbauprodukte von Elektrolyten, aber auch gelöste Gase enthalten. Letztere, wie HF, HCl oder $SO_2$ (in Form von Schwefelsäure), haben nicht nur eine direkte toxische Wirkung, sondern verändern auch die Eigenschaften des aufnehmenden Wassers und der Lösungen im Boden. Die durch diese ätzenden Stoffe verursachte Versauerung kann die gleiche Wirkung haben wie "saurer Regen", indem sie den pH-Wert absenkt und damit Pflanzen und Tiere stark beeinträchtigt.[220] Sie würden auch die Freisetzung von bodengebundenen Schwermetallen fördern. Unter saureren Bedingungen ist die tatsächliche Toxizität von Schwermetallen höher, als es die Metallkonzentration allein vermuten ließe.[221]

**3.2.2 Schwermetalle**. Der Gehalt an Metallen in Batterien hängt von ihrer Bauart und Größe (d.h. zylindrische, prismatische oder Beutelzellen) sowie von ihrer Chemie (d.h. NMC, LCO usw.) ab. Typischerweise liegen sie im Bereich von 0,05-0,37 kg Co pro kW h, 0,25-0,86 kg Ni pro kW h und 0,46-0,9 kg Li pro kW h.[222-225] Diese Zahlen bedeuten, dass mehrere Dutzend Kilogramm solcher Materialien in EV-Packs enthalten sind, die bei unsachgemäßer Entsorgung in die Umwelt gelangen können, was eine Reihe von Gefahren für die menschliche Gesundheit und die Umwelt darstellt.

Die Toxizität von Schwermetallen aus LIBs umfasst die Bindung, Blockierung und Störung der Konformationsstruktur von Kohlenhydraten, Lipiden, Proteinen oder Enzymen.[226-228] Es ist bekannt, dass Schwermetalle, die Pflanzen, Früchte oder Staub verunreinigen, genetische Schäden bei Kindern hervorrufen[229,230] und zu schlechteren schulischen Leistungen führen.[231]

In die Umwelt freigesetztes Nickel bindet sich stark an kleine feste Partikel, insbesondere an solche, die Eisen oder Mangan enthalten. Nickel hat eine geringe Tendenz, sich in Fischen und Kleintieren anzureichern. Was die menschliche Gesundheit betrifft, so ist Nickel das häufigste allergische Metall. Es kann auch Atemwegserkrankungen und in höheren Konzentrationen sogar Krebs verursachen.[232] Lithium hat eine relativ geringe Toxizität, und kleine Dosen sind für verschiedene trophische Ebenen von Organismen von Vorteil.[233] Dennoch ist es ein recht aktives Element und kann in höheren Konzentrationen Störungen des Verdauungssystems und des Nervensystems verursachen.[234,235] Kleine Dosen von Kobalt sind für den Menschen von Vorteil (Synthese von Vitamin B12), aber größere Dosen verursachen Atemwegsprobleme und Hautausschläge.[236] Im Allgemeinen hängen die negativen Reaktionen auf die Kobalt-Exposition in erster Linie von seiner chemischen Form ab.[237]

Das Sickerwasser von LIBs, das in Mülldeponien oder illegale Deponien eindringt, sammelt und transportiert verschiedene Metalle, darunter Lithium, Kobalt, Nickel, Mangan, Eisen, Chrom und Kupfer.[155] In einigen wenigen Studien wurden verschiedene Auslaugungsszenarien untersucht, um die Korrelation zwischen der typischen Massenzusammensetzung in verschiedenen Arten von LIBs und ihrem Kontaminationspotenzial zu bewerten.[238-241] Die in (echten und künstlichen) Sickerwässern gefundenen Metalle, die die Toxizitätsgrenzwerte überschritten, waren Blei, Quecksilber, Kobalt, Kupfer, Nickel, Chrom und Thallium - je nach Art des verwendeten Tests. In einer der Studien[242] wurde das Sickerwasser einer Deponie analysiert, die NMC-Batterien enthielt: Die Autoren stellten fest, dass weniger als 4 % des gesamten Kobalts, Nickels, Aluminiums, Kupfers und Eisens der Batterie in Lösung waren, während 11,45 % des Mangans und 42,50 % des Lithiums vorhanden waren.

Es ist unwahrscheinlich, dass Metalle nur in metallischer oder ionischer Form aus vergrabenen LIBs freigesetzt werden: Sie werden wahrscheinlich auch in Form von Nanopartikeln (NPs) mobilisiert werden. Solche Nanomaterialien (meist kathodischen Ursprungs) und ihr ökotoxikologisches Potenzial gegenüber verschiedenen Organismen wurden in mehreren Studien bewertet. So untersuchten Hang et al. (2017) die Auswirkungen von NMC auf das Bodenbakterium Shewanella oneidensis MR-1 und stellten fest, dass die Exposition gegenüber 5 mg L-1 NMC das Wachstum und die Atmung der Bakterienpopulation signifikant beeinträchtigte.[243] Die Autoren zeigten, dass diese Auswirkungen auf die Freisetzung von Metallionen aus den NMC zurückzuführen waren, wobei die größten Auswirkungen von $Ni^{2+}$- und $Co^{2+}$-Spezies ausgingen. Gunsolus et al. (2017) untersuchten auch die Toxizität von NMC gegenüber denselben Bakterien und variierten dabei die relative Zusammensetzung der Metalle in dem gemischten Metalloxid.[244] Die Autoren fanden heraus, dass eine Verringerung des Ni- und Co-Gehalts und eine Erhöhung des Mn-Gehalts die biologischen Auswirkungen deutlich verringerten. Tatsächlich war die Verringerung des Kobaltgehalts und die Erhöhung des Ni-Gehalts in den letzten Jahren ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung von NMC-Batterien, was auf Sicherheitsüberlegungen[245,246] und Fragen der globalen Lieferkette zurückzuführen ist.[247,248] In einer anderen Studie wurden die biologischen Auswirkungen von NMC auf ein Gram-positives Modellbakterium, Bacillus subtilis, untersucht.[249] Wachstum und Zellatmung der Bakterien wurden durch freie $Ni^{2+}$- und $Co^{2+}$-Ionen, die bei der inkongruenten Auflösung des NMC freigesetzt wurden, erheblich gehemmt. DNA-Schädigungstests auf Einzelzellebene bestätigten, dass die Toxizität des umgestalteten (mit Mn angereicherten) NMC im Vergleich zu Lösungen, die entweder freies Ni und Co oder das ursprüngliche NMC-Material enthielten, geringer war. In einem kürzlich erschienenen Artikel[250] wurde eine Studie über den Einfluss von mehrphasigem lithiiertem Kobaltphosphat (mLCP) auf Shewanella oneidensis MR-1 und Bacillus subtilis veröffentlicht. Die Autoren stellten fest, dass mLCP aufgrund der Freisetzung von Kobaltionen für beide Arten toxisch war.

Die Toxizität von NMC- und LCO-Materialien gegenüber eukaryontischen Organismen wurde anhand von Daphnia magna untersucht.[251] Die Arbeit zeigte, dass die akute Toxizität für Daphnien bei den höchsten Konzentrationen von 25 mg L-1 vernachlässigbar ist, während bei chronischer Exposition (21 Tage) bei Konzentrationen von 0,25 mg L-1 für LCO und 1,0 mg L-1 für NMC erhebliche Auswirkungen auf die Fortpflanzung und das Überleben von Daphnien zu verzeichnen sind. Sie bestätigten, dass die Toxizität von der chemischen Zusammensetzung abhängt - der Ersatz von Co durch Ni und Mn führte zu einer besseren Überlebensrate, Reproduktion und Körpergröße der Daphniden. Schließlich betonten die Autoren, dass es eine starke nanomaterialspezifische Auswirkung gab - wahrscheinlich aufgrund von Adhäsion.[252] Allerdings konnte der Effekt nicht vollständig durch Experimente bestätigt werden, bei denen nur freie Li-, Ni-, Mn- und Co-Ionen in einer Metallsuspension gelöst wurden.

LCO und NMC haben nachweislich schädliche Auswirkungen auf das benthische Wirbellose Chironomus riparius253 , indem sie Wachstum und Entwicklung hemmen. Die erhöhte Toxizität dieser Materialien wurde mit der schnellen Sedimentation von Nanopartikeln und damit einer schnelleren Interaktion mit benthischen Organismen in Verbindung gebracht. Wie in früheren Studien wurde eine Verringerung der biologischen Auswirkungen von NMC im Vergleich zu LCO beobachtet.

Auf der höheren trophischen Ebene, der Fischklasse, ist eine deutliche Auswirkung von LCO auf Kiemenepithelzellen der Regenbogenforelle festzustellen.[254] Es wurde festgestellt, dass die Exposition gegenüber $Li^{+}$ und $Co^{2+}$ allein die Lebensfähigkeit der Zellen nicht beeinträchtigt, jedoch wurden starke toxische Wirkungen bei LCO-Nanopartikeln beobachtet, die die Konzentration reaktiver Sauerstoffspezies (ROS) erhöhen. Eine Überproduktion von ROS kann zu biochemischen Schäden, einer Überbeanspruchung der Zellen und letztlich zu deren Schädigung führen.[255] Diese negativen Auswirkungen wurden bei subtoxischen LCO-Konzentrationen gemessen, die nahe an den vorhergesagten Umweltkonzentrationen liegen. Schließlich wurde festgestellt, dass die Nanomaterialien in zellulären Organellen internalisiert wurden, was bei Bakterien nicht der Fall war.[243] In einer späteren Arbeit[256] wurden Studien über die Reaktion derselben Art von Zellen auf LCO-induzierten oxidativen Stress berichtet. Die Autoren postulierten ein "Two-Hit"-Modell für die LCO-Toxizität. Zunächst induziert das intakte LCO-Material hohe Mengen an ROS, die zu einer allmählichen Aktivierung von Stressreaktionsgenen führen ("first hit"). Im nächsten Schritt beginnt die allmähliche Freisetzung von Metallionen aus den NPs, die Expression dieser Gene zu unterdrücken, wodurch die Zellreaktion auf erhöhte ROS-Werte gestört wird ("zweiter Treffer"). Diese Wirkungsweise verwirrt letztlich die Reaktion der Zellen auf Stress und kann zu schweren Schäden führen.

Die Kernaussage aller Ökotoxizitätsstudien ist, dass der Ersatz von toxischen Metallen (Co und Ni) durch weniger toxische (Mn) die Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit der nächsten Generation von LIB-Materialien erhöhen kann.

Schwermetalle aus LIBs können auch durch Materialrückgewinnungsprozesse sowie durch legale und illegale Entsorgungswege in die natürliche Umwelt gelangen. Da es an validen Daten zum Recycling von LIBs mangelt, können wir für Analysezwecke andere, gut etablierte Verarbeitungsverfahren für Autobatterien heranziehen. Eine kritische Analyse der Verwertung von Blei-Säure-Batterien zeigt, dass große Mengen potenziell toxischer Schlacke zu entsorgen sind. In den meisten Ländern werden solche Abfälle häufig auf Mülldeponien entsorgt, für die es, insbesondere in den Schwellenländern, keine angemessenen technischen Deponien gibt. Die Analyse der Schlacke ergab, dass sie neben einem hohen pH-Wert (12,22) auch hohe Konzentrationen (g/kg) von Pb (>101), Cu (>2,5), Cr (>1,2), Zn (0,5), Cd (>0,5) und Ni (0,1) enthielt, was auf eine unzureichende Rückgewinnung der Metalle in den Recyclingprozessen hindeutet.[257] Die Autoren schlugen vor, dass langfristig ein größeres Risiko der Freisetzung dieser Schwermetalle nach der Entsorgung in die Umwelt besteht. Fujimori et al. (2016) fanden erhöhte Pb-Werte in einigen chinesischen Böden in der Nähe von Recyclinganlagen.[258] Beim LIB-Recycling müssen wir uns auch mit der Schlacke aus der Pyrometallurgie befassen, die hauptsächlich Mn, Li und Al enthält.[259]

**3.2.3 Abbauprodukte von Batterien**. Die Studie von Grützke et al. (2015) kann Hinweise auf den Verbleib von aufbereitetem Batteriematerial geben, wenn es gelagert (d. h. vor dem Recycling) oder deponiert wird.[59] Die Autoren schredderten NMC-LIBs aus Elektrofahrzeugen und schlossen sie in versiegelte Weißblech- und Kunststoffdosen ein. Ihr Hauptziel war es, zu beurteilen, welche

Verbindungen aus dem verbrauchten, verarbeiteten Material freigesetzt werden und ob es zu einem weiteren Abbau der ursprünglichen Verbindungen und der möglichen Entstehung gefährlicher Umwandlungsprodukte kommt. Die so genannte "schwarze Masse" wurde über 20 Monate lang durch regelmäßige Analysen von Gasen, Flüssigkeiten und Restsalzen überwacht. Die Ergebnisse zeigten, dass die Weißblechdosen einer schnellen Korrosion unterlagen - erste Flecken waren bereits nach wenigen Tagen sichtbar, und nach fünf Monaten waren einige der Dosen bereits von Rost durchlöchert. Kunststoffdosen zeigten keine sichtbaren Anzeichen von Zersetzung. Neben HF fanden die Autoren auch Spuren von Phosphorsäuren, LiPF6, anderen Additiven (z. B. Cyclohexylbenzol) und Lösungsmitteln - DMC, EC, EMC und deren Abbauprodukte. Noch wichtiger ist, dass sie mehrere Alkylfluorophosphate identifiziert haben, darunter Dimethylfluorophosphat (DMFP) und Diethylfluorophosphat (DEFP). Alkylfluorophosphate sind besorgniserregend, da sie ähnliche Strukturen wie chemische Kampfstoffe wie Sarin aufweisen.[260] DMFP und DEFP wurden auch von Kraft et al. (2015 und 2016) nachgewiesen, die den thermischen Abbau von LIB-Elektrolyten untersuchten.[160,261] Obwohl sie in überschaubar niedrigen Konzentrationen vorhanden sind, können sie dennoch ein toxisches Potenzial für Mensch und Umwelt haben.

Diese Studien verdeutlichen das wichtige Thema der Lagerung von verbrauchten und verarbeiteten Batteriematerialien. Wenn man reale Szenarien in Betracht zieht, wie z. B. die vorübergehende Lagerung im Kanister oder die Deponierung, wird die Korrosion von Behältern oder Metallgehäusen von Batterien (Modulen oder Paketen) durch äußere Umweltfaktoren wie Sickerwasser oder feuchte Luft beschleunigt. Dies deutet auch darauf hin, dass verbrauchte degradierte Batterien bereits schädliche Inhalte enthalten - diese Produkte können in die Luft gelangen oder mit der Lösung in andere Fächer transportiert werden.

**3.2.4 Zusatzstoffe**. Schließlich können LIBs auch die Reste des Elektrolyten und seiner Zusätze auslaugen.[262,263] Die häufigsten Zusätze sind Polymere, Lewis-Säuren, schwefel- und phosphorhaltige Zusätze, polyfluoralkylsubstituierte Ethylencarbonate oder ionische Flüssigkeiten (ILs). Letztere, die ILs, sind besonders interessant, da sie im Batteriesystem viele Rollen spielen können: als reiner Elektrolyt, in Mischung mit herkömmlichen Lösungsmitteln, als Gel-Polymer-Elektrolyt oder als Bindemittel.[264,265] ILs sind nicht flüchtige und nicht entflammbare organische Salze, die aus einem organischen Kation und einem organischen oder anorganischen Anion bestehen, und es gibt ein breites Spektrum an Kationen (z. B. Imidazolium, Pyridinium, Cholin usw.) und Anionen (organisch und anorganisch).[266] Daher gibt es ein sehr breites Spektrum an Umweltauswirkungen dieser Verbindungen je nach ihrer Struktur. Aufgrund ihrer Eigenschaften sind die Expositionswege und potenziellen Gefahren jedoch auf Wechselwirkungen mit Lösungen beschränkt. Die Verteilung ionischer Flüssigkeiten in der Umwelt wird durch ihre Struktur bestimmt, z. B. absorbieren sich IL mit längeren Alkylketten leichter an der Bodenoberfläche. Daher können einige ionische Flüssigkeiten in Wasser- oder Bodensäulen recht mobil sein, während sich andere stark an verschiedene Umweltkompartimente binden und zu persistenten Schadstoffen werden können. Darüber hinaus erhöhen die Eigenschaften des Bodens, wie z. B. eine hohe Kationenaustauschkapazität und/oder ein hoher Anteil an organischen Stoffen, die Aufnahme von ionischen Flüssigkeiten erheblich.[267-275] Obwohl ihre Verwendung in der Regel auf kleine Mengen beschränkt ist, können ionische Flüssigkeiten dennoch erhebliche negative Auswirkungen auf die Tierwelt und die menschliche Gesundheit haben. So gelten die meisten ionischen Flüssigkeiten in Batteriesystemen als toxische und biologisch schwer abbaubare Verbindungen.[276,277] Wie bei der Mobilität und dem Transport in Umweltmedien hängt die Toxizität von ILs von der Lipophilie und der Alkylkettenlänge, der direkten Interaktion mit dem biologischen System (Membran, Zelle oder Organismus) und den trophischen Ebenen (Bakterien, Pflanzen, Wirbellose oder menschliche

Zellen) ab. Je länger das Derivat ist, desto toxischer ist es in der Regel, aber auch das Gegenion, insbesondere fluorierte, hat einen starken Einfluss.[278-287]

## 4. Empfehlungen für künftige Studien

Tabelle 3 veranschaulicht die möglichen Emissionswege und Schadstoffe, die von LIBs freigesetzt werden. Obwohl sie teilweise durch die vorhandene Literatur gestützt wird (siehe Abschnitte 2 und 3), handelt es sich eher um eine indikative Liste. Es gibt viele Unbekannte, unvollständige Daten, noch nicht erforschte spezifische Themen oder sogar widersprüchliche Ergebnisse, die geklärt werden müssen, um etwaige negative Auswirkungen von Altbatterien zu mindern.

*Tabelle 3 Mögliche Schadstoffe und ihre Emissionswege, die von LiBs freigesetzt werden*

| Battery component | Source of pollutant | Specific pollutant | Route | Affected environment | Hazard |
|---|---|---|---|---|---|
| Pack casing | – Steel | *i.e.* Fe, Al, Ni, Cr other | Leaching | Land | – In excess toxic to wildlife |
| | | | | Natural waters | – Accumulation in plants and crops |
| Module casing | – Steel | – Fe, Ni, Cr other | Leaching | Land | – In excess toxic to wildlife |
| | – Aluminium | – Al | | Natural waters | – Accumulation in plants and crops |
| Cell packing | – Aluminium foil | – Al, Ni | Leaching | Natural waters | – In excess toxic to wildlife |
| | – Polymers | – PET, PP | Fire | Land | – Accumulation in plants and crops |
| | – Ni-Coated steel | | | Air | |
| Cathode | – Metal | – Al | Leaching | Land | – Toxic to the various organism |
| | – Metal oxides | – LMO – Li/Mn/O | Dust | Natural waters | – Toxic to humans if breathed |
| | | – LFP – Li/Fe/P/O | | Air | – In excess toxic to wildlife |
| | | – NMC – Li/Ni/Mn/Co/O | | | – Accumulation in plants and crops |
| | | – LCO – Li/Co/O | | | |
| | | – NCA – Li/Ni/Co/Al/O | | | |
| Anode | – Copper | – Cu | Leaching | Land | – In excess toxic to wildlife |
| | – Graphite | – C (nanomaterial) | | Natural waters | – Accumulation in plants and crops |
| | | – LTO – Li/Ti/O | | | – Toxic to humans if breathed |
| Separator | – Polymers | – Polyethylene (PE) | Leaching | Land | – Microplastics accumulation |
| | | – Polypropylene (PP) | Fire | Natural waters | |
| | | | Dust | Air | |
| Binder | – PDVF | – HF | Fire | Air | – Toxic to humans if breathed |
| | | | | | – Toxic to humans if in contact |
| Electrolyte | – Ethylene carbonate | – HF | Fire | Air | – Toxic to humans if breathed |
| | – Propylene carbonate | – $SO_x$ | Vapours/gases | Land | – Toxic to humans if in contact |
| | – Dimethyl carbonate | – HCN | Leaching | Natural waters | – Toxic to wildlife |
| | – Diethyl carbonate | – $H_2$ | | | – Accumulation in soils |
| | – Salts: $LiPF_6$ | – CO | | | |
| | – Additives | – $CO_2$ | | | |
| | | – $NO_x$ | | | |
| | | – COS | | | |
| | | – HCl | | | |
| | | – Degradation products of electrolyte (*i.e.* $C_2H_4$; $CH_3COCHO$ *etc.*) | | | |
| | | – Ionic liquids | | | |
| | | – Unknown additives/degradation products | | | |

Daher haben wir einige der wichtigsten Wissenslücken identifiziert und die folgenden Fragen zu den Umweltauswirkungen von abgebrannten LIBs untersucht, die dazu beitragen könnten, diese in Zukunft besser zu bewältigen:

(1) Wie groß sind die derzeitigen und künftigen Mengen an verbrauchten LIBs?
(2) Wie viele Altbatterien gelangen in den jeweiligen Entsorgungsstrom?
(3) Wo werden die Altbatterien verarbeitet/entsorgt/zurückgelassen?
(4) In welcher Form: als Ganzes, zerlegt, geschreddert usw. werden die LIBs verarbeitet/beseitigt/zurückgelassen?

(5) Wie wirkt sich die Änderung der chemischen Zusammensetzung auf die Abfallströme im Hinblick auf die erforderliche Technologie, aber auch auf die Lebensdauer aus?
(6) Welche Gefahren gehen von den Altbatterien aus und wie, wo und in welchen Mengen werden sie freigesetzt?
(7) Wie ist die Verbreitung und Verteilung von Batterieschadstoffen nach ihrer Freisetzung in die natürliche Umwelt?
(8) Wie sieht der Kreislauf und die Wechselwirkung von Batterieschadstoffen zwischen den Pfaden Land-Wasser-Luft-Emissionen und dem Nexus mit der Tierwelt aus?
(9) Wie sieht es mit der (Öko-)Toxizität und (Bio-)Akkumulation von LIBs-Materialien für verschiedene Organismen und Menschen aus?
(10) Wie sollten oder könnten Umweltstudien die Gestaltung und Entsorgung von verbrauchten LIBs unterstützen?

Obwohl einige dieser Fragen bereits teilweise auf der Grundlage von Näherungswerten beantwortet werden können, d.h. die voraussichtlichen Mengen werden anhand von Verkaufszahlen geschätzt, besteht ein dringender Bedarf an zuverlässigen und überprüften Daten. Die Beschaffung zuverlässiger und genauer Daten hat schwerwiegende Auswirkungen auf die Sicherheit der Recycling- und Entsorgungsanlagen und hilft bei der Gestaltung, Umsetzung und Regulierung geeigneter Verfahren und Rechtsvorschriften. Die realen Daten sollten durch verschiedene Methoden der Lebenszyklusbewertung, Kosten-Nutzen-Studien und den Einsatz weiterer Modelle für die Vorhersage des Lebenszyklus einer bestimmten Batterie in einer bestimmten Anwendung unterstützt werden.

Da die steigende Nachfrage nach neuen LIBs zu einer erhöhten Anzahl von Altbatterien führen wird, empfehlen wir, dass diese Menge auf den verschiedenen Entsorgungswegen angemessen verwaltet und kontrolliert werden muss. Das Best-Case-Szenario geht von hohen Sammelquoten von Altbatterien mit einer fast vollständigen Rückgewinnung von Materialien aus, die wiederverwendet werden können (Förderung der Kreislaufwirtschaft). Es liegt auf der Hand, dass das häusliche, d. h. dezentrale Recycling rentabler sein wird als das zentrale Recycling, allerdings wird es einige Zeit dauern, bis die Industrie die Sammlung, die Prozesse und die Infrastrukturen ausbauen kann.[6] Es wird auch argumentiert, dass Nachzügler von der bestehenden Industrie bedroht werden, die schneller von den größeren Größenvorteilen profitieren kann. Dezentrale Systeme erfordern eine beträchtliche Menge an verbrauchten LIBs (insbesondere große EVs), um Größenvorteile zu erzielen, da die Recyclingkosten schätzungsweise sinken, wenn zwischen 1000 und 15 000 Tonnen pro Jahr in einer Anlage recycelt werden.[6] Die Sammlung von verbrauchten und "Second-Life"-Großbatterien könnte mit einem Geschäftsmodell verknüpft werden, z. B. mit dem Verkauf des Fahrzeugs, aber dem Leasing der Batterie - dann liegt die Verantwortung beim Händler/Verkäufer oder kann von den Kommunen mit z. B. einem spezialisierten Sammelzentrum geregelt werden - die Verantwortung liegt beim Nutzer. Um die Sammlung und die spätere Entscheidung über die Wiederverwendung, das Recycling oder die Deponierung zu verbessern, wäre es von großem Nutzen, die Nutzungshistorie der "ersten Lebensdauer" von EV/BESS-Batterien zu kennen - der Zustand der Batterie kann viel schneller und kostengünstiger bestimmt werden. Das wird die Rationalisierung von LIBs auf einen genauen Verarbeitungsweg beschleunigen. Wir müssen jedoch bedenken, dass die Module im Pack unterschiedlich altern können[288] - es ist also möglich, dass die Auswahl auf der Ebene der Module und nicht des Packs erfolgen wird. Nichtsdestotrotz könnte die Verbesserung der Wiederverwendung der Materialien die ökologische, wirtschaftliche und soziale Belastung der bestehenden Batterielieferkette, einschließlich der Entsorgungspraktiken, unausweichlich verringern. Allerdings müssen die Herausforderungen bei der Sammlung, der Demontage und dem Recycling von LIBs gemeistert werden. Es ist von entscheidender Bedeutung, innovative Technologien zu entwickeln, um die

Kosten der Materialrückgewinnung zu senken und die Umweltauswirkungen dieser Industrie zu reduzieren.[6]

Außerdem muss die illegale Entsorgung und informelle Verarbeitung, die zu einer erheblichen Umweltverschmutzung führt, verhindert werden. Dies könnte durch bessere Sammelsysteme, Erweiterungen und Verbesserungen der derzeitigen Recycling-Infrastruktur sowie durch rechtliche Hindernisse für den Export von gebrauchten E-Fahrzeugen oder LIBs erreicht werden. Niemand möchte, dass LIBs beispielsweise zu einer Quelle der Bodenverschmutzung durch Schwermetalle werden. Darüber hinaus sollte ständig an der Herstellung von LIBs gearbeitet werden, die weniger gefährliche und "grünere" Materialien[289] enthalten, die nicht nur die Kapazität und Effizienz der Batterie verbessern, sondern auch zerstörerisches Verhalten verhindern und bei unsachgemäßer Entsorgung nur minimale negative Auswirkungen auf die Umwelt haben.[290] Neue LIBs sollten für das Recycling konzipiert sein, d. h. die Materialien sollten leicht voneinander getrennt und in neuen Batterien wiederverwendet werden können (direktes Recycling). Dies ist mit neuen Technologien der Materialrückgewinnung verbunden, die weniger energieintensiv und billiger sind und weniger oder keine Sekundärverschmutzung verursachen.

Die Verbesserungen müssen durch geeignete Rechtsvorschriften, Regelungen und Managementstrukturen begleitet werden. Diese müssen Kunden und Hersteller zu einem ordnungsgemäßen Umgang mit Altbatterien ermutigen, die Vorteile des Recyclings hervorheben (unter Berücksichtigung der Verpflichtungen der Wirtschaftsakteure in Bezug auf die Beschaffung von Rohstoffen) und das Modell der Kreislaufwirtschaft fördern und schließlich auch eindeutig sicherstellen, wo die jeweilige Haftung liegt.[48]

Schließlich müssen wir uns mit dem Problem der Verbreitung von großen "2nd-Life"-LIBs in der Gesellschaft befassen. Vor allem in Europa herrscht die allgemeine Auffassung, dass die Wiederverwendung (Verwendung einer EV-Batterie ohne Änderung in einem EV), die Wiederaufbereitung (Verwendung einer EV-Batterie nach dem Austausch defekter Module in einem EV) und die Wiederverwendung (Verwendung von Modulen aus einem EV am Ende des Lebenszyklus zum Zusammenbau einer Batterie für einen anderen Zweck als den Antrieb, z. B. für die stationäre Speicherung) von LIBs einen positiven Beitrag zur Dekarbonisierung des Planeten leisten können.[48] Die Sicherheit neuer Zellen, Module und Batteriesätze kann mit Hilfe von "Typentests" bewertet werden, die die Grundlage aller Codes, Normen und Vorschriften bilden, die z. B. für Energiespeichersysteme für Haushalte und Industrie gelten. Bei der Typprüfung wird eine Stichprobe von Zellen aus einer Charge geprüft, in der Regel bis zur Zerstörung, und das Ergebnis wird als repräsentativ für die Charge angesehen. Die Anwendung von Typprüfungen auf neue Zellen ist aufgrund der extrem strengen Qualitätskontrolle bei ihrer Herstellung gültig, jedoch werden solche Typprüfungen mittlerweile als ungeeignet angesehen, um die Sicherheit von LIBs in der zweiten Lebensphase zu bewerten, da die SoH-Werte in einem EV-Pack während seiner Lebensdauer stark schwanken und er möglicherweise extremen Temperaturen, Überladung und/oder Ladung mit hohen Strömen ausgesetzt ist,[291-293] was alles das Potenzial für thermisches Durchgehen erhöhen kann.[294,295] In den Normentwürfen DIN IEC 63330[296] (Anforderungen an die Wiederverwendung von Sekundärbatterien) und DIN EN IEC 63338[297] (Allgemeiner Leitfaden für die Wiederverwendung von Sekundärzellen und -batterien) wird die Tatsache anerkannt, dass Typentests nicht zur Bewertung der Sicherheit von langlebigen LiBs eingesetzt werden können. Die größte Herausforderung ist die Bestimmung des SoH oder besser gesagt des Sicherheitszustands von Second-Life-LiBs.[298] Ein Teil der letzteren muss die vollständige Kenntnis der ersten Lebensdauer der LIB im Elektrofahrzeug sein, einschließlich aller Details über jeglichen Missbrauch (z. B. Überladung), maximale Lade- und Entladeströme und Betriebstemperaturen. Die Normenentwürfe IEC 63330 und IEC 63338 sollten dieses Problem lösen und damit die sichere

Anwendung von langlebigen LiBs erleichtern. Dies ist jedoch nicht gelungen, da sie keine Tests vorschreiben und sich vollständig darauf verlassen, dass die ursprünglichen Hersteller von Elektrofahrzeugen vollständige BMS-Daten (und damit potenziell wertvolles geistiges Eigentum) an Wiederaufbereiter und Wiederverwerter weitergeben, was als höchst unwahrscheinlich gilt. Der Entwurf der EU-Batterieverordnung umgeht auch das Sicherheitsproblem von Second-Life-Batterien, indem er nur vorschreibt, dass die BMS-Daten vollständig zur Verfügung gestellt werden.

Es wird allgemein anerkannt, dass die Wiederverwendung, die Wiederaufbereitung und die Wiederverwendung kompletter Akkus, bei denen der ursprüngliche Hersteller des Elektrofahrzeugs in der Lieferkette verbleibt, mit einem geringen Risiko behaftet ist.[299] Allerdings sind gebrauchte Zellen, Module und sogar komplette Akkus bei Online-Händlern frei erhältlich, so dass unerfahrene Organisationen und sogar die breite Öffentlichkeit LIBs wiederverwenden können. Ein Hauptproblem ist daher die Nutzung dieser Anbieter durch Hausbesitzer, um BESS für den Hausgebrauch zu bauen: Batteriespeichersysteme für den Hausgebrauch sind derzeit im Vereinigten Königreich im Hinblick auf die Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien völlig ungeregelt. Bedenken hinsichtlich der Gefahren, die von solchen Systemen in der häuslichen Umgebung ausgehen, wurden in anderen Ländern aufgegriffen: So lassen die US-amerikanische Norm NFPA 855300 und der Entwurf der australischen und neuseeländischen Norm DR2 AS/NZS 5139 : 2019 häusliche Lithium-Ionen-BESS innerhalb des Hauses nicht zu, und NFPA 855 erlaubt überhaupt keine selbstgebauten Lithium-Ionen-BESS.

Der Online-Handel mit 2nd-Life-LIBs ist völlig unreguliert, und die Lieferung dieser Geräte wird häufig mit Mitteln angeboten, die nach UN 38.3302 illegal sind, da sie als Gefahrgut eingestuft sind und daher gemäß den Anforderungen des europäischen Übereinkommens "Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route" (ADR) befördert werden müssen.[303]

## 5. Schlussfolgerung

Es besteht kein Zweifel, dass die dringende Notwendigkeit, den Transport zu dekarbonisieren, LIBs in den Vordergrund der Maßnahmen stellt. Der wachsende Strom verbrauchter LIBs würde jedoch eine enorme Bedrohung für die natürliche Umwelt und die menschliche Gesundheit darstellen, da die Batterien gefährliche Stoffe enthalten. In dieser Untersuchung wurden die derzeitigen, möglichen und wahrscheinlichen Abfallentsorgungspraktiken für LIBs ermittelt - von der Sammlung und Wiederverwertung bis zur Deponierung, über die EoL-Vorfälle bis hin zur illegalen Entsorgung. Derzeit ist die Deponierung die gängigste Praxis, aber der Anteil des Recyclings nimmt zu. Bei der aktuellen Überprüfung wurden auch die wahrscheinlichsten Gefahren und Zwischenfälle bei den einzelnen EoL-Verfahren bewertet. Brand- und Explosionsereignisse sind derzeit die häufigsten Ereignisse, die durch reale Vorfälle belegt sind. Auslaugung ist ein weiterer Verschmutzungspfad, der in Zukunft mit dominieren wird. Zu den identifizierten Gefahren, die von LIBs freigesetzt werden, gehören Dämpfe und Gase (z. B. HF, CO oder HCN), Metallnanoxide (z. B. LMO, NMC), Abbauprodukte des Elektrolyten (Alkylfluorophosphate) und mögliche Spuren von Zusatzstoffen. Diese Schadstoffe können in den Boden, das Wasser (Grundwasser) und die Luft freigesetzt werden, je nach Recycling, Entsorgungsmethode oder Missbrauchsfall. Freigesetzte Schadstoffe können eine ernsthafte Bedrohung für wild lebende Tiere und Menschen darstellen und haben oft unmittelbare Auswirkungen, wie z. B. im Falle eines Kontakts mit HF bei einem EV-Brand. Die Zersetzung des Batterieinhalts (insbesondere des Elektrolyts) kann in einigen Fällen zur Entstehung von Chemikalien führen, die strukturell chemischen Kampfstoffen ähneln. Die ersten Studien zur (Öko-)Toxizität der Kathoden-Nanomaterialien zeigten, dass LIBs eine Gefahr für lebende Organismen und die menschliche Gesundheit darstellen können. Der Ersatz toxischer Metalle (Co und Ni) durch weniger toxische (Mn) könnte jedoch die Umweltverträglichkeit und

Nachhaltigkeit der nächsten Generation von Lithiumbatteriematerialien verbessern. Schließlich haben wir mehrere dringende Wissenslücken identifiziert, die geschlossen werden müssen, um die negativen Auswirkungen von LIBs auf die Umwelt zu mindern, und einige Maßnahmen zur Lösung dieser Probleme empfohlen.

**Beiträge der Autoren**

Wojciech Mrozik: Schreiben - ursprünglicher Entwurf, Schreiben - Überprüfung & Bearbeitung, Konzeptualisierung, Visualisierung, Untersuchung; Methodologie; Mohammad Ali Rajaeifar: Schreiben - ursprünglicher Entwurf, Schreiben - Überprüfung & Bearbeitung; Oliver Heidrich: Schreiben - ursprünglicher Entwurf, Schreiben - Überprüfung & Bearbeitung, Konzeptualisierung, Finanzierung; Paul Christensen: Schreiben - ursprünglicher Entwurf, Schreiben - Überprüfung & Bearbeitung, Finanzierung.

**Abkürzungen**

| | |
|---|---|
| Alterung | Der Kapazitätsverlust, z. B. durch den Verlust von Lithium-Ionen oder durch Spallation der Anoden. Dies kann auf den Gebrauch (Laden und Entladen) und/oder auf einen offenen Stromkreis zurückzuführen sein (kalendarische Alterung). |
| Anode | Die negative Elektrode. Bei Lithium-Ionen-Batterien handelt es sich in der Regel um kleine Graphitpartikel. |
| Batterie (Pack) | Die komplette Energiespeichereinheit, die aus einer Reihe von Modulen besteht |
| BESS | Batterie-Energiespeichersystem |
| Kathode | Die positive Elektrode. Sie besteht in der Regel aus Lithium und Metalloxiden: z. B. Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid ($LiNi_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33}O_2$) |
| Zelle | Die kleinste Einheit einer Batterie |
| Elektrolyt | In der Elektrochemie ist dieser Begriff zweideutig, da er sich auf das anorganische Salz (z. B. $LiPF_6$) oder auf das Salz + organisches Lösungsmittel beziehen kann |
| End of Life (EoL) | Der Punkt, an dem eine Batterie für ihre aktuelle Anwendung nicht mehr geeignet ist. Bei Autobatterien liegt dieser Punkt in der Regel bei 75-80 % des Gesundheitszustands. |
| GHG | Treibhausgase, Gase, die den Treibhauseffekt verursachen, z. B. $CO_2$ und $CH_4$ |
| Deponie | Ein Ort für die Entsorgung von Abfallstoffen |
| LCO-Kathode | Lithium-Kobalt-Oxid, $LiCoO_2$ |
| LIB | Lithium-Ionen-Batterie |
| LIBESS | Lithium-Ionen-Batterie-Energiespeichersystem |
| LFP-Kathode | Lithiumeisen(eisen)phosphat, $LiFePO_4$ |
| LMO-Kathode | Lithium-Mangan-Oxid $LiMnO_2$ |
| LTO-Anode | Lithium-Titan-Oxid $Li_4Ti_5O_{12}$ |
| MRF | Materialrückgewinnungsanlagen; Entsorgungsanlagen für feste Abfälle, die wiederverwertbare Materialien verarbeiten, um sie als Rohstoffe für neue Produkte an Hersteller zu verkaufen |
| NCA-Kathode (Lithium) | Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid, z. B. $LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$ |
| NMC-Kathode (Lithium) | Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid, z. B. $LiNi_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33}O_2$ (NMC 111), $LiNi_{0.6}Mn_{0.2}Co_{0.2}O_2$ (NMC 622) |
| PAK | Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, die aus Molekülen mit verschmolzenen aromatischen Ringen bestehen |

| | |
|---|---|
| Recycling | Der Prozess der Umwandlung von Abfallstoffen in neue Materialien und Gegenstände |
| Separator | Eine für Lithium- und Hexafluorphosphat-Ionen durchlässige Kunststofffolie, die verhindert, dass sich Anode und Kathode berühren und einen Kurzschluss verursachen |
| Solid Electrolyte Interphase (SEI) | Die Schutzschicht, die sich während der ersten Ladung durch die Reduktion des LiPF6 und des Lösungsmittels auf der Anode bildet und einen weiteren, explosiven Abbau des Elektrolyten und ein thermisches Durchgehen verhindert |
| Lösungsmittel | Gemisch aus organischen Karbonaten, das Ethylencarbonat enthält, da dieses für die Bildung der SEI unerlässlich ist. Ethylencarbonat ist bei Raumtemperatur ein Feststoff, und andere Carbonate sind für die Verringerung der Viskosität unerlässlich. |
| Ladezustand (State of Charge, SoC) | Die gespeicherte Ladung im Vergleich zu derjenigen, die einer Vollladung entspricht, ausgedrückt in %. |
| State of Health (SoH) | Die aktuell gespeicherte Ladungsmenge bei voller Ladung im Vergleich zur gespeicherten Ladung (bei voller Ladung) zu Beginn der Zellen- oder Batterielebensdauer, ausgedrückt in %. |
| VOCs V | olatile organic compounds (flüchtige organische Verbindungen); Verbindungen, die einen hohen Dampfdruck und eine geringe Wasserlöslichkeit aufweisen |

**Interessenkonflikte**
Es gibt keine Interessenkonflikte zu melden.

**Danksagung**
Diese Arbeit wurde vom britischen Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) und der Faraday Institution (EP/S003053/1) im Rahmen des Projekts "Recycling of Li-Ion Batteries (ReLIB)" (FIRG005) "SafeBatt - Science of Battery Safety" (FIRG028) unterstützt. Die Geldgeber hatten keinen Einfluss auf die Konzeption, das Design, die Literatursammlung, die Analyse, die Entscheidung zur Veröffentlichung oder die Vorbereitung der Studie für dieses Manuskript und spielten keine Rolle dabei.

## Referenzen

[1] H. E. Melin, M. A. Rajaeifar, A. Y. Ku, A. Kendall, G. Harper und O. Heidrich, Science, 2021, 373, 384-387 CrossRef CAS PubMed.
[2] Europäische_Kommission, 2019, COM/2019/640 final.
[3] R. Harrabin, Ban on new petrol and diesel cars in UK from 2030 under PM's green plan, 2020, Zugriff 20.11.2020 Search PubMed.
[4] UKRI, Industrial Strategy Challenge Fund: Zukunft der Mobilität, 2020, Zugriff am 20.09.2020 Suche in PubMed.
[5] UKRI, Industrial Strategy Challenge Fund, 2020, Zugriff am 20.09.2020 Search PubMed.
[6] L. Lander, T. Cleaver, M. A. Rajaeifar, V. Nguyen-Tien, R. J. R. Elliott, O. Heidrich, E. Kendrick, J. S. Edge und G. Offer, iScience, 2021, 24, 102787 CrossRef PubMed.

Alle weiteren Literaturquellen bitte dem Originaltext entnehmen.
Quelle: https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/ee/d1ee00691f
**Umweltauswirkungen, Verschmutzungsquellen und Entsorgungswege für verbrauchte Lithium-Ionen-Batterien**
Wojciech Mrozik, *abc Mohammad Ali Rajaeifar,ab Oliver Heidrichab und
Paul Christensena

Übersetzt mit www.deepl.com

20.03.2023