

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# V4InnovatE

## Fallstudie

Batterien und Rohstoffe



Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung  
Baden-Württemberg (ZSW)  
Meitnerstraße 1, D-70563 Stuttgart

Projektleitung: Dr. Tobias Buchmann

E-Mail: [tobias.buchmann@zsw-bw.de](mailto:tobias.buchmann@zsw-bw.de)

Phone: +49-(0)711-7870-232

**Stuttgart, 2022**

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Überblick</b> .....	<b>3</b>
2.1	Technologie.....	4
2.1.1	Technologiecharakterisierung.....	4
2.1.2	Einordnung Wissensbasis und Innovationssystemkonfiguration.....	7
2.2	Politik.....	7
2.3	Diffusion (Fokus Marktbeschreibung).....	8
<b>3</b>	<b>Problemaufriss</b> .....	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Exemplarische Anwendung des V4I-Indikatoriksystems</b> .....	<b>13</b>
4.1	Beispielhafter Auszug aus der Projektplanung.....	13
4.2	Bewertung Antizipation.....	14
4.3	Bewertung Reflexion.....	15
4.4	Bewertung Inklusion.....	17
4.5	Bewertung Responsivität.....	18
4.6	Bewertung Transparenz.....	18
4.7	Ergebnisüberblick.....	21
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>23</b>

## 1 Einleitung

*“[...] case studies are vital to identify potential propositions that, using larger and more comprehensive studies, can lead to the testing of specific RRI theories.”*

Wiarda et al., 2021, p. 9

Batteriespeicher sind von zentraler Bedeutung für die Nutzung grünen Stroms, da sie sowohl in Elektrofahrzeugen als auch bei der Speicherung von Strom zum Einsatz kommen. Allerdings sind Batterien nicht frei von Bedenken. So entstehen bei ihrer Herstellung Emissionen und es werden Rohstoffe benötigt, bei deren Gewinnung lokale Ökosysteme geschädigt werden und Menschen gesundheitlich gefährdet werden. Wenn man sich vor Augen führt, welche Mengen an Batterien im Zuge des Transformationsprozesses benötigt werden, so wird deutlich, dass Umwelt- und Sozialverträglichkeit bei der Herstellung an vorderster Stelle stehen muss (Sharma and Manthiram, 2020). Dies sollte umso mehr im Auge behalten werden, als gerade bei Energiewendetechnologien der Legitimität eine Schlüsselfunktion innerhalb technologischer Innovationssysteme (TIS) zukommt, welche die Entwicklung und Verbreitung neuartiger Technologien beeinflusst.

Legitimität ist ein entscheidender Faktor für den Erfolg von Technologien in den frühen Entwicklungsphasen und für die Aufrechterhaltung der Ressourcenströme zur Technologieentwicklung sowie der öffentlichen und politischen Unterstützung während des gesamten Lebenszyklus der Technologie. Bei Nachhaltigkeitsübergängen, die sich über lange Zeiträume erstrecken, wird die Aufrechterhaltung der Legitimität von Technologien, die als entscheidend für die Nachhaltigkeit angesehen werden, zu einer zentralen Herausforderung.

In Anbetracht dieser Herausforderungen wird in dieser Fallstudie untersucht, wie Akzeptanzproblematiken im Bereich Batterien und Rohstoffe mithilfe des Konzepts der Responsible Research and Innovation (RRI) angegangen werden können. Die RRI bezieht sich auf einen Ansatz, der darauf abzielt, Forschung und Innovation so zu gestalten und zu steuern, dass sie den Bedürfnissen und Werten der Gesellschaft entsprechen und gleichzeitig die langfristige Nachhaltigkeit fördern. Durch die Integration von RRI in die Entwicklung und Implementierung von Batterietechnologien können potenzielle Risiken und ethische Bedenken adressiert und die soziale Akzeptanz gestärkt werden.

Im folgenden Verlauf dieser Fallstudie wird zunächst ein allgemeiner Überblick über die Batterietechnologie sowie die politische Landschaft, insbesondere im Hinblick auf Fördermaßnahmen und die Produktverbreitung, gegeben. Anschließend werden mittels eines Problemumrisses relevante Akzeptanzprobleme aufgezeigt, die mit der Batterieproduktion und den Rohstoffgewinnungsprozessen verbunden sind. Schließlich wird anhand eines exemplarischen Auszugs aus der Projektplanung die Anwendung eines RRI-Indikatorsystems veranschaulicht, um zu zeigen, wie RRI dazu beitragen kann, diese Problematiken abzumildern und die Entwicklung von Batterietechnologien in eine nachhaltige Richtung zu lenken.

## 2 Überblick

Batterien und insbesondere Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) werden besonders für mobile Anwendungen eingesetzt. Als prominentes Beispiel erwarten Experten, dass bis zum Jahr 2028 bis zu 200 Millionen Elektrofahrzeuge auf den Straßen unterwegs sein werden. Aber auch in stationären Anwendungen werden LIBs zunehmend benötigt, zum Beispiel um das Energiesystem zu stabilisieren. LIBs gelten derzeit als die fortschrittlichste Batterietechnologie hinsichtlich ihrer Energie- und Leistungsmerkmale. Es sind jedoch weitere Innovationen bei den Batterietechnologien erforderlich, um die Energiewende voranzutreiben, die für die Verwirklichung einer CO<sub>2</sub> neutralen Gesellschaft notwendig ist. LIBs wurden erstmals 1991 von Sony auf den Markt gebracht und seither kontinuierlich verbessert. Die Verbesserungen betreffen die Energiedichte (Wh/l), die mit der Reichweite von Elektrofahrzeugen zusammenhängt, und spezifische Energie (Wh/kg), aber auch Sicherheit, Kosten und Ladegeschwindigkeit. Vor allem die Kosten werden voraussichtlich in den nächsten Jahren aufgrund von Größenvorteilen und der Verwendung von Materialien, die weniger teuer sind als Kobalt, weiter sinken. Dadurch wird eine wachsende Kundenakzeptanz für Elektrofahrzeuge erwartet. So ergibt sich im Zusammenhang mit Batterien auch eine indirekte Akzeptanz, die mit Batterien betriebene Geräte betrifft (Zubi et al., 2018). Lithium-Ionen-Batterien enthalten so genannte kritische Metalle wie Kobalt und Graphit. Kritisch bezieht sich auf das Problem, dass das Versorgungsrisiko hoch ist. Das Konzept der "Kritikalität" setzt sich in der Regel zusammen aus einer Kombination der wirtschaftlichen Bedeutung der Rohstoffe, der Schwierigkeit, einen anderen Rohstoff zu ersetzen und dem Versorgungsrisiko (European Commission, 2014). Trotz zunehmender Nutzung aller Arten von Geräten, die Lithium-Ionen-Batterien verwenden, liegt die benötigte Gesamtmenge oft nur bei bis Tausende von Tonnen pro Jahr, was im Vergleich zu anderen Metallen wie Kupfer sehr viel weniger ist. Folglich können einige wenige große Minen für die Gesamtversorgung ausreichen, aber auch die Auswahl an Minen ist begrenzt. Außerdem sind die Recyclingquoten immer noch sehr niedrig. Da auch viele dieser kritischen Metalle für Geräte benötigt werden, die für die Erzeugung von Ökostrom ausgelegt sind, ist es naheliegend, dafür zu sorgen, dass auch ihre Produktion umweltfreundlich ist. Daher verwenden beispielsweise (Wall et al., 2017) das Konzept des "verantwortungsvollen Bergbaus", das sie als "Minimierung der negativen Auswirkungen des Bergbaus und Maximierung der positiven Ergebnisse" definieren. Bei der verantwortungsvollen Beschaffung geht es um all diese Fragen und darum, wie wir als Endverbraucher sicher sein können, dass die Lieferketten akzeptable Standards erfüllen (Wall et al., 2017).

Die Nachhaltigkeit von Batterien während des gesamten Lebenszykluses ist wichtig, um die Ziele des Europäischen Green Deals erreichen zu können. Das heißt, Batterien sollten möglichst geringe Umweltauswirkungen haben und gleichzeitig müssen die benötigten Rohstoffe unter akzeptablen sozialen Standards gewonnen werden. Batteriespeicher müssen außerdem sicher bei der Nutzung und langlebig sein. Am Ende ihrer Lebensdauer muss sichergestellt werden, dass sie wiederaufbereitet oder recycelt werden, damit wertvolle Materialien in den Ressourcenkreislauf zurückgeführt werden können. Bisher spielt das Recycling bei der Lithiumproduktion jedoch

noch keine große Rolle, obwohl es theoretisch möglich wäre. Der Grund dafür ist, dass die Ressourcen in ausreichender Menge vorhanden zu sein scheinen und der Rohstoff relativ günstig zu gewinnen ist (Leifker et al., 2018). Allerdings erfordert die Gewinnung von Lithium enorme Mengen an Wasser, setzt umweltschädliche Chemikalien frei, die Verdunstungsteiche und Verarbeitungsanlagen verbrauchen Land und die chemischen Abfälle werden häufig nicht umweltgerecht entsorgt. Die Salzseen bilden jedoch ein äußerst empfindliches Ökosystem mit dem Wasser als Hauptbestandteil. Es gibt also eine ganze Reihe von Problemen, die potenziell die Akzeptanz der Technologie beeinflussen können und es muss weiter erforscht werden, wie diese Probleme bereits im FuE-Prozessen angegangen werden können. Darüber hinaus gibt es sozio-ökonomische Effekte, die die Akzeptanz einer Technologie negativ beeinflussen können. Die Forschung hat gezeigt, dass Menschen mit höherem Einkommen wesentlich eher Zugang zu und Nutzen aus Maßnahmen zur Förderung der Einführung sauberer Energietechnologien ziehen als Menschen mit niedrigerem Einkommen, was ein weit verbreitetes Problem der Ungleichheit offenbart. In der Folge profitieren vor allem einkommensstärkere von den Subventionen für kohlenstoffarme Technologien was die Kluft zwischen wohlhabenderen und benachteiligten Haushalten weiter vergrößert (Stewart, 2022).

## 2.1 Technologie

### 2.1.1 Technologiecharakterisierung

Die vorliegende Analyse konzentriert sich auf wiederaufladbare elektrochemische Speicher, auch bekannt als Sekundärbatterien. Diese Speichertypen bestehen aus einzelnen oder mehreren elektrochemischen Zellen, in denen reversibel ablaufende elektrochemische Reaktionen stattfinden. Dies ermöglicht eine Umkehrung der Reaktion während des Wechsels zwischen Entlade- und Ladezyklen. Die individuellen Zellen setzen sich zusammen aus einer Kombination von zwei Elektroden (Anode und Kathode) aus verschiedenen Materialien, einem Elektrolyten, der den Transport von Ladungen ermöglicht, und einem Separator. Während des Ladevorgangs wird elektrische Energie in chemisches Potenzial umgewandelt, das bei Bedarf als Entladestrom (Gleichstrom) reversibel abgegeben werden kann. Um Batteriesysteme in das Netz einzubinden, sind Stromrichter notwendig, die Wechselstrom aus dem Netz in Gleichstrom beim Laden umwandeln und Gleichstrom aus der Batterie in Wechselstrom beim Entladen (siehe Abbildung 1).

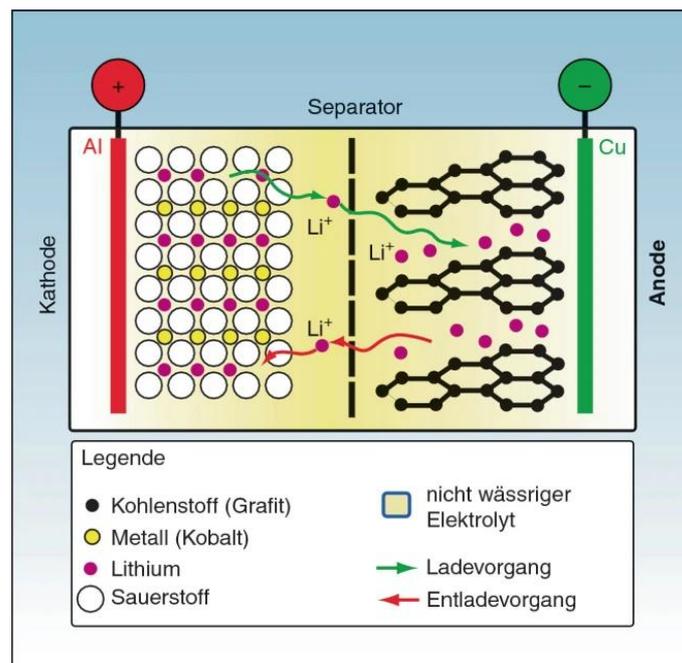


Abbildung 1: Schematische Darstellung Batteriespeicher (Quelle: (Crastan und Höckel, 2022))

In der Praxis werden verschiedene Batterietypen eingesetzt, die sich in ihrer Zellchemie (verwendete Materialien) und den daraus resultierenden technischen Parametern wie Nennspannung, Energiedichte, Betriebstemperatur, Zyklenzahl und Selbstentladung unterscheiden. Unterschiedliche Batterietypen sind je nach Anwendungszweck geeignet. Aufgrund der Vielzahl von Elektrolytmischungen, Separatoren, Elektrodenmaterialien und Zellenabmessungen sowie unterschiedlichen Bauprinzipien (gewickelt, gestapelt) und deren Einfluss auf die Eigenschaften gibt es bisher keine eindeutige Feststellung zur effizientesten Kombination, insbesondere im Kontext stationärer Speichersysteme (Elsner und Sauer, 2015).

Für mobile Anwendungen eignen sich insbesondere Lithium-Ionen-Batterien (LIBs). Sie kombinieren eine hohe Energiedichte mit einer hohen Zahl möglicher Ladezyklen (Dorrmann et al., 2021). Während des Ladevorgangs werden Elektronen von den Lithiumatomen über das Steckernetzteil zur Kathode geleitet. Die Lithiumatome wechseln von der Kathode zur Anode durch den Separator der mikroporöse Eigenschaften hat. An der Anode vereinigen sich die Lithiumatome wieder mit den Elektronen. Beim Entladungsprozess läuft dieser Vorgang in umgekehrter Richtung ab (Hopp, 2016; Rahimzei et al., 2015). Die Anwendungsfelder von LIBs sind z.B. E-Mobilität, Drohnen und Roboter, mobile Elektronik, Energiespeicher und weitere zukünftige Anwendungen, die noch nicht vollständig absehbar sind.

Die Elektroden bestehen aus einem Substrat und einem aktiven Material. Die Anode des LIB besteht aus Kupfer (Substrat) mit einer Graphitbeschichtung (aktives Material). Manchmal wird auch Lithiumtitanatoxid (LTO) als aktives Material verwendet (Kushnir, 2015). Graphit ist als aktives Material für Anoden gut geeignet, da es Anoden gut geeignet, da es den gespeicherten Ionen mechanische Stabilität verleiht, elektrisch leitend ist und gleichzeitig den Lithium-Ionen Transport gleichzeitig ermöglicht (Nitta et al., 2015). LTO als alternatives Anodenmaterial bietet

eine höhere Lebensdauer und Leistung, hat aber auch eine geringere Energiedichte und höhere Kosten (Kelty, 2011). Des Weiteren, wird die Verwendung von Silizium als Anodenmaterial erforscht. Vorteile könnten eine mögliche nachhaltige Beschaffungssituation, z. B. von Altglasflaschen (Li et al., 2017), sowie die sehr hohe theoretische Kapazität von 3572 mAh/g, die fast zehnmal höher ist als die von Graphit mit 372 mAh/g (Chandrasekaran et al., 2010). Allerdings ist dies derzeit nur im Labormaßstab möglich.

Für Kathoden wird meist Aluminium als Substrat verwendet und verschiedene Lithiumverbindungen als aktives Material verwendet, z. B. Lithium-Kobalt-Oxid (LCO), Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC) für E-Mobilitätsanwendungen, Lithiumeisenphosphat (LFP), Lithiummanganoxid und Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Mangan. NMC wird meist mit den Bezeichnungen NMC-1:1:1, NMC-6:2:2 und NMC-8:1:1 verwendet, wobei die Zahlen die relativen Anteile der verwendeten Materialien Nickel, Mangan und Kobalt (in dieser Reihenfolge) zueinander angeben. Das heißt, je höher die erste Zahl ist, desto weniger Kobalt (kritisches Material) verwendet werden muss. LFP-Batterien haben eine geringere Energiedichte, aber wir gehen von einem steigenden Verbrauch bis 2030 aus, danach wird sie sinken. Lithium ist als Kathodenmaterial aufgrund seiner Eigenschaften wichtig: Es hat ein großes negatives Standard Potential (Rahimzei et al., 2015), was bedeutet, dass es sehr "unedel" ist und seine Elektronen relativ leicht. Außerdem hat es im festen Zustand ein geringes Gewicht, was für mobile Anwendungen ideal ist. Daher ist man allgemein der Meinung, dass Lithium vorerst unersetzlich bleibt. LCO ist das am häufigsten verwendete Kathodenmaterial für die Unterhaltungselektronik (Wang et al., 2018).

Derzeit werden Möglichkeiten für Kobaltsubstitute untersucht, da der Abbau von Kobalt mit politischen Problemen verbunden ist. Mögliche Zukunftstechnologien sind Lithium-Schwefel-Batterien, Lithium-Luft-Batterien und Feststoffbatterien. Nach der Definition des United States Geological Survey (USGS) sind Ressourcen Ansammlungen von natürlich vorkommenden in oder auf der Erdkruste vorkommenden Materialien, die derzeit oder in Zukunft wirtschaftlich abbaubar sind. Reserven hingegen sind der Teil der bekannten Ressourcen, der wirtschaftlich abgebaut und gefördert werden kann (USGS, 2013). Darüber hinaus sind Reserven variabel, da ein unwirtschaftlicher Abbau von Rohstoffen wirtschaftlich werden kann, wenn die Rohstoffpreise steigen (Öko-Institut, 2017). Aber auch der umgekehrte Weg ist möglich. Das Problem bei Lithium ist in erster Linie nicht seine Verfügbarkeit, sondern die Steigerung der Produktion entsprechend der Nachfrage. Daher werden verschiedene Produktionsmethoden untersucht, wie etwa die Lithiumgewinnung aus Meerwasser durch eine Membran (Li et al., 2021). Die wichtigsten Kobaltreserven (50 %) sowie der größte Teil der Produktion (60 %) befinden sich in der politisch instabilen Demokratischen Republik Kongo (BGR, 2018), weshalb Kobalt ein kritisches Mineral ist und eine sichere Versorgung in absehbarer Zeit gefährdet ist. Nickel und Mangan hingegen haben eine breite Verteilung der Reserven und der Abbau ist nicht allzu sehr länderspezifisch. Sie haben ihre Hauptanwendung in der Stahlindustrie (Olivetti et al., 2017). Nickel hat eine hohe Gewinnungsrate von über 50 % im Jahr 2011 (Graedel et al., 2011). Für Graphit, macht der Batteriemarkt ebenfalls nur einen geringen Anteil an der Gesamtverwendung

aus. Graphit kann synthetisch hergestellt werden, wenn auch mit höheren Kosten, aber in besserer Qualität.

### **2.1.2 Einordnung Wissensbasis und Innovationssystemkonfiguration**

Bezüglich der Positionierung im globalen Innovationssystem nach Binz und Truffer (2017) lässt sich die Technologie vornehmlich in im Bereich des ungebundenen globalen Innovationssystems (Footlose GIS) wiederfinden. Dieser ist durch eine stark globale Ausrichtung gekennzeichnet und verfügt über einen nur geringen Grad an territorialer Einbindung. Die für die Technologie relevanten Wissensgrundlagen, Marktbedingungen, Qualitätsanforderungen sowie generellen Investitionsmechanismen sind in hohem Maße standardisiert und kodifiziert. Gleichzeitig spielen internationale Netzwerke und internationaler Handel eine Schlüsselrolle bei technologischen Innovationen. Im Hinblick auf die mit der Lithium-Ionen-Batterie verbundenen Wissensbasis, lässt sich die Technologie im Bereich des analytischen Wissens einordnen.

## **2.2 Politik**

Die nationale sowie die europäische Politik fördert die Entwicklung von Batterietechnologien in erheblichem Maße. So wurden allein in Deutschland bisher 1421 Forschungsprojekte im Batteriekontext mit einem Gesamtvolumen von knapp einer Milliarde € gefördert (Batterieforum Deutschland, 2023). Einen Überblick über die bisherige Batterieforschung in Deutschland nach Energiespeichertyp gibt nachfolgend Abbildung 2.

Aktuelle Planungen sehen einen erheblichen Ausbau der Zellproduktion in Europa vor. So wurde das politische Ziele ausgegeben, dass bis zum Jahr 2030 30% der weltweiten Nachfrage nach Batteriezellen aus europäischer Produktion gedeckt werden kann (aktuell sind es ca. 6%). Allein das BMWi fördert den Aufbau eine Zellfertigung in Deutschland mit knapp 3 Mrd. Euro. Die Europäische Kommission unterstützt das gesetzte Ziel im Rahmen eines sogenannten ‚Important Project of Common European Interest‘ (IPCEI). Dadurch soll durch Kooperation ein gemeinschaftlicher Aufbau von technologischen Kompetenzen erfolgen, Innovationen vorangebracht sowie große Produktionsstätten errichtet werden.

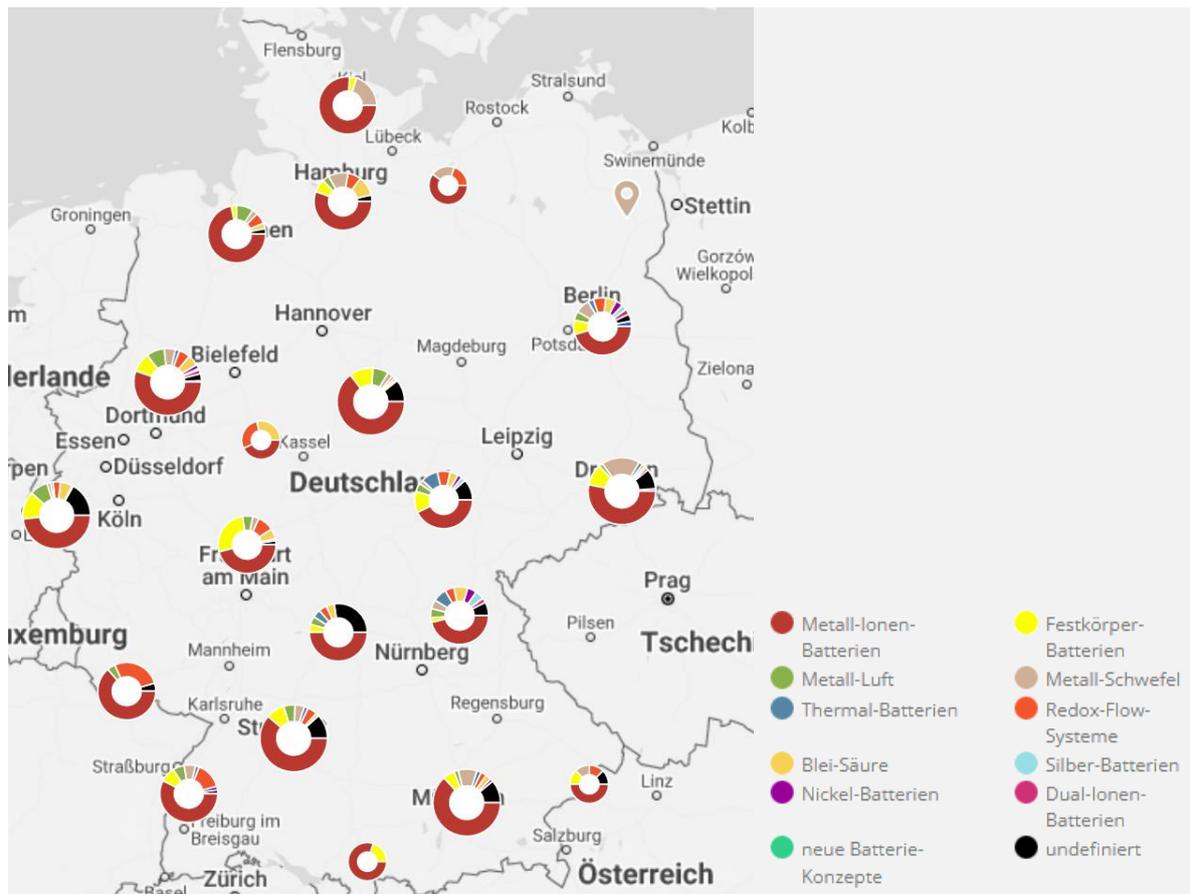


Abbildung 2: Überblick über Batterieforschung in Deutschland nach Energiespeichertyp (Darstellung nach Batterieforum Deutschland, 2023)

### 2.3 Diffusion (Fokus Marktbeschreibung)

Im Hinblick auf die Zellproduktion besteht aktuell eine globale LIB-Zellproduktionskapazität von ca. 1,1 TWh. Der Anteil chinesischer Hersteller liegt dabei mit ca. 68% am Höchsten, wobei auch die Produktionsstandorte anderer Hersteller zum größten Teil in China zu verorten sind (siehe Abbildung 3). Eine Auswertung der VDMA (Michaelis et al., 2023) kommt zu dem Ergebnis, dass sich allein basierend auf aktuellen Ankündigungen die globalen LIB-Zellproduktionskapazitäten bereits bis 2025 auf knapp 4 TWh und bis 2030 auf ca. 7,6 TWh erhöhen wird, wobei im Hinblick auf den Produktionsstandort von einer zumindest teilweisen Verlagerung in die USA und nach Europa ausgegangen wird. Nach (Michaelis et al., 2023) ist bis 2030 eine globale Standortverlagerung der Zellproduktion in die Nähe der Anwendermärkte zu erwarten, da hierdurch die insbesondere in den erwarteten Produktionsmaßstäben signifikanten Transport- und Logistikkosten gesenkt werden können. Sollte es hierzu kommen, würden die Regionen Europa, USA und China bis 2030 mehr als 90% der globalen LIB-Zellproduktionskapazitäten bei gleichzeitig 70-80% der Nachfrage abdecken. Besonders für Europa, bzw. hier insbesondere auch Deutschland, werden jedoch auch die zukünftig vorherrschenden Energiekosten ein wesentlicher Aspekt sein, an dem sich eine eventuelle Verlagerung bzw. auch der zukünftige Ausbau von Produktionskapazitäten orientieren wird.

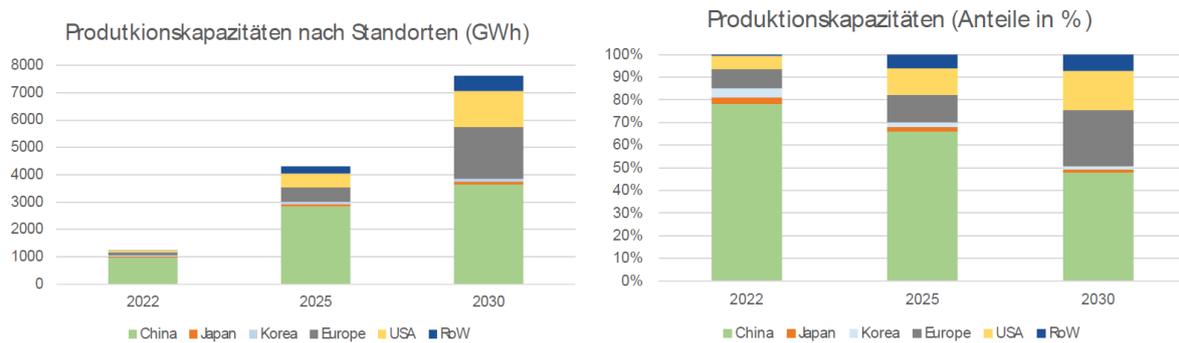


Abbildung 3: Globale Produktionskapazitäten in GWh nach Standorten (Darstellung nach Michaelis et al., 2023)

### 3 Problemaufriss

Wiederaufladbare Batterien gelten als eine wesentliche Schlüsselkomponente im Übergang zu sauberer Energie. Zum einen gelten sie als wesentlicher Enabler für die Elektromobilität da sie eine Verringerung der im Verkehrssektor verursachten Schadstoffemissionen ermöglichen; zum anderen ermöglichen sie als stationärer Speicher den Ausgleich von Angebots- und Nachfrageschwankungen und ebnen den Weg zur Gestaltung intelligenter Energiesysteme (Thies et al., 2019). Vor allem auch im Hinblick auf die Notwendigkeit zur Bekämpfung der globalen Klimakrise sowie die Reduktion der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, zeichnen sich massive Anstiege im Bedarf entsprechender Speichertechnologien ab. Gerade auch deshalb ist es von wesentlicher Bedeutung, dass Forscher und Hersteller im Batteriebereich entsprechende Technologien so entwickeln, dass diese umwelt- und sozialverträglich sind (Sharma and Manthiram, 2020). Diese Notwendigkeit führte in jüngster Zeit zu einer zunehmenden Auseinandersetzung mit, sowie einer Aufarbeitung von bestehenden Problemen bezüglich einerseits wiederaufladbarer Batteriespeicher im generellen (Sharma and Manthiram, 2020) sowie auch Lithium-Ionen-Batterien im speziellen (Christensen et al., 2021).

Bestehende Studien zeigen, dass Batteriespeicher, insbesondere auch Lithium-Ionen-Batterien, nicht frei von Auswirkungen auf den Planeten sind, sondern in verschiedensten Bereichen negative Auswirkungen aufweisen können. Problematische Aspekte finden sich unter anderem bezüglich Toxizität, Umweltschädigungen und der Zerstörung von Lebensräumen sowie auch Gesundheitsschäden und negativer sozialer Auswirkungen (siehe u.a. Christensen et al., 2021; Sharma and Manthiram, 2020). Die Auswirkungen variieren hierbei deutlich zwischen den Lebenszyklusphasen Materialgewinnung, Herstellung, erstes Leben, zweites Leben und Lebensende (Christensen et al., 2021; Dehghani-Sanij et al., 2019). Aktuelle Studien bescheinigen hierbei insbesondere den Phasen der Materialgewinnung (Beylot and Villeneuve, 2017; Thies et al., 2019) sowie dem Lebensende (Christensen et al., 2021) ein hohes Risikopotenzial, während dieses insbesondere während der ersten Nutzungsphase (First Life) als vergleichsweise gering angesehen werden kann (Christensen et al., 2021).

Als problematisch wird hierbei einerseits der hohe Energieverbrauch bei der Ressourcengewinnung sowie insbesondere auch im Produktionsprozess genannt, welcher in Abhängigkeit der eingesetzten Energieträger zu mitunter hohen Treibhausgasemissionen führen kann (Peters et al., 2017; Pettinger and Dong, 2016; Romare and Dahllöf, 2017). Neben Treibhausgasen fallen speziell im Rahmen des Bergbaus noch weitere schädliche Emissionen mit teilweise schweren lokalen Auswirkungen an. Hierzu gehören beispielsweise Schwefeldioxidemissionen beim Abbau von Nickel (Opray, 2017) sowie generell die Freisetzung von Feinstaub (Kelly, 2020). Negative Auswirkungen erfahren hierdurch insbesondere die lokalen Gemeinden, welche erhöhten Gesundheitsgefahren, wie bspw. einer Gefährdung der Atemwege, sowie einer Verschmutzung von Luft und Wasser ausgesetzt sind (Kelly, 2020).

Ein in der Literatur häufig angeführtes Problem stellt zudem die mit den Einsatzstoffen verbundene, erhöhte Toxizität dar. Hier können Arbeiter bei der Ressourcengewinnung aber auch der Batteriefertigung an sich mit toxischen Stoffen und Chemikalien in Berührung kommen. Insbesondere unter Arbeitsbedingungen ohne hinreichende Schutzmaßnahmen, wie es beispielsweise vom Kobaltabbau im Kongo berichtet wird (Amnesty International, 2016), sowie generell in Entwicklungsländern mit niedrigen regulatorischen Standards (Cerdas et al., 2018) können dabei teils schwere Gesundheitsprobleme auftreten. Das Problem der Toxizität kann sich aber auch über Bergbau- und Fertigungsstätten hinaus auf die lokale Umwelt erstrecken, wo Verschmutzungen und unkontrollierte Abwässer eine ernsthafte Bedrohung für das Wohlergehen der umliegenden Gemeinden sowie Ökosysteme darstellen können (Sharma and Manthiram, 2020). Lithium-Ionen-Batterien enthalten reaktive Salze, flüchtige organische Elektrolyte und andere Zusatzstoffe, aus denen sich im Laufe der Degradation gefährliche Verbindungen bilden können, die bei einer mechanischen Beschädigung im Rahmen der Nutzung, vor allem aber auch im Hinblick auf Recycling und Entsorgung, freigesetzt werden können (Diekmann et al., 2018). Hinzu kommt, dass in den Batterien zusätzlich enthaltene Additive oftmals nicht vollständig ausgewiesen und daher hinsichtlich ihrer Toxizität nicht immer vollumfänglich einschätzbar sind (Mrozik et al., 2021; Rodrigues dos Santos et al., 2017; Winslow et al., 2018). Aufgrund der chemischen Verbindungen sowie enthaltener Schwermetalle werden Lithium-Ionen-Batterien als gefährliche Abfälle klassifiziert, die eine entsprechende Behandlung erfordern. Eine einfache Deponierung ist in vielen Ländern zwar verboten bzw. durch rechtliche Rahmenbedingungen zumindest in großem Umfang eingeschränkt (Cerdas et al., 2018; Christensen et al., 2021), gerade in weniger entwickelten Volkswirtschaften ist dies aber nicht immer der Fall. Eine entsprechende Deponierung kann hierbei dazu führen, dass in den Batterien enthaltene Metalle, wie Lithium, Kobalt, Kupfer, Chrom und Nickel (Rodrigues dos Santos et al., 2017), aber auch enthaltene Additive, wie ionische Flüssigkeiten oder phosphor- und schwefelhaltige Zusätze (Haregewoin et al., 2016), auslaugen und ins Grundwasser gelangen. Hierdurch können gefährliche und toxische

Schadstoffe auch an Orte in erheblicher Entfernung zum eigentlichen Kontaminationsort transportiert werden (Szymański and Janowska, 2016; Xu et al., 2018). Die Problematik wird noch dadurch verstärkt, dass einige enthaltene Stoffe, wie bspw. ionische Flüssigkeiten, eine geringe biologische Abbaubarkeit und eine hohe Persistenz in Böden aufweisen (Coleman and Gathergood, 2010; Stepnowski et al., 2007).

Die Probleme der Toxizität und Emissionen zeigen bereits, dass im Hinblick auf Batterien neben ökologischen Folgen auch soziale Auswirkungen auftreten und diese mitunter eng miteinander zusammenhängen. Insbesondere letzteren wurde bisher jedoch vergleichsweise wenig Aufmerksamkeit zuteil (Thies et al., 2019), was zumindest teilweise der Schwierigkeit einer quantitativen Bewertung zuzurechnen ist (Sharma and Manthiram, 2020). Dies ändert jedoch nichts an den teils evidenten Problemen in diesem Bereich. So gibt es einerseits, speziell im Kontext der Rohstoffgewinnung in ärmeren Ländern, starke ethische Bedenken. Hier kann insbesondere die Situation der Kobaltgewinnung als die bei weitem alarmierendste eingeschätzt werden (Reuter, 2016). Hier wird aus der Demokratischen Republik Kongo, wo ein großer Teil der weltweiten Kobaltgewinnung erfolgt, von gefährlichen Arbeitsbedingungen sowie Ausbeutung und Rechteeinschränkung der Arbeiter berichtet (Amnesty International, 2016). Weiterhin besteht hier sowie in anderen Ländern, wie Sambia und China, auch ein erhöhtes Risiko von Kinder- und mitunter auch Zwangsarbeit. In China zeigen sich zudem verstärkt Risiken hinsichtlich übermäßiger Arbeitszeiten sowie eingeschränkter Rechte auf Streik und kollektive Tarifverhandlungen (Reuter, 2016). Die Situation in den Industrieländern wie Australien und Kanada zeigt sich hier als deutlich besser und weniger kritisch, wobei auch hier Probleme identifiziert werden können, bspw. im Hinblick auf eine zögerliche bzw. nur teilweise Umsetzung von Konventionen der Internationalen Arbeitsorganisation durch Kanada (Reuter, 2016).

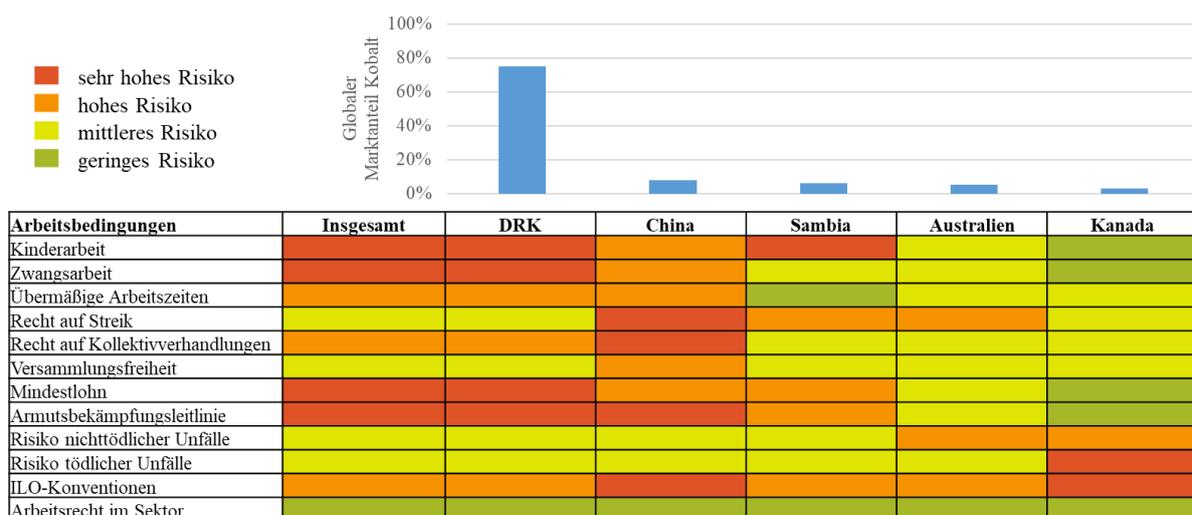


Abbildung 4: Risikoeinschätzung bzgl. Arbeitsbedingungen beim Abbau von Kobalt (Darstellung nach Reuter, 2016)

Ein weiteres im Rahmen der Rohstoffgewinnung auftretendes und speziell die lokalen Gemeinden betreffendes Problem ist die Verknappung und Kontamination des örtlichen Trinkwassers.

So werden im Rahmen der Lithiumgewinnung, je nach genutztem Verfahren, großen Mengen an Frischwasser für die Solebehandlung benötigt. Im Bezug hierauf wird aus Chile und Argentinien berichtet, dass eine exzessive Anwendung solcher Verfahren dazu führt, dass die einheimische Bevölkerung nicht mehr über genügend Wasser für Viehzucht, Nahrungsmittelanbau und Lebensunterhalt verfügt (Frankel and Whoriskey, 2016; Joy and Azzopardi, 2019; Sherwood, 2018). Die Gewinnung von Nickel und Graphit sind zudem mit einer Verschmutzung des Grundwassers verbunden und können hierbei zu einer Kontamination des Trinkwassers sowie einem Absterben von Nutzpflanzen führen (Opray, 2017; Whoriskey, 2016).

Viele der genannten Aspekte verdeutlichen, dass auch im Hinblick auf die menschliche Gesundheit negative Auswirkungen bei Rohstoffgewinnung und Batterieproduktion bestehen. Eine entsprechende lokal begrenzte Gefährdung besteht jedoch auch im Rahmen der Batterienutzung, wobei berichtete Zwischenfälle hier insbesondere Brände, Explosionen, Stromschläge und die Freisetzung von giftigen Gasen umfassen (Christensen et al., 2021; Mrozik et al., 2021). Diese sind zumeist Folge einer extremen Belastung, beispielsweise im Rahmen eines Fahrzeugunfalls, einer Überladung oder übermäßiger Hitzeeinwirkung. Vereinzelt wird auch von Selbstentzündungen von in Elektrofahrzeugen genutzten Lithium-Ionen-Batterien berichtet, wobei hier als Ursache eine schlechte Konstruktion oder Verunreinigungen im Rahmen des Produktionsprozesses vermutet werden (Feng et al., 2018). Problematisch ist hierbei auch, dass es auch nach einem ersten Brand mitunter Stunden, Tage oder sogar Wochen später zu einer erneuten Entzündung kommen kann (Roman, 2018).

Im Hinblick auf rechtliche und regulatorische Aspekte wird in der Literatur vermehrt auf ein Fehlen von Leitlinien, Normen und Vorschriften hingewiesen (Iclodean et al., 2017). Hieraus können einerseits eine allgemeine Verunsicherung der Verbraucher hinsichtlich der Nutzung von Batteriemodulen aber auch nachteilige Effekte bspw. im Bereich der Fahrzeugreparatur resultieren. Auch im Bereich Quartierspeicher zeigen sich mitunter unklare Regelungen beim Brandschutz sowie fehlenden Standards und Schnittstellen (Gähns and Knoefel, 2018). Zudem wird darauf verwiesen, dass bezüglich der Aufteilung von Haftung und Verantwortung zwischen Anbietern und Verbrauchern zumeist kein klares Verständnis besteht, was sowohl zu Unsicherheiten als auch erhöhten Kosten führen kann (Christensen et al., 2021). Die Verwendung von im Hinblick auf Verfügbarkeit sowie Diversität der Ursprungsregionen kritischen Metallen kann zudem zu einer starken und auch kurzfristigen Preisvolatilität führen und die zukünftige nachhaltige Versorgung mit Batterien gefährden oder zumindest beeinträchtigen (Lander et al., 2021). Dies unterstreicht auch die Notwendigkeit zur Berücksichtigung einer ressourcenseitigen Nachhaltigkeit. So weisen die Rohstoffe Kupfer, Lithium und Nickel eine zumindest mittlere, Chrom sogar bereits eine hohe Kritikalität hinsichtlich Versorgungsrisiko und Vulnerabilität auf (Erdmann et al., 2011), werden aber aus Gründen einer längeren realisierbaren Zyklusdauer häufig weniger kritischen Rohstoffen wie Natrium, Eisen oder Mangan vorgezogen (Sharma and Manthiram, 2020). Als

problematisch kann in diesem Hinblick auch die bestehende Importabhängigkeit Deutschlands gesehen werden. Hier bestehen sehr hohe Abhängigkeit von China (Raffinierung) und der Demokratischen Republik Kongo (Bergbau) mit gleichzeitig hohen Länderrisiken. Ein zu erwartender Anstieg des Angebotsdefizits aufgrund einer steigenden Batterienachfrage könnte diese Abhängigkeiten zukünftig zusätzlich verstärken (NPE, 2016).

## 4 Exemplarische Anwendung des V4I-Indikatoriksystems

Nachfolgend soll die Anwendung des im Rahmen des Forschungsprojektes ‚V4InnovatE‘ entwickelte Indikatoriksystems demonstriert werden.<sup>1</sup> Die nachfolgende Bewertung mittels der Prozessindikatoren beruht auf dem hypothetischen Falls eines Forschungsprojektes im Bereich Batterien und Rohstoffe. Damit soll aufgezeigt werden auf welche Art und Weise die entwickelten Prozessindikatoren zur Anwendung kommen können.

### 4.1 Beispielhafter Auszug aus der Projektplanung

Das beantragte Projekt setzt an folgendem Problem an: Die etablierte Technologie der Lithium-Ionen-Batterien nutzt als Kathodenmaterial Kobalt. Kobalt lässt sich im notwendigen Maßstab nicht in Europa, jedoch in Afrika gewinnen. Insbesondere der Kongo bietet dafür gute Voraussetzungen hinsichtlich des Umfangs der Vorkommen und der Möglichkeiten der Gewinnung. Allerdings sind damit eine ganze Reihe von Schwierigkeiten verbunden (u.a. politische Situation vor Ort, ethische Bedenken hinsichtlich Art der Gewinnung, Umweltverschmutzung, Gesundheit). Deshalb schlagen wir die Entwicklung einer kobaltfreien Batterie vor, die als Kathodenmaterial auf Lithiummanganeisenphosphats setzt.

Der vorgesehene Pfad über die Nutzung des Lithiummanganeisenphosphats scheint nach vorherrschenden wissenschaftlicher Meinung sehr vielversprechend zu sein. Auch um mögliche zusätzliche Kosten zu vermeiden, wird der Fokus entsprechend auf diese Lösung gelegt. Darüber hinaus werden jedoch Statusgateways eingerichtet, um den Entwicklungsfortschritt zu überwachen. Eine Akteuranalyse ist nur in rudimentärem Stile geplant, da nicht mit signifikanten Auswirkungen auf unterschiedliche Akteure zu rechnen ist.

Die Ziele der Akteurseinbindung sind im Laufe des Projekts herauszuarbeiten. Relevante Stakeholder werden in erster Linie aus dem wissenschaftlichen Sektor ausgewählt. Daneben werden aber auch Umweltschutzverbände einbezogen. In erster Linie werden Stakeholder eingeladen, um über den vorgeschlagenen Forschungspfad zu informieren. Daneben sollen jedoch auch mögliche Bedenken der verschiedenen Gruppen aufgegriffen werden. Der konkrete Plan zum Einbezug von Stakeholdern wird im Verlauf des Projekts von der Steuerungsgruppe entwickelt.

Das Projekt wird basierend auf dem linear strukturierten Projektplan durchgeführt. Zu Beginn des Projekts findet ein Abgleich der dem Projekt zugrundeliegender Werte und Motivationen mit den

---

<sup>1</sup> Siehe hierzu auch die offizielle Projektseite <https://www.v4innovate.de>

Werten und Motivationen der potentiellen Anwender der neuen Batterietechnologie statt. Die Risiken des Projekts sind als mittel-hoch bis hoch einzustufen. Zur Regelmäßigen Überprüfung der Einsetzung und der etwaigen Einleitung von Gegenmaßnahmen wird ein halbjähriges Treffen geplant. Verantwortlich für den Projekterfolg ist der Projektleiter. Die Zuständigkeiten für einzelne Tasks werden noch im Lauf des Projekts basierend auf den jeweiligen Kompetenzen zugewiesen. Es ist zu Beginn des Projekts noch weitgehend unklar, wer die zukünftigen Nutzer der neuen Batterietechnologien sein werden. Entsprechend wird ein Feedbackprozess erst in einer späteren Phase des Projekts implementiert.

Zentrale Erkenntnisse werden über Fachzeitschriften der Wissenschafts-Community zugänglich gemacht. Relevante kommerziell verwertbare Erkenntnisse werden nur insoweit offengelegt, dass sie die spätere kommerzielle Nutzung der Ergebnisse nicht beeinträchtigen. Information bezüglich der Gefährlichkeit der eingesetzten Materialien werden entsprechend der gesetzlichen Regelungen offengelegt.

## 4.2 Bewertung Antizipation

### **Ermittlung und Definition der erwünschten Auswirkungen und Ergebnisse**

Der Auszug aus der Projektplanung zeigt keine Planung einer zusätzlichen Ermittlung oder weitergehenden Definition wünschenswerter Ergebnisse.

### **Identifizierung und Berücksichtigung problematischer Auswirkungen und Ergebnisse**

Der Antrag zeigt eine Bereitschaft, problematische Auswirkungen und Ergebnisse zu identifizieren und zu berücksichtigen. Es wird darauf hingewiesen, dass ein Prozess vorgesehen ist, um potenzielle Risiken zu bewerten. Die geplante regelmäßige Überprüfung soll sicherstellen, dass problematische Auswirkungen frühzeitig erkannt und adressiert werden können.

### **Identifizierung und Prüfung alternativer Pfade**

Die Projektbeschreibung führt Statusgateways zur Überwachung der Entwicklungsschritte an und deutet hinsichtlich der Formulierung zumindest an, dass sie Bereitschaft besteht, den genannten Forschungspfad zu hinterfragen. Diese zeigen auch die Information und eingeschränkte Diskussion mit den Stakeholdern über den Forschungspfad.

Tabelle 1: Bewertung der Indikatoren im Bereich Antizipation

	Niedrig	Moderat	Hoch	Sehr hoch
<b>Ermittlung und Definition der erwünschten Auswirkungen und Ergebnisse</b>	Pauschale Annahme wünschenswerter Auswirkungen und Ergebnisse ohne klare Bemühungen, mögliche Wirkungen und Ergebnisse zu untersuchen	Erklärte Bereitschaft zur Ermittlung und Identifikation wünschenswerter Auswirkungen und Ergebnisse, ohne klare Methoden oder Verfahren zu benennen	Die Verwendung eines zumindest in Ansätzen strukturierten Prozesses zur Ermittlung und Identifikation wünschenswerter Auswirkungen und Ergebnisse ist vorgesehen	Eine strukturierte, regelmäßige analytische Überprüfung der gewünschten Auswirkungen und Ergebnisse in Bezug auf die Ankerpunkte ist vorgesehen
<b>Identifizierung und Berücksichtigung problematischer Auswirkungen und Ergebnisse</b>	Pauschale optimistische Prognose für zukünftige Projektergebnisse, ohne klare Bemühungen, Risiken zu identifizieren oder mögliche zukünftige Szenarien zu untersuchen.	Erklärte Bereitschaft zur Ermittlung und Identifikation potentiell problematischer oder unbeabsichtigter Auswirkungen und Ergebnissen, ohne klare Methoden oder Verfahren zu benennen	Die Verwendung eines zumindest in Ansätzen strukturierten Prozesses zur Ermittlung und Identifikation potentiell problematischer oder unbeabsichtigter Auswirkungen und Ergebnissen ist vorgesehen.	Eine strukturierte, regelmäßige analytische Überprüfung von problematischen oder unbeabsichtigten Auswirkungen und Ergebnissen in Bezug auf die Ankerpunkte ist vorgesehen
<b>Identifizierung und Prüfung alternativer Pfade</b>	Pauschale optimistische Prognose für das gewählte Vorgehen, ohne klare Bemühungen, alternative Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationswege zu identifizieren	Erklärte Bereitschaft zur Identifikation und Prüfung alternativer Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationswege, ohne klare Methoden oder Verfahren zu benennen	Die Verwendung eines zumindest in Ansätzen strukturierten Prozesses zur Identifikation und Prüfung alternativer Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationswege ist vorgesehen	Eine strukturierte, regelmäßige analytische Überprüfung alternativer Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationswege ist vorgesehen

### 4.3 Bewertung Reflexion

#### Kritische Reflexion der Problemstellung und –definition

Aus der Planung geht kein erklärtes Interesse zur Reflexion der Problemdefinition hervor.

#### Kritische Reflexion von Annahmen, Entscheidungen und Handlungen

Die Planung beschreibt die Einrichtung von Statusgateways zur Überwachung des Entwicklungsfortschritts. Dementsprechend ist von einer zumindest grundlegenden, regalmäßigen Reflexion auszugehen.

#### Kritische Reflexion der zugrundeliegenden Verantwortlichkeiten

Ähnlich wie bei der Reflexion von Annahmen und Entscheidungen gibt es im Antrag keine explizite Erklärung für das Interesse an der Reflexion der zugrundeliegenden Verantwortlichkeiten. Es wird lediglich darauf hingewiesen, dass der Projektleiter die Verantwortung für den Projekterfolg trägt.

#### Kritische Reflexion der zugrundeliegenden Werte und Motivationen der beteiligten

Entsprechend der Projektplanung findet zu Beginn des Projekts ein einmaliger Abgleich der dem Projekt zugrundeliegender Werte und Motivationen mit den Werten und Motivationen der potentiellen Anwender der neuen Batterietechnologie statt. Eine zusätzliche regelmäßige Überprüfung geht allerdings nicht aus dem Antrag hervor.

## Kritische Reflexion von möglichen Unsicherheiten und Einschränkungen

Aufgrund von als mittel- bis hoch eingestufte Projektrisiken wird ein regelmäßiges Treffen anvisiert, weshalb man in diesem Kontext von einer zumindest in Ansätzen strukturierten Reflexion ausgehen kann. Genauere Informationen zum Prozess werden jedoch nicht gegeben.

## Analyse relevanter Akteure

In der Projektplanung wird beschrieben, dass eine eher rudimentäre Akteursanalyse geplant ist, wobei auch erste Akteursgruppen konkret benannt werden. Entsprechend der vorliegenden Informationen ist deshalb von einem informellen, einmaligen bzw. ad-hoc-Prozess auszugehen.

Tabelle 2: Bewertung der Indikatoren im Bereich Reflexion

	Niedrig	Moderat	Hoch	Sehr hoch
<b>Kritische Reflexion der Problemstellung und /-definition</b>	Kein erklärtes Interesse zur Reflexion der Problemdefinition	Informeller, einmaliger oder ad-hoc-Prozess zur Untersuchung der Problemdefinition	Verwendung eines zumindest in Ansätzen strukturierten Prozesses zur Reflexion über die Problemdefinition ist vorgesehen	Eine strukturierte, regelmäßige Überprüfung der Problemdefinition ist vorgesehen
<b>Kritische Reflexion von Annahmen, Entscheidungen und Handlungen</b>	Kein erklärtes Interesse zur Reflexion von Annahmen, Entscheidungen und Handlungen	Informeller, einmaliger oder ad-hoc-Prozess zur Untersuchung von Annahmen, Entscheidungen und Handlungen	Verwendung eines zumindest in Ansätzen strukturierten Prozesses zur Reflexion Überprüfung von Annahmen, Entscheidungen und Handlungen ist vorgesehen	Eine strukturierte, regelmäßige Überprüfung von Annahmen, Entscheidungen und Handlungen ist vorgesehen
<b>Kritische Reflexion der zugrunde liegenden Verantwortlichkeiten</b>	Kein erklärtes Interesse zur Reflexion der zugrunde liegenden Verantwortlichkeiten	Informeller, einmaliger oder ad-hoc-Prozess zur Untersuchung der zugrunde liegenden Verantwortlichkeiten	Verwendung eines zumindest in Ansätzen strukturierten Prozesses zur Reflexion der zugrunde liegenden Verantwortlichkeiten ist vorgesehen	Eine strukturierte, regelmäßige Überprüfung der zugrunde liegenden Verantwortlichkeiten ist vorgesehen
<b>Kritische Reflexion der zugrunde liegenden Werte und Motivationen der beteiligten Akteure</b>	Kein erklärtes Interesse zur Reflexion der zugrunde liegenden Werte und Motivationen der beteiligten Akteure	Informeller, einmaliger oder ad-hoc-Prozess zur Untersuchung der zugrunde liegenden Werte und Motivationen der beteiligten Akteure	Verwendung eines zumindest in Ansätzen strukturierten Prozesses zur Reflexion der zugrunde liegenden Werte und Motivationen der beteiligten Akteure ist vorgesehen	Eine strukturierte, regelmäßige Überprüfung der zugrunde liegenden Werte und Motivationen der beteiligten Akteure ist vorgesehen
<b>Kritische Reflexion von möglichen Unsicherheiten und Einschränkungen</b>	Kein erklärtes Interesse zur Reflexion von möglichen Unsicherheiten und Einschränkungen	Informeller, einmaliger oder ad-hoc-Prozess zur Überprüfung möglicher Unsicherheiten und Einschränkungen	Verwendung eines zumindest in Ansätzen strukturierten Prozesses zur Reflexion möglicher Unsicherheiten und Einschränkungen ist vorgesehen	Eine strukturierte, regelmäßige Überprüfung von möglichen Unsicherheiten und Einschränkungen ist vorgesehen
<b>Analyse relevanter Akteure</b>	Kein erklärtes Interesse zur Analyse potenziell sachkundiger, betroffener und interessierter Akteure	Informeller, einmaliger oder ad-hoc-Prozess zur Analyse potenziell sachkundiger, betroffener und interessierter Akteure	Es gibt konsistente Ideen darüber, wie potenziell sachkundige, betroffene und interessierte Akteure identifiziert und analysiert werden sollen	Ein klar definierter methodischer Ansatz für die Analyse potenziell sachkundiger, betroffener und interessierter Akteure liegt vor

## 4.4 Bewertung Inklusion

### Einbeziehung von Akteuren/Stakeholdern

Die Planung sieht vor, Stakeholder einzubeziehen, jedoch ist die Methodik und Auswahlkriterien für die Einbeziehung nicht explizit spezifiziert. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass relevante Stakeholder-Gruppen einbezogen werden sollen. Dies deutet darauf hin, dass zumindest ein gewisses Interesse an der Einbeziehung von Stakeholdern besteht, auch wenn die Strategie hierfür nicht ausführlich erläutert wird.

### Art der Einbindung von Akteuren/Stakeholdern

Die vorliegende Beschreibung sagt aus, dass die Einbindung der Stakeholder eine vornehmlich informierende Funktion hat, es aber auch eine zumindest begrenzte Diskussion angestrebt wird.

### Regelmäßigkeit und Systematik der Einbindung von Akteuren/Stakeholdern

Aus der Planung gehen keine genauen Informationen zur Regelmäßigkeit der Akteurseinbindung hervor. Entsprechend der gemachten Angaben ist aber zumindest davon auszugehen, dass eine Kommunikation in zumindest begrenztem Maße geplant ist.

Tabelle 3: Bewertung der Indikatoren im Bereich Inklusion

	Niedrig	Moderat	Hoch	Sehr hoch
Einbeziehung von Akteuren/Stakeholdern	Die Einbeziehung der Stakeholder spielt keine oder nur eine sehr geringe Rolle und wird in Bezug auf Strategie und Methodik nicht weiter spezifiziert	Erklärte Absicht, verschiedene Stakeholder auf der Grundlage eher willkürlicher oder nicht spezifizierter Auswahlkriterien einzubeziehen	Es ist vorgesehen, die relevantesten Stakeholder-Gruppen basierend auf spezifizierten Auswahlkriterien/Methoden (z. B. in Bezug auf Wissen/Expertise, Perspektiven) einzubeziehen	Einbeziehung der Stakeholder in ausreichender Anzahl und Vielfalt, die anhand spezifizierter Auswahlkriterien/Methoden (z. B. in Bezug auf Wissen/Expertise, Perspektiven) und unter Berücksichtigung der Ankerpunkte als relevant identifiziert wurden
Art der Einbindung von Akteuren/Stakeholdern	Reine informative Einbindung der Stakeholder ohne die Möglichkeit, zu diskutieren oder eigene Beiträge zu leisten	Die verwendeten Methoden für die Einbindung der Stakeholder ermöglichen eine Beteiligung der Stakeholder ohne weitere Diskussion	Die verwendeten Methoden zur Einbindung der Stakeholder ermöglichen eine Beteiligung der Stakeholder und eine begrenzte Diskussion mit/zwischen diesen	Die verwendeten Methoden zur Einbindung der Stakeholder ermöglichen eine Beteiligung der Stakeholder und eine Diskussion mit/zwischen diesen
Regelmäßigkeit und Systematik der Einbindung von Akteuren/Stakeholdern	Eine Kommunikation mit den Stakeholdern ist nicht vorgesehen	Die Kommunikation mit den Stakeholdern findet nur in begrenztem Maße und/oder erst gegen Ende des Forschungs- und Innovationsprozesses statt	Einbeziehen und Integrieren von Stakeholder-Ansichten an verschiedenen Punkten entlang des Forschungs- und Innovationsprozesses	Offenes und aktives Suchen nach kontinuierlichem kritischem Input, Feedback und Feed-Forward von Stakeholdern

## 4.5 Bewertung Responsivität

### Möglichkeit zur Veränderung nach interner Reflexion und externem Feedback

Der Antrag zeigt eine klare Bereitschaft, auf reflektive Praxis und externes Feedback zu reagieren. Es wird betont, dass Anpassungen vorgenommen werden sollen, um auf neue Erkenntnisse zu reagieren.

### Umgang mit Feedback

Der Antrag gibt an, dass eingehendes Feedback eingearbeitet wird, jedoch ohne klare Methoden oder Verfahren zu nennen. Es fehlt eine detaillierte Darstellung, wie das Feedback gesammelt, bewertet und in den Forschungs- und Innovationsprozess integriert wird. Daher wird die Bewertung als moderat eingestuft, da der Umgang mit Feedback verbessert werden könnte.

Tabelle 4: Bewertung der Indikatoren im Bereich Responsivität

	Niedrig	Moderat	Hoch	Sehr hoch
Möglichkeit zur Veränderung nach interner Reflexion und externem Feedback	Keine Anzeichen für Potenzial zur Anpassung als Reaktion auf reflektive Praxis und externes Feedback	Erklärte Bereitschaft zur Anpassung als Reaktion auf reflektive Praxis und externes Feedback	Klare Hinweise auf die Fähigkeit zur Anpassung als Reaktion auf reflektive Praxis und externes Feedback	Nachgewiesenes Potential die Fähigkeit zur Anpassung als Reaktion auf reflektive Praxis und externes Feedback
Umgang mit Feedback	Es gibt keine Hinweise darauf, dass eingehendes Feedback in den Forschungs- und Innovationsprozess einbezogen werden soll	Es wird angegeben, dass eingehendes Feedback eingearbeitet wird, ohne klare Methoden oder Verfahren zu nennen	Es gibt konsistente Darstellungen dazu, wie Feedback eingebunden werden soll	Klare Methoden zur Einbindung von Feedback werden in den Forschungs- und Innovationsprozess implementiert

## 4.6 Bewertung Transparenz

### Offenlegung von Praxisdetails

Der Antrag zeigt eine moderate Bereitschaft, Informationen zu teilen. So werden Stakeholder über den Forschungspfad informiert und über einen Feedbackprozess integriert. Dies deutet auf eine entsprechende Bereitschaft zur Transparenz über zumindest Ziele und Methoden hin. Jedoch fehlen detailliertere Angaben zu weiteren Transparenzaspekten im Projekt.

### Kommunikation der Grenzen der Offenlegung

Es wird eine Bereitschaft zur Kommunikation von Unsicherheiten und Einschränkungen gezeigt. Zudem wird in der Beschreibung kommuniziert, wo die Grenzen der Offenlegung liegen. Allerdings fehlt ein klares Konzept zur Darstellung dieser Grenzen und wie sie kommuniziert werden sollen.

### Kommunikation der Rolle und Einbindung der Akteure

Der Antrag erwähnt, dass relevante Stakeholder, hauptsächlich aus dem wissenschaftlichen Sektor und Umweltschutzverbände, eingebunden werden. Es wird jedoch keine Methode genannt, wie bzw. auch generell ob die Rolle und Einbindung der Akteure kommuniziert werden sollen.

### **Transparenz über die Integration des Stakeholder-Inputs**

Es wird eine gewisse Bereitschaft zur Integration von Stakeholder-Input gezeigt, aber es fehlen klare Methoden oder Verfahren, wie dieser Input integriert werden soll. Es liegen keine Informationen zu Transparenz in Bezug auf die Integration von Stakeholder-Input vor.

### **Teilen und Verbreiten der Ergebnisse**

Zentrale Erkenntnisse aus dem Projekt sollen über Fachzeitschriften der Wissenschafts-Community zugänglich gemacht werden.

### **Transparenz in Bezug auf Verantwortlichkeiten und Eigentumsrechte**

Es wird keine Bereitschaft zur Kommunikation oder Offenlegung von Delegations- und Eigentumsverhältnisse gezeigt, weshalb die Bewertung ‚Niedrig‘ als am zutreffendsten erscheint.

Tabelle 5: Bewertung der Indikatoren im Bereich Transparenz

	Niedrig	Moderat	Hoch	Sehr hoch
<b>Offenlegung von Praxisdetails</b>	Keine Bereitschaft oder vorliegende Informationen zur Transparenz bezüglich der Praxisdetails	Es wird die Bereitschaft geäußert, begrenzt Informationen zu Zielen, Methoden, Finanzen und Interessen zu teilen	Eine zumindest eingeschränkte Darstellung von Zielen, Methoden sowie Interessen und beteiligten Akteuren ist vorgesehen	Eine ehrliche und klare Darstellung von Zielen, Methoden sowie Interessen und beteiligten Akteuren ist erfolgt oder vorgesehen
<b>Kommunikation der Grenzen der Offenlegung</b>	Keine Bereitschaft oder vorliegende Informationen zu Transparenz in Bezug auf Einschränkungen und Unsicherheiten	Es wird die Bereitschaft geäußert, begrenzt Informationen in Bezug auf Einschränkungen und Unsicherheiten zu teilen	Die Kommunikation von Unsicherheiten und Einschränkungen, die von den beteiligten Akteuren als wesentlich angesehen werden, ist vorgesehen	Ein klares Konzept für die Kommunikation von Unsicherheiten und Einschränkungen, die für verschiedene Interessengruppen relevant sein können, wird dargelegt
<b>Kommunikation der Rolle und Einbindung der Akteure</b>	Keine Bereitschaft oder vorliegende Informationen zu Transparenz in Bezug auf die Rolle und Einbindung relevanter Akteure	Erklärte Bereitschaft, über die Rolle und die Beteiligung der relevanten Akteure zu informieren, ohne klare Methoden oder Verfahren zu benennen	Eine zumindest eingeschränkte Darstellung von Rolle und Beteiligung der relevanten Akteure ist vorgesehen	Ein klares Konzept, wie die Rolle und Einbindung relevanter Akteure kommuniziert werden soll, liegt vor
<b>Transparenz über die Integration des Stakeholder-Inputs</b>	Keine Bereitschaft oder vorliegende Informationen zu Transparenz in Bezug auf die Integration von Stakeholder-Input	Erklärte Bereitschaft, über die Integration von Stakeholder-Input zu informieren, ohne klare Methoden oder Verfahren zu benennen	Eine zumindest eingeschränkte Darstellung der Integration von Stakeholder-Input ist vorgesehen	Ein klares Konzept, wie die Integration von Stakeholder-Input kommuniziert werden soll, liegt vor
<b>Teilen und Verbreiten der Ergebnisse</b>	Keine Bereitschaft oder vorliegende Informationen zu Transparenz in Bezug auf Ergebnisse	Es wird die Bereitschaft geäußert, in begrenztem Maße Ergebnisse zu teilen	Es ist geplant, ausgewählte Ergebnisse mit einigen involvierten und/oder betroffenen Stakeholdern in verschiedenen Phasen (vorläufige, Zwischen- und endgültige Ergebnisse) zu teilen	Es liegt ein Konzept vor, das eine offene Bereitstellung von vorläufigen, Zwischen- und endgültigen Ergebnissen für die involvierten und/oder betroffenen Stakeholder vorsieht
<b>Transparenz in Bezug auf Verantwortlichkeiten und Eigentumsrechte</b>	Keine Bereitschaft oder vorliegende Informationen zu Transparenz in Bezug auf Delegations- und Eigentumsverhältnisse	Es wird die Bereitschaft geäußert, begrenzt Informationen in Bezug auf Delegations- und Eigentumsverhältnisse zu teilen	Eine zumindest eingeschränkte Darstellung der bestehenden und anvisierten Delegations- und Eigentumsverhältnisse ist vorgesehen	Klar definierte und offen kommunizierte Delegations- und Eigentumsverhältnisse

## 4.7 Ergebnisüberblick

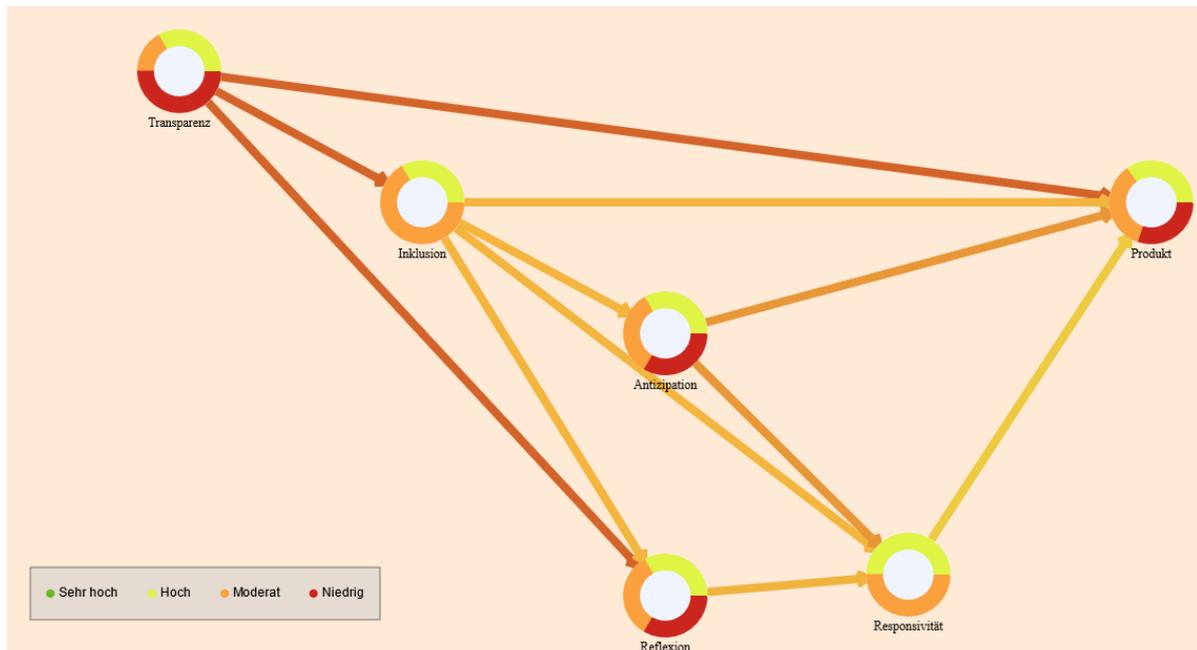


Abbildung 5: Überblick über die Ergebnisse des Self-Assessment

Abbildung 5 gibt einen Überblick über die Ergebnisse des Self-Assessments. Insgesamt zeigt sich bei den Bewertungsergebnissen ein sehr gemischtes Bild, wobei auch auffällt, dass keiner der Indikatoren tatsächlich eine sehr hohe Bewertung aufweist. Im Hinblick auf die RRI-Konformität besteht demnach noch ein deutliches Verbesserungspotential.

### Transparenz

Es zeigt sich eine gewisse Bereitschaft zur Transparenz, aber es gibt noch Raum für Verbesserungen, insbesondere in Bezug auf die Offenlegung von Praxisdetails, Verantwortlichkeiten und Eigentumsrechten sowie die Transparenz in der Kommunikation der Rolle und Einbindung der Akteure und der Integration von Stakeholder-Input. Durch entsprechende Verbesserungen könnte das Projekt seine RRI-Konformität in Bezug auf Transparenz erhöhen und auch das Vertrauen der Stakeholder stärken. Zudem kann eine Verbesserung der Transparenz bessere Grundlagen für die anderen Dimensionen, insbesondere bezüglich der Inklusion und Reflexion, schaffen.

### Inklusion

Zusammenfassend zeigt der Antrag eine insgesamt moderate bis hohe Konformität mit den Anforderungen der RRI-Dimension der Inklusion. Während der Antrag die Einbeziehung von Stakeholdern anerkennt und plant, sie zu beteiligen, könnte eine klarere Strategie für die Auswahl und Einbindung der Stakeholder sowie eine verstärkte Betonung auf kontinuierliche Beteiligung und Feedback die Bewertung verbessern.

### **Reflexion**

Für den Bereich der Reflexion deutet die Bewertung darauf hin, dass die Projektplanung zwar einige Reflexionsprozesse vorsieht, aber vor allem in Bereichen wie der kritischen Reflexion der zugrunde liegenden Problemstellung und den Verantwortlichkeiten aber auch den Werten und Motivationen noch Raum für Verbesserungen besteht. Zudem deutet die Projektplanung auf eine lediglich rudimentäre Analyse relevanter Akteure hin. Eine stärkere Betonung dieser Aspekte könnte dazu beitragen, die Qualität und Relevanz des Projekts zu verbessern sowie potenzielle Risiken und Herausforderungen frühzeitig zu adressieren.

### **Antizipation**

Basierend auf den Bewertungen zeigt die Projektplanung eine unterschiedlich hohe Konformität mit den Anforderungen der RRI-Dimension der Antizipation. Es gibt klare Bemühungen, problematische Auswirkungen und Ergebnisse zu identifizieren und zu berücksichtigen. Allerdings könnte die Identifizierung und Prüfung alternativer Pfade weiter verbessert werden, indem konkrete Methoden und Verfahren für diesen Prozess festgelegt werden. Zudem werden die erwünschten Auswirkungen und Ergebnisse lediglich pauschal unterstellt. Eine Etablierung diesbezüglicher Antizipationsstrategien könnte die Klarheit über die tatsächlichen Wirkungen des zu entwickelnden Produktes deutlich verbessern.

### **Responsivität**

Abschließend lässt sich sagen, dass die vorliegende Projektplanung eine moderate bis hohe Responsivität zeigt, indem er eine klare Bereitschaft zur Anpassung an interne Reflexion und externes Feedback signalisiert. Die Bewertung in Bezug auf die Möglichkeit zur Veränderung nach interner Reflexion und externem Feedback wurde daher als "Hoch" eingestuft. Das Projekt erkennt die Bedeutung von Feedback an, allerdings ist der Umgang damit noch verbesserungsfähig.

## 5 Literaturverzeichnis

- Amnesty International, 2016. "This is what we Die for". Human Rights Abuses in the Democratic Republic of the Congo Power the Global Trade in Cobalt.
- Batterieforum Deutschland, 2023. Projektdatenbank.
- Beylot, A., Villeneuve, J., 2017. Accounting for the environmental impacts of sulfidic tailings storage in the Life Cycle Assessment of copper production: A case study. *Journal of Cleaner Production* 153, 139–145.
- BGR, 2018. Experten diskutieren beim DERA-Industrieworkshop: Weiterhin hohe Marktrisiken bei der Versorgung mit Kobalt – einem Schlüsselrohstoff für die Elektromobilität.
- Binz, C., Truffer, B., 2017. Global Innovation Systems—A conceptual framework for innovation dynamics in transnational contexts. *Research policy* 46, 1284–1298.
- Cerdas, F., Andrew, S., Thiede, S., Herrmann, C., 2018. Environmental aspects of the recycling of lithium-ion traction batteries, in: *Recycling of Lithium-Ion Batteries*. Springer, pp. 267–288.
- Chandrasekaran, R., Magasinski, A., Yushin, G., Fuller, T.F., 2010. Analysis of lithium insertion/deinsertion in a silicon electrode particle at room temperature. *Journal of the Electrochemical Society* 157, A1139.
- Christensen, P.A., Anderson, P.A., Harper, G.D., Lambert, S.M., Mrozik, W., Rajaeifar, M.A., Wise, M.S., Heidrich, O., 2021. Risk management over the life cycle of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 148, 111240.
- Coleman, D., Gathergood, N., 2010. Biodegradation studies of ionic liquids. *Chemical Society Reviews* 39, 600–637.
- Crastan, V., Höckel, M., 2022. Elektrochemische Energiespeicherung, in: *Elektrische Energieversorgung 2*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 535–562. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-65105-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-662-65105-6_10)
- Dehghani-Sanij, A.R., Tharumalingam, E., Dusseault, M.B., Fraser, R., 2019. Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 104, 192–208.
- Diekmann, J., Grützke, M., Loellhoeffel, T., Petermann, M., Rothermel, S., Winter, M., Nowak, S., Kwade, A., 2018. Potential dangers during the handling of lithium-ion batteries, in: *Recycling of Lithium-Ion Batteries*. Springer, pp. 39–51.
- Dorrmann, L., Sann-Ferro, K., Heining, P., Mähliß, J., 2021. Kompendium: Li-Ionen-Batterien: Grundlagen, Merkmale, Gesetze und Normen.
- Elsner, P., Sauer, D.U., 2015. Energiespeicher–Technologiesteckbrief zur Analyse „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050“. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft.
- Erdmann, L., Behrendt, S., Feil, M., 2011. Kritische Rohstoffe für Deutschland:" Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel-bis langfristig als kritisch erweisen könnte"; Abschlussbericht. KfW.
- European Commission, 2014. Report on critical raw materials for the EU. European Commission.
- Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., He, X., 2018. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials* 10, 246–267.

- Frankel, T.C., Whoriskey, P., 2016. Tossed aside in the 'white gold' rush. Indigenous people are left poor as tech world takes lithium from under their feet. *Washington Post*.
- Gähns, S., Knoefel, J., 2018. Anforderungen verschiedener Stakeholder an Dienstleistungen mit Quartierspeichern. Ergebnisse einer Analyse von Stakeholderinterviews.
- Graedel, T.E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B.K., Sibley, S.F., Sonnemann, G., 2011. What Do We Know About Metal Recycling Rates? *Journal of Industrial Ecology* 15, 355–366. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x>
- Haregewoin, A.M., Wotango, A.S., Hwang, B.-J., 2016. Electrolyte additives for lithium ion battery electrodes: progress and perspectives. *Energy & Environmental Science* 9, 1955–1988.
- Hopp, H., 2016. Stand der Technik und Grundlagen von Lithium-Ionen-Batterien, in: *Thermomanagement von Hochleistungsfahrzeug-Traktionsbatterien anhand gekoppelter Simulationsmodelle*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, pp. 3–21. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-14247-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-14247-6_2)
- Iclodean, C., Varga, B., Burnete, N., Cimerdean, D., Jurchiș, B., 2017. Comparison of different battery types for electric vehicles, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, p. 012058.
- Joy, P., Azzopardi, T., 2019. Water Use in Atacama Salt Flat Trips Up Chilean Lithium Miner. *Bloomberg Law*.
- Kelly, A., 2020. Human rights activist “forced to flee DRC” over child cobalt mining lawsuit. *The Guardian*.
- Kelty, K., 2011. Tesla’s closed loop battery recycling program. *Tesla*.
- Kushnir, D., 2015. Lithium ion battery recycling technology 2015. Current state and future prospects 1–56.
- Lander, L., Cleaver, T., Rajaeifar, M.A., Nguyen-Tien, V., Elliott, R.J., Heidrich, O., Kendrick, E., Edge, J.S., Offer, G., 2021. Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling. *Iscience* 24, 102787.
- Leifker, M., Lincoln, S., Saenger, K., Hilbig, S., Müller, A., 2018. Das weiße Gold: Umwelt und Sozialkonflikte um den Zukunftsrohstoff Lithium.
- Li, C., Liu, C., Wang, W., Mutlu, Z., Bell, J., Ahmed, K., Ye, R., Ozkan, M., Ozkan, C.S., 2017. Silicon derived from glass bottles as anode materials for lithium ion full cell batteries. *Scientific reports* 7, 917.
- Li, Z., Li, C., Liu, X., Cao, L., Li, P., Wei, R., Li, X., Guo, D., Huang, K.-W., Lai, Z., 2021. Continuous electrical pumping membrane process for seawater lithium mining. *Energy & Environmental Science* 14, 3152–3159.
- Michaelis, S., Schütrumpf, J., Kampker, A., Heimes, H., Dorn, B., Wennemar, S., Scheibe, A., Wolf, S., Smulka, M., Ingendoh, B., 2023. Roadmap Battery Production Equipment 2030. Update 2023.
- Mrozik, W., Rajaeifar, M.A., Heidrich, O., Christensen, P., 2021. Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science* 14, 6099–6121.
- Nitta, N., Wu, F., Lee, J.T., Yushin, G., 2015. Li-ion battery materials: present and future. *Materials today* 18, 252–264.
- NPE, 2016. Roadmap integrierte Zell-und Batterieproduktion Deutschland.

- Öko-Institut, 2017. Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität.
- Olivetti, E.A., Ceder, G., Gaustad, G.G., Fu, X., 2017. Lithium-ion battery supply chain considerations: analysis of potential bottlenecks in critical metals. *Joule* 1, 229–243.
- Opray, M., 2017. Nickel mining: the hidden environmental cost of electric cars. *The Guardian*.
- Peters, J.F., Baumann, M., Zimmermann, B., Braun, J., Weil, M., 2017. The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 491–506.
- Pettinger, K.-H., Dong, W., 2016. When does the operation of a battery become environmentally positive? *Journal of the Electrochemical Society* 164, A6274.
- Rahimzei, E., Sann, K., Vogel, M., 2015. Kompendium: Li-Ionen-Batterien. Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen, VDE Verband der Elektrotechnik.
- Reuter, B., 2016. Assessment of sustainability issues for the selection of materials and technologies during product design: a case study of lithium-ion batteries for electric vehicles. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 10, 217–227.
- Rodrigues dos Santos, F., de Almeida, E., da Cunha Kemerich, P.D., Melquiades, F.L., 2017. Evaluation of metal release from battery and electronic components in soil using SR-TXRF and EDXRF. *X-Ray Spectrometry* 46, 512–521.
- Roman, J., 2018. Stranded Energy. The number of electric vehicles on the road is growing rapidly, even as critical questions remain about how to effectively respond to the most severe EV crashes. *NFPA Journal*.
- Romare, M., Dahllöf, L., 2017. The life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions from lithium-ion batteries.
- Sharma, S.S., Manthiram, A., 2020. Towards more environmentally and socially responsible batteries. *Energy & Environmental Science* 13, 4087–4097.
- Sherwood, D., 2018. A water fight in Chile's Atacama raises questions over lithium mining. *Reuters*.
- Stepnowski, P., Mroziak, W., Nischthäuser, J., 2007. Adsorption of alkylimidazolium and alkylpyridinium ionic liquids onto natural soils. *Environmental science & technology* 41, 511–516.
- Stewart, F., 2022. Friends with benefits: How income and peer diffusion combine to create an inequality “trap” in the uptake of low-carbon technologies. *Energy Policy* 163, 112832.
- Szymański, K., Janowska, B., 2016. Migration of pollutants in porous soil environment. *Archives of Environmental Protection* 42, 87–95.
- Thies, C., Kieckhäfer, K., Spengler, T.S., Sodhi, M.S., 2019. Assessment of social sustainability hotspots in the supply chain of lithium-ion batteries. *Procedia CIRP* 80, 292–297.
- USGS, 2013. MINERAL RESERVES, RESOURCES, RESOURCE POTENTIAL, AND CERTAINTY.
- Wall, F., Rollat, A., Pell, R.S., 2017. Responsible sourcing of critical metals. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology* 13, 313–318.
- Wang, Q., Liu, W., Yuan, X., Tang, H., Tang, Y., Wang, M., Zuo, J., Song, Z., Sun, J., 2018. Environmental impact analysis and process optimization of batteries based on life cycle assessment. *Journal of cleaner production* 174, 1262–1273.
- Whoriskey, P., 2016. In your phone, in their air. A trace of graphite is in consumer tech. In these Chinese villages, it's everywhere. *Washington Post*.

- Wiarda, M., van de Kaa, G., Yaghmaei, E., Doorn, N., 2021. A comprehensive appraisal of responsible research and innovation: From roots to leaves. *Technological Forecasting and Social Change* 172, 121053.
- Winslow, K.M., Laux, S.J., Townsend, T.G., 2018. A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling* 129, 263–277.
- Xu, Y., Xue, X., Dong, L., Nai, C., Liu, Y., Huang, Q., 2018. Long-term dynamics of leachate production, leakage from hazardous waste landfill sites and the impact on groundwater quality and human health. *Waste Management* 82, 156–166.
- Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M., Pasaoglu, G., 2018. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89, 292–308.