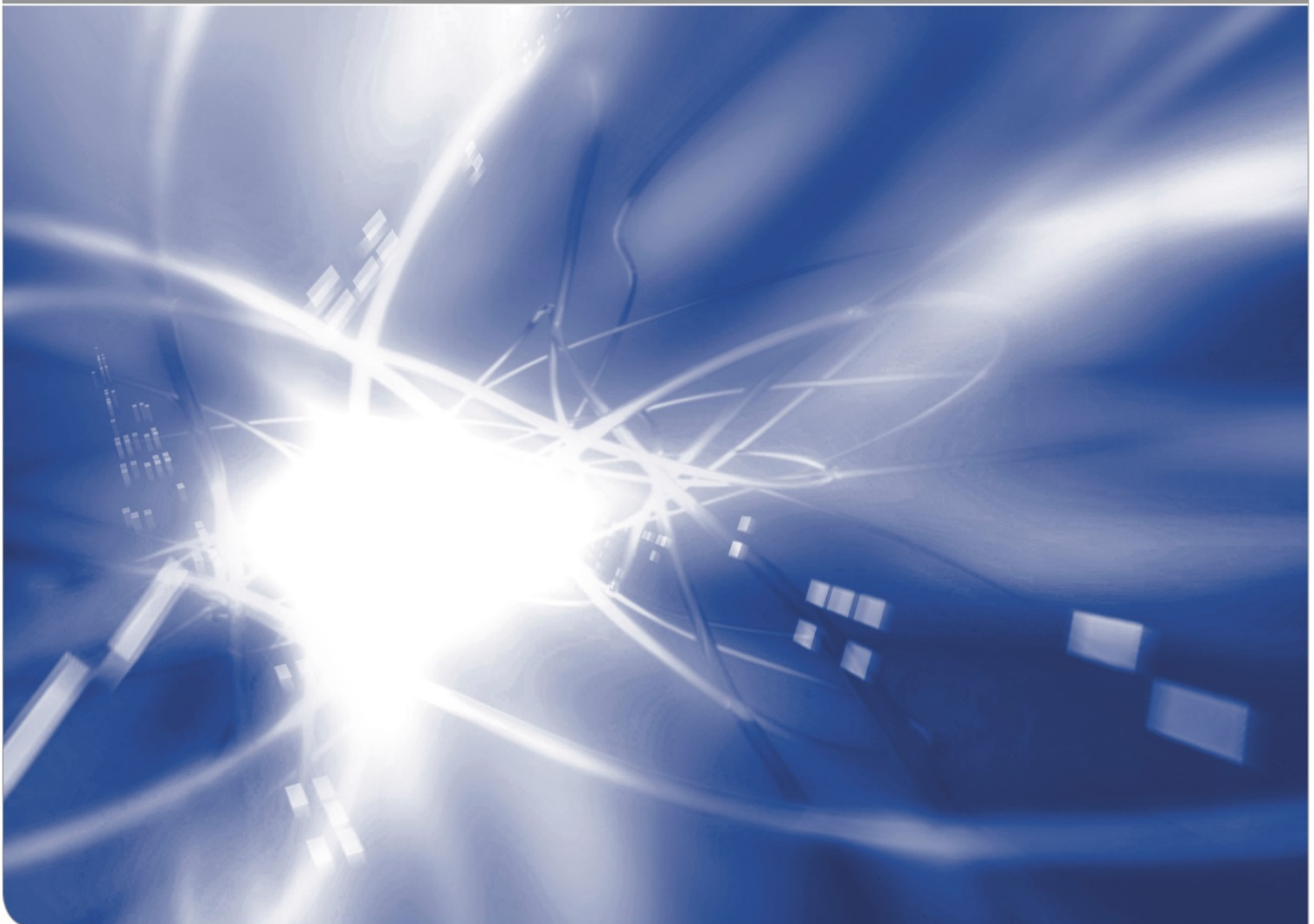


# **Recycling aktueller und zukünftiger Batteriespeicher: Technische, ökonomische und ökologische Implikationen**

Ergebnisse des Expertenforums am 6. Juni 2018 in Karlsruhe

Jens F. Peters<sup>1</sup>, Manuel Baumann<sup>2</sup>, Marcel Weil<sup>1,2</sup>

KIT SCIENTIFIC WORKING PAPERS 99



Diese Publikation enthält die gesammelten Ergebnisse des Workshops und Expertenforums vom 6.Juni 2018 in Karlsruhe

## Eine Initiative des Helmholtz-Exzellenznetzwerks `Post-Lithium Batteries´ (pLB)

<sup>1</sup> Helmholtz-Institute Ulm (HIU), Research Group Resources, Recycling, Environment and Sustainability; Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

<sup>2</sup> Institute for Technology Assessment and Systems Analysis (ITAS); Karlsruhe Institute of Technology (KIT)



Karlsruhe Institut für Technologie (KIT)

Helmholtz-Institute Ulm für elektrochemische Energiespeicher (HIU)

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)

Karlstr. 11

76133 Karlsruhe

[https://www.itas.kit.edu/veranstaltungen\\_2018\\_batteriespeicher.php](https://www.itas.kit.edu/veranstaltungen_2018_batteriespeicher.php)

### Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

[www.kit.edu](http://www.kit.edu)



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0):

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

2018

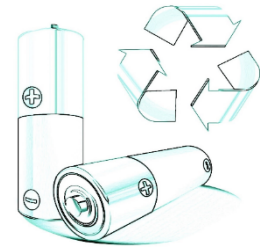
DOI: 10.5445/IR/1000085778

ISSN: 2194-1629

## Expertenforum

### Recycling aktueller und zukünftiger Batteriespeicher - Technische, ökonomische und ökologische Implikationen

6. Juni 2018



## Inhalt

1. Hintergrund .....	2
2. Ziel und Rahmen des Workshops .....	2
3. Ergebnisse.....	3
3.1. Aktuelle Recyclingprozesse .....	3
3.2. Ökonomische und ökologische Aspekte des Batterierecyclings .....	4
3.3. Zukünftige Batterietechnologien.....	6
Solid state .....	6
3.4. Herausforderungen des Batterierecyclings.....	7
3.5. Ansätze zur Überwindung der identifizierten Herausforderungen.....	8
Elektrolyte .....	8
Demontage:.....	9
Stoffvielfalt und vermischte Altbatterieströme .....	10
Sicherheitsaspekte .....	12
Kosten bzw. Wirtschaftlichkeit des Recyclings.....	12
Wirtschaftliche und ökologische Grenzen des Recyclings .....	13
Informelles Recycling in Drittländern.....	14
Zweitnutzung / Wiederaufbereitung gebrauchter Batterien.....	14
Ressourcenengpässe / Knappheiten trotz Recyclings .....	14
Weiterführende Aspekte .....	15
3.6. Stakeholder Befragung.....	15
4. Zusammenfassung.....	17

## 1. Hintergrund

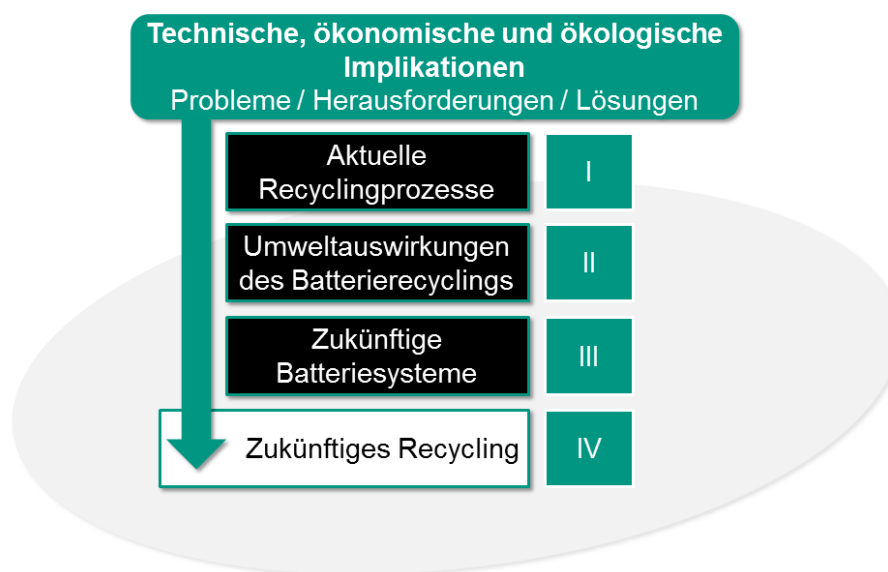
Das Recycling gegenwärtiger Li-Ion Batterien ist aufwendig und zum Teil mit erheblichen Kosten und Umweltauswirkungen verbunden. Ferner können (je nach Recyclingtechnologie) auch nur ein Teil der Wertstoffe wiedergewonnen werden. Jedoch wird ein möglichst vollständiges Recycling aufgrund der Endlichkeit mineralischer Ressourcen und der teils hohen Umweltbelastung aus der Rohstoffgewinnung als zentral für eine positive Umweltbilanz von Batteriespeichern gesehen. Unabhängig davon werden gegenwärtig einige post-Lithium Speichersysteme entwickelt, über deren prinzipielle Rezyklierbarkeit noch sehr wenig bekannt ist. Experten aus verschiedenen Disziplinen und Institutionen wie Forschung, Industrie oder Politikberatung diskutierten auf dem eintägigen Workshop die grundlegenden Fragen in Hinsicht auf ein zukünftiges Batterierecycling. Dabei wurden unternehmerische Aspekte, Regularien, potentielle Umweltauswirkungen sowie die mögliche Anwendbarkeit gegenwärtiger und zukünftiger Recyclingverfahren auf die verschiedenen Batterie- und Zellchemien behandelt.

## 2. Ziel und Rahmen des Workshops

Der Workshop fand am 6. Juni in Karlsruhe am ITAS (KIT) statt und umfasste insgesamt 19 Teilnehmer. Davon waren vier aus der Industrie (Recyclingfirmen, Verbindungstechnik), vier aus dem Bereich der Recyclingindustrie, jeweils zwei Teilnehmer der Recyclingforschung und der Batterieforschung, sieben Vertreter des Bereichs Systemanalyse (mit verschiedenen Schwerpunkten) sowie zwei Vertreter von Verbänden und Politikberatung.

Die Hauptziele des eintägigen Workshops waren (i) die Vernetzung von Experten unterschiedlicher Disziplinen (Forschung, Industrie, Politik); (ii) das Schaffen eines gemeinsamen Verständnisses bzgl. der Wichtigkeit der Recyclingfähigkeit zukünftiger Batterien für nachhaltigere Energiespeichertechnologien; (iii) die Identifizierung von zukünftigem Forschungs- und Förderungsbedarf in dieser Hinsicht sowie (iv) das Ermitteln erster Schlüsselkriterien für einen recyclingfreundlicheren Aufbau von Batterien.

Erklärtes Ziel war es eine starke Interaktivität zu gewährleisten, deshalb wurde eine kleine Gruppengröße mit ausgedehnten Diskussionen im Plenum gewählt. Kurze Impulspräsentationen am Beginn jedes Blockes stellten dabei die Diskussionsbasis. Eine schematische Repräsentation des Ablaufes ist in Abbildung 1 zu sehen.



**Abbildung 1:** Struktur des Workshops

## 3. Ergebnisse

### 3.1. Aktuelle Recyclingprozesse

Der erste Schritt nach der Anlieferung und grobe Identifizierung der Batterien ist die Demontage der Batteriepacks. Hier wird auf manuelles Zerlegen gesetzt, da die Vielfalt der Bauformen derzeit zu groß für eine Automatisierung ist. In Anbetracht der voraussichtlich großen Anzahl an Altbatterien durch Elektroautos erscheint zumindest zukünftig eine Teilautomatisierung unumgänglich, weshalb Forschungen diesbezüglich angestellt werden, wie zum Beispiel AutoBatRec2020 des Fraunhofer ISC. Jedoch ist fraglich, ob eine Automatisierung jemals stattfinden wird, da auch heute z.B. Elektroaltgeräte trotz hoher Durchsätze und etablierter Technologie immer noch manuell zerlegt werden.<sup>1</sup> Hier könnte sich ein potenzieller Standortnachteil für Hochlohnländer ergeben, durch hohe Anteile manueller Arbeit die Kosten eines Recyclingprozesses steigen und somit die Wirtschaftlichkeit sinkt. Bei der Zerlegung der Batteriemodule erschweren insbesondere Schweißverbindungen und Verklebungen an den Batteriemodulen die Demontage grundlegend. Auch das Auftrennen der Verbindung einzelner Zellen ist aufwendig und erhöht damit die Kosten. Jedoch ermöglicht ein Zerlegen bis auf Zellebene eine deutlich höhere Recyclingeffizienz, insbesondere da auf dieser Ebene Materialien sortenrein zurückgewonnen werden können (z.B. Verbinder, Leiterbleche, Kabel etc.). Alternative Verbindungstechniken und mechanisierte bzw. automatisierte Trennverfahren von Zellverbindungen werden beispielsweise vom Fraunhofer Institut untersucht, jedoch sind für den OEM Sicherheit und Kosten von höherer Priorität. In der Praxis sind nicht nur die Verbindungen, die den elektrischen Kontakt herstellen, sondern auch die mechanischen Verbindungen problematisch, da die einzelnen Zellen eines Packs zur Versteifung oder Sicherheit oft miteinander verklebt oder gar verschweißt sind. Als negatives Beispiel wurden Li-S Batterien genannt, welche verschweißt sind und im Recyclingprozess bei einem Innendruck von 30bar explosionsartig zerbersten können, mit entsprechend schweren verfahrenstechnischen Problemen. Nach dem Zerlegen und Separieren der Peripheriekomponenten werden die Batteriezellen dem Recyclingprozess zugeführt.

Die Identifizierung bestimmter Zelltypen und Zellzusammensetzungen ist dabei extrem aufwendig, wenn nicht sogar unmöglich, da jeder Zellhersteller eine proprietäre Stoffmischung verwendet und diese nicht vollständig zugänglich macht. Des Weiteren kann sich die Materialzusammensetzungen eines bestimmten Zellmodells über den Produktionszeitraum ändern, womit bei den Endprodukten gleichen Typs effektiv unterschiedliche Batterien verbaut sein können. Da es zahlreiche Hersteller und Varianten von Zellen gibt und zudem keine Kennzeichnungspflicht besteht, ist eine präzise optische Identifizierung einzelner Zellen kaum möglich, es kann lediglich eine grobe Einsortierung vorgenommen werden. Die Identifizierung der Batteriezellen erfolgt deshalb meist durch Experten sowie bei größeren Chargen per expliziter chemischer Analyse. Diese Analyse ist auch die Basis für die Bestimmung der Prozesskosten und fließt mit in den Annahmepreis ein.

Bei den aktuell etablierten Verfahren zum Recycling von Batteriezellen kann zwischen verschiedenen Prozessen unterschieden werden. Konventionelle kommerzielle Prozesse werden zurzeit pyrometallurgisch oder hydrometallurgisch durchgeführt, während kleinere Firmen (z.B. Duesenfeld) meist proprietäre Prozesse einsetzen, welche Weiterentwicklungen der etablierten Verfahren darstellen. An alternativen Verfahren zur Materialtrennung und Aufbereitung wird geforscht, wie z.B. die elektrohydraulische Zerlegung durch Schockwellen (Fraunhofer, Projekt NeW-Bat), welches versucht, die Komponenten an den Materialübergängen aufzubrechen und so eine verbesserte Fraktionierung zu erreichen. Pyrometallurgische Verfahren sind robuster in Bezug auf die

---

<sup>1</sup> H. Martens, Recycling von Elektro- und Elektronikgeräten. In: Recyclingtechnik - Fachbuch für Lehre und Praxis, Spektrum Akademischer Verlag, 2011

Zellzusammensetzung als Recyclingprozesse, die auf Hydrometallurgie basieren. Deshalb werden sie bei schwer zu identifizierenden Batterien bevorzugt eingesetzt.

Bei den im Workshop vorgestellten aktuell eingesetzten Recyclingprozessen entweicht der flüssige und flüchtige Elektrolyt aus den Zellen und wird in einem thermischen Verfahren genutzt, um einen Teil der erforderlichen Prozesswärme bereitzustellen. Die Elektrolyte sind fluorhaltig, weshalb die entstehenden Produkte, insbesondere die Abgase, aufwändig nachbereitet werden müssen. Der flüssige Elektrolyt stellt dabei aufgrund seiner Flüchtigkeit, Entzündlichkeit und Toxizität eine der größten Herausforderungen für die Prozesskette dar.

Der zurzeit bestimmende Faktor für die Wirtschaftlichkeit des Recyclings von Lithium-Ionen Batterien ist deren Kobaltgehalt. Daneben tragen noch das rückgewonnene Nickel und Kupfer zur Wertschöpfung bei, sowie die sortenrein aus dem Zerlegen der Gehäuse (Batteriepacks) gewonnenen Materialien. Der Trend zu Kathodenmaterialien mit sinkendem Kobaltgehalt reduziert den Wert der Recyclingprodukte, sodass vor allem für Traktionsbatterien Annahmekosten erhoben werden müssen, während der Anteil des Kobalts in Consumer Batterien so hoch liegt, dass bei Rückgabe ein Bonus gezahlt werden kann. Da manche Zellchemien wie bspw. LFP aus vergleichsweise günstigen Materialien bestehen, können die aus den Recyclingprozessen entstehenden Produkte entweder nicht zu dem Wettbewerb entsprechendem Wert oder nur in zu geringer Menge verkauft werden. In Verbindung mit fehlenden Wertstoffe wie Kobalt oder Nickel können diese Recyclingprozesse kaum wirtschaftlich betrieben werden.

### 3.2. Ökonomische und ökologische Aspekte des Batterierecyclings

Es existieren bereits mehrere Studien zu den potentiellen Umweltauswirkungen und –nutzen von Batterierecyclingprozessen.<sup>2,3,4</sup> Dabei kommt die Mehrheit der Arbeiten zu dem Schluss, dass der größte Nutzen in den ersten Prozessschritten erzielt wird, d.h. dem mechanischen Zerlegen der Batteriepacks, deren Gehäuse und Batteriemodule, wo die einzelnen Komponenten vollständig und sortenrein getrennt und individuell einer geeigneten Wiederverwertung zugeführt werden können. Allerdings ist auch hier selbst bei Massenmaterialien (Stahl, Aluminium) die genaue Legierung oft unbekannt, was ein hochwertiges Recycling (d.h. unter Minimierung von Qualitätsverlusten) verhindert. Das Recycling der Batteriezellen selbst erscheint energieaufwendig, benötigt teils erhebliche Mengen an chemischen Hilfsprodukten bei hydrometallurgischen Prozessen und ermöglicht eine Rückgewinnung von nur einem Teil der Ausgangsmaterialien, was den ökologischen Nutzen deutlich verringert. Teilweise ist sogar der Aufwand höher als der Nutzen, so dass dieser Prozessschritt (abhängig von der betrachteten Wirkungskategorie) zu einer Erhöhung der Umweltbelastung führen kann. Eine stärkere Fokussierung auf eine frühzeitige, chemikalienfreie Trennung von Batteriekomponenten würde die Wahrscheinlichkeit erhöhen, sortenreine Materialien zurückzugewinnen und diese mit hoher Qualität zu recyceln. Dabei ist die Bauart der Zelle (Pouch, prismatic, Rundzelle) eher nebensächlich, während die Zellchemie von hoher Bedeutung ist. In starker Korrelation mit ökonomischen Kriterien wird der höchste ökologische Mehrwert aus dem Recycling von Zellen mit hohem Kobalt und Nickelgehalt erzielt, da die Gewinnung dieser (vergleichsweise teuren) Metalle ebenfalls mit hohen Umweltbelastungen verbunden ist.

---

<sup>2</sup> M. Buchert, J. Sutter: Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren EcoBatRec für Lithium-Ionen-Batterien. Öko Institut, Berlin/Darmstadt, 2016

<sup>3</sup> M. Buchert, J. Sutter: Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien. Öko Institut, Berlin/Darmstadt, 2016

<sup>4</sup> L. Unterreiner, V. Jülch, S. Reith: Recycling of Battery Technologies – Ecological Impact Analysis Using Life Cycle Assessment (LCA). Energy Procedia 99, 2016, 229-234

Dagegen kann die Zurückgewinnung von einfach abzubauenen Metallen wie z.B. Lithium oder Eisen aus den Batteriezellen fallweise sogar mit höheren Umweltbelastungen verbunden sein als deren Gewinnung als Primärrohstoffe. In diesem Fall wäre ein Recycling dieser Materialien ökologisch nicht sinnvoll, obwohl es dies z.B. unter Aspekten der strategischen Leitung des Materialflusses durchaus sein kann. Hier zeigen sich die ökologischen Grenzen des Batterierecyclings auf, denn ein 100%iges Recycling aller Bestandteile ist womöglich nicht sinnvoll. Somit müsste eine ökologisch optimale Recyclingtiefe identifiziert werden, über die hinaus Aufwand mit zunehmender Rückgewinnungsrate exponentiell ansteigt und den zusätzlichen Nutzen überkompensiert. Die ist jedoch auch abhängig vom Ursprung der Primärressourcen die durch die Recyclingmaterialien ersetzt werden, und mit zunehmend schwindenden Ressourcen würde sich das Bild in zeitlicher Abhängigkeit ändern. So wird zum Beispiel bereits jetzt ein zunehmend großer Anteil des Lithiumbedarfs durch Spodumene-Abbau gedeckt. Dieser ist mit höheren Umweltauswirkungen verbunden als das aus Salzlauge gewonnene Lithium, weshalb eine Rückgewinnung von Lithium mit zunehmenden Anteilen an Spodumene basiertem Lithium konkurrenzfähig werden könnte.

Während es aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll sein mag, Batterien für das Recycling in Drittländer zu exportieren, könnte dies, aufgrund der zum Teil deutlich niedrigeren Umweltstandards, zu erhöhten Umweltbelastungen durch das Recycling führen. So werden in manchen Fällen die Zellen ohne besondere Vorkehrungen geöffnet, um den Elektrolyt ungefiltert in die Atmosphäre verdampfen zu lassen und die trockenen Zellen anschließend zu recyceln. Auch die Abgasbehandlung eines Recyclingprozesses, einer der kritischen Punkte unter Umweltaspekten, hätte womöglich niedrigere Standards zu erfüllen. Für low-cost Batterien (z.B. aus LFP-Batterien), die außer Kupfer keine wertvollen Metalle enthalten, ist es wirtschaftlich uninteressant die Schwarzmasse weiterzuverarbeiten, weshalb diese dann unkontrolliert bzw. informell mit den entsprechenden Umweltauswirkungen entsorgt werden könnte. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in Europa aktuell 30-40 % der Altbatterien nicht in der Sammelstelle abgegeben werden, sondern auf anderen Pfaden entsorgt werden, weshalb diese Aspekte durchaus zu betrachten sind. Auch wurde angemerkt, dass eine Bindung von Stoffströmen an Europa Vorteile hätte, jedoch war dieser Punkt kontrovers. Die Sicherung von kritischen Ressourcen ist erstrebenswert, jedoch nicht unbedingt sinnvoll wenn die Batterieproduktion in Asien stattfindet und somit Europa keinen Bedarf an diesen Rohstoffen hat.

Die Nutzumwandlung nach Erstgebrauch (Re-use) und die Wiederaufarbeitung (Refurbish) von gebrauchten Batterien verlängert deren Lebenszeit und ist deshalb ökologisch vorteilhaft. Allerdings gibt es auch hier Bedenken seitens der anwesenden Vertreter von Recyclingfirmen bezüglich der Anforderung, Batterien sortenrein zu sammeln und diese einem frühzeitigen Recyclings zuzuführen mit dem Ziel, möglichst hochqualitative Materialien zurückzugewinnen.

Bezüglich Aspekten der Ressourcenverfügbarkeit gibt es Hinweise, dass es für eine weltweite 100% erneuerbare Energieversorgung selbst im Falle einer kreislaufgeführten Batteriewirtschaft zu Ressourcenengpässen kommen könnte. Selbst mit effizientem Batterierecycling würden durch das zu erwartende exponentielle Wachstum enorme Mengen an Ressourcen benötigt werden. Deren Größenordnung hängt stark von den zugrundeliegenden Annahmen (Zukunftsszenarien) und damit von den einzelnen Studien ab, jedoch werden die Grenzen einer Kreislaufwirtschaft im Rahmen von exponentiellen Wachstumsszenarien aufgezeigt.<sup>5,6</sup>

---

<sup>5</sup> Weil, M.; Ziemann, S.; Peters, J. The issue of metal resources in li-ion batteries for electric vehicles. In: Pistoia, G.; Liaw, B. (Hrsg.): Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. Battery Health, Performance, Safety, and Cost. Springer, 2018, S. 59-74.

<sup>6</sup> Weil, M.; Ziemann, S. Recycling of traction batteries as a challenge and chance for future lithium availability. In: Pistoia, G. (Hrsg.): Lithium-Ion Batteries: Advances and applications. Elsevier, 2014, S. 509-528

### 3.3. Zukünftige Batterietechnologien

Aktuelle Recyclingverfahren konzentrieren sich auf gegenwärtige Batterietypen, da selbst hier der Rücklauf zeitverzögert stattfindet (10-20 Jahre bei automotive-Batterien), weshalb neue Batterietechnologien erst auf lange Sicht relevant werden. Jedoch ist es sinnvoll, auch neue Entwicklungen zu analysieren, weniger um die Recyclingprozesse entsprechend zukunftsfähig zu gestalten als vielmehr bei der Entwicklung neuer Batterietechnologien bereits deren potentielle Recyclingfähigkeit im Auge zu behalten und dadurch ein „Design for Recycling“ zu erreichen.

Derzeit wird an halogenfreie Elektrolyten geforscht, jedoch wird selbst in Prototypen weiterhin Fluor eingesetzt, weshalb weiterhin eine Abgasnachbehandlung beim Recycling erforderlich sein wird. Insgesamt ist über die Rezyklierbarkeit von neuartigen Batteriekonzepten bisher wenig bekannt. Für Batterien, die vom Aufbau den aktuellen LIB ähnlich sind, können die meisten Erfahrungen direkt übertragen werden, weshalb hierzu wenig tiefere Diskussionen stattfanden. Eine Ausnahme sind Solid State Batterien (SSB), welche vergleichsweise ausgiebig diskutiert wurden, vor allem aufgrund des Wegfalls von flüssigen Elektrolyten, was auch in Hinsicht auf die Recyclingprozesse einen grundlegenden konzeptionellen Unterschied zu gängigen Batterien ausmacht.

#### Solid state

Solid state Batterien (SSB) vermeiden potentiell das Problem des flüssigen und fluorhaltigen Elektrolyten. Um Recyclingprozess wesentlich zu vereinfachen, dürften die Batterien keinerlei Halogene mehr enthalten, denn sonst ist eine aufwendige Abgasbehandlung ohnehin erforderlich. Dies würde die Kosten zur Nachbearbeitung von Gasen deutlich verringern. Mit dem Elektrolyt fällt jedoch auch eine wichtige Quelle für die benötigte Prozessenergie weg, die in mehreren Recyclingprozessen durch Verbrennen von Elektrolyt und Graphit gewonnen wird. Diese müsste bei SSB extern zugeführt werden.

Aktuell vielversprechende keramische Separatoren für SSB sind häufig mit Halbmetallen wie z.BV. Germanium dotiert.<sup>7,8,9</sup> Hieraus ergibt sich ein potentiell Problem, da die Dotierungsstoffe nur sehr schwer aus der keramischen Struktur herausgewonnen werden können, da hierfür sehr hohe Temperaturen erforderlich sind. Zudem handelt es sich bei den vielversprechendsten Dotierungsmaterialien um vergleichsweise seltene Elemente. Diese werden aufwendig und unter vergleichsweise hohen wirtschaftlichen und ökologischen Kosten gewonnen, weshalb deren Wiedergewinnung wahrscheinlich zentral für das Recycling sein wird. Elementares Recycling von Keramikmaterialien ist jedoch praktisch nicht möglich. Zu untersuchen wäre hier insbesondere die Möglichkeit des funktionellen Recyclings, in diesem Fall die Separierung und Wiederverwendung des keramischen Separators.

Alternativ wird auch an organischen Separatoren für SSB geforscht (Polymeren). Hier würde bei einem Recycling ein energetischer Vorteil gegenüber den Keramiken auftreten, da sie sich bereits bei niedrigen Temperaturen zersetzen. Polymere sind jedoch mit aktueller Technologie ebenfalls nicht stofflich recyclebar und könnten demnach im Recyclingprozess höchstens als Energielieferant ähnlich dem Elektrolyt bestehender LIB in pyrometallurgischen Prozessen dienen.

---

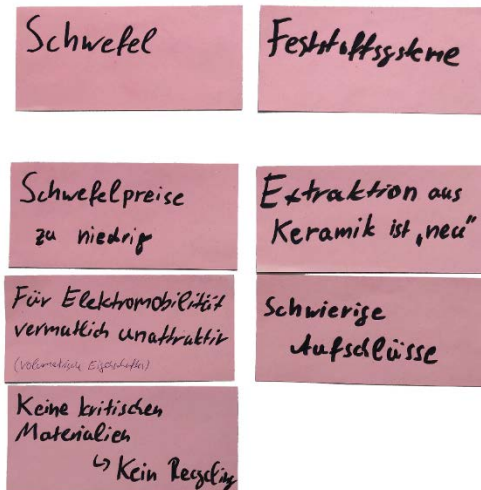
<sup>7</sup> A. Hayashi, T. Ohtomo, F. Mizuno, K. Tadanaga, M. Tatsumisago. All-solid-state Li/S batteries with highly conductive glass-ceramic electrolytes. *Electrochem Comm* 5(8), 2003, 701-705

<sup>8</sup>, X. Huang: Separator technologies for lithium-ion batteries. *J Solid State Electrochem* 15(4), 2011, 649–662

<sup>9</sup> A. Manthiram, X. Yu, S. Yu: Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes. *NatRevMat*, 2(16103), 2017



Metall-Schwefel Metall-Schwefel Systeme wurden ebenfalls explizit erwähnt, jedoch mehr als Beispiel für einen unzureichenden wirtschaftlichen Anreiz des Recyclings bei Low Cost Batterien.<sup>10,11</sup> Hier wird aktuell nicht erwartet, dass mit den zurückgewonnenen Materialien ein marktfähiges Produkt entsteht, weshalb sich erneut die Frage nach einem ökonomisch und ökologisch sinnvollen Recycling stellt. Unter prozesstechnischen Aspekten wurden außerdem negative Erfahrungen mit Li-S Zellen erwähnt, welche verschweißt sind und dadurch im Recyclingprozess einen sehr hohen Innendruck aufbauen, was zum unkontrollierten explosionsartigen Zerplatzen der Zellen führt.



**Abbildung 2:** Potenzielle Probleme des Recyclings zukünftiger Batteriesysteme

### 3.4. Herausforderungen des Batterierecyclings

Die prinzipiellen Herausforderungen, die für aktuelle Recyclingverfahren im Rahmen des Workshops auf Prozessebene herausgearbeitet wurden, sind folgende:

- Elektrolyt (flüssig fluorhaltig, flüchtig, entzündlich). Dieser bereitet große Probleme bei der Handhabung und Verarbeiten der Batterien
- Demontage der Batteriemodule. Schwer demontierbare Stacks/Packs (verklebt, verschweißt) erschwert Recycling massiv. Aktuell kein Design for Recycling
- Stoffvielfalt und Schwierigkeit der Identifikation der Zellchemie in vermischten Altbatterieströmen, fehlende Information über Typ und Inhalt von Batterien
- Sicherheitsaspekte (Brand- Explosionsgefahr), insbesondere in Hinsicht auf neue Zellchemien wie z.B. Li-S

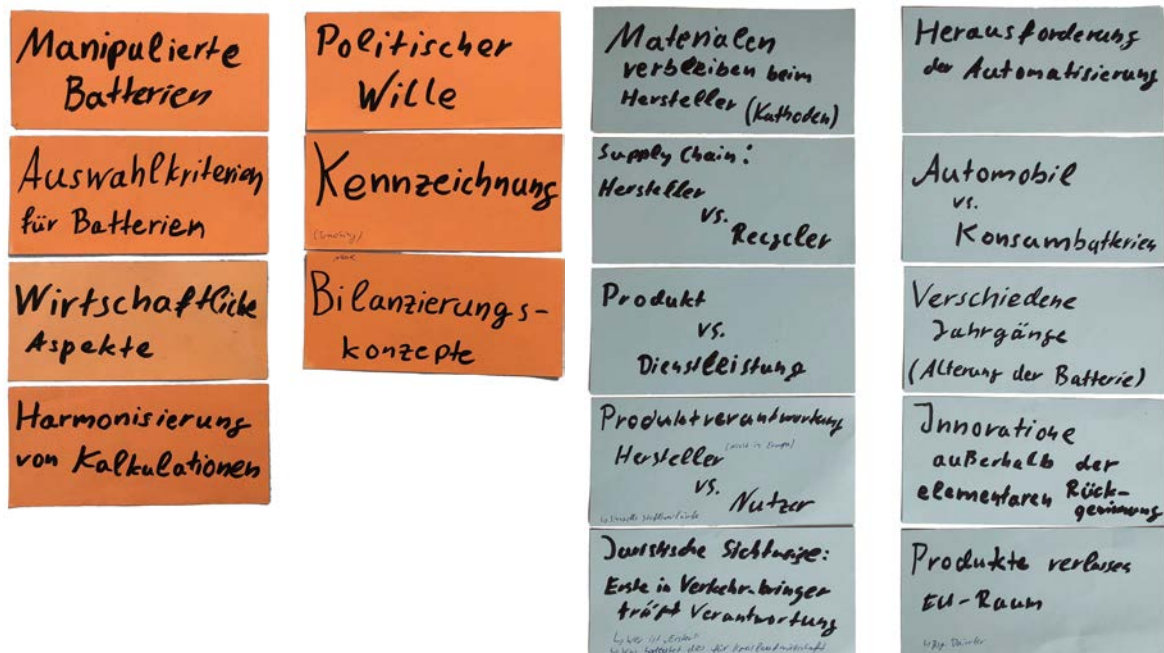
Unter Umwelt- und Wirtschaftlichkeitsaspekten wurden außerdem die folgenden Aspekte als besonders relevant erachtet:

- Kosten bzw. Wirtschaftlichkeit des Recyclings, insbesondere in Hinsicht auf sinkenden Anteil von Wertstoffen
- Wirtschaftliche und ökologische Grenzen des Recyclings unklar, aktuelle starre Recyclingquote kann dies nicht berücksichtigen
- Informelles und meist umweltschädliches Recycling in Drittländern

<sup>10</sup> V. Palomares, P. Serras, I. Villaluenga, K. Hueso, J. Carretero-González, T. Rojo: Na-ion batteries, recent advances and present challenges to become low cost energy storage systems. Energy Environ. Sci. 5, 2012, 5884-5901

<sup>11</sup> Z. Wen, J. Cao Z. Gu, X. Xu, F. Zhang, Z. Lin: Research on sodium sulfur battery for energy storage. Solid State Ionics 179(27-32), 2008, 1697-1701

- Fehlendes Wissen zu Nutzen und Umsetzbarkeit von Zweitnutzung / Wiederaufbereitung gebrauchter Batterien, eventuelle Zielkonflikte
- Ressourcenengpässe / Knappheiten eventuell auch trotz Recyclings ein Problem



**Abbildung 3:** Aktuelle Herausforderungen des Recyclings (linke zwei Spalten) und potenzielle zukünftige Problemstellungen (rechte zwei Spalten)

### 3.5. Ansätze zur Überwindung der identifizierten Herausforderungen

#### Elektrolyte

Es werden zunehmend wässrige Binder in den Anoden verwendet (Vermeidung von PVdF), und auch für Kathoden wird an der Verwendung wässriger Binder geforscht. Dadurch wird der Gesamtfluorgehalt in den Batteriezellen deutlich reduziert, aber der größte Anteil, welchen die fluorbasierten Elektrolytsalze ausmachen, bleibt bestehen. Eine Alternative dazu wären wässrige Elektrolyte, aber diese bleiben in ihrer Leistungsfähigkeit weit hinter deren organischen Pendanten zurück, weshalb aktuell kein nennenswerter Einsatz stattfindet. Ein großer Fortschritt könnte durch die Etablierung von Festkörperbatterien (Solid State Batterien – SSB) erzielt werden, welche die flüssigen Elektrolyte und die daraus entstehenden Probleme komplett vermeiden. Eine komplett halogenfreie Batterie würde wesentliche Verbesserungen für den Recyclingprozess mit sich bringen, da die aufwendige und teure Reinigung der Abgase von Halogenen und deren Säuren entfiel. Jedoch ist dies nur der Fall, wenn eine sortenreine Zufuhr von halogenfreien Zellen in den Prozess sichergestellt werden kann. Solange gemischte Altbatterieströme verarbeitet werden, wird dies nicht der Fall sein.



**Abbildung 4:** Identifizierung der wichtigsten Problemstellen und Herausforderungen für ein effizienteres Batterierecycling

#### Demontage:

Die Verbindungstechniken stellen eine große Hürde für eine automatisierte und damit kosteneffiziente Zerlegung der Batteriepacks in einzelne Batteriezellen dar. Im Fokus der Hersteller ist allerdings nicht die Rezyklierbarkeit des Packs, sondern dessen Leistung, Integrierbarkeit, Sicherheit und Kosten. Wird hingegen auf das Recycling zu Lasten der Leistungsfähigkeit gesetzt, kann das zu einem nicht erfolgreichen Produkt führen: Kunden setzen ihr Augenmerk verstärkt auf die Leistung und Kosten eines Produkts und da sich eine gute Rezyklierbarkeit im Allgemeinen invers dazu verhält, führt dies zu einem unerwünschten Endprodukt. Gegen die einfache Auftrennung der Batterien spricht außerdem eine gewünschte Robustheit und die damit verbundene Sicherheit. So sollen Akkupacks in Autos bei einem Unfall möglichst kein Elektrolyt austreten lassen, da dieses leicht entflammbar ist und eine unmittelbare Gefahr darstellen würde. Auch beim Transport der Batterien nach dem End-of-Life (EoL) wird eine stabile Verpackung der Zellen gefordert. Aus Sicht der Recycler wäre dagegen eine Vermeidung von Klebe- und Schweißverbindungen auf Zell- und Modulebene wünschenswert. An partikulären Zusätzen für Klebeverbindungen für leichtere Trennung wird geforscht;<sup>12</sup> dies würde eine Vereinfachung der Demontage mit sich bringen.

Ein gutes und erfolgreiches Design for Recycling kann somit nur stattfinden, wenn Entwickler/Produzenten mit der Recyclingsparte kommunizieren und die Kritikpunkte berücksichtigen. Bei Lithium-Ionen-Batterien ist das derzeit nicht oder nur beschränkt der Fall, da sich Produzenten und Recycler nicht nur die Absicht betreffend, sondern auch lokal gesehen weit entfernt voneinander befinden und so der Dialog kaum stattfindet. Hier müssten dringend entsprechende Anreize geschaffen werden.

Nichtsdestotrotz wird ein „Design for Recycling“ von den Teilnehmern des Workshops als entscheidender Aspekt für eine zukünftige umweltfreundlichere Batteriewirtschaft gesehen. Das

<sup>12</sup> Lekakou, C.; Sorniotti, A.; Lei, C.; Markoulidis, F.; Wilson, P.C. et al. AUTOSUPERCAP: Development of High Energy and High Power Density Supercapacitor Cells. In: Electric Vehicle Batteries: Moving from Research towards Innovation. Reports of the PPP European Green Research towards Innovation. Springer, 2015, 33-43

betrifft nicht nur die Zellebene, sondern insbesondere auch Modul bzw. Batteriepack- Ebene. Eine einfache und möglichst automatisierbare Demontierbarkeit bis zur Zelle ist dafür fundamental.

#### Stoffvielfalt und vermischte Altbatterieströme

Als eine der größten Probleme wurde die fehlende Information über die in den Batterien enthaltenen Materialien und die Schwierigkeit der Identifikation des Zelltyps aus den von den Sammelstellen kommenden gemischten Altbatterieströmen. Die zwei diskutierten Ansätze beziehen sich auf das Labeling und das Rücknahmesystem, diese werden im Folgenden näher erläutert.

#### Labeling

Aktuell erfolgt in der Praxis die Identifizierung zur Einordnung der Batterietypen individuell durch den Recycler über interne Datenbanken und Erfahrungswerte. Durch die enorme Vielfalt an Zelltypen ist eine exakte Einordnung der Batterien nach der Zusammensetzung durch die Mitarbeiter nahezu unmöglich. Hier könnte ein verpflichtendes Batterielabeling helfen.

Jedoch ist selbst bei gelabelten Batterien Vorsicht geboten, da Verunreinigungen immer möglich sind. So werden beispielsweise Reparaturen von Batteriepacks durchgeführt, die nicht von den Herstellern autorisiert wurden. Bei diesen „Bastlerbatterien“, werden ohne Kennzeichnung andere Zellchemien wie z.B. Ni-Cd anstatt Li-Ion eingebaut. Dies ist ein bereits jetzt existierendes Problem für Recycler, da es dadurch zu hochproblematischen Schwermetallbelastungen in den Recyclingprodukten führt. Diese Gefahr besteht bislang nahezu ausschließlich bei Consumer-Batterien, könnte jedoch in Anbetracht von zunehmender Elektromobilität durch Elektroautos und E-Bikes auch bei Traktionsbatterien ein schwerwiegendes Problem werden. Um dieser Problematik auszuweichen wäre ein Labeling mit Informationen zur Sicherheit und Zellchemie auf Modul- und Zellebene wünschenswert, sodass auch bei unsertifizierter Reparatur von Batteriepacks eine Identifizierung der verbauten Zellen und damit ein fachgerechtes Recycling möglich ist.

Ein Labeling der Materialien wäre nicht nur hilfreich für die Batteriezellen, sondern ebenfalls für die Peripherie (z.B. Alu-Modulgehäuse etc.). Aufgrund der enormen Vielfalt von Stahl- und Aluminiumlegierungen ist ein fachgerechtes Recycling mit minimalem Wert- bzw. Qualitätsverlust selbst bei diesen Massenmaterialien oft nicht möglich, da die genaue Legierung nicht bekannt ist. Dabei sind gerade Peripheriekomponenten aufgrund der hohen Masse und Verwertbarkeit besonders wichtig.

Jedoch ist ein durchgehendes Labeling / Kennzeichnungspflicht aufwendig durchzusetzen und nicht problemfrei. Das automatisierte Scannen der Labels ist aufgrund des großen Durchsatzes und der langen Lebensdauer der Batterien, was zu einem Rücklauf oftmals erst nach 10-20 Jahren führt, technisch schwierig umzusetzen und aufwendig. Das Label muss auch nach dieser Zeit noch lesbar bzw. in der Datenbank verfügbar sein. Eine alternative Lösung zum Labeling ist ein Zurverfügungstellen der Zellchemie in einer zentralen Datenbank (z.B. IDIS Datenbank), wo ein Zugriff auf Informationen für autorisierte Dritte ermöglicht werden könnte. Batterien könnten dann durch scannen des Herstellercodes über die Datenbank identifiziert werden. Dieser Ansatz würde ein explizites Labeling vermeiden. Jedoch gibt es auch hier das Problem der großen zeitlichen Diskrepanz zwischen Produktion und Recycling und damit von Fragen zu Handhabbarkeit von Datenbanken (IDIS) sowie der Lesbarkeit / Scanbarkeit des Herstellercodes am Lebensende. Eine weitere Herausforderung hierbei ist, dass es zahlreiche Hersteller von Lithium-Batterien gibt, welche ausnahmslos die genaue Zusammensetzung der Zellen bekannt geben oder den Zugriff darauf erlauben müssen. Auch dies ist voraussichtlich nur durch den Gesetzgeber durchsetzbar.

Auf EU-Ebene ist derzeit eine EU-weite Kennzeichnungspflicht von Batterien nach Hauptbestandteil in Erarbeitung. Eine detaillierte Bereitstellung aller Inhaltsstoffe wird dabei nicht angestrebt und ist auch

unwahrscheinlich, da es sich dabei oft um Knowhow des Batterieherstellers handelt ("Herstellergeheimnis"). Dieses erschwert den Zugriff bzw. den Willen zur Bereitstellung detaillierter Daten. Auf der anderen Seite ist die Einordnung in Batterietypen ist von größerer Bedeutung als eine Unterscheidung nach der genauen Zellchemie für bestehende Recyclingprozesse. Beispielsweise müssen Cadmium- und Lithiumprozesse unterschieden werden. Für zukünftige Prozesse, wo aufgrund höherer Rücklaufströme auch bei sortenreiner Verarbeitung noch wirtschaftlich interessante Massenströme Zustandekommen, ermöglicht jedoch eine zuverlässige automatische Trennung der Zellchemien wahrscheinlich ein effizienteres und besser auf die Zellchemie optimiertes Recycling.

#### *Sammlung / Rücknahmesystem*

Neben einer fehlenden Kennzeichnung ist die Beschaffenheit der Rücknahmesysteme und der geringe Rücklauf ein Problem. Aktuell finden ungefähr nur 60-70% der Consumer-Batterien den Weg zur Batteriesammelstelle, die restlichen Batterien werden über den Hausmüll entsorgt oder nicht nachverfolgbar weiterverkauft. Der Rücklauf von Batterien von Elektroautos ist noch zu gering, um hier Aussagen treffen zu können. Im Consumer-Bereich besteht deshalb Bedarf, die Beschaffenheit der Rücknahmesysteme zu verbessern. Hier sollte die Sammlung dem Nutzer stärker entgegenkommen, eventuell z.B. durch Anreize für Rückgabe. Bei Sammelstellen ergibt sich eine weitere Besonderheit für Lithiumzellen, da er enthaltene Elektrolyt leicht entzündlich ist. Dieser wird bei einer Beschädigung des Gehäuses oder Ausdehnung und undicht werden durch Kurzschluss mit den Gehäusen anderer Zellen freigesetzt. Dies stellt auch erhöhte Anforderungen für den Transport der Zellen zu oder von der Sammelstelle, erhöht damit Kosten und macht das koordinierte Sammeln unattraktiver.

Verantwortlich für die Rücknahme ist in Europa der Erstinverkehrbringer (Produktverantwortlichkeit). Zu diesem Zweck wurde von den Herstellern das gemeinsame Rücknahmesystem Batterien (GRS) ins Leben gerufen. Jedoch sind viele Hersteller von Batteriezellen nicht in Europa angesiedelt und nicht Teil des GRS. Es ist nicht klar, wie hier die Verantwortung durchgesetzt werden kann und wie die Verantwortlichkeit gehandhabt wird, wenn dieser zum Zeitpunkt des Recyclings nicht mehr existiert.

Ein Pfandsystem stellt einen Anreiz zur Rückgabe und könnte die Rückläufe deutlich erhöhen, sowie die Exporte gebrauchter Batterien indirekt kontrollierbarer machen. Aber auch hier stellt sich das Problem der langen Zeitdauer bis zum Recycling, so dass sich für ein Pfandsystem v.a. geldpolitische Fragen ergeben (Pfandannahme/ -Ausgabestelle kann nicht mehr existieren, Pfandbeträge sind „abgeschrieben“, wer zahlt das Pfand ein / aus?). Für vergleichsweise kurzlebige Consumer-Batterien ist dies aber denkbar. Für Fahrzeugbatterien wäre das Leasing der Batterien eine potentielle Lösung, mit dem Vorteil eines kontrollierten EoL Prozesses, da es eine eindeutig zuordenbare Herstellerproduktverantwortung gibt.

Im automotive Bereich wird Re-Use von (evtl. aufbereiteten) Altbatterien als Zwischenschritt vor dem Recycling gesehen. Dies ist ein für die Kreislaufwirtschaft wichtiger Aspekt, jedoch gibt es auch hier noch keine Erfahrungen. Es existieren Pilotprojekte, die gebrauchte eKfz-Batterien für stationäre Speicher einsetzen, aber bei steigenden Mengen ist ein Gebrauchtbatteriemarkt wie bei anderen Autoteilen wahrscheinlich. Hier ergibt sich (in Analogie zum Teilemarkt) eine Teilung in informelle Refurbisher („Schrottplatz-Batterie“) vs. kontrollierte Aufbereitung durch OEM. Eventuell ergibt sich daraus aber ein Konflikt mit möglichst früher Stofftrennung und damit qualitative hochwertige Recyclingprodukte. Ebenfalls in Analogie zum Gebrauchtwagenmarkt ist ein Export älterer Fahrzeuge in Drittstaaten denkbar oder sogar wahrscheinlich, was zu unkontrollierten Ströme ins Ausland gebrauchter Batterien führt. Was hier mit den Batterien geschieht und wie diese ggf. recycelt werden, ist unbekannt, jedoch erlauben Erfahrungen mit aktuellen Bleibatterien keine gute Prognose.

## Sicherheitsaspekte

Sicherheitsaspekte wurden vergleichsweise wenig diskutiert. In diesem Bereich ist vor allem der Zielkonflikt „Sicherheit im Betrieb“ (möglichst umfassende Kapselung der Batteriezellen) gegen „einfache Demontage“ zu nennen. Diesen aufzulösen ist sicherlich eine der wesentlichen Herausforderungen für ein Design for Recycling. Dies erfordert einen regelmäßigen Dialog zwischen Hersteller und Recycler, welcher aktuell nicht stattfindet. Des Weiteren bestehen Sicherheitsrisiken im Rücknahme und Sammelprozess, insbesondere bei Consumer-Batterien. Eine umfassende Kennzeichnung von Packs und einzelnen Zellen mit Informationen zu Zellchemie und damit auch Sicherheit wurde auch unter Sicherheitsaspekten als wesentlich gesehen.

## Kosten bzw. Wirtschaftlichkeit des Recyclings

### *Alternative Absatzmärkte für Recyclingprodukte*

Eine der großen Herausforderungen für Recyclingfirmen ist das Finden von Absatzmärkten für die Recyclingprodukte. Während sich Consumer-Batterien durch den hohen Kobaltgehalt selbst finanzieren (wirtschaftlicher Mehrwert aus dem Recycling), müssen für Fahrzeugbatterien trotz Kobalt- und Nickelgehalt Gebühren erhoben werden. Eine elementare Rückgewinnung der Batteriebestandteile von Lithium-Ionen-Zellen ohne Anteil teurer Metalle führt zu nicht vermarktbar Produkten, wie zum Beispiel Titanoxide oder Eisenoxide. Die Wiedergewinnung von Aktivmaterialien anstelle von Metallsalzen könnte hier einen deutlichen Mehrwert bringen. Insbesondere für Batterien ohne Anteil teurer Metalle (LFP und LMO) kann dies relevant werden. Die Herstellung von LFP Material ist deutlich Prozesskostengetrieben, während die Materialien nur einen geringen Anteil an den Aktivmaterialkosten ausmachen. Allerdings ist hier die Frage nach der Aufbereitung und der Qualität des zurückgewonnenen Aktivmaterials und deren Auswirkungen auf die Batterieperformance noch unbeantwortet. Während ein derartiges funktionelles Recycling von Produktionsausschüssen bereits erfolgreich stattfindet, ist dies für Materialien aus Altbatterien offen. Am Ende zählt die Entscheidungen der Verbraucher, also muss ein Produkt entstehen, das auch vermarktbar ist. Dazu wurden die Analogien Papierrecycling sowie Elektrogeräte genannt. Bei ersterem wurde ein attraktives Produkt geschaffen, während dies bei Elektrogeräten bislang nicht funktioniert. Als Negativbeispiel dient das Fairphone: Hier konnte das Konzept von Design for Recycling nicht ausreichend verkauft werden, da Performance und Preis nicht auf Augenhöhe konkurrierender Produkte war.

Auch stellt sich hier das Problem der großen zeitlichen Diskrepanz zwischen Produktion und Recycling. Es ist schwer abschätzbar, ob 10-20 Jahre alte Aktivmaterialien überhaupt noch von Interesse sind für eine sich schnell entwickelnde Batterieindustrie oder ob diese ohnehin in ihre Ausgangsmaterialien heruntergebrochen werden müssen. Die Dauer zwischen Produktion und Recycling spielt auch bei einem elementaren Recycling eine wichtige Rolle. Für eine Zellchemie, die zum Herstellungszeitpunkt ökonomisch nachhaltig recycelbar wäre, kann dies zum Zeitpunkt des Recyclings nicht mehr der Fall sein, da die Rohstoffe starken Preisschwankungen unterliegen. So könnten durch Trendwechsel, wie die Substitution von teuren Kathodenmaterialien, die aktuell hohen Rohstoffpreise wieder sinken, und Recyclingprodukte, die aktuell die wirtschaftliche Machbarkeit bestimmen (Kobalt), zukünftig weniger gefragt sein und deutlich geringere Erlöse erzielen.

Eine Alternative wäre das Finden von Märkten für Stoffsysteme, die ohne Mehraufwand aus Recycling gewonnen werden, ohne die Materialien auf ihre elementare Ebene zurückzuführen. Als Beispiel kann dazu das Recycling von Alkali-Mangan-Zellen angeführt werden, die in einem Recyclingprozess ohne weitere Vorbehandlung Grauguss hinzugefügt werden und dort Primärmangan ersetzen (sinnvolles „Downcycling“). Für andere Produkte aus Batterie-Recyclingprozessen wie z.B. Eisen- und Titanoxide müssten dafür Märkte identifiziert werden, die man auf nicht elementarer Ebene bedienen kann und wo diese auf ähnliche Weise als Ausgangsstoff in anderen Industrieprozessen eingebracht werden können (z.B. für Pigmente). Dies würde außer eines vermarktbar Produktes zusätzlich eine

potentielle Reduktion der Prozesskosten mit sich bringen, da der beträchtliche Mehraufwand durch die elementare Aufbereitung entfällt, wodurch Prozessschritte vermieden werden können. Jedoch müssen diese Märkte auch entsprechende Mengenströme aufnehmen können.

#### *Kostenreduzierung existierender Prozesse*

Ein Ansatz zur Kostenreduzierung wäre die Vermeidung von Halogenen in den Batterien und damit die Ersparnis entsprechender Abgasbehandlungssysteme. Jedoch ist dies aktuell nicht in Sicht (siehe Elektrolyte). Auch müsste dafür ein halogenfreier Altbatteriestrom sichergestellt werden, was auch in ferner Zukunft aufgrund der Vermischung mit Rückläufen älterer (fluorhaltiger) Batterien unwahrscheinlich ist.

Potential zu wesentlichen Einsparungen ergibt sich aus einer Automatisierung der Demontageprozesse. Dies ist aktuell noch nicht denkbar, wäre aber bei höheren Stoffmengen erforderlich. Auch hier wäre ein verbesserter Dialog zwischen Hersteller und Recycler bzw. eine stärkere Orientierung an einem Design for Recycling zielführend.

#### *Steigende Rohstoffpreise*

Rohstoffpreise sind Schwankungen ausgesetzt, dies manifestiert sich insbesondere bei Kobalt, aber auch Lithium. Hier führte der Preisanstieg dazu, dass Recycling von kobalthaltigen Batterien wirtschaftlich wurde. Preisschwankungen und der Trend zu sinkendem Kobaltgehalt bringen aber auch eine Ungewissheit mit sich, inwieweit ein Recycling in Zukunft noch kostendeckend sein kann. Lithiumcarbonat verzeichnet ebenfalls steigende Preise, was zu einem erhöhten Anreiz führt, zukünftig auch Lithium zurückzugewinnen. Aufgrund des zunehmend hohen Preises für Graphit (und der beschränkten Verfügbarkeit von natürlichem Graphit), ist die Rückgewinnung dieses Rohstoffes mittelfristiges Ziel der Recyclingfirmen.

#### *Wirtschaftliche und ökologische Grenzen des Recyclings*

##### *Definition der Recycling-Effizienz unzureichend*

Als ein großer Kritikpunkt wurde im Workshop die in der Batterie-Direktive<sup>13</sup> geforderte starre massenbasierte Recyclingquote identifiziert. Dabei wurde bemängelt, dass eine Gesamtquote nur eine unzureichende Aussage über einen Recyclingprozess zulasse und zu einer unter Kosten und Umweltaspekten oft nicht optimalen Recyclingtiefe führe. Daher wäre beispielsweise die Recyclingeffizienz wichtiger als eine Quote, diese wiederum hat allerdings keine einheitliche Definition und kann sehr unterschiedlich interpretiert werden. Bei der Betrachtung des Batteriekreislaufs unter Stoffstromaspekten treten weitere Unklarheiten auf. So ist beispielsweise der Begriff der Kreislaufwirtschaft unscharf definiert und Recyclingkalkulationen nicht harmonisiert, was eine einheitliche und vergleichbare Quantifizierung der Recyclingeffizienz erschwert. Eine stoffbasierte Quote („Recyclability-Indikator“), die berücksichtigt, wie viel der spezifischen Ausgangsmaterialien in welcher Menge ökonomisch und ökologisch sinnvoll wiederverwendet werden können, wird von Recyclern als zielführend erachtet. Mögliche Ansätze dazu wären eine Entropiebilanz, die einen ganzheitlichen Energieaufwand widerspiegelt oder die Bewertung über Umweltpunkte, welche verschieden ökologische Aspekte integrieren, um ein möglichst umfassendes Bild zu erhalten. Diese würden erlauben, eine ökonomisch und ökologisch optimale Recyclingtiefe zu einem gegebenen Zeitpunkt definieren, Aufwendungen und Benefits abzuwägen, sowie die entscheidenden Rohstoffe / Stoffströme zu identifizieren. Alle diese Ansätze benötigen jedoch eine Lebenszyklus-Perspektive, um die Auswirkungen auf die Umwelt bzw. Gutschriften während des Recyclings im Vergleich zum

---

<sup>13</sup> Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators

Primärabbau darzustellen (Vermeiden von zusätzlichen Umweltbelastungen durch zu ambitioniertes Recycling). Insgesamt wurden hier neue politische, stoffbezogenen Zielsetzungen gewünscht, um sich von der starren Gesamtquotenbetrachtung zu lösen und umfassendere Bilanzierungskonzepte zu verwenden.

#### Informelles Recycling in Drittländern

Neben den bereits erwähnten ökonomischen Anreizen gibt es noch andere Motivationen, um Batterierecycling zu betreiben. Als wohl wichtigster Punkt sind die kontrollierten ökologischen Folgen bei einem inländischen Recycling. Die Prozesse unterliegen der lokalen und EU Gesetzgebung und Unternehmensstandards, somit können die Umweltauswirkungen der Recyclingprozesse mittels entsprechenden Regulierungen kontrolliert werden. Bei einem Recycling außerhalb des Einflussbereichs solcher Regularien kann es deshalb vorkommen, dass die ökologischen Folgen in den Hintergrund rücken und die Kosten vorangestellt werden. Beispielsweise kann auf eine aufwendige Reinigung der Abgase verzichtet werden, wodurch ungehindert Fluor und dessen Nebenprodukte aus dem Elektrolyt und Binder in die Umwelt abgegeben werden. Auch hier kann der Rücknahmeprozess als Schlüssel gesehen werden. Es müsste sich ein Rückgabemehrwert ergeben, der über dem aus einem (informellen) Recycling zu erzielende Gewinn liegt.

#### Zweitnutzung / Wiederaufbereitung gebrauchter Batterien.

Die Zweitnutzung (second use) sowie die Aufbereitung gerauchter Batterien (refurbish) werden als sehr vielversprechend angesehen, um die Nutzungsdauer der Batterien zu erhöhen und damit deren Umweltbelastung zu reduzieren. Jedoch existieren (außer einigen Pilotprojekten) wenig Erfahrungen damit. Wie sich ein Altbatteriemarkt tatsächlich entwickeln könnte, wenn größere Mengen verfügbar sind und auch für gebrauchte Elektrofahrzeuge ein relevanter Markt für gebrauchte Batterien vorhanden ist, ist aktuell schwer absehbar.

#### Ressourcenengpässe / Knappheiten trotz Recyclings

Der zukünftige Bedarf an Batterien ist von vielen Faktoren abhängig und somit nur mit hohen Unsicherheiten abschätzbar. Es gibt zahlreiche Studien, die eine Prognose versuchen, jedoch sind die sich ergebenden Ergebnis-Bandbreiten extrem hoch. Extremszenarien können für Grenzbetrachtungen herangezogen werden, um potentielle Probleme zu identifizieren.[Quelle] Hier ergeben sich bei einer global und ambitioniert umgesetzten Energiewende durchaus Ressourcenknappheiten für die Batterieherstellung. Recycling kann diese lindern, jedoch reichen auch dann die verfügbaren Ressourcen eventuell nicht aus, um den benötigten Bestand aufzubauen. Hier ist ein ganzheitlicher Blickpunkt erforderlich, um neben Recycling auch alternative Technologien und z.B. andere Mobilitätskonzepte zu betrachten.

Grundlegend stellt sich die Frage, ob ein Batterie-Recycling in Deutschland sinnvoll ist, solange die Mehrheit der Produktionsanlagen im asiatischen Raum angesiedelt sind. Die Frage nach der Produktverantwortung solcher Hersteller ist nicht geklärt. Wenn das Recycling im Ausland erfolgt, wird andererseits mit den Altbatterien auch ein potentiell wichtiger Wertstoff aus der Hand gegeben. Da in Deutschland (und EU) kaum oder keine Ressourcen vorhanden sind, die für die Produktion von aktuellen Lithium-Ionenbatterien notwendig sind, kann durch ein lokales Recycling ein Stoffstrom an Europa gebunden werden. Dennoch darf nicht außer Acht gelassen werden, dass zwischen Produktion und Recycling einer Batterie mehrere Jahre liegen und ggf. (abhängig vom Batterietyp) auch zukünftig ein relevanter Teil der Speicher den Stoffkreislauf bereits vor dem Recycling verlassen. Somit wäre ein geschlossener Batteriekreislauf im Sinne einer europäischen Kreislaufwirtschaft nur eingeschränkt möglich.



### Weiterführende Aspekte

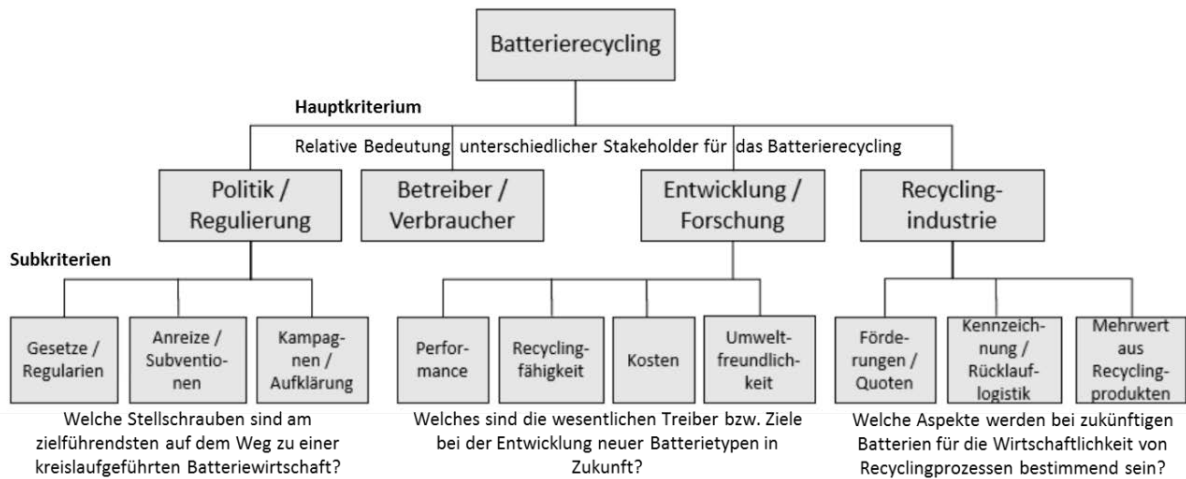
Eventuell ist es notwendig, die einzelnen Sektoren (Consumer, stationary, automotive) getrennt zu betrachten. Insbesondere die Herausforderungen bei Sammlung und Kennzeichnung sind sehr verschieden. Auch gibt es teils erhebliche Unterschiede in der Zusammensetzung der Batteriezellen (zum Beispiel Zellchemie, und damit auch Kobaltgehalt) und Bauformen der Module (Anforderungen an Sicherheit und Gewicht, und damit Verbindungstechnik). Eine getrennte Behandlung könnte die Prozesseffizienz erhöhen und ist bei steigenden Rücklaufströmen in Zukunft wahrscheinlich möglich.

Ebenso könnten konzeptionell völlig andere Speichertechnologien eventuell deutliche Vorteile in Hinsicht auf Recycling aufweisen. Insbesondere im stationären Bereich existieren zahlreiche konkurrierende Speichertechnologien (sowohl elektrochemisch als auch andere). Hier ist ggf. eine breitere, lebenszyklusorientierte Perspektive unter Berücksichtigung aller Alternativen notwendig. Das benötigte Produkt ist schlussendlich eine Speicherdienstleistung, nicht eine spezifische Batterie. Eine derartige Betrachtung könnte durch die Technologiekonkurrenz eine stärkere Fokussierung auf eine höhere Recyclingfähigkeit anstoßen.

### 3.6. Stakeholder Befragung

Im Rahmen des Workshops wurden die Teilnehmer gebeten, einen Fragebogen zur Wichtigkeit verschiedener Aspekte für eine kreislaufgeführte Batteriewirtschaft auszufüllen. Über paarweise Vergleiche wurden dabei Präferenzen bezüglich der Relevanz einzelner Aspekte für eine Batterie-Kreislaufwirtschaft abgefragt, welche dann als Input für ein multi-criteria-decision analysis (MCDA) Modell verwendet wurden. Dies ermöglicht eine Darstellung der Präferenzen über alle Stakeholder-Gruppen. Insgesamt wurden von 15 (aus 19) Teilnehmern konsistente Antworten zurückgegeben (Konsistenzprüfung erfolgte über paarweise Vergleiche); nur diese fließen in die Ergebnisse ein. Die Zahl der Teilnehmer pro Stakeholder-Gruppe lag dabei zwischen zwei (Batterieforschung, Batterieindustrie, Recyclingindustrie und Systemanalyse) und vier (sonstige). Unter „sonstige“ eingruppiert wurden Fragebögen, die eine eindeutige Zuordnung aufgrund der gemachten Angaben nicht zuließen, obwohl auch diese einer der genannten Gruppen zuordenbar wären.

Für die Umfrage wurde ein hierarchischer Ansatz gewählt: In erster Instanz war die Bedeutung unterschiedlicher Stakeholder-Gruppen für ein funktionierendes Batterierecycling zu bewerten, und im Anschluss verschiedene Aspekte innerhalb jeder der einzelnen Stakeholder-Gruppen. Der Bewertungsbaum inklusive der zu bewertenden Fragen sowie die erhaltenen Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. In erster Instanz (Hauptkriterium) musste die relative Bedeutung verschiedener Stakeholder-Gruppen für das Batterierecycling angegeben werden. Für diese Stakeholder-Gruppen wurden darüber hinaus Subkriterien bewertet, die innerhalb der jeweiligen Gruppe relevant sein könnten. Für Politik / Regulierung waren dies die zielführendsten Stellschrauben auf dem Weg zu einer kreislaufgeführten Batteriewirtschaft, für Entwicklung / Forschung die wesentlichen Treiber bzw. Ziele bei der Entwicklung neuer Batterietypen in Zukunft sowie für die Recyclingindustrie die Aspekte die bei zukünftigen Batterien für die Wirtschaftlichkeit von Recyclingprozessen bestimmend sein werden. Für Betreiber/Verbraucher ergab sich keine sinnvolle Unterklassifizierung, weshalb keine Bewertung abgefragt wurde. Die Bewertungen erfolgten dabei über paarweise Vergleiche auf einer 17-stufigen Skala (vgl. Abbildung 5).



Indikator A	Indikator A wichtiger									1	Indikator B wichtiger									Indikator B
	9	8	7	6	5	4	3	2			2	3	4	5	6	7	8	9		
	Sehr viel höhere Bedeutung	Viel höhere Bedeutung	Deutlich höhere Bedeutung	Etwas höhere Bedeutung	Gleich-bedeutend	Etwas höhere Bedeutung	Deutlich höhere Bedeutung	Viel höhere Bedeutung	Sehr viel höhere Bedeutung		Etwas höhere Bedeutung	Deutlich höhere Bedeutung	Viel höhere Bedeutung	Sehr viel höhere Bedeutung						
<b>Relative Bedeutung unterschiedlicher Stakeholder für das Batterierecycling</b>																				
Politik / Regulierung	9	8	7	6	5	4	3	2			2	3	4	5	6	7	8	9	Betreiber / Verbraucher*	
Politik / Regulierung	9	8	7	6	5	4	3	2			2	3	4	5	6	7	8	9	Entwicklung / Forschung**	
Politik / Regulierung	9	8	7	6	5	4	3	2			2	3	4	5	6	7	8	9	Recyclingindustrie	
Recyclingindustrie	9	8	7	6	5	4	3	2			2	3	4	5	6	7	8	9	Entwicklung / Forschung	
Entwicklung / Forschung	9	8	7	6	5	4	3	2			2	3	4	5	6	7	8	9	Betreiber /Verbraucher	
Betreiber /Verbraucher	9	8	7	6	5	4	3	2			2	3	4	5	6	7	8	9	Recyclingindustrie	

**Abbildung 5:** MCDA Bewertungsbaum und Ausschnitt aus dem Bewertungsbogen (Bewertung bzgl. Hauptkriterium)

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse aus der MCDA. Interessanterweise gibt sich ein Bild, das sich nur teilweise mit den Ergebnissen aus den Diskussionen deckt. Zwar wurde Politik / Regulierung übereinstimmend als der relevanteste Stakeholder bewertet, bei anderen Interessengruppen gab es jedoch Diskrepanzen. So ergab sich aus der Umfrage eine hohe Relevanz der Recyclingindustrie, während aus den Diskussionen Handlungsbedarf insbesondere bei Betreiber / Verbraucher (z.B. OEM) und Hersteller / Entwickler, bzw. der Kommunikation zwischen diesen identifiziert wurde. Bezüglich des Hauptkriteriums (Ebene 1) decken sich die Einschätzung durch die Untergruppe Batterieindustrie am ehesten mit den Workshop-Ergebnissen. Die Interpretation der Bewertung durch einzelne Stakeholder-Gruppen sollte jedoch mit Vorsicht erfolgen, da die Selbsteingruppierung der befragten Teilnehmer nicht vollständig mit der von den Organisatoren erwarteten übereinstimmte (erkennbar an der Menge der Teilnehmer die sich in der jeweiligen Gruppe sahen).

Für die Recyclingindustrie wurde (entsprechend der Bewertung des Hauptkriteriums) die Erzielung eines wirtschaftlichen Mehrwertes durch den Recycler sowie die Förderung (incl. Vorgaben oder Quoten) als wichtigster Aspekt genannt. Allerdings sind die Präferenzen der einzelnen Gruppen bezüglich dieses Kriteriums sehr divers, weshalb hier noch erhöhten Diskussionsbedarf zu bestehen scheint.

Hoher Konsens zwischen den einzelnen Stakeholder- Gruppen herrscht bezüglich der wesentlichen Treiber bei der Entwicklung neuer Batterien. Hier stehen die Leistungsfähigkeit der Batterie, sowie, in etwas geringerem Maße, deren Kosten eindeutig im Vordergrund. Umweltfreundlichkeit und Recyclingfähigkeit werden hier als deutlich weniger relevant gesehen. Interessanterweise herrscht lediglich in der Gruppe der Recyclingforscher eine abweichende Wahrnehmung; hier werden

Umweltfreundlichkeit und Recyclingfähigkeit als deutlich stärker im Fokus neuer Batterieentwicklungen gesehen.

In Hinsicht auf Politik und Regulierung ergibt sich eine sehr klare Dominanz: Gesetzen und Regularien werden als die wichtigsten Stellschrauben gesehen, um eine stärker zirkuläre Batteriewirtschaft zu erreichen. Auch dies deckt sich mit den Ergebnissen des Workshops. Die Korrelation zwischen den einzelnen Stakeholder-Gruppen ist ebenfalls hoch bezüglich dieser Einschätzung, lediglich die Vertreter von Forschungseinrichtungen (sowohl Batterieforschung als auch Forschung zu Recyclingverfahren) haben hierzu eine abweichende Einschätzung und sehen Anreize bzw. Subventionen als effizientere Maßnahmen.

	Beschreibung	Kriterien	Für alle	Forschung/ Batterie	Forschung/ Recycling	Industrie/ Batterie	Industrie/ Recycling	System- analyse	Sonstige
<b>Hauptkrit.</b>	<b>Haupttreiber:</b>	Politik	33%	31%	31%	38%	45%	37%	23%
	Relative Bedeutung der Stakeholder	Betreiber	11%	5%	8%	29%	14%	12%	7%
		Entwickler	23%	14%	33%	19%	13%	12%	34%
		Recycling	34%	50%	28%	15%	29%	39%	35%
<b>Subkriterien</b>	<b>Recycling industrie:</b>	Förderung	29%	31%	17%	52%	35%	18%	27%
	Bestimmende Aspekte für die Wirtschaftlichkeit	Kennzahl	15%	15%	7%	14%	10%	22%	19%
		Mehrwert	31%	33%	46%	24%	33%	16%	32%
	Rücklauf	Performance	25%	21%	30%	11%	22%	45%	22%
		Entwicklung /	Performance	42%	42%	26%	45%	61%	36%
	<b>Forschung:</b> Treiber bei Entwicklung neuer Batterietypen	Recycling	11%	6%	26%	9%	3%	11%	12%
		Kosten	29%	39%	10%	39%	27%	28%	30%
	<b>Politik / Regulierung:</b> zielführende Stellschrauben	Umwelt	18%	13%	38%	7%	9%	25%	19%
		Reg	51%	33%	15%	44%	73%	69%	61%
		Anreize	30%	59%	63%	22%	4%	22%	21%
	Kamp	19%	7%	22%	34%	22%	10%	18%	

Abbildung 6: Ergebnisse der MCDA

#### 4. Zusammenfassung

Insgesamt wird aufgrund der gewonnenen Ergebnisse der der größte Handlungsbedarf auf Seiten des Gesetzgebers gesehen. Es müssen geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden, welche ein effizientes und ökologisch sinnvolles Recycling ermöglichen, fördern und fordern. Hierzu sind insbesondere Maßnahmen im Bereich Kennzeichnung / Labeling und Rücklauf zu nennen, aber auch eine umfassende Neudefinition der Zielgrößen, an denen die Recyclingvorgaben gemessen werden. Dabei ist die Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette sowie die Komplexität des Batteriemarktes zu berücksichtigen (Weltmarkt), um ökologisch und ökonomisch sinnvolle Recyclingprozesse zu etablieren.

Größerer Handlungsbedarf wurde außerdem bei der mangelnden Kommunikation zwischen den einzelnen Stakeholder-Gruppen gesehen, insbesondere OEM und Recyclern, welche ein Design für Recycling erschwert (Entwicklung ist stark kosten- und performancegetrieben). Ein frühzeitiges Einbinden von Recyclern in den Entwicklungsprozess wäre in diesem Sinne wünschenswert, da insbesondere bei der Zerlegung der Batteriemodule große Potentiale zur Senkung der Kosten und Steigerung der Recyclingeffizienz liegen. Auch hier wären entsprechende Anreize / Vorgaben von Seiten Politik bzw. Regulierern hilfreich.

Zukünftige Entwicklungen werden im Bereich Recyclingprozesse vor allem bei der Rückgewinnung von Lithium und Graphit gesehen. Steigender Bedarf an Batterien führt potentiell zu Kostensteigerungen auch für diese Materialien sowie erhöhte Umweltauswirkungen, wenn diese auch aus weniger leicht zugänglichen Vorkommen gewonnen werden müssen. Dies könnte dazu führen, dass ein Recycling auch von Lithium und Graphit mittelfristig ökonomisch und ökologisch sinnvoll wird. Im Bereich der

zukünftigen Batterietechnologien scheint Solid State Batterien (SSB) eine vielversprechende Technologie, die Lithium-Ionen Batterien ersetzen könnten. Diese vermeiden das Problem der fluorhaltigen, toxischen und entzündlichen flüssigen Elektrolyten, jedoch ist hier in beiden Bereichen noch erheblicher Forschungsbedarf.



Abbildung 7: Gesammelte Stichpunkte aus der Ergebniskonsolidierung



Abbildung 8: Workshopteilnehmer

KIT Scientific Working Papers  
ISSN 2194-1629

[www.kit.edu](http://www.kit.edu)