

## **2 Grundlagen des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen**

Für die strategische Planung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen ist ein umfassendes Verständnis der Fahrzeug-, Batterie- und Recyclingtechnologien sowie der Bedeutung des Recyclings für betroffene Akteure erforderlich. Eine wesentliche Rolle kommt hierbei den vorherrschenden Unsicherheiten zu. Zur Erarbeitung des Verständnisses werden in diesem Kapitel die Grundlagen für das Recycling der Batterien dargelegt sowie in die Nomenklatur und Systematik eingeführt. Zunächst werden in Abschnitt 2.1 die technischen Eigenschaften und der Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen für Elektrofahrzeuge im Allgemeinen sowie die stoffliche Zusammensetzung von Technologievarianten im Speziellen dargestellt. Die besondere Bedeutung der in den Batterien eingesetzten metallischen Rohstoffe für den Erfolg der Elektromobilität wird in Abschnitt 2.2 herausgestellt, die wichtigsten Metalle werden hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit und Preise charakterisiert. Den größten Einflussfaktor auf das rohstoffstrategische Potential und die Wirtschaftlichkeit des Recyclings sowie die wichtigste Grundlage zur Planung des Recyclings stellt das zukünftig zu erwartende Aufkommen gealterter Batterien aus Elektrofahrzeugen dar, dessen Schätzung Gegenstand des Abschnitts 2.3 ist. Anschließend werden in Abschnitt 2.4 die in Deutschland geltenden abfallrechtlichen Rahmenbedingungen aufgeführt und die betroffenen Akteure identifiziert. Einen Überblick über den derzeitigen Umgang mit Altbatterien aus Elektrofahrzeugen und aktuellen Bestrebungen für das Recycling der Batterien in Deutschland und anderen Ländern gibt Abschnitt 2.5. Das Kapitel zusammenfassend werden in Abschnitt 2.6 Schlussfolgerungen für die Planung des Recyclings in Deutschland gezogen.

## 2.1 Lithium-Ionen-Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge

### 2.1.1 Differenzierung von Elektrofahrzeugen

Unter dem Begriff „Elektrofahrzeug“ wird sowohl im allgemeinen Sprachgebrauch als auch in einschlägiger Literatur meist eine Vielzahl heterogener Fahrzeugarten und Antriebskonzepte zusammengefasst. Mit Bezug auf die Fahrzeugart umfassen Elektrofahrzeuge neben den in dieser Arbeit ausschließlich betrachteten Personenkraftwagen grundsätzlich Fahrräder, Motorroller, Motorräder und Lastkraftwagen, aber auch Wasser- und Schienenfahrzeuge.

Der **Grad der Elektrifizierung** des Fahrzeugantriebs ist das hauptsächliche Differenzierungskriterium für Elektrofahrzeuge. Dieser kann jedoch vielfältige Ausprägungen annehmen. Eine grobe Einordnung ist diejenige in **hybride** und **vollelektrische Antriebskonzepte**.<sup>15</sup> In hybriden Konzepten werden sowohl eine Verbrennungs- als auch eine Elektrokraftmaschine eingesetzt. Sie lassen sich weiter nach der Systemstruktur, also der Anordnung der Energiewandler, in serielle, parallele oder leistungsverzweigende Antriebskonzepte unterscheiden.<sup>16</sup> Ein Antriebskonzept ist dann **seriell**, wenn die Energiewandler in Reihe geschaltet sind, z. B. ein Verbrennungsmotor über einen Generator elektrische Energie für einen Elektromotor generiert, der mechanisch mit dem Antriebstrang verbunden ist. Das Antriebskonzept ist **parallel**, wenn beide Energiewandler mechanisch mit dem Antriebstrang verbunden sind und gemeinsam auf ihn wirken können. Ein **leistungsverzweigendes** Konzept erlaubt sowohl die serielle als auch die parallele Schaltung der Energiewandler.

Weitere Kriterien zur Differenzierung von Elektrofahrzeugen sind der **Typ des Energiespeichers** (Batterie oder Wasserstofftank) und die Möglichkeit zur **externen Speisung** (Ladung oder Betankung) dieses Speichers. Ein vollelektrisches Fahrzeug ist auf die externe Lade- bzw. Betankungsmöglichkeit angewiesen, und aufgrund des fehlenden Verbrennungsmotors ist auch die Systemstruktur vorgegeben (dediziert elektrisch).

---

<sup>15</sup> Für ausführliche technische Beschreibungen siehe bspw. Futschik et al. 2013, S. 145–148, 161–202; Lamp 2013, S. 392–400; und Ketterer et al. 2009, S. 30–34.

<sup>16</sup> Vgl. z. B. Ketterer et al. 2009, S. 31.

**Tabelle 2.1** Typische Bezeichnungen zur Beschreibung unterschiedlicher Antriebskonzepte und technische Charakteristika von Elektrofahrzeugen

Bezeichnung in dieser Arbeit	Hybridfahrzeuge (HEV)		Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV)		Vollelektrische Fahrzeuge (BEV)	Wasserstofffahrzeuge
Bezeichnung	Mild Hybrid Electric Vehicle	(Full) Hybrid Electric Vehicle	Plug-in Electric Vehicle	zusätzlicher Range-Extender	Battery Electric Vehicle	Fuel Cell Electric Vehicle
Systemstruktur	Parallel		Parallel / leistungsverzweigt	Seriell / leistungsverzweigt	Dediziert elektrisch	
Primäre Maschine	Verbrennungskraftmotor			Elektromotor		
Dediziert elektrische Traktion	Nicht möglich	Kurze Strecken (2 bis 10 km)	Mittlere Strecken (ca. 40 km)	Längere Strecken (ca. 80 km)	Ja, lange Strecken (ab ca. 120 km)	Ja, sehr lange Strecken (ab ca. 400 km)
Energiespeicher	Batterie					Wasserstofftank
Externe Speisung	Nicht möglich		Möglich		Erforderlich	

Für die auf dem Markt und die in Entwicklung befindlichen elektrifizierten Personenkraftwagen hat sich im Laufe der letzten Jahre eine eigene **Namenskonvention** etabliert, die eine grobe Unterscheidung der Antriebkonzepte ermöglicht. Einen Überblick über die unterschiedlichen Konzepte und deren wesentlichen Unterschiede gibt Tabelle 2.1. Aufgrund des Fokus auf Batterien werden in dieser Arbeit ausschließlich batteriebetriebene Elektrofahrzeuge betrachtet. Eine Unterscheidung hinsichtlich der Antriebkonzepte muss hierbei nur insofern getroffen werden, als dass Unterschiede in Bezug auf die Anforderungen an die Batterien bestehen. Dem genügt die Unterscheidung in Hybridfahrzeuge („Hybrid Electric Vehicles“, HEV), Plug-in-Hybridfahrzeuge („Plug-in Hybrid Electric Vehicles“, PHEV) und vollelektrische Fahrzeuge („Battery Electric Vehicles“, BEV), da diese grundsätzlich unterschiedliche Speicherkapazitäten erfordern.<sup>17</sup> Diese und weitere Anforderungen der Konzepte an die Batterien werden im folgenden Abschnitt behandelt.

<sup>17</sup> Ähnliche oder identische Bezeichnungen und Unterscheidungen werden u. a. in Ketterer et al. 2009, S. 30; Deutsche Bundesregierung 2009, S. 7; Broussely 2010, S. 307; Walther et al. 2010, S. 261; Hoyer et al. 2011b, S. 79; Lamp 2013, S. 394; Futschik et al. 2013, S. 145–148 verwendet.

### 2.1.2 Anforderungen von Elektrofahrzeugen an Traktionsbatterien

Die grundsätzlichen Anforderungen von Elektrofahrzeugen an Traktionsbatterien betreffen insbesondere Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Sicherheit, Wirkungsgrad und Umweltverträglichkeit.<sup>18</sup> Die Batterien müssen zu jeder Zeit und bei jeder Witterung zuverlässig einsetzbar sein. Dies erfordert **geringe Selbstentladung**, weitgehend **gleichbleibende Leistungen** über den Entladezeitraum und Einsatzbereitschaft auch **bei extremen Außentemperaturen**. Die Batterien sollten mindestens die übliche **Lebensdauer** konventioneller Pkw von 10 bis 15 Jahren erreichen. Sie dürfen den Nutzer im normalen Betrieb, bei einfachem Missbrauch und bei Unfällen nicht über Gebühr gefährden. Ein **hoher Wirkungsgrad** der Batterie (verwendbare Energie bei Entladung gegenüber aufgewendeter Energie bei Ladung) ist unerlässlich, um einen angesichts des zusätzlichen technischen Aufwands ausreichenden energetischen Vorteil gegenüber konventionellen Verbrennungskraftfahrzeugen zu erzielen. Gleiches gilt für die **Umweltverträglichkeit** der Batterie, da die Umweltwirkungen ihrer Herstellung, ihres Transports, ihrer Nutzung und ihrer Entsorgung die ökologische Gesamtbilanz von Elektrofahrzeugen beeinflusst. Hierbei ist insbesondere die Recyclingfähigkeit der Batterie vor dem Hintergrund knapper Rohstoffe bedeutsam.<sup>19</sup>

Detaillierte Anforderungen von Elektrofahrzeugen an die Eigenschaften von Traktionsbatterien sind wesentlich abhängig vom grundsätzlichen Antriebskonzept des Fahrzeugs (HEV, PHEV oder BEV), von der Fahrzeuggrößenklasse (z. B. Kompakt- oder Oberklasse) sowie von den für das Fahrzeug angestrebten Leistungscharakteristika und Kostenzielen.<sup>20</sup> Mit zunehmender Bedeutung des elektrischen Antriebs müssen die Batterien höhere Energiemengen mit höherer Leistung speichern und zur Verfügung stellen können, um ausreichend elektrische Reichweite und Fahrdynamik zu erzielen. Die Masse und das Volumen der Batterie steigen hierbei jedoch überproportional mit deren Speicherkapazität (speicherbare Energie) und Leistung, da aufgrund ihres Eigengewichts mit

---

<sup>18</sup> Zu den genannten grundsätzlichen Anforderungen vgl. bspw. Winter und Brodd 2004, S. 4528f.; Ketterer et al. 2009, S. 36–37; Broussely 2010, S. 310–315; Futschik et al. 2013, S. 166f.; Lamp 2013, S. 396.

<sup>19</sup> Vgl. Ketterer et al. 2009, S. 58.

<sup>20</sup> Vgl. Ketterer et al. 2009, S. 35; Broussely 2010, S. 306; Lamp 2013, S. 394.

einer größeren Batterie auch die benötigte Energie zur Traktion des Fahrzeugs steigt.<sup>21</sup> Die wesentliche Anforderung an die Batterien ist somit eine **möglichst hohe spezifische Energie**, wenn viel Speicherkapazität benötigt wird, und eine **hohe spezifische Leistung**, wenn die Erreichung hoher Leistungen im Vordergrund steht.<sup>22</sup>

**Hybridfahrzeuge** müssen wegen des dominierenden Verbrennungsmotors vergleichsweise wenig elektrische Energie speichern.<sup>23</sup> Die hauptsächliche Aufgabe der Batterie besteht darin, die beim Bremsen mit Hilfe des Elektromotors zurückgewonnene Energie für typische Bremssituationen im Stadtverkehr zu speichern, um diese insbesondere für das Anfahren wieder nutzbar zu machen, oder den Verbrennungsmotor in einem effizienten Lastbereich zu betreiben.<sup>24</sup> Für diese Aufgaben sind üblicherweise 0,5 bis 3,0 kWh Speicherkapazität ausreichend.<sup>25</sup> Eine größere Bedeutung kommt der zulässigen **Lade- und Entladeleistung** zu, denn die Batterie muss in der Lage sein, die beim Verzögern entstehenden hohen Leistungen der elektrischen Maschine aufnehmen zu können.<sup>26</sup> Abhängig von der Leistung des verwendeten Elektromotors muss die Batterie üblicherweise eine Spitzenleistung zwischen 15 und 50 kW aufweisen.<sup>27</sup>

Bei **Plug-in-Hybridfahrzeugen** ist die rein elektrische Reichweite von hoher Bedeutung, sodass größere Energiespeicher als in Hybridfahrzeugen benötigt werden. Die Auslegung der Batterie hinsichtlich Energie und Leistung ist insbesondere abhängig von der angestrebten elektrischen Reichweite und von Ladezustandsdefinitionen, die dem

---

<sup>21</sup> Vgl. Broussely 2010, S. 330.

<sup>22</sup> Spezifische Energie und spezifische Leistung beziehen sich auf die verfügbare Energie bzw. Leistung je Kilogramm des Batteriesystems oder der Batteriezelle. Hierzu auch Futschik et al. 2013, S. 167; diese sprechen von gravimetrischer Energie- und Leistungsdichte. Mit einer hohen spezifischen Leistung geht konstruktionsbedingt eine eher niedrige spezifische Energie einher (et v. v.). Neben der Masse wird außerdem das Volumen als Bezugsgröße herangezogen (volumetrische Energie-/Leistungsdichte).

<sup>23</sup> Vgl. Broussely 2010, S. 306,319,326,329f.; Wallentowitz und Freialdenhoven 2011, S. 59.

<sup>24</sup> Vgl. Wallentowitz und Freialdenhoven 2011, S. 58–59.

<sup>25</sup> Vgl. bspw. Broussely 2010, S. 307; Hoyer et al. 2011a, S. 211 (dort: 1,3 kWh); Wallentowitz und Freialdenhoven 2011, S. 88 (dort: 0,6–2,0 kWh).

<sup>26</sup> Vgl. Wallentowitz und Freialdenhoven 2011, S. 105.

<sup>27</sup> Vgl. Broussely 2010, S. 307.

Treibstoffsparen und der Schonung der Batterie dienen, und liegt üblicherweise zwischen 5 und 15 kWh bzw. 30 und 100 kW.<sup>28</sup>

In **vollelektrischen Fahrzeugen** ist die Batterie die einzige Energiequelle, sodass deren Speicherkapazität neben dem Gewicht des Fahrzeugs der ausschlaggebende Parameter zur Erzielung hinreichender Reichweiten ist. Für Kleinst- und Kleinwagen werden dabei Reichweiten von mindestens 160 km gefordert.<sup>29</sup> Dies entspricht einer Energie von etwa 25 kWh.<sup>30</sup> Die Speicherkapazität und damit auch die Reichweite werden jedoch stark durch das Gewicht, das Volumen und die Kosten der Batterie eingeschränkt. Die zu verwendende Batterietechnologie sollte daher besonders hohe gravimetrische und volumetrische Energiedichten und niedrige Stückkosten vereinen.<sup>31</sup> Für vollelektrische Fahrzeuge werden darüber hinaus Leistungen von 35 bis 70 kW gefordert.<sup>32</sup> Aufgrund des fehlenden Verbrennungsmotors müssen die Batterien auch bei niedrigen Temperaturen leistungsfähig sein.<sup>33</sup> Angesichts der vergleichsweise geringen Reichweiten voll-elektrischer Fahrzeuge kommt eine besondere Bedeutung überdies der Ladeleistung zu, welche die Dauer der Ladung bestimmt. Die Ladedauer sollte 3 bis 6 Stunden nicht übersteigen, um eine Vollladung während der Nacht oder der Arbeitszeit zu ermöglichen; darüber hinaus wird langfristig eine Schnellademöglichkeit gefordert, die eine Teilaufladung (auf 40 bis 80 Prozent) binnen 15 Minuten erlaubt.<sup>34</sup>

Beispielhafte Anforderungen der unterschiedlichen Antriebskonzepte an Leistung, Energie und Spannung der Batterie werden in Tabelle 2.2 aufgezeigt. Tabelle 2.3 stellt

---

<sup>28</sup> Ladezustandsdefinitionen regeln, ab welchem Ladezustand der Batterie das Fahrzeug vom Entladungsmodus in den Ladeerhaltungsmodus mit verringerter Entladerate wechselt und ab welchem Ladezustand der Verbrennungsmotor als primäre Energiequelle wirkt. Vgl. Broussely 2010, S. 326–327 zur Funktionsweise des Entladungs- und des Ladeerhaltungsmodus und zum Treibstoffsparen. In Ketterer et al. 2009, S. 48–49 ist die Funktionsweise abweichend beschrieben sowie der Betrieb im schonenden Ladezustand motiviert.

<sup>29</sup> Beispielsweise gibt die Nationale Plattform Elektromobilität für das Referenzfahrzeug „Stadtfahrzeug“ für das Jahr 2020 eine elektrische Reichweite von 160 km an (vgl. Nationale Plattform Elektromobilität 2010a, S. 3).

<sup>30</sup> Bei 290 kg Batteriegewicht, 1.200 kg Fahrzeuggewicht und einem Verbrauch von 135 Wh/(km · t).

<sup>31</sup> Spezifikationen für ein 40-kWh-Batteriesystem, vgl. U.S. Advanced Battery Consortium LLC (o. J.). Die Nationale Plattform Elektromobilität gibt dagegen in ihrem neueren „Key-Performance-Spinnendiagramm“ niedrigere Zielwerte von 100 Wh/kg, 150 Wh/l und 500 EUR/kWh für 2014 an (vgl. Nationale Plattform Elektromobilität 2010b, S. 8).

<sup>32</sup> Vgl. Broussely 2010, S. 307.

<sup>33</sup> Vgl. z. B. Ketterer et al. 2009, S. 38.

<sup>34</sup> Vgl. U.S. Advanced Battery Consortium LLC (o. J.).

Zieldefinitionen der deutschen Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) und des US-amerikanischen U.S. Advanced Battery Consortium (USABC) für ausgesuchte Leistungsparameter von Batterien für vollelektrische Fahrzeuge gegenüber. In Tabelle 2.4 sind Beispiele für die Auslegung von Batterie und Elektromotor gegeben.

**Tabelle 2.2 Anforderungen unterschiedlicher Antriebskonzepte an Leistung, Energie und Spannung der Traktionsbatterie<sup>35</sup>**

Antriebskonzept	Leistung [kW]	Energie [kWh]	Spannung [V]
Hybridfahrzeug	15–50	0,5–3,0	120–350
Plug-in-Hybridfahrzeug	30–100	5–15	200–350
Vollelektrisches Fahrzeug	35–70	25–40	200–350

**Tabelle 2.3 Zieldefinitionen für ausgesuchte Parameter von Batterien für vollelektrische Elektrofahrzeuge<sup>36</sup>**

Parameter der Batterie	Nationale Plattform Elektromobilität, Ziele für 2020	USABC, Minimalziele zum langfristigen Erfolg
Spezifische Energie, ggf. Betriebsbereich	130 Wh/kg	150 Wh/kg
Spezifische Leistung ggf. Betriebsbereich	600 W/kg Spitzenleistung bei 25°C und 50% SoC <sup>37</sup>	300 W/kg über 30 Sekunden bei 20% SoC
Spezifische Mindestleistung Betriebsbereich	90 W/kg bei –25°C und 50% SoC	240 W/kg bei –40°C bis +50°C
Spezifische Kosten	250 EUR/kWh bei 250.000 Stück/a	< 150 USD/kWh bei 25.000 Stück/a und 40 kWh

<sup>35</sup> Angaben aus Broussely 2010, S. 307.

<sup>36</sup> Vgl. Nationale Plattform Elektromobilität 2010b, S. 8 und U.S. Advanced Battery Consortium LLC (o. J.). Die Angaben der NPE beziehen sich auf ein Referenz-Stadtfahrzeug der Kleinst- oder Kleinwagenklasse (Nationale Plattform Elektromobilität 2010a, S. 3) und orientieren sich an dem Stand der Technik, während die Kriterien des USABC sich auf „ein mit konventionellen Mittelklasselimosinen vergleichbares Elektrofahrzeug“ (Ketterer et al. 2009, S. 45) beziehen. Die USABC-Kriterien wurden jedoch bereits vor dem Jahr 2000 aufgestellt (Broussely 2010, S. 330) und sind dem Anschein nach eher technologieunabhängig festgelegt worden. So sind auch die erheblichen Zielabweichungen der Angaben von NPE und USABC zu erklären.

<sup>37</sup> „State of Charge“ (SoC) bzw. „Depth of Depletion“ (DoD) beziehen sich auf den „Ladestand“ der Batterie, also die verbleibende respektive verbrauchte Energie in Prozent relativ zur Nennenergie. 20% SoC ist gleichbedeutend mit 80% DoD.

Tabelle 2.4 Auslegung von Batterie und Elektromotor in beispielhaften Elektrofahrzeugen<sup>38</sup>

Modell (Modelljahr)	Antriebs- konzept	El. Reich- weite [km]	Batterie- typ	Energie [kWh]	Spez. Ener- gie [Wh/kg]	Batterie- spannung [V]	Batterie- masse [kg]	Leistung E-Motor [kW]
Mercedes-Benz S 400h ('10)	HEV	-	LIB	0,8	32	126	25	15
VW Touareg Hybrid ('10)	HEV	-	NiMH	1,7	22	288	79	34
Lexus IS 300h ('14)	HEV	-	NiMH	1,5	30	230	50	105
Toyota Prius Plug-in ('14)	PHEV	20	LIB	5,2	33	346	160	60
Opel Ampera ('10)	PHEV	60	LIB	16	89	360	180	111
Tesla Model S ('13)	BEV	480	LIB	85	106	375	800	270
BMW i3 ('13)	BEV	190	LIB	21,6	94	360	230	125
VW e-Up! ('13)	BEV	160	LIB	18,7	81	374	230	60

NiMH: Nickel-Metallhydrid-Batterie, LIB: Lithium-Ionen-Batterie

### 2.1.3 Technologien für Batteriesysteme und Eignung der Lithium-Ionen-Technologie

Die wesentlichen, für den Einsatz in Elektrofahrzeugen grundsätzlich geeigneten Batterietechnologien sind Bleibatterien, Nickel-Cadmium-Batterien, Nickel-Metallhydrid-Batterien, Natrium-Nickelchlorid-Batterien und Lithium-Ionen-Batterien.

**Bleibatterien** bedeuteten gegen Ende des 19. Jahrhundert den weltweiten kommerziellen Durchbruch für Elektrofahrzeuge, bis diese dann in den 1920er- bis 1930er-Jahren durch den Verbrennungsmotor weitestgehend verdrängt wurden. Erhalten blieb die Bleibatterie als Starterbatterie. In Bleibatterien werden Blei und Bleioxid als Aktivmaterialien und wässrige Schwefelsäure als Elektrolyt eingesetzt. Sie zeichnen sich durch eine verhältnismäßig hohe Spannung von ca. 2 V, eine kurzzeitige Belastbarkeit mit hohen Strömen, gute Recyclingfähigkeit und niedrige Herstellungskosten, jedoch auch durch niedrige spezifische Energie (30 bis 40 Wh/kg) und Leistung, hohe Selbstentladung und kurze Lebensdauer aus.<sup>39</sup> Neuere Varianten wie die Blei-Gel-Batterie konnten diese Nachteile etwas verringern. Bleibatterien wurden während der Elektromobilitätswellen

<sup>38</sup> Zusammenstellung aus Herstellerangaben, Demontageanleitungen und teilweiser Abgleich mit Daten aus Braess und Seiffert 2013, S. 188–198; Volkswagen AG 2013, S. 26 und König 2010. Ggf. gerundete Werte.

<sup>39</sup> Vgl. bspw. Möller 2013, S. 5.



der 1970er- und 1990er-Jahre in Deutschland in Elektrofahrzeugen eingesetzt, so zum Beispiel in Kleinstserien der Volkswagen-Golf-Modelle erster und dritter Generation.<sup>40</sup>

**Nickel-Cadmium-Batterien** (NiCd) wurden gegen 1900 entwickelt und verwenden Nickeloxidhydroxid und Cadmium als Aktivmaterialien sowie eine zwanzigprozentige Kaliumhydroxidlösung als Elektrolyt. Die Spannung beträgt 1,2 V und die Energiedichte etwa 40 bis 60 Wh/kg.<sup>41</sup> Die Vorteile der Nickel-Cadmium-Batterien äußern sich insbesondere in der hohen Strombelastbarkeit und der Einsatzbereitschaft selbst bei tiefen Temperaturen von  $-40^{\circ}\text{C}$ . Nickel-Cadmium-Batterien wurden deshalb in der Vergangenheit auch in Elektrofahrzeugen eingesetzt. Der weiteren Verwendung für die Elektromobilität steht jedoch neben einer hohen Selbstentladungsrate die gegenwärtige Rechtslage in der EU entgegen, welche die Verwendung des hoch toxischen Cadmiums in Produkten bis auf wenige Ausnahmefälle untersagt.<sup>42</sup>

**Nickel-Metallhydrid-Batterien** (NiMH) stellen eine Weiterentwicklung der Nickel-Cadmium-Batterien dar, in der das Cadmium durch eine Metallhydridlegierung ersetzt wurde. Die Legierung kann aus verschiedenen Schwermetallen (z. B. Nickel, Cobalt) und Seltenen Erden (z. B. Lanthan) bestehen.<sup>43</sup> Mit Nickel-Metallhydrid-Batterien kann eine höhere spezifische Energie von 60 bis 90 Wh/kg erzielt werden. Im Vergleich zur Nickel-Cadmium-Batterie sind sie jedoch weniger belastbar, weniger einsatzbereit bei geringen Temperaturen, weniger robust gegenüber Überladung und weisen einen vergleichsweise geringen Wirkungsgrad auf. Nickel-Metallhydrid-Batterien werden sehr verbreitet in Hybridfahrzeugen eingesetzt.

---

<sup>40</sup> Vgl. Die Welt 2014. Die sogenannten „CityStromer“ erzielten Reichweiten von 50 bzw. 70 Kilometern und Leistungen von 12 bzw. 20 kW.

<sup>41</sup> Spezifische Energie und Leistung der verschiedenen Batterietechnologien auf Zellebene sind stark abhängig von der konkreten Auslegung einer Zelle (z. B. als Hochleistungs- oder Hochenergiezelle). Entsprechend finden sich ganz unterschiedliche Angaben in Literatur und Internet. Diese und die folgenden Angaben orientieren sich an denen von Möller 2013, S. 5; Wallentowitz und Freialdenhoven 2011, S. 105; Guetif 2007, S. 60 und den jeweiligen darin Zitierten.

<sup>42</sup> Richtlinien 2002/95/EG (RoHS 1) und 2011/65/EU (RoHS 2). In verschiedenen Ländern außerhalb der EU gelten ähnliche Verbote.

<sup>43</sup> Vgl. Möller 2013, S. 6

Die **Natrium-Nickelchlorid-Batterietechnologie („ZEBRA“)** ist eine Weiterentwicklung der in den späten 1970er-Jahren entwickelten Natrium-Schwefel-Batterien. Als Aktivmaterialien kommen Natriumchlorid (Kochsalz) und Nickel und somit verhältnismäßig günstige Materialien zum Einsatz. Die ZEBRA-Batterien werden im Hochtemperaturbereich von typischerweise 300°C betrieben, um den Ionenaustausch durch den Aluminiumoxid-Feststoffelektrolyten zu ermöglichen.<sup>44</sup> Mit der Technologie wird eine hohe Energiedichte zwischen 100 und 120 Wh/kg und eine hohe Zuverlässigkeit erzielt,<sup>45</sup> so dass sie vor allem im stationären und im Militärbereich, aber vereinzelt auch in Elektrofahrzeugflotten eingesetzt wird. Dem stärkeren Einsatz in Elektrofahrzeugen steht entgegen, dass die ZEBRA-Batterien auch bei Nichtnutzung auf konstant hoher Temperatur gehalten werden müssen. Dies führt zu niedrigen Wirkungsgraden und gegebenenfalls zu Reichweiteinbußen, da die notwendige Energie entweder aus dem Netz oder der Batterie selbst entnommen werden muss. Zudem werden nur vergleichsweise geringe Leistungsdichten erreicht.

Die vielversprechendste Batterietechnologie für die Elektromobilität ist die **Lithium-Ionen-Technologie**. Basis für deren Entwicklung ab den 1970er-Jahren war die nicht-wiederaufladbare Lithiumbatterie, in der metallisches Lithium auf Anodenseite eingesetzt wurde. Lithium ist das leichteste unter Standardbedingungen feste Element; das Lithium-Ion ( $\text{Li}^+$ ) besitzt hierdurch eine sehr hohe spezifische Ladung von 3.861 Ah/kg und weist das niedrigste Standardpotential ( $-3,05$  V gegen eine Wasserstoffelektrode) aller Elemente auf. Damit beträgt die theoretische Energiedichte 11.777 Wh/kg, die aus vielfältigen Gründen jedoch nicht erreicht werden kann. Aufgrund der Bildung von Dendriten ist ein Aufladen von Lithiumbatterien nicht möglich.<sup>46</sup> Um Reversibilität zu erreichen, wird in Lithium-Ionen-Batterien auf negativer Elektroden Seite statt metallischem Lithium eine interkalationsfähige Verbindung eingesetzt.<sup>47</sup> Beim Aufladen der Batterie werden Lithium-Ionen in diese interkaliert. Die Elektronen reduzieren im Gegensatz zur Lithiumbatterie nicht die Lithium-Ionen, sondern die Interkalationsverbindung. Als

---

<sup>44</sup> Vgl. Möller 2013, S. 6–7.

<sup>45</sup> Zur Energiedichte vgl. Wallentowitz und Freialdenhoven 2011, S. 106; Möller 2013, S. 6.

<sup>46</sup> Vgl. Möller 2013, S. 4.

<sup>47</sup> Interkalation meint die Einlagerung von Molekülen, Ionen oder Atomen in eine chemische Struktur.

Strategische Planung des Recyclings von  
Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in  
Deutschland

Hoyer, C.

2015, XXVII, 230 S. 42 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-10273-9