

Sammlung von Elektroaltgeräten in Depotcontainern – Nutzen und Gefährdungsanalyse –

Markus Hertel, Hermann Nordsieck, Alexander Martin und Wolfgang Rommel

1.	Stand der Elektroaltgerätesammlung in Deutschland	462
2.	Sammlung von Elektroaltgeräten in Depotcontainern	463
2.1.	Praxis der Depotcontainersammlung.....	464
2.2.	Potenzial an Elektro- und Elektronikaltgeräten, die in Depotcontainern gesammelt werden können	465
2.3.	Untersuchung des Sammelguts	467
2.3.1.	Kategorien der Elektroaltgeräte.....	468
2.3.2.	Batterien im Sammelgut.....	468
2.3.3.	Beschädigungsgrad, Kapazität und Ladezustand der Batterien.....	469
3.	Gefährdungsanalyse.....	470
3.1.	Randbedingungen der Gefährdungsanalyse	470
3.1.1.	Betrachtungsraum.....	470
3.1.2.	Fehlerfolgen	470
3.1.3.	Auftretenswahrscheinlichkeiten und deren Bewertung	471
3.1.4.	Entdeckungswahrscheinlichkeit (E)	471
3.2.	Betrachtung spezifischer Fehlermechanismen.....	472
3.2.1.	Austritt gefährlicher Flüssigkeiten und Gase	472
3.2.2.	Unkontrollierte Wärmefreisetzung (<i>thermal runaway</i>)	472
3.2.3.	Brandentstehung und Ausweitung	473
3.3.	Ableitung der Eintrittswahrscheinlichkeit einzelner Fehler.....	474
3.3.1.	Wahrscheinlichkeit mechanischer Beschädigung	474
3.3.2.	Wahrscheinlichkeit eines äußeren Kurzschlusses.....	476
3.3.3.	Wahrscheinlichkeit eines Brands in Folge eines thermal runaway oder eines Kurzschlusses.....	477
3.3.4.	Wahrscheinlichkeit eines Vollbrands in Folge eines Schwelbrands und des Übergreifens eines Vollbrands.....	477
3.4.	Wahrscheinlichkeit und Auswirkungen verketteter Fehler.....	478
3.4.1.	Wahrscheinlichkeit verketteter Fehler.....	478
3.4.2.	Gefährdungsbeurteilung einer bundesweiten Sammlung	480

4.	Handlungsmöglichkeiten	481
4.1.	Optimierung des Sammelsystems.....	481
4.2.	Fehlererkennung und Qualitätssicherung.....	482
4.3.	Erreichen ADR-konformer Transporte.....	482
5.	Ausblick.....	483
6.	Literatur.....	483

1. Stand der Elektroaltgerätesammlung in Deutschland

Nach den Maßstäben der Elektroaltgeräterichtlinie 2002 (RL 2002/96/EG) und ElektroG 2005 lag das Sammelziel der Menge von Elektroaltgeräten aus privaten Haushalten bei 4 kg/(Ew*a) bzw. dem Mittelwert der in den drei vorangegangenen Jahren erfassten Menge. Mit spezifischen Sammelmengen zwischen 6,5 kg/(Ew*a) und 9,1 kg/(Ew*a) erschien die EAG-Sammlung in Deutschland eigentlich recht erfolgreich. Aufgrund systematischer Unterschiede in der Datenerhebung bestehen Unterschiede zwischen den Mengen, die von den statistischen Landesämtern erhoben werden und den Mengenmeldungen der Stiftung ear [6]. Davon unabhängig war etwa seit dem Jahr 2010 und dem Jahr 2015 eher ein Stagnieren der Sammelmengen als ein Anstieg zu verzeichnen [12] (Bild 1).

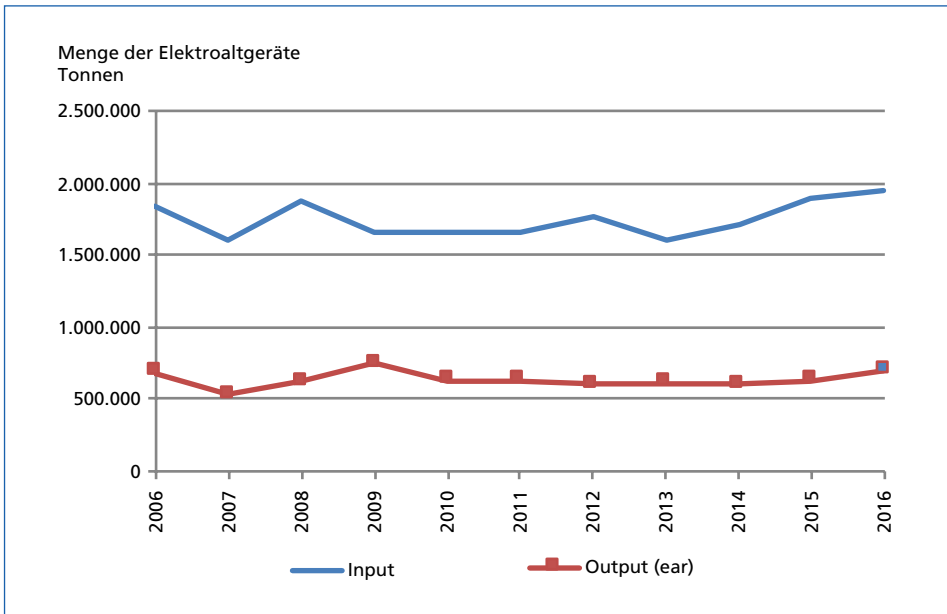


Bild 1: Mengen, der in Verkehr gebrachten und als Altgeräte erfassten Elektrogeräte

Quelle: Daten der Stiftung ear

Seit 2016 ist der Zielwert der Elektro- und Elektronik-Altgerätesammlung definiert als ein Anteil der in den drei Vorjahren in Verkehr gebrachten Geräte. Der Anteil steigt von 45 Prozent (2016) auf 65 Prozent im Jahr 2019. Bei einer im Mittel der Jahre 2013 bis 2015 in Verkehr gebrachten Menge von rund 21,4 kg/(Ew*a) Elektrogeräten müssten im Jahr 2016 9,6 kg/Ew*a Elektroaltgeräte erfasst worden sein. Die offiziellen Daten liegen noch nicht vor [4], es ist aber zu befürchten, dass dieses Ziel allenfalls knapp erreicht wird. Für die Folgejahre bis zur Steigerung der Sammelquote auf 65 Prozent der in Verkehr gebrachten Geräte sind erhebliche Anstrengungen erforderlich.

Neben der bislang mit rund 10 Prozent der Sammelmenge nicht übermäßig erfolgreichen Sammlung im Handel erweitert das Aufstellen von Depotcontainern das Bündel der Maßnahmen, die zu einer erfolgreichen Sammlung beitragen.

2. Sammlung von Elektroaltgeräten in Depotcontainern

Die Sammlung von Elektrokleingeräten in Depotcontainern ist eine Möglichkeit, die Erfassung von Elektroaltgeräten durch Erweiterung des Bringsystems bürgerfreundlich zu gestalten.

Insbesondere öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger (örE) haben vor einigen Jahren erfolgreich in Depotcontainersysteme für Elektrokleingeräte investiert, um die Sammelmengen zu erhöhen und um Elektroaltgeräte aus dem Restabfall in die geeigneten Erfassungs- und Verwertungswege zu leiten. Der Sammelkanal Depotcontainersysteme wurde von der Bevölkerung hervorragend angenommen. Er stellt in den Gebietskörperschaften, die diesen Sammelkanal anbieten, einen wichtigen Bestandteil bei der Erfassung von Elektroaltgeräten dar.

Elektrokleingeräte enthalten in bestimmtem Umfang auch Lithiumbatterien. Weil Lithiumbatterien Gefahrgut sind, unterliegt der Transport von Lithiumbatterien den Vorschriften des ADR, das für den Transport letztlich eine Verpackung der Batterien oder gleichwertigen Schutz fordert. Die derzeitige Praxis der Sammlung von Elektroaltgeräten in Depotcontainern mit Umleeren in Abrollcontainer zum Transport ist daher nur dann mit dem Gefahrgutrecht zu vereinbaren, wenn das Sammelgut frei von Lithiumbatterien ist. Gleichwohl gelangen erfahrungsgemäß auch Lithium-Batterien bzw. Elektroaltgeräte, die Lithium-Batterien enthalten, als Fehlwurf in die Depotcontainer.

Vor diesem Hintergrund hat das bifa Umweltinstitut als Basis für eine Gefährdungsanalyse im Jahr 2016 eine Bestandsaufnahme der Praxis der Sammlung in Depotcontainern durchgeführt. Auftraggeber der Untersuchung waren einerseits Kommunalbetriebe, andererseits der Verband kommunaler Unternehmen und einige Privatfirmen. Im Rahmen der Untersuchung wurde bei neun über die Bundesrepublik verteilten Gebietskörperschaften unterschiedlicher Siedlungs- und Bevölkerungsstruktur die Zusammensetzung des Sammelguts aus der Elektrokleingerätesammlung in Depotcontainern analysiert und die Menge und Eigenschaften der enthaltenen Lithiumbatterien ermittelt. Aufgrund der Zahl und Auswahl der untersuchten Gebietskörperschaften und der Größe der Probe (42.100 kg) wird das Ergebnis als repräsentativ für die Praxis des Betriebs von Depotcontainersystemen zur Erfassung von Elektrokleingeräten vor einer Optimierung angesehen.

2.1. Praxis der Depotcontainersammlung

Zur Sammlung von Elektroaltgeräten werden verschiedene Behältersysteme eingesetzt. Neben den überwiegend eingesetzten Behältern mit Unterflurleerung wurden von verschiedenen Herstellern auch Lösungen entwickelt, bei denen Behälter in die Depotcontainer eingestellt werden. In der Regel haben die Behälter ein Volumen von 3 bis 4 m³. Die Größe und die Höhe der Einwurfföffnung begrenzen die Abmessungen der Elektrokleingeräte auf etwa 0,5 m Kantenlänge und die maximale Fallhöhe im Behälter auf etwa 1,2 m. Der Behälterboden und die Wände sind mit einer elektrisch nicht leitenden Dämmschicht ausgestattet.

In Bild 2 sind die Prozessschritte der Sammlung in Umleerbehältern schematisch dargestellt. Bei sachgerechter Durchführung und Absenken der Depotcontainer in den Transportcontainer sind die Fallhöhen beim Um- und Entladen auf 0,3 m begrenzt. Die Belastungen der Geräte sind daher nicht höher als beim fachgerechten Umgang nach LAGA M 31a [3].

Anzumerken ist, dass der dargestellte Transport in loser Schüttung nach ADR nicht zulässig ist, wenn Lithiumbatterien im Sammelgut enthalten sind. Der Transport der gefüllten Depotcontainer im Tausch ist im Rahmen einer multilateralen Vereinbarung nach ADR hingegen zulässig. Lithiumbatterien und Geräte, die Lithiumbatterien enthalten, werden daher von der Sammlung in den Depotcontainern ausgeschlossen. Die Container sind dem entsprechend gekennzeichnet. Teilweise wird am Containerstandort die Möglichkeit zur Entsorgung von (Lithium-) Batterien bzw. entsprechender Geräte gegeben, um die Zahl von Fehlwürfen zu minimieren.

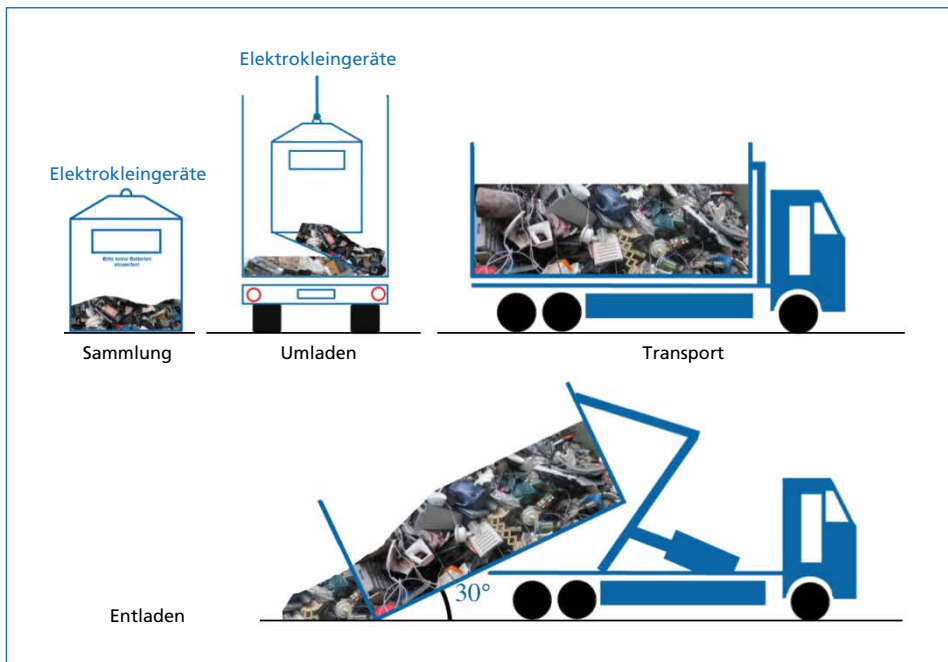


Bild 2: Prozessschritte der Elektrokleingerätesammlung in Depotcontainern

2.2. Potenzial an Elektro- und Elektronikaltgeräten, die in Depotcontainern gesammelt werden können

Kleingeräte, die in Depotcontainern gesammelt werden können, sind in allen Kategorien des ElektroG vertreten mit Ausnahme der Kategorien 1 (eingeschränkt), 5 und 10. Mikrowellengeräte als die größten im Sammelgut vertretenen Geräte werden der Kategorie 1 zugeordnet, insofern ist auch diese vertreten. Gasentladungslampen als Geräte der Kategorie 5 (Beleuchtungskörper) müssen wegen der Bruchgefahr ausgeschlossen werden.

Damit lassen sich mit Einschränkungen hinsichtlich der Geräteabmessungen die Geräte der Sammelgruppen (alt) 3 und 5 in Depotcontainern erfassen. Mit Ausnahme sehr großer Geräte trifft das auch auf die neuen Sammelgruppen 3 (Bildschirmgeräte) und 5 (Kleingeräte mit Kantenlängen unter 0,5 m) zu.

Wie Bild 3 zeigt, sind die von der Stiftung ear gemeldeten Sammelmengen der Gruppen 3 und 5 in den letzten Jahren deutlich gesunken. Maßnahmen zur Erfassung der Kleingeräte kommt daher besondere Bedeutung zur Steigerung des Erfolgs der Elektroaltgeräteerfassung zu.

Rechnerisch ergibt sich das Potenzial an Geräten, die zusätzlich erfasst werden könnten in erster Näherung aus der Differenz der Menge der in Verkehr gebrachten Geräte und der bei der Sammlung erfassten Geräte. Für das Jahr 2016 wäre das eine Menge von 7 kg/(Ew*a). Selbst wenn wie in den letzten Jahren die Menge der Geräte aus Kategorie 2 (Haushaltskleingeräte) den statistischen Erhebungen zufolge um rund 1 kg/(Ew*a) höher als die Zahl der Stiftung ear liegt, bleibt das theoretische Potenzial mit 6 kg/(Ew*a) erheblich.

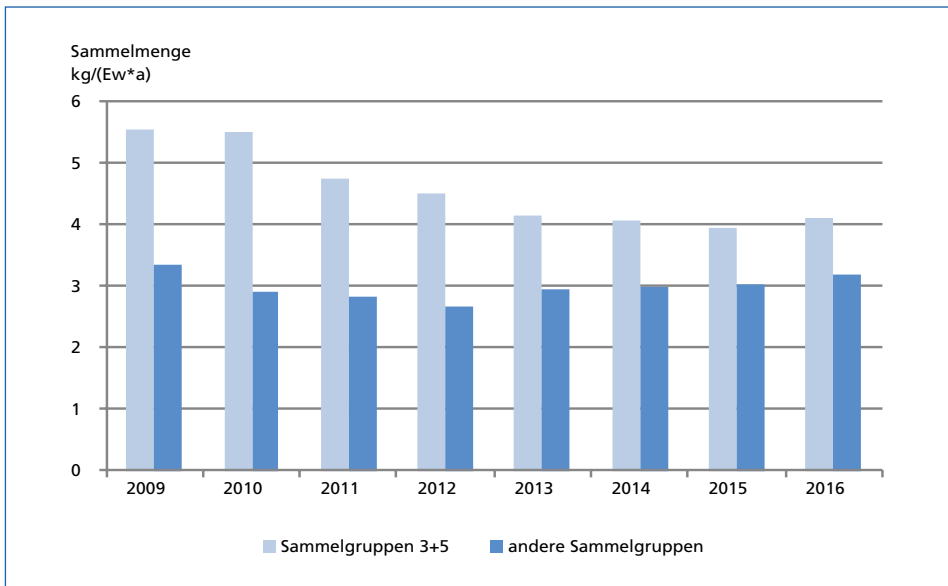


Bild 3: Spezifische Sammelmengen der Sammelgruppen 3 und 5 im Vergleich zu den Mengen der anderen Sammelgruppen

Quelle: Daten der Stiftung ear

Die Sammelerfolge der einzelnen Gebietskörperschaften waren unter anderem wegen der sehr unterschiedlichen Standortdichte der Depotcontainer sehr unterschiedlich. In der Regel war der Auswertung der Sammelmengen zufolge mit Einführung der Depotcontainersammlung ein signifikanter Anstieg der Sammelmengen der Gruppen 3 und 5 verbunden. Wenn bei der Sammlung auf Wertstoffhöfen hohe Sammelmengen erreicht wurden, war eine Verschiebung von der Wertstoffhofsammlung zur Sammlung in den Depotcontainern zu verzeichnen.

In städtisch strukturierten Gebietskörperschaften wird das konventionelle Bringsystem meist eher schlecht genutzt. Hier waren mit über 1 kg/(Ew*a) recht hohe Sammelerfolge zu verzeichnen, die kaum zu Lasten der konventionellen Sammlung gingen. Als Beispiel ist in Bild 4 der Verlauf der Sammelmengen nach Einführung der Depotcontainersammlung dargestellt. Im Jahr 2017 stiegen die Sammelmengen dort auf 1,7 kg/(Ew*a) ohne dass die Standortdichte weiter erhöht worden wäre. In einer anderen Kommune wurde mit einer seit vielen Jahren etablierten Depotcontainersammlung eine Sammelmenge von 1,8 kg/(Ew*a) erreicht.

Somit erscheint daher in der Praxis eine Sammelmenge von bis zu knapp 2 kg/(Ew*a) Elektrokleingeräte allein über Depotcontainer erreichbar.

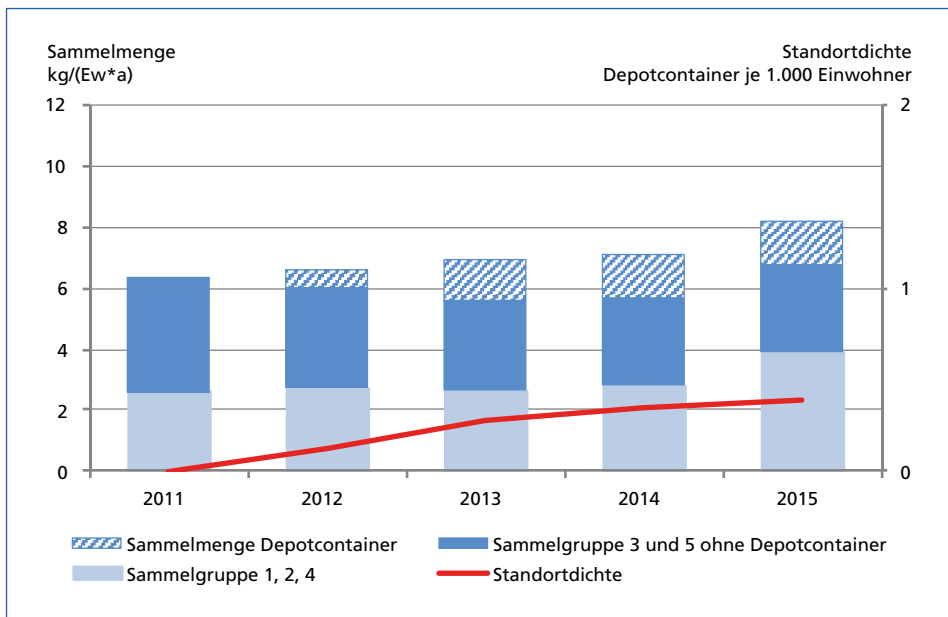


Bild 4: Spezifische Sammelmengen der Depotcontainer, der Sammelgruppen 3 und 5, der anderen Sammelgruppen und Standortdichte in einer Großstadt

Die Daten zu den Sammelmengen bei den Studienteilnehmern lassen eine Auswertung hinsichtlich der Standortdichte zu. Eine Steigerung der Depotcontainerdichte hat bei geringen Standortdichten zunächst eine starke Steigerung der Sammelmenge zur

Folge. Bei weiterem Verdichten des Netzes von Depotcontainerstandorten nimmt die Sammelmenge unterproportional weiter zu. Die je Depotcontainer jährlich erfasste Menge von Elektrokleingeräten sinkt bei hoher Standortdichte aber deutlich ab, so dass ein Optimum zwischen Aufwand (d.h. Zahl der Depotcontainer) und Sammelerfolg im Bereich einer Standortdichte von etwa 0,3 bis 0,6 DC je 1.000 Einwohnern liegt.

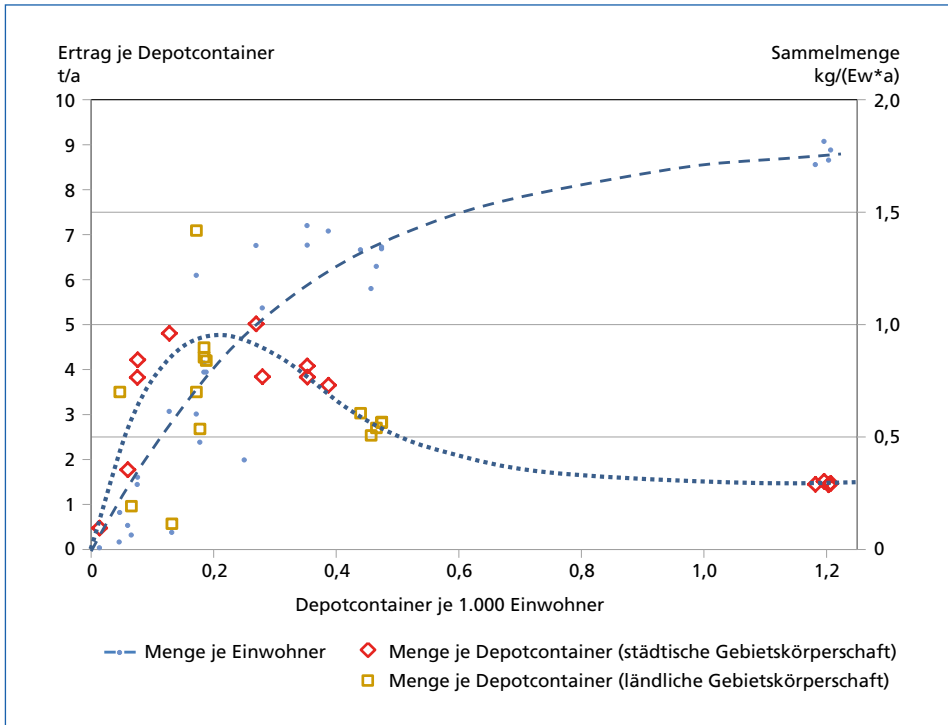


Bild 5: Spezifische Sammelmengen und Ertrag je Depotcontainer in Abhängigkeit von der Standortdichte

2.3. Untersuchung des Sammelguts

Das Sammelgut von 9 Depotcontainersystemen in unterschiedlich strukturierten Gebietskörperschaften verschiedener Bundesländer wurde mit je einer oder mehreren Abfahrten beprobt. Insgesamt wurden 42.100 kg Elektroaltgeräte aus 12 Stichproben untersucht. In den Proben wurden insgesamt 22.926 Elektroaltgeräte identifiziert und einer von 280 Gerätearten zugeordnet, so dass eine Zuordnung zu den Kategorien des ElektroG möglich war. Die Massenanteile der Gerätearten und die mittleren Stückgewichte der einzelnen Gerätearten sowie der Beschädigungsgrad wurden ermittelt. Lose und in Geräten eingebaute Lithiumbatterien wurden nach Stückzahl, Beschädigungsgrad und Gewichtsklasse erfasst. Von sonstigen losen Batterien, Steckernetzteilen (zusammen mit losen Kabeln) und anderen Abfällen wurde nur der Massenanteil ermittelt (*Sonderfraktionen*).

2.3.1. Kategorien der Elektroaltgeräte

Wie Bild 6 zeigt, stellten Haushaltskleingeräte mit 33 Ma.-% und Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik mit 31 Ma.-% der EAG die wichtigsten Fraktionen des Sammelguts dar, darauf folgten Geräte der Unterhaltungselektronik mit 15 Ma.-%. Kleine Haushaltsgroßgeräte wie z.B. Mikrowellenöfen waren zu 8 Ma.-% im Sammelgut zu finden.

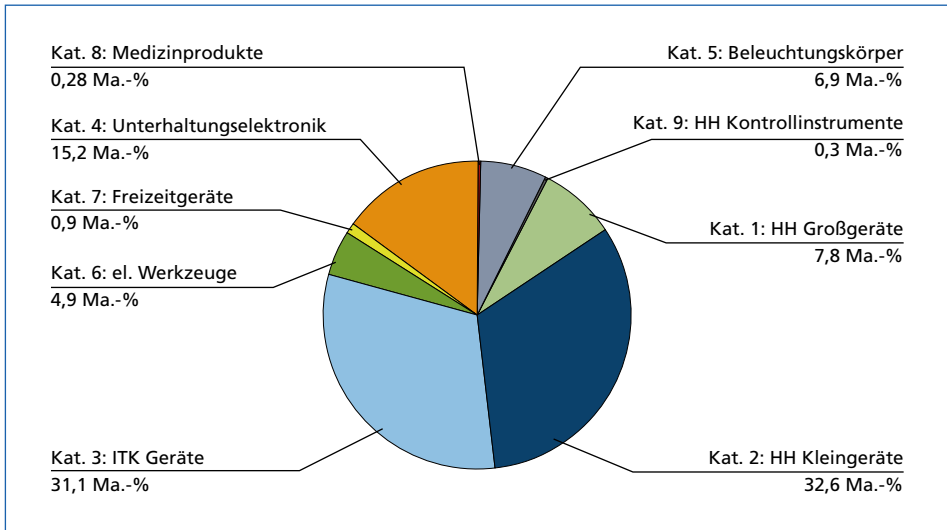


Bild 6 Kategorien der Elektroaltgeräte (Massenanteile bezogen auf die gesammelten Elektroaltgeräte)

Die Sonderfraktionen hatten einen Massenanteil an der Gesamtprobe (GP) von rund 13 Prozent. Sie setzen sich aus Kabeln und Steckernetzteilen (4,5 Prozent GP), Kleinmetall und Schrott (3,9 Prozent GP) losen Batterien (Li: 0,1 Prozent GP, nicht Li: 0,6 Prozent GP) und sonstigen Abfällen zusammen. Kleinmetall und Schrott werden in einigen der untersuchten Sammelsysteme gezielt miterfasst.

2.3.2. Batterien im Sammelgut

Insgesamt enthielt das Sammelgut 0,19 Ma.-% Li-Batterien und 0,64 Ma.-% nicht-Li-Batterien. Der überwiegende Anteil der Lithiumbatterien (70 Prozent, stückzahlbezogen) war in Geräte eingebaut. Tabelle 1 gibt eine Übersicht. Auffällig waren zwei Batterien mit einem Gewicht > 500 g. Sie hatten Nennkapazität < 100 Wh, die passenden Geräte fehlten.

Kleine Batterien mit einer Zelle und Stückgewichten unter 45 g wie beispielsweise in Mobiltelefonen oder Fotoapparaten eingesetzt werden, stellten den überwiegenden Teil der Batterien der Gewichtsklasse < 100 g dar.

Bei den meisten Proben lag die Zahl der losen Li-Batterien unter 10 Stück/t bzw. 1,25 m⁻³.

Tabelle 1: Stückzahlkonzentration der Li-Batterien nach Gruppe und Gewichtsklasse (Medianwerte)

Li-Batterien	Einheit	in Laptop/ Notebook	in Mobil- telefonen	in sonstigen Geräten	lose	Summe
Knopfzellen	Stk/m ³	0,50	n.e.	1,01	0,31	1,81
< 100 g	Stk/m ³	n.e.	0,90	0,40	0,32	1,69
100 bis 500 g	Stk/m ³	0,13	n.e.	< 0,01	0,45	0,58
> 500 g	Stk/m ³	n.e.	n.e.	n.e.	< 0,01	0,00
Summe	Stk/m ³	0,63	0,90	1,41	1,14	4,08
Massenanteil an der Gesamtprobe	%	0,05	0,02	0,02	0,11	0,19

n.e. = nicht enthalten

2.3.3. Beschädigungsgrad, Kapazität und Ladezustand der Batterien

Der mit 99 Prozent weit überwiegende Teil der Lithiumbatterien im Sammelgut war nicht mechanisch beschädigt. Dabei wurden oberflächliche Kratzer nicht als Beschädigung angesehen. Von den 16 mechanisch beschädigten Batterien wiesen 6 eindeutige Werkzeugspuren auf, diese Batterien wurden sicher vor der Erfassung beschädigt.

Rund 40 Prozent (Stückzahl) der Lithiumbatterien (ohne Knopfzellen) wurden nach einem Probenahmeplan zur detaillierteren Untersuchung ausgewählt. Der Ladezustand der Batterien wurde durch Entladen bis unter 2,5 V je Zelle ermittelt.

Wie Bild 7 zeigt, war der weit überwiegende Teil der Batterien (80 Prozent) vollständig entladen. Ein Ladezustand von mehr als 50 Prozent konnte bei 4,9 Prozent aller untersuchten Batterien festgestellt werden. Nur diese Batterien enthalten genug Ladung, dass bei Beschädigung oder Kurzschluss ein Folgeschaden wahrscheinlich ist (s.u.).

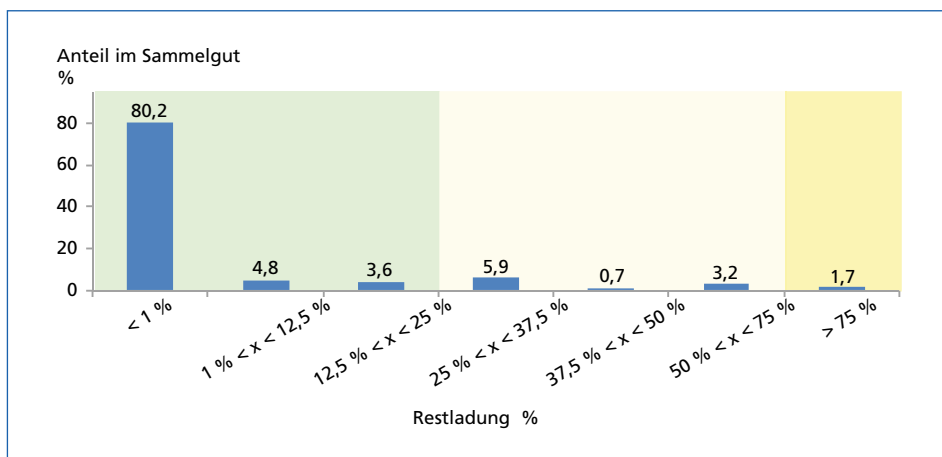


Bild 7: Restladung der Li-Batterien im Sammelgut

3. Gefährdungsanalyse

Bei der Gefährdungsanalyse wurden zwei Ansätze gewählt: einerseits wurde in Anlehnung an eine Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA) vorgegangen, um mögliche Fehler und Fehlerfolgen zu identifizieren, sie mit einer Risikoprioritätszahl zu bewerten und daraus Handlungshinweise abzuleiten, andererseits wurde die Wahrscheinlichkeit verknüpfter Fehler aus deren Einzelwahrscheinlichkeiten der Fehler berechnet und mit dem *ALARP*-Schema bewertet.

3.1. Randbedingungen der Gefährdungsanalyse

3.1.1. Betrachtungsraum

Als Grenzen des Betrachtungsrahmens wurde zu Beginn der Prozesskette der Einwurf des Elektroaltgeräts gewählt. Nach Umladen und Transport steht das Entladen der Geräte beim Erstbehandler am Ende der Prozesskette. Darauf folgende Arbeitsschritte wie Lagern, betriebsinterne Transporte, Schadstoffentfrachtung und Verwertung liegen außerhalb des Betrachtungsrahmens. Der Prozessschritt *Sammlung* unterliegt nur eingeschränkt dem Gefahrgutrecht: nur wenn in Depotcontainer eingestellte Behälter oder ganze Depotcontainer im Wechsel getauscht werden, ist die Sammlung als die Tätigkeit *Verpacken* anzusehen.

Der Betrachtungsraum bezieht sich zunächst auf das einmalige Durchlaufen der Prozesskette. Zum Schluss der Betrachtung werden die ermittelten Wahrscheinlichkeiten für verschiedene Szenarien der Verbreitung einer Sammlung von Elektroaltgeräten in Depotcontainern hochgerechnet.

3.1.2. Fehlerfolgen

Die Fehlerfolgen werden in der in Tabelle 2 dargestellten Abstufung gruppiert. Diese ist an verbreitete Gruppierungsschemata [10] angelehnt.

Tabelle 2: Bedeutung der Fehlerfolgen

Wertung	Beschreibung	Beispiel
1 zu vernachlässigen	keine merklichen Folgen, keine Verletzungen	Austritt von Gasen oder geringen Mengen Elektrolyt, lokale Erwärmung des Sammelguts ohne Auslösen eines Brands
2 keine direkten Schäden	keine nennenswerten Sachschäden, keine Verletzungen	thermal runaway (thermische Kettenreaktion)
3 geringfügig	geringe Sachschäden, leichte Verletzungen ohne bleibende Schäden	Austritt größerer Menge Elektrolyt, Schwelbrand
4 kritisch	hohe Sachschäden, mehrere Verletzte oder bleibende Schäden	auf den Transportcontainer begrenzter Flammenbrand
5 katastrophal	sehr hohe Sachschäden, viele Verletzte oder gar Tote	Übergreifen eines Flammenbrands

3.1.3. Auftretenswahrscheinlichkeiten und deren Bewertung

Die in Tabelle 3 dargestellte Abstufung von Auftretenswahrscheinlichkeiten orientiert sich einerseits ebenfalls an zum Beispiel im Sicherheitsmanagement üblichen Schemata [10].

Hinsichtlich der Bewertung der Wahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von den möglichen Fehlerfolgen wird mit dem ALARP-Schema auf Maßstäbe aus dem Bereich der Arbeitssicherheit zurückgegriffen. Das Akronym ALARP ins Deutsche übertragen bedeutet *so gering, wie vernünftigerweise praktikabel*. Es besagt, dass das Risiko so weit reduziert werden soll, wie es in der Realität mit angemessenem Aufwand (technisch oder finanziell) umsetzbar ist. Im Bereich zwischen akzeptabler und nicht mehr akzeptabler Auftretenswahrscheinlichkeit muss eingehend geprüft werden, ob die Wahrscheinlichkeit mit darstellbarem Aufwand weiter verringert werden kann. Nur wenn dies nicht der Fall ist, kann der Fehler dennoch hingenommen werden (*ALARP-Bereich*).

In einer für die britische Arbeitsschutzorganisation Health & Safety Executive erarbeiteten Studie [5] wurden die Grenzen zwischen akzeptablem und ALARP-Bereich auf 1:1.000.000 pro Jahr für den Fall einer katastrophalen Fehlerwirkung (Todesfall) gesetzt und auf 1:100.000 pro Jahr zwischen ALARP- und inakzeptablem Bereich. Um im Bereich zwischen *vernachlässigbaren* und *geringfügigen* Fehlern besser differenzieren zu können, wurde zusätzlich zu den vier üblicherweise unterschiedenen Kategorien der Fehlerfolgen die in der FMEA definierte Bewertungsstufe *keine direkten Schäden* eingeführt.

Tabelle 3: Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehler und deren Bewertung in Abhängigkeit von den Fehlerfolgen

Wertung	Auftrittenswahrscheinlichkeit	bei Ausschöpfen von Maßnahmen zur Minderung zu akzeptieren					
		Fehlerfolge	1	2	3	4	5
6 wahrscheinlich	> 1:100	ALARP	nein	nein	nein	nein	nein
5 selten	1:100 – 1:1.000	ALARP	ALARP	nein	nein	nein	nein
4 sehr selten	1:1.000 – 1:10.000	ja	ALARP	ALARP	nein	nein	nein
3 unwahrscheinlich	1:10.000 – 1:100.000	ja	ja	ALARP	ALARP	nein	nein
2 sehr unwahrscheinlich	1:100.000 – 1:1.000.000	ja	ja	ja	ja	ALARP	ALARP
1 extrem unwahrscheinlich	< 1:1.000.000	ja	ja	ja	ja	ja	ja

ALARP: so gering wie vernünftigerweise praktikabel

3.1.4. Entdeckungswahrscheinlichkeit (E)

Neben der Einstufung der Fehlerfolge und der Auftretenswahrscheinlichkeit wurde zur Berechnung der Risikoprioritätszahl eine Kennzahl festgelegt, die zur Beschreibung der Fehlererkennungsmöglichkeiten dient. In Stufen zwischen *leicht erkennbar* und *auch unter Zuhilfenahme von Sensoren oder durch Fachleute nicht zu erkennen* wurden Werte zwischen 1 und 5 zugeordnet.

3.2. Betrachtung spezifischer Fehlermechanismen

Für Lithiumbatterien spezifische Fehler sind der Austritt gefährlicher Gase und Flüssigkeiten und der sogenannte *thermal runaway*, eine unkontrollierte Wärmefreisetzung, die bis zum Brand der Batterie führen kann.

3.2.1. Austritt gefährlicher Flüssigkeiten und Gase

Lithiumbatterien haben einen brennbaren nichtwässrigen Elektrolyt, in dem gesundheitsschädliche Leitsalze gelöst sind. Beim Altern von Lithiumbatterien, bei Überhitzung, beim Überladen oder beim Laden nach Tiefentladung entstehen Gase, die zu einer Erhöhung des Innendrucks der Zellen führen. Die Mengen freisetzbare Flüssigkeiten und Gase sind sehr begrenzt: Eine typische Rundzelle des Formats 18650 enthält rund 6 ml Elektrolyt der weitgehend von Anoden- und Kathodenmaterial aufgesaugt ist. Bei einer Beschädigung ist bei kleinen Batterien eine Freisetzung *nur weniger Tropfen Elektrolyt zu erwarten* [9].

Die Mengen an Gasen, die im Fehlerfall austreten können, sind mit einem bei der thermischen Zersetzung freigesetzten Gasvolumen von 0,1 l/Wh bei einem Ladezustand von 50 Prozent und 0,32 l/Wh bei einer vollgeladenen Pouch-Zelle [11] gering.

3.2.2. Unkontrollierte Wärmefreisetzung (*thermal runaway*)

Als *thermal runaway* (thermisches Durchgehen) wird eine unkontrollierbare Erwärmung einer einzelnen Zelle oder einer ganzen Lithium-Ionen Batterie bezeichnet. Der *thermal runaway* läuft zuerst auf der thermischen (Erwärmung), dann in mehreren Reaktionsschritten auf der chemischen (Zersetzung) und letztendlich auf der mechanischen (z.B. Ausbeulen, Aufreißen) Ebene ab [8]. Wenn hinreichend hohe Temperaturen erreicht werden, kann sich austretender Zellinhalt entzünden. Daher besteht beim *thermal runaway* die Gefahr eines Brandes.

Charakteristisch für den Prozess ist eine kritische Einsatztemperatur von rund 130 °C bis 150 °C, bei deren Überschreiten die Reaktion kaum mehr durch äußere Maßnahmen gestoppt werden kann. Die Schwere der einzelnen Reaktion bzw. die daraus resultierenden Auswirkungen hängen von den individuellen Zellparametern ab [1]

Ohne äußere Energiezufuhr (Aufheizen) ist es für das Eintreten eines *thermal runaway* eine zwingende Voraussetzung, dass die Batterie über ausreichend elektrische Ladung verfügt, um sich bei innerem oder äußerem Kurzschluss bis auf die kritische Einsatztemperatur des *thermal runaways* zu erwärmen. Insofern stellen tiefentladene Lithiumbatterien keine Gefahr dar, wenn nicht versucht wird, sie wieder aufzuladen. [9].

Bei niedrigem Ladezustand (< 25 Prozent der Nennkapazität) ist nicht mit einem *thermal runaway* zu rechnen. Bei Ladezuständen zwischen 25 Prozent und 50 Prozent der Nennladung können Batterien einen *thermal runaway* erleiden, dieser verläuft aber vergleichsweise langsam und mit wesentlich geringerer Energiefreisetzung als bei hohem Ladezustand [7]. Damit ist nicht zu erwarten, dass diese zu einem Brand als schwerwiegendem Folgefehler führen.

Innerer Kurzschluss als Auslöser eines *thermal runaway*

Ein innerer Kurzschluss kann bei Lithiumbatterien die nicht in Gebrauch sind, nur durch eine mechanische Beschädigung verursacht werden. Diese muss so schwerwiegend sein, dass sie spannungsführende Bauteile im Inneren der Batterie miteinander in Kontakt bringt. Dazu müssen die Batterien in der Regel um mehr als 2 mm verformt werden [8]. Ein *thermal runaway* durch inneren Kurzschluss ist daher dann zu befürchten, wenn die Batterie sowohl hinreichend hoch geladen ist als auch relevant beschädigt wird.

Äußerer Kurzschluss

Ein äußerer Kurzschluss bedeutet bei ausreichend hoch geladenen Batterien eine unzulässig hohe Erwärmung. Die Literaturlauswertung und eigene Tests haben ergeben, dass u.a. aufgrund von eingebauten Kurzschlussicherungen bei intakten Batterien auch bei einem äußeren Kurzschluss nicht mit einem kritischen Temperaturanstieg und damit einem *thermal runaway* der Lithiumbatterie zu rechnen ist.

Dadurch, dass im Sammelgut sehr vereinzelt jedoch auch Batterien mit frei liegenden Anschlüssen der Zellen vorkommen, kann das Risiko eines äußeren Kurzschlusses nicht ganz ausgeschlossen werden. Wenn eine hinreichend hoch geladene Batterie kurz geschlossen wird, kann auch der Kurzschluss selbst einen Brand auslösen.

3.2.3. Brandentstehung und Ausweitung

Für die Ermittlung der Brandentstehung wurde als externer Gutachter Prof. Dr. Goertz (Leitender Branddirektor a.D.) hinzugezogen. Für eine sichere Beurteilung der Gefahr des Übergreifens eines *thermal runaway* sieht der Gutachter Forschungsbedarf, eine Einschätzung ergab folgende Ergebnisse:

- Aus seiner Erfahrung schätzt er es als wenig wahrscheinlich ein, dass der *thermal runaway* einer einzelnen Lithiumionen-Zelle einen sich ausbreitenden Flammenbrand über das Zünden von Kunststoffen auslösen kann. Die typischen Zündtemperaturen der Kunststoffe liegen bei etwa 450 °C [2], eine Temperatur, die beim Abbrand einer Einzelzelle kaum über hinreichend lange Zeit auf Kunststoffgehäuse einwirke. Die Zündung eines sich langsam ausbreitenden Schwelbrandes sei aber auch bei einem vergleichsweise geringen Zündinitial möglich.
- Bei einem *thermal runaway* thermisch gekoppelter Batterien (Akkupack) sei das Zündinitial stärker bzw. halte es länger an, so dass hier wie auch im Fall hoch geladener Zellen (Ladung > 75 Prozent der Nennladung) leichter ein Brand ausgelöst werden könne.
- Die größte Gefahr bestehe darin, dass cellulosehaltige Materialien, wie Papier, eine sehr niedrige Zündtemperatur von etwa 250 °C haben und damit leicht durch durchgehende Zellen gezündet werden können. Anders als bei den kunststoffhaltigen Gehäusen sei bei Papier/Pappe/Kartonagen im Einflussbereich eines *thermal runaway* mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einer Zündung und Brandausbreitung zu rechnen.

- Ein sich ausbreitender, offener Flammenbrand sei bei geschlossenem Container eher unwahrscheinlich, Schwelbrände können wegen ihres geringen Sauerstoffbedarfs auch in einem verschlossenen Container stattfinden.
- Beim offenen Container sei der Abbrand grundsätzlich möglich, als Schwelbrand oder auch als Flammenbrand.

3.3. Ableitung der Eintrittswahrscheinlichkeit einzelner Fehler

Kritische oder katastrophale Fehlerfolgen wie übergreifende Brände mit Personenschäden ergeben sich aus der Verkettung von Einzelfehlern, die für sich genommen wenig kritisch sind. Die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Folgefehlers ist das Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten der Fehler in der Kette. Die Wahrscheinlichkeiten von Einzelfehlern, die zu demselben Folgefehler führen, werden hingegen addiert.

Die möglichen Fehler in der gesamten Prozesskette reduzieren sich auf zwei Bereiche:

- einerseits die Gefahr einer *relevanten mechanischen Beschädigung*, die zum Öffnen des Gehäuses der Zelle mit Austritt von Elektrolyt oder Gasen führen kann oder aber durch inneren Kurzschluss einem thermal runaway auslösen kann und
- andererseits die Gefahr eines Kurzschlusses, der über einen thermal runaway oder über Glut- oder Funkenbildung zu einem Brand führen kann.

Die Verknüpfung verketteter Fehler ist in Bild 8 skizziert.

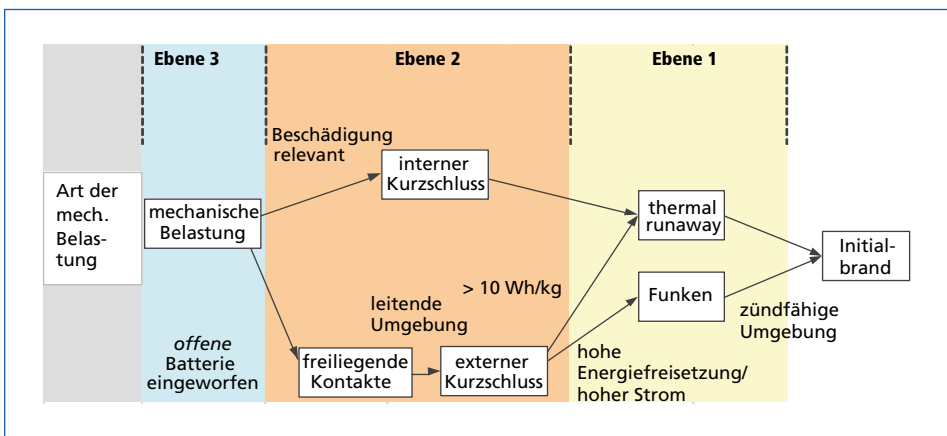


Bild 8: Ebenen der Fehlerbetrachtung und Verkettung möglicher Fehler

3.3.1. Wahrscheinlichkeit mechanischer Beschädigung

Die wichtigsten mechanischen Belastungen im Sammelsystem sind der Fall von Lithiumbatterien und der Aufprall fallender Elektroaltgeräte auf lose Batterien.

Da alle in Verkehr gebrachten Lithiumbatterien einem nach UN-Handbuch über Prüfungen und Kriterien (für die Beförderung gefährlicher Güter) Unterabschnitt 38.3 [13] geprüften Typ entsprechen müssen, sind mit den Prüfkriterien Mindestanforderungen an die mechanische Beständigkeit der Batterien festgelegt.

Die Wahrscheinlichkeit, dass in einer bestimmten Konstellation die Belastung einer Batterie höher als die Belastungen unter den Testbedingungen sind, wird als Wahrscheinlichkeit für eine (mögliche) sicherheitskritische Beschädigung der Batterie angesehen.

Batterien, die in Geräten eingeschlossen sind, werden durch die Gehäuse zusätzlich geschützt. Dadurch widerstehen sie wesentlich höheren Belastungen als bei den mechanischen Prüfungen nach UN-Handbuch auftreten. Die Beschädigungsgrade der Elektroaltgeräte war so gering, dass eine relevante Beschädigung von Batterien, die in den Geräten eingeschlossen in das Sammelgut gelangen, als ausgeschlossen angesehen werden kann. Insofern werden in Geräte eingeschlossene Batterien im Bereich der Sammlung in Depotcontainern und dem Transport zum Erstaufbereiter als hinreichend geschützt angesehen.

Betrachtet wurden die Belastung durch Fall der Batterie und durch Beschleunigungen beim Transport (UN Handbuch Test 38.3.4.4, Beschleunigung $< 150 g_n$) und die Belastung durch ein auftreffendes Elektroaltgerät.

Eine Beschleunigung von $150 g_n$ wird im Sammelsystem wegen der begrenzten Fallhöhen und der als Polster wirkenden Dämmung der Container bzw. bereits eingeworfener Geräte nicht überschritten.

Zur Ermittlung der Belastung durch auftreffende Elektroaltgeräte wurde aus den Bedingungen des Tests 38.3.4.6 (Aufprall) der auf die Zelle einwirkende Druck abgeleitet (120 MPa). Dann wurden die Elektroaltgeräte nach Verformbarkeit des Gehäuses und Krümmungsradien der Kanten und Ecken in je 4 Kategorien eingeteilt. Anhand der Krümmungsradien der Kanten bzw. Ecken (Größe der Kontaktfläche) und der Verformbarkeit der Gehäuse (Bremsweg bzw. Bremsbeschleunigung und daraus resultierende Kraft) wurde berechnet, ab welchem Gerätegewicht der Prüfdruck beim Auftreffen des Elektroaltgeräts überschritten wird. Dabei wurden drei Fälle des Auftreffwinkels (flach, spitz, Ecke) unterschieden. Im letzten Schritt wurden für die verschiedenen Konstellationen von Verformbarkeit, Kantenausprägung und Auftreffwinkel die Zahl der Geräte im Sammelgut ermittelt, bei deren Aufprall der Prüfdruck überschritten würde (für eine Beschädigung *relevante Elektroaltgeräte*, rEAG). Die Wahrscheinlichkeit einer Beschädigung durch Aufprall ist proportional zum Anteil der Elektroaltgeräte mit entsprechend hohem Gewicht.

Sobald beim Befüllen eine erste Bodenschicht von Elektroaltgeräten im Container erreicht ist, landen sowohl eingeworfene Batterien als auch die nächsten Elektroaltgeräte *weich* auf den vorhandenen Geräten. Dadurch sinkt das Risiko einer Beschädigung rapide. Die Zunahme der Bodenbedeckung wurde iterativ abgebildet. Tabelle 4 stellt die Ergebnisse und einige wichtige Ausgangsdaten dar.

Tabelle 4: Ableitung der Wahrscheinlichkeit einer relevanten Beschädigung von Batterien in der Prozesskette

Prozessschritt		Sammeln	Umladen und Transport	Entladen	Bemerkung
Behälterart		Depot-container	Abroll-container	Abroll-container	Depotcontainer: nur die Fläche unter der Einwurfföffnung berücksichtigt
Maximale Fallhöhe	m	1,2	0,3	0,3	0,3 m bei schonendem Umgang
Nutzvolumen	m ³	2,3	39	39	–
Anzahl rEAG*		1,47	0,57	0,57	im Nutzvolumen
Typisches Gewicht rEAG	kg	0,54 bis 1,1	2,9 bis 8,7	2,9 bis 8,7	Bereich des Gewichts der häufigsten rEAG
Anzahl lose Batterien		1,78	30,0	30,0	im Nutzvolumen
Wahrscheinlichkeit relevanter Beschädigung		$2,7 \cdot 10^{-5}$ (~1:37.000)	$2,3 \cdot 10^{-4}$ (~1:4.300)	$2,3 \cdot 10^{-4}$ (~1:4.300)	je Vorgang

*: rEAG: relevante Elektroaltgeräte

3.3.2. Wahrscheinlichkeit eines äußeren Kurzschlusses

Ein äußerer Kurzschluss kann nur stattfinden, wenn eine Brücke aus elektrisch leitfähigem Material zwischen den Abschlüssen einer Zelle bzw. eines Akkus zustande kommt. Die Gehäuse der Batterien sind durch gegenüber der Oberfläche zurückliegenden Kontakten so gebaut, dass sie einen guten Schutz vor äußerem Kurzschluss darstellen. Zu berücksichtigen war, dass bei nur rund 10 Prozent der Elektroaltgeräte wesentliche Teile der Oberfläche elektrisch leitfähig sind.

Um eine unkontrollierte Wärmefreisetzung im Kurzschlussfall zu unterbinden, enthalten Lithiumbatterien Schmelzsicherungen oder Bauteile, die den Stromfluss begrenzen (PTC – Sicherungen und/oder Batteriemanagementsysteme). Das Verhalten beim Kurzschluss wird beim UN-Testprotokoll geprüft. Bei intakten Batterien kann daher ausgeschlossen werden, dass ein äußerer Kurzschluss zu unkontrollierter Wärmefreisetzung führt.

Das Sammelgut enthält sehr vereinzelt aber auch Akkupakete, deren Gehäuse entfernt wurde. Hier ist ein direkter Zugang zu den Zellanschlüssen möglich und gleichzeitig ist zu befürchten, dass Kurzschlussicherungen nicht greifen.

Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein äußerer Kurzschluss über die Containerwand oder über eine aus leitfähigen Gehäuseteilen bestehende Brücke entstehen kann, wurde für die Akkupakete mit freiliegenden Kontakten in allen Konstellationen berechnet. Der Betrachtung zufolge beträgt die Wahrscheinlichkeit eines äußeren Kurzschlusses über eine Brücke leitfähiger Geräte $1,5 \cdot 10^{-4}$ (~1:6.600). Die Wahrscheinlichkeit eines Kurzschlusses einer Batterie über die Containerwand beträgt $1,0 \cdot 10^{-3}$ (1:1.000).

3.3.3. Wahrscheinlichkeit eines Brands in Folge eines *thermal runaway* oder eines Kurzschlusses

Mit einer Brandentstehung als Folge eines thermal runaway oder eines Kurzschlusses ist zu rechnen, wenn

- cellulosehaltiges Material (z.B. Papier, Pappe, Kartonagen) im Einflussbereich der Wärmequelle liegt. Das gilt nicht nur im Fall eines thermal runaway, sondern kann auf den Fall eines externen Kurzschlusses erweitert werden – bei entsprechendem Übergangswiderstand der Kontaktstelle oder des Leiters kann sich auch diese(r) auf hinreichend hohe Temperaturen erhitzen. Der Anteil an PPK in den Transportcontainern betrug maximal $0,4 \text{ m}^3$ bzw. 1 Prozent des Volumens. Dem entsprechend wurde die Wahrscheinlichkeit, dass PPK im Einflussbereich der bei einem Kurzschluss (Funken, Glut) oder einem thermal runaway freigesetzten Wärme liegt, auf 0,01 (1:100) geschätzt.
- der thermal runaway bedingt durch hohe Restladung unter hoher Energiefreisetzung abläuft. 1,7 Prozent der Lithiumbatterien hatten eine Restladung von mehr als 75 Prozent, so dass bei diesen davon auszugehen ist, dass ein thermal runaway energisch verläuft und direkt einen Schwelbrand auslösen kann. Die Wahrscheinlichkeit für den Fall b) wurde daher auf 0,02 (1:50) gesetzt
- thermisch in engem Kontakt stehende Zellen (Akkupakete) in einer Kettenreaktion in den thermal runaway übergehen und dadurch die Intensität und die Einwirkdauer des Zündinitials vergrößert wird. Thermisch gekoppelte Zellen liegen im Sammelgut praktisch nur als Akkupaket vor. Die Dichte loser Batterien ist mit < 1 Stück je Kubikmeter so gering, dass praktisch ausgeschlossen werden kann, dass zwei Batterien zufällig einen Abstand von wenigen Zentimetern haben. Die Wahrscheinlichkeit einer Kettenreaktion im Fall eines thermal runaways wird daher durch den Anteil der Akkupakete begrenzt. Dieser beträgt 20 Prozent der Gesamtzahl der Batterien, so dass die Einzelwahrscheinlichkeit der Möglichkeit, dass ein thermal runaway einer Batterie sich in einer Kettenreaktion ausweitet und so zu einem Schwelbrand führt, höchstens bei 0,2 (1:5) liegt.

Die Gesamtwahrscheinlichkeit des Auslösens eines Schwelbrands nach Wärmefreisetzung ergibt sich aus der Summe der Einzelwahrscheinlichkeiten, sie liegt damit bei 0,23 (~1:4).

3.3.4. Wahrscheinlichkeit eines Vollbrands in Folge eines Schwelbrands und des Übergreifens eines Vollbrands

Ein Schwelbrand kann sich nur zum Vollbrand entwickeln, wenn er nicht rechtzeitig erkannt wird. Es wird angenommen, dass in der Regel ausreichend Brennstoff zur Verfügung steht und dass die Sauerstoffzufuhr für den Unterhalt eines Schwelbrands ausreicht.

Die Geschwindigkeit der Entwicklung zum Vollbrand ist u.a. abhängig von der Zufuhr von Sauerstoff. Diese ist im Sammelgut eingeschränkt und kann durch geeignete Maßnahmen weiter behindert werden. Zur Erkennung von Schwelbränden stehen geeignete Sensoren zur Verfügung. Wenn entsprechende Maßnahmen getroffen werden, kann davon ausgegangen werden, dass ein Schwelbrand in der Regel erkannt und bekämpft wird, bevor sich ein Vollbrand entwickelt.

Die Wahrscheinlichkeit der Entwicklung eines Schwelbrands in einem Transportcontainer zum Vollbrand wird daher auf $< 10^{-3}$ ($< 1:1.000$) gesetzt.

Weil die Depotcontainer weitestgehend geschlossen sind und sich kein Zug entwickeln kann, wird ausgeschlossen, dass sich der Schwelbrand eines Depotcontainers zum Vollbrand entwickelt.

Das Übergreifen eines Vollbrands auf die Umgebung wird (Zugänglichkeit des brennenden Containers vorausgesetzt) als *sehr selten* ($< 10^{-3}$ bzw. $< 1:1.000$) eingestuft.

3.4. Wahrscheinlichkeit und Auswirkungen verketteter Fehler

Eine Bewertung verketteter Fehler, die zu gravierenden Fehlerfolgen führen können, ist nur über Konstruktion der vollständigen Fehlerkette möglich. Über die Visualisierung im Risikographen wird anschaulich, wo akuter Handlungsbedarf zur Risikominimierung besteht und in welchem Bereich nur mehr nachzuweisen ist, dass keine weitere Verminderung des Restrisikos mit vertretbaren Mitteln möglich ist.

3.4.1. Wahrscheinlichkeit verketteter Fehler

Im Schema von Bild 8 verläuft ein Zweig der Fehlerkette ausgehend von übermäßiger mechanischer Belastung über einen inneren Kurzschluss und eine dadurch ausgelöste unkontrollierte Wärmefreisetzung (thermal runaway) zum Zündinitial und einem Schwelbrand als Vorstufe zu einem Vollbrand (Zweig A). Der zweite Zweig geht von der Anwesenheit von Batterien mit freiliegenden Kontakten aus und führt über einen äußeren Kurzschluss zu Funken, Glut oder ebenfalls einem thermal runaway (Zweig B). Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der als Zündinitial wirkenden Folgefehler Funken, Glut und thermal runaway werden durch den Ladungszustand der Batterien bestimmt. Ob das Zündinitial zum Zünden eines Schwelbrands ausreicht, hängt von der Energiefreisetzung durch das Zündinitial und von der Anwesenheit leicht entflammbarer Stoffe (PPK) in dessen Einwirkungsbereich ab.

In Tabelle 5 ist die Herleitung der Wahrscheinlichkeiten der folgenschweren Fehler dargestellt. Zur besseren Nachvollziehbarkeit werden Zwischenergebnisse ebenfalls dargestellt (Werte in Klammern).

Dabei wurde von einem nicht hinsichtlich der Fehlerwahrscheinlichkeiten optimierten Sammelsystem ausgegangen.

Das Risiko einer Beschädigung einer Batterie beim Umleeren des Inhalts der Depotcontainer in den Transportcontainer und beim Leeren des Transportcontainers beträgt bei schonender Vorgehensweise $2,3 \cdot 10^{-4}$ je Transportvorgang.

Tabelle 5: Ableitung der Wahrscheinlichkeit verketteter Fehler (nicht minimierte Anzahl von Fehlwürfen)

Zeilennummer	Fehler bzw. Folgefehler	Abhängig von	p (Einzelschritt)	Verknüpfung (Zahlen geben die Zeilennummern wieder)	Eintrittswahrscheinlichkeit (p_verknüpft)
1	übermäßige mechanische Belastung (Depotcontainer)	Fallhöhe, Eigenschaften Sammelgut,			$2,7 \cdot 10^{-5}$
2	übermäßige mechanische Belastung (Umladen, Transport)	Anzahl loser Batterien...			$2,3 \cdot 10^{-4}$
3	übermäßige mechanische Belastung (Entladen)				$2,3 \cdot 10^{-4}$
4	Kurzschluss (Depotcontainer)	Eigenschaften Sammelgut,			$4,4 \cdot 10^{-6}$
5	Kurzschluss (Umladen und Transport)	Anzahl Batterien mit freiliegenden Kontakten,			$1,7 \cdot 10^{-4}$
6	Kurzschluss (Entladen)	Leitfähigkeit Wände und Boden			$7,1 \cdot 10^{-5}$
7	thermal runaway, Funken und Glut als Zündinitial	Ladungszustand > 25 %	0,115		DC: $3,6 \cdot 10^{-6}$ TC:
8	Zündinitial wirksam zur Auslösung eines Schwelbrands	sehr hoher Ladungszustand (> 75 %)	0,017		
9		Anwesenheit PPK	0,01		
10		Thermisch gekoppelte Zellen	0,2		
11		Summe (Z8-Z10)	0,227	=Z8+Z9+Z10	$(2,3 \cdot 10^{-1})$
12	Schwelbrand (Depotcontainer)			=(Z1+Z4)*Z7*Z11	$8,2 \cdot 10^{-7}$
13	Schwelbrand (Umladen, Transport)			=(Z2+Z5)*Z7*Z11	$1,8 \cdot 10^{-5}$
14	Schwelbrand (Entladen)			=(Z3+Z6)*Z7*Z11	$7,9 \cdot 10^{-6}$
15	Vollbrand (im Freien)		0,001	=(Z13+Z14)*Z15	$1,8 \cdot 10^{-9}$
16	Übergreifen eines Vollbrands		0,001	=Z15*Z16	$1,8 \cdot 10^{-12}$

(Basis: 0,8 Li-Batterien/ m³, ein Sammelzyklus eines Depotcontainers bzw. ein Transportbehälter)

Mit einem Wert von $1,7 \cdot 10^{-4}$ liegt das Risiko eines Kurzschlusses beim Transport in dem selben Bereich. Im Depotcontainer und beim Entladen ist das Kurzschlussrisiko wesentlich geringer, weil hier die Möglichkeit eines Kurzschlusses über den leitfähigen Boden und über die Wände des Containers wegfällt.

Unter Berücksichtigung der vom Ladezustand der Batterien abhängigen Wahrscheinlichkeit, dass ein Kurzschluss oder eine Beschädigung überhaupt einen thermal runaway

auslösen kann und den Randbedingungen der Schwelbrandentstehung beträgt ist die Wahrscheinlichkeit des Auslösens eines Schwelbrands unter den derzeitigen Bedingungen $1,8 \cdot 10^{-5}$, das ist für den Einzelfall ein geringes Risiko.

Die Wahrscheinlichkeit der Entwicklung eines Vollbrands ist wesentlich geringer als die der Entstehung eines Schwelbrands, insbesondere, wenn die Möglichkeiten zur Entdeckung des Schwelbrands genutzt werden und im Fall eines Schwelbrands gelöscht wird.

Bei optimiertem Betrieb der Sammlung von EAG in Depotcontainern, d.h. bei Verringerung der Zahl der Fehlwürfe auf ein Drittel des hier angesetzten Werts verringern sich die Einzelwahrscheinlichkeiten um Faktor 3.

3.4.2. Gefährdungsbeurteilung einer bundesweiten Sammlung

In Abschnitt 3.4.1. wurden die Wahrscheinlichkeiten der verketteten Fehler für Einzelvorgänge abgeleitet. Bei einer weit verbreiteten Umsetzung der Sammlung von Elektroaltgeräten in Depotcontainern sind die abgeleiteten Wahrscheinlichkeiten mit der Zahl der Einzelvorgänge zu multiplizieren.

Auch im Fall einer weit verbreiteten Sammlung von EAG in Depotcontainern ist davon auszugehen, dass das Sammelsystem nicht für alle Gebietskörperschaften in Frage kommt. Es wird mit einem Anschluss von 60 Prozent der Bevölkerung und der Umsetzung unter optimierten Bedingungen (s.u.), d.h. einer spezifischen Sammelmenge von 1 kg/(Ew*a) und einer Fehlwurfrate von maximal 0,3 Lithiumbatterien je Kubikmeter Sammelgut gerechnet. Das bedeutet, dass jährlich rund 50.000 Tonnen Elektroaltgeräte in Depotcontainern gesammelt würden, bzw. dass rund 10.000 Transporte jährlich anfallen. Unter diesen Bedingungen ergibt sich der in Bild 9 dargestellte Risikograph.

Elektro(nik)geräte

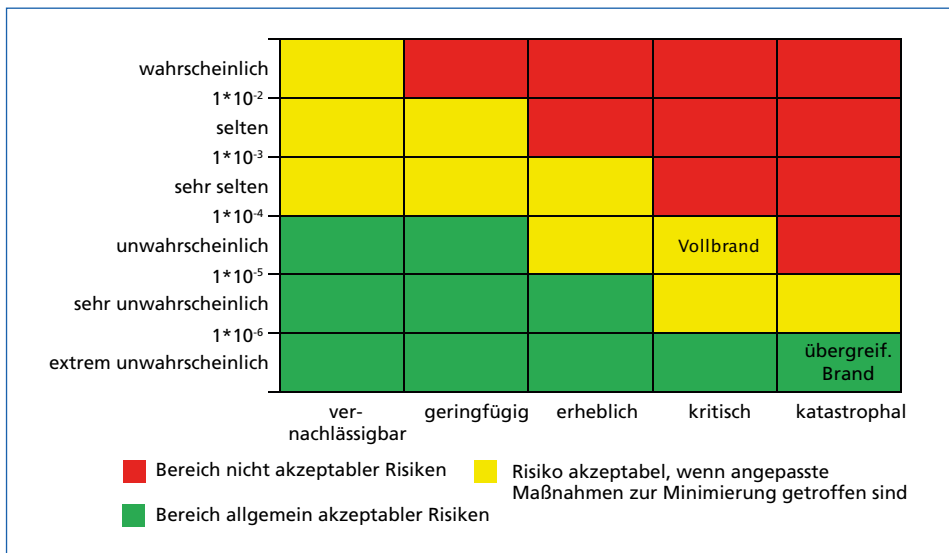


Bild 9: Risikograph für den Fall bundesweiter Sammlung von Elektroaltgeräten in Depotcontainern unter optimierten Bedingungen

Das kritische Risiko eines Vollbrands kann durch die unten vorgeschlagenen Maßnahmen zur Verminderung der Zahl der Fehlwürfe in den ALARP-Bereich gedrückt werden. Das Risiko katastrophal verlaufender Ereignisse bleibt auch im Fall einer weiten Verbreitung von Depotcontainersystemen extrem unwahrscheinlich. Die berechnete Eintrittswahrscheinlichkeit eines derartigen Ereignisses liegt bei $7,2 \cdot 10^{-8}$ (1:14.000.000).

4. Handlungsmöglichkeiten

4.1. Optimierung des Sammelsystems

Konzentration von Lithiumbatterien im Sammelgut

Die Konzentration von Lithiumbatterien im Sammelgut kann abgesenkt werden, wenn einerseits den Nutzern klar wird, aus welchen Gründen die Batterien gesondert entsorgt werden müssen und andererseits Möglichkeiten zur Entsorgung in nächster Nähe zum Depotcontainer gegeben werden. Hierzu haben sich Batteriefächer am Depotcontainer und getrennte Container für Batteriegeräte und sonstige Elektroaltgeräte bewährt. Auf Basis der bislang vorliegenden Erfahrungen kann damit gerechnet werden, die Konzentration von Lithiumbatterien im Sammelgut auf ein Drittel des ermittelten Werts zu senken (Zielwert: 0,06 Ma.-%)

Konzentration leicht entflammbarer Materials im Sammelgut

Eine Einschätzung des Anteils von PPK als leicht entflammbar Material im Sammelgut und dessen Einfluss auf das Risiko der Brandentstehung ergab, dass knapp 5 Prozent des Brandrisikos auf die Anwesenheit von PPK im Sammelgut zurückzuführen ist.

Der Anteil von PPK im Sammelgut sollte gering gehalten werden, der derzeitige Wert ist aber nicht als kritisch anzusehen.

Kurzschlussgefahr

Die Gefahrenanalyse hat ergeben, dass leitfähige (bzw. nicht zuverlässig isolierende) Wände und Böden der Transportcontainer mit rund 20 Prozent des Gesamtrisikos merklich zum Brandrisiko beitragen. Dieser Beitrag kann durch eine widerstandsfähige isolierende Beschichtung der Wände und des Boden der Transportcontainer ausgeschlossen werden. Derartige Beschichtungen auf Basis von Polyurethan sind am Markt verfügbar.

Brandentwicklung

Die Entwicklung eines Schwelbrands zum Vollbrand während des Transports ist der Schritt, der von einem als *erheblich* einzustufenden Risiko zum *kritischen* Risiko führt. Ein Vollbrand ist nur bei ausreichender Sauerstoffzufuhr möglich. Damit bietet sich die Möglichkeit, das Entstehen eines Vollbrands beim Transport durch Einsatz eines Transportcontainers mit hitzebeständiger Abdeckung (z.B. Stahldeckel) mit großer Zuverlässigkeit zu unterdrücken.

4.2. Fehlererkennung und Qualitätssicherung

Fehlererkennung

Der *Fehler* einer hohen Konzentration an Lithiumbatterien kann erst erkannt werden, wenn das Sammelgut wieder entladen wird. Da zum Zeitpunkt der Erkennung Sammlung und Transport bereits erfolgt sind, kann diese Möglichkeit nur systembegleitend im Rahmen von Qualitätssicherungsmaßnahmen genutzt werden.

Die Entwicklung eines Schwelbrands zum Vollbrand während des Transports ist der Schritt, der von einem als *erheblich* einzustufenden Risiko zum *kritischen* Risiko führt. Erkennung entstehender Brände kann zuverlässig dazu führen, dass Maßnahmen zur Brandbekämpfung eingeleitet werden und ein Vollbrand vermieden wird. Zur Erkennung von Schwelbränden können und sollten technische Einrichtungen eingesetzt werden.

Qualitätssicherung

Maßnahmen zur Minimierung des Anteils von Lithiumbatterien im Sammelgut oder zur Minimierung des Risikos einer Beschädigung der Batterien sind nur wirksam, wenn sie in angemessener Form umgesetzt werden. Dazu gehört, dass sowohl die Wirksamkeit von Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit als auch die Einhaltung innerbetrieblicher Anweisungen regelmäßig im Sinn eines Qualitätssicherungskonzepts verifiziert wird.

4.3. Erreichen ADR-konformer Transporte

Im Rahmen der aktuellen Fassung der ADR (2017) ist ein Transport ungeprüfter und damit möglicherweise defekter loser Lithiumbatterien und von Geräten (ADR: *Ausrüstungen*), die solche Batterien enthalten, unter der Sondervorschrift 636 (SV 636) möglich. Diese setzt Grenzen für die Größe der Batterien (< 500 g, wenn die Nennkapazität nicht bekannt ist, ansonsten < 100 Wh Nennkapazität) und fordert den Transport in Verpackungen, die wiederum einer Verpackungsvorschrift (P 909) entsprechen müssen.

Das Gefahrgutrecht kennt den Begriff des *Fehlwurfs* nicht. Wenn Material transportiert wird, das Lithiumbatterien enthalten kann, führt im Prinzip eine einzige Batterie dazu, dass der Transport in loser Schüttung nicht zulässig ist.

Im Rahmen der multilateralen Vereinbarung M303 können Lithiumbatterien, die in Geräten von privaten Haushalten enthalten sind und zur Verwertung oder Beseitigung befördert werden, in widerstandsfähigen Außenverpackungen, die nicht P909 entsprechen müssen, transportiert werden. Wenn die an die Behälter gestellten Anforderungen erfüllt sind, erlaubt das den Transport der befüllten Depotcontainer, so dass ein Betrieb von Depotcontainersystemen im Behältertausch zulässig ist. Es steht an, entsprechende Außenverpackungen zu entwickeln, die einen effizienteren Betrieb des Sammelsystems als im Behältertausch erlauben.

Langfristig ist auch im Hinblick auf Fehlwürfe im Bereich der konventionell gesammelten Elektroaltgeräte anzustreben, dass eine (geringe) Zahl von Fehlwürfen beim Transport gesammelter Elektroaltgeräte offiziell akzeptiert wird.

5. Ausblick

Ziel von Maßnahmen zur Verbesserung der Elektroaltgeräte-Erfassung ist es, das theoretische Sammelpotential weitgehend auszuschöpfen und die geforderten Zielmengen für 2019 zu erreichen.

Im Bereich der Elektrokleingeräte können Depotcontainer einen merklichen Beitrag dazu leisten. Mit den untersuchten Depotcontainersystemen wurden zwischen etwa 0,3 bis 1,8 kg/Ew*a abgeschöpft. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass der Sammelerfolg mit der Depotcontainerdichte steigt. Das Optimum liegt dabei bei etwa 0,3 bis 0,5 DC je 1.000 Ew. Bei einer höheren Dichte ist das Verhältnis zwischen Aufwand und Sammelmenge weniger günstig. Eine Abhängigkeit des Sammlungserfolges zur Siedlungsstruktur besteht nach aktuellen Erkenntnissen nicht.

Die vorliegende Studie hat insgesamt 42,1 Tonnen Elektroaltgeräte aus der Depotcontainersammlung untersucht. Auf Basis der erhobenen Daten wurde eine detaillierte Risikoanalyse durchgeführt. Diese ergab folgende Ergebnisse:

- Die Fehlerfolge *Vollbrand* (der auf einen Transportcontainer beschränkt bleibt) ist als *kritisch* (hohe Sachschäden und/oder Verletzungen mit bleibenden Folgen) anzusehen. Ein Übergreifen eines Brandes und/oder ein Brand bei schlechter Zugänglichkeit, die zu hohen Sachschäden, mehreren schwer Verletzten oder tödlichem Ausgang führen, werden als *katastrophale* Fehlerfolge eingestuft.
- Das Risiko kritischer Fehlerfolgen liegt auch bei weit verbreiteter Einführung von Depotcontainersystemen zur Erfassung von Elektroaltgeräten im akzeptablen Bereich. Die Wahrscheinlichkeit katastrophaler Fehlerfolgen ist extrem gering (unter 1: 1.000.000).

Die Sammlung in Depotcontainern hat das Potenzial, rund 50.000 Tonnen Geräte zusätzlich zu erfassen. Weil nur Kleingeräte erfasst werden, ergänzt sie die Handlungssammlung, die bislang überwiegend Großgeräte erfasst.

Formale Konformität mit dem Gefahrgutrecht ist derzeit nur durch Transport in geeigneten Behältern möglich, Transport in loser Schüttung ist nicht zulässig. Um die Sammlung von Elektroaltgeräten zu erleichtern, sollte hier durch Änderung der rechtlichen Grundlagen Abhilfe geschaffen werden. Weil dies ein längerfristiger Prozess ist, sollten Vollzugshinweise zumindest temporär helfen, die Situation zu verbessern.

6. Literatur

- [1] Abada, S.; Marlair, G.; Lecocq, A.; Petit, M.; Sauvart-Moynot, V.; Huet, F.: Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review. *Journal of Power Sources* 306: 178-192, 2016, DOI 10.1016/j.jpowsour.2015.11.100
- [2] Babrauskas, V.: *Ignition Handbook*. Fire Science Publishers, Issaquah, USA, 2003
- [3] Bund-Länder Arbeitsgemeinschaft Abfall: Merkblatt M31a: Umsetzung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes - Anforderungen an die Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten. 2017, online verfügbar: https://www.laga-online.de/documents/m-31-a-aktuell-stand-23-01-2017_mit-gliederung_1503993226.pdf (Stand 23.1.2017)

- [4] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Daten zu Elektro- und Elektronikgeräten in Deutschland. 2018, <http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/elektro-und-elektronikaltgeraete/> (Stand 5.1.2018)
- [5] Franks, A.; Whitehead, R.; Crossthwaite, P.; Smail, L.: Application of QRA in operational safety issues. Research Report 025. prepared by Det Norske veritas, Stockport UK for Health & Safety Executive, Liverpool, UK. 2002, online verfügbar: <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr025.pdf> (Stand 5.1.2018)
- [6] Gallenkemper, B.; Breer, J.: Analyse der Datenerhebung nach ElektroG über die Berichtsjahre 2011 und 2012 zur Vorbereitung der EU-Berichtspflicht 2014. Umweltbundesamt (Hrsg.): Texte 09/2015. Dessau, 2015
- [7] Golubkov, A.; Scheikl, S.; Planteu, R.; Voitic, G.; Wilschke, H.; Stangl, Chr.; Fauler, G.; Thaler, A.; Hacker, V.: Thermal runaway of commercial 18650 Li-ion batteries with LFP and NCA cathodes – impact of state of charge and overcharge. RSC advances, 2015, 5, 57171-57186
- [8] Lamb, J.; Orendorff, C.: Evaluation of mechanical abuse techniques in lithium ion batteries. Journal of Power Sources. 2014. Vol. 247, S. 189-196. DOI 10.1016/j.jpowsour.2013.08.066
- [9] Mikolajczak, C.; Kahn, M.; White, K.; Long, R.: Lithium-ion batteries hazard and use assessment. Bericht an The Fire Protection Research Foundation, Quincy, MA (www.nfpa.org/foundation), 2011
- [10] Mössner, T.: Risikobeurteilung im Maschinenbau. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund. 2012, ISBN 978-3-88261-145-8
- [11] Somandepalli, V.; Marr, K.; Horn, Q.: Quantification of combustion hazards of thermal runaway failures in lithium-ion batteries. SAE Int. In: J. Alt. Power 3(1) 98-104, 2014
- [12] Stiftung elektro-altgeräte register: Jahres-Statistik-Mitteilung und Rücknahmemenge je Sammelgruppe. 2017, online verfügbar: <https://www.stiftung-ear.de/service/kennzahlen/> (Stand 15.1.2018)
- [13] UNECE: Recommendations on the transport of dangerous goods. Manual of tests and criteria. 6. Auflage, Vereinte Nationen, New York und Genf, 2016