

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3713 95 316
UBA-FB-00 [trägt die UBA-Bibliothek ein]

Umweltwirkungen von wiederaufladbaren Lithium-Batterien für den Einsatz in mobilen Endgeräten der Information- und Kommunikationstechnik (IKT)

von

Christian Clemm
Paul Mähltz
Alexander Schlösser
Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter
Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. Klaus-Dieter Lang

Technische Universität Berlin
Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik
Forschungsschwerpunkt Technologien der Mikroperipherik
Sekretariat TIB 4/2-1
Gustav-Meyer-Allee 25
D-13355 Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Abschlussdatum Oktober 2015

Berichtskennblatt

Berichtsnummer	UBA-FB 00
Titel des Berichts	Umweltwirkungen von wiederaufladbaren Lithium-Batterien für den Einsatz in mobilen Endgeräten der Information- und Kommunikationstechnik (IKT)
Autor(en) (Name, Vorname)	Christian Clemm Paul Mähltitz Alexander Schlösser Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. Klaus-Dieter Lang
Durchführende Institution (Name, Anschrift)	Technische Universität Berlin Forschungsschwerpunkt Technologien der Mikroperipherik Sekt. TIB 4/2-1 Gustav-Meyer-Allee 25 13355 Berlin
Fördernde Institution	Umweltbundesamt Postfach 14 06 06813 Dessau-Roßlau
Abschlussjahr	2015
Forschungskennzahl (FKZ)	3713 95 316
Seitenzahl des Berichts	135
Zusätzliche Angaben	
Schlagwörter	Lebensdauer, Umweltwirkungen, Notebook-Akku, Tablet-Akku, Ökobilanz, Felddaten, Laboruntersuchungen, Empfehlungen, Ökodesign, Wärmemanagement

Report Cover Sheet

Report No.	UBA-FB 00
Report Title	Environmental impacts of rechargeable lithium-batteries for mobile devices of the information and communication technology (ICT)
Author(s) (Family Name, First Name)	Christian Clemm Paul Mähltitz Alexander Schlösser Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. Klaus-Dieter Lang
Performing Organisation (Name, Address)	Technische Universität Berlin Forschungsschwerpunkt Technologien der Mikroperipherik Skr. TIB 4/2-1 Gustav-Meyer-Allee 25 13355 Berlin
Funding Agency	Umweltbundesamt Postfach 14 06 06813 Dessau-Roßlau
Report Date (Year)	2015
Project No. (FKZ)	3713 95 316
No. of Pages	135
Supplementary Notes	
Keywords	Lifespan, Environmental Impacts, Notebook Battery, Tablet Battery, Life Cycle Assessment, Field Data, Laboratory Test, Recommendations, Ecodesign, Thermal Management

Kurzbeschreibung

In Notebooks und vielen anderen mobilen Geräten der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) hat der Akku oft eine kürzere Lebensdauer als das Gesamtprodukt. Bei einem mobilen Gerät, bei dem der Akku nicht ausgewechselt werden kann, begrenzt die Lebensdauer des Akkus auch die Lebensdauer des Gesamtproduktes. Trotzdem ist über die tatsächliche Lebensdauer von Lithium-Akkumulatoren (Lithium-Akkus), deren Lebenszyklus und den damit verbundenen Umweltwirkungen nur relativ wenig bekannt.

Das Forschungsvorhaben untersucht die Lebensdauer von Lithium-Akkus im Labor und im Feld. Im Ergebnis zeigt sich, dass aktuelle Lithium-Akkus für Tablet-PC unter Laborbedingungen mehrere hundert oder tausend Ladezyklen durchlaufen können, bis das Ende der nutzbaren Lebensdauer erreicht wird. Die Daten der Notebook-Akkus im Feld streuen stark, deuten jedoch auf nur wenige hundert Ladezyklen. Unterschiede zwischen verschiedenen Herstellern und verschiedenen Nutzungsszenarien sind deutlich erkennbar.

Die Umweltwirkungen eines Lithium-Kobaltoxid (LCO)-Notebook-Akkus wurden mithilfe von Primärdaten eines großen Akkuherstellers sowie Sekundärdaten für das End-of-Life (EOL) abgeschätzt. In den untersuchten Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus des Lithium-Akkus eines Notebooks dominiert die Herstellungsphase eindeutig, wobei die Nutzungsphase dem Endgerät zugerechnet und damit nicht betrachtet wird.

Abstract

The rechargeable (secondary) batteries of notebooks and many other mobile devices of the information and communications technology (ICT) often have a shorter lifespan than the device in its entirety. Further, the durability of the battery limits the lifespan of mobile devices where the battery cannot easily be replaced. Nevertheless, little data is available on the actual lifespan of lithium-batteries, their lifecycle and the associated environmental impacts.

The current research investigates the lifespan of secondary lithium-batteries under laboratory and real use conditions. Results show that current secondary batteries of the ICT can, under controlled conditions, go through several hundred and even up to several thousand charge/discharge cycles before reaching the end of their useful lifespan. In contrast, data from the field suggest that notebook batteries reach the end of their useful lifespan after only a few hundred charging cycles. The data scatters significantly and varies between different manufacturers as well as between different use scenarios.

Environmental impacts of a lithium cobalt oxide (LCO) notebook battery were assessed using primary data for production and secondary data for end-of-life (EOL) processing. The production phase distinctively dominates the battery's life cycle in terms of environmental impacts. However, the use phase is allocated to the device powered by the battery and thus is not assessed in this study.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich für umfangreiche Hilfestellung und freundliche Unterstützung bei folgenden Institutionen und Personen:

- ▶ AfB social & green IT Berlin, insbesondere Klaus Bölling
- ▶ Coconut Battery, insbesondere Christoph Sinai
- ▶ Fachbereich Ingenieurwissenschaften der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW), insbesondere Prof. Dr. Romy Morana, Christian Kunisch, Oliver Krieft, Michel Rösler und Sebastian Hübner
- ▶ Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM, insbesondere Karsten Schischke, Dr. Lutz Stobbe, Krystan Marquardt, Marco Muhl
- ▶ dem Expertenkreis sowie den Teilnehmerinnen und Teilnehmern des Workshops
- ▶ Marina Köhn, Maike Janßen und ihren Kolleginnen und Kollegen für die gute Zusammenarbeit

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis.....	13
Abkürzungsverzeichnis.....	15
Zusammenfassung	17
Summary	29
1 Hintergrund und Begriffsbestimmungen	41
1.1 Begriffsbestimmung	41
1.2 Hintergrund	42
2 Zielsetzung und Untersuchungsrahmen.....	45
2.1 Ziel und Aufgabe	45
2.2 Marktrelevanz	45
2.4 Untersuchungsrahmen.....	48
2.4.1 Untersuchungsgegenstand	48
2.4.2 Festlegung der Systemgrenzen	48
2.4.3 Funktion und funktionelle Einheit	49
2.4.4 Berücksichtigte Wirkungskategorien.....	50
3 Bestimmung der Lebensdauer eines Akkus	51
3.1 Lebensdauer unter standardisierten Laborbedingungen.....	51
3.1.1 Beschreibung der Akkus	52
3.1.2 Eingangsprüfung	52
3.1.3 Beschreibung des Zyklisierungsverfahrens	53
3.1.4 Verwendete Geräte	54
3.1.5 Ergebnisse.....	55
3.1.6 Diskussion.....	58
3.2 Felddatenerhebung zur Untersuchung der Lebensdauer	60
3.2.1 Auslesen von Akkudaten	61
3.2.2 Auswertung der Felddaten von AfB.....	67
3.2.3 Auswertung der Felddaten von coconutBattery.....	74
3.2.4 Auswertung von Akkus im Alter von 5 ± 1 Jahren.....	79
3.2.5 Berechnung von Szenarien der Nutzung	81
3.2.6 Diskussion	83
3.3 Abschließende Diskussion zur Lebensdauerbestimmung	85
4 Lebenszyklusdaten	87
4.1 Herstellungsphase	87

4.1.1	Produktsystem	87
4.1.2	Zellen	90
4.1.3	Batteriemanagementsystem (BMS)	92
4.1.4	Gehäuse	93
4.2	Distribution.....	94
4.3	Nutzungsphase	95
4.4	End-of-Life (EOL).....	95
4.4.1	Vorgeschaltete Prozesse	95
4.4.2	Aufbereitung und Verwertung	97
4.5	Allokation von Lasten und Gutschriften des Recyclings.....	98
4.6	Diskussion der Datenqualität	99
5	Abschätzung der Umweltwirkungen.....	101
5.1	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung.....	101
5.2	Sensitivitätsanalyse und Szenarien	105
5.2.1	Einfluss des Kathodenmaterials.....	105
5.2.2	Distribution eines Ersatzakkus	107
5.3	Diskussion	108
6	Expertenworkshop zu Lithium-Akkus	109
7	Wärmemanagement mobiler IKT-Geräte	111
8	Empfehlungen für Hersteller, Verbraucher und Politik.....	113
8.1	Empfehlungen für umweltpolitische Maßnahmen.....	113
8.2	Maßnahmen zur Lebensdauerverlängerung seitens der Hersteller.....	115
8.3	Empfehlungen für einen angemessenen Umgang mit Lithium-Akkus.....	117
9	Schlussfolgerungen und weiterer Forschungsbedarf.....	120
10	Quellenverzeichnis.....	122
11	Anhang	125
11.1	Bill of Materials und Datenbasis	126
11.2	Ergebnisse der Abschätzung der Umweltwirkungen	132
11.3	Detaillierte Betrachtung des Ozonabbaupotential im EOL	135

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verlauf der Kapazität mit zunehmender Anzahl Ladezyklen (erste Messreihe)	19
Abbildung 2:	Verlauf der Kapazität mit zunehmender Anzahl Ladezyklen in einer zweiten Messreihe	20
Abbildung 3:	Nutzungsintensität der Akkus der AfB-Datenbank.....	22
Abbildung 4:	Grafische Auswertung von Akkus einzelner Notebook-Modelle	22
Abbildung 5:	Darstellung der statistischen Verteilung von Akkus im Alter von 5 (± 1) Jahren (Daten von coconutBattery)	23
Abbildung 6:	Schematische Darstellung des betrachteten Produktsystems	24
Abbildung 7:	Treibhauspotential im Basisfall über den Lebensweg des Notebook-Akkus	26
Abbildung 8:	Umweltlasten der Akkus mit NMC und LCO Kathoden im Vergleich, bezogen auf den gesamten Lebenszyklus eines Notebook-Akkus	27
Abbildung 9:	Behavior of the discharge capacity with increasing number charging cycles (first measurement series).....	31
Abbildung 10:	Behavior of the discharge capacity with increasing number charge cycles (second measurement series).....	32
Abbildung 11:	Intensity of use of the batteries in the AfB database.....	34
Abbildung 12:	Graphical evaluation of individual batteries by notebook models (example)	34
Abbildung 13:	Statistical distribution of batteries at the age of 5 (± 1) years (data from coconutBattery).....	35
Abbildung 14:	Schematic representation of the considered product system	36
Abbildung 15:	Global warming potential in the base case throughout the life cycle of the laptop battery.....	38
Abbildung 16:	Environmental impacts of the batteries with NMC and LCO cathode in comparison, based on the entire life cycle of a notebook battery.....	39
Abbildung 17:	Weltweite Verkaufszahlen und Prognosen zu Lithium-Akku-Zellen mobiler IKT nach Roland Berger (2012)	46
Abbildung 18:	Marktentwicklung der eingesetzten Kathodenmaterialien bei Notebook-Akkus und Tablet-Akkus nach Roland Berger (2012)	47
Abbildung 19:	Schematische Darstellung des betrachteten Produktsystems und Festlegung der Systemgrenze	49
Abbildung 20:	Lade / Entladekurve, Beispiel DUT_17, Zyklus 10	54
Abbildung 21:	Verlauf der Kapazität mit zunehmender Anzahl Ladezyklen (erste Messreihe)	56

Abbildung 22:	Verlauf der Kapazität mit zunehmender Anzahl Ladezyklen in einer zweiten Mess-reihe	57
Abbildung 23:	Änderung des Innenwiderstandes (oben) und der Kapazität (unten) mit zunehmender Anzahl an Ladezyklen	58
Abbildung 24:	Von der Windows-Energieeffizienzdiagnose ermittelte Akkuintformationen.....	62
Abbildung 25:	Akku-Recording mit AkkuLine Batterie Tool	63
Abbildung 26:	Akkudaten ausgegeben mit BatteryInfoView	64
Abbildung 27:	Akkudaten ausgegeben mit coconutBattery 3.1.1	65
Abbildung 28:	Screenshots von herstellereigenen Tools	65
Abbildung 29:	Erhebung eines vollständigen Datensatzes mittels der Kombination aus BatteryInfoView und einem herstellereigenen Softwaretool.....	66
Abbildung 30:	Prozentuale Anteile der Modelle am Datenpool.....	69
Abbildung 31:	Verteilung der Nutzungsintensität der Akkus in der AfB-Datenbank.....	70
Abbildung 32:	Grafische Einzelauswertung der AfB-Daten nach Notebook-Modell.....	71
Abbildung 33:	Modellübergreifende Darstellung und Auswertung der Felddaten von AfB.....	74
Abbildung 34:	Verteilung der Nutzungsintensität der Akkus in der coconutBattery Datenbank.....	76
Abbildung 35:	Grafische Einzelauswertung der coconutBattery Daten nach Notebook-Modell	77
Abbildung 36:	Exemplarische Darstellung des Verlaufs des Gesundheitszustandes ausgewählter individueller Akkus	78
Abbildung 37:	Modellübergreifende Darstellung und statistische Auswertung der Felddaten von coconutBattery	79
Abbildung 38:	Auswertung der Daten von Akkus im Alter von 5 (± 1) Jahren der AfB-Datenbank.....	80
Abbildung 39:	Auswertung der Daten von Akkus im Alter von 5 (± 1) Jahren der coconutBattery Datenbank.....	81
Abbildung 40:	Schematische Darstellung der Herstellungsphase eines Lithium-Akkus (in Anlehnung an Amarakoon et al. 2013)	88
Abbildung 41:	Tablet-Akku vor der Demontage (Vorderseite).....	89
Abbildung 42:	Tablet-Akku nach Entfernung des Gehäuses	89
Abbildung 43:	Massenverteilung der Komponenten des Tablet-Akkus und Notebook-Akkus (gerundete Werte)	90
Abbildung 44:	Leiterplatte des Tablet-Akkus.....	93
Abbildung 45:	Verfahrensschritte für Akkus nach der Nutzungsphase	95

Abbildung 46:	Berechnung der Menge des zurückgewonnenen Sekundärmetalls	98
Abbildung 47:	Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP, in Kohlenstoffdioxid (CO ₂)-Äquivalenten) über 100 Jahre über den gesamten Lebenszyklus.....	102
Abbildung 48:	Erschöpfung abiotischer Ressourcen (Abiotic Resource Depletion Potential, ADP, in Antimon (Sb)-Äquivalenten) über den gesamten Lebenszyklus	102
Abbildung 49:	Anteilige Umweltwirkungen der Akku-Komponenten in der Herstellungsphase	103
Abbildung 50:	Anteilige Umweltwirkungen der Zellkomponenten in der Zellherstellung.....	104
Abbildung 51:	Anteilige Umweltwirkungen der Kathodenmaterialien in der Herstellung.....	105
Abbildung 52:	Umweltlasten der Akkus mit NMC und LCO Kathoden im Vergleich, bezogen auf den gesamten Lebenszyklus eines Notebook-Akkus	107
Abbildung 53:	Thermografieaufnahmen eines Tablet-PCs: Ungeöffnet (oben) und mit geöffneter Rückseitenabdeckung (unten); im Akkubetrieb (links) und im Netzbetrieb (rechts).....	111
Abbildung 54:	Thermografieaufnahmen eines Tablet-PCs mit einem Gehäuse aus Kunststoff.....	112
Abbildung 55:	Thermografieaufnahmen eines Tablet-PCs mit einem Gehäuse aus Metall	112
Abbildung 56:	Kalendarische Alterung von Lithium-Akkus unter verschiedenen Bedingungen (Temperatur und SOC) (Mezger & Nobis 2012)	118
Abbildung 57:	Erschöpfung abiotischer Ressourcen (Abiotic Resource Depletion Potential, ADP, in Antimon (Sb)-Äquivalenten) über den gesamten Lebenszyklus.....	132
Abbildung 58:	Versauerungspotential (Acidification Potential, AP, in Schwefeldioxid (SO ₂)-Äquivalenten) über den gesamten Lebenszyklus	132
Abbildung 59:	Eutrophierungspotential (Eutrophication Potential, EP, in Phosphat-Äquivalenten) über den gesamten Lebenszyklus	133
Abbildung 60:	Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP) über 100 Jahre in kg Kohlenstoffdioxid-Äquivalenten über den gesamten Lebenszyklus	133
Abbildung 61:	Humantoxizitätspotential (Human Toxicity Potential, HTP, in Dichlorbenzol (DCB)-Äquivalenten) über den gesamten Lebenszyklus.....	134
Abbildung 62:	Ozonabbaupotential (Ozone Depletion Potential, ODP, in Trichlorfluormethan (R11)-Äquivalenten) über den gesamten Lebenszyklus.....	134

Abbildung 63:	Ozonabbaupotential (Ozone Depletion Potential, ODP, in Trichlorfluormethan (R11)-Äquivalenten) in den EOL Prozessen	135
---------------	---	-----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Daten für den zugrunde gelegten Akku (Modellierung)	24
Tabelle 2:	Data for the battery modelling	36
Tabelle 3:	Weltmarkt für Lithium-Akkus nach Tohani (2013).....	43
Tabelle 4:	Spezifikationen des betrachteten Notebook Lithium-Akkus	49
Tabelle 5:	Getestete Akkumulatoren	52
Tabelle 6:	Eingangsprüfung.....	53
Tabelle 7:	Prüfplan Zyklentests (Ablauf eines einzelnen Zyklus)	54
Tabelle 8:	Alterungsmechanismen nach Tröltzsch (2005)	59
Tabelle 9:	Benötigte Akkudaten bei der Datenerhebung	61
Tabelle 10:	Anonymisierte Zusammensetzung der AfB-Datenbank nach Notebook-Modellen.....	69
Tabelle 11:	Anonymisierte Auflistung der in der coconutBattery Datenbank enthaltenen Notebook-Modelle in verschiedenen Ausführungen (plausible Datensätze).....	75
Tabelle 12:	Verteilung des Gesundheitszustandes in Szenario 1	82
Tabelle 13:	Statistische Verteilung des Gesundheitszustandes in Szenario 2.....	83
Tabelle 14:	Statistische Verteilung des Gesundheitszustandes in Szenario 3.....	83
Tabelle 15:	Kenndaten zum Referenzakku (Herstellerangaben)	88
Tabelle 16:	Massenverteilung der Komponenten des Tablet- und des Notebook-Akkus (gerundete Werte)	90
Tabelle 17:	Materialzusammensetzung einer Zelle des Notebook-Akkus (Herstellerangaben)	91
Tabelle 18:	Prozessaufwendungen zur Herstellung einer Akkuzelle (Herstellerangaben)	92
Tabelle 19:	Bauteile der Leiterplatte	93
Tabelle 20:	Materialzusammensetzung und Gewicht des Batteriemanagementsystems.....	93
Tabelle 21:	Materialzusammensetzung des Gehäuses des untersuchten Lithium-Akkus.....	94
Tabelle 22:	Angenommene Transportentfernungen und Transportmittel bei der Distribution.....	94
Tabelle 23:	Transportentfernungen und Transportmittel im End-of-Life nach Fisher et al. (2006)	96
Tabelle 24:	Recycelte und nicht recycelte Materialien nach Kathodenmaterial (Weyhe 2013)	97
Tabelle 25:	Übersicht zu Verfahren bei den Recyclingunternehmen für Lithium-Akkus nach Siret (2012) und Weyhe (2013).....	97

Tabelle 26:	Umweltwirkungen der Akku-Komponenten in der Herstellungsphase	103
Tabelle 27:	Umweltwirkungen der Zellkomponenten in der Zellherstellung.....	104
Tabelle 28:	Umweltwirkungen der Kathodenmaterialien in der Herstellung.....	105
Tabelle 29:	Modifizierte Materialzusammensetzung einer NMC Kathode	106
Tabelle 30:	Umweltwirkungen der Szenarien der Distribution im Vergleich	107
Tabelle 31:	Akkuzelle: Materialzusammensetzung und verwendete Datensätze	126
Tabelle 32:	Akkuzelle: Prozessaufwendungen bei der Herstellung und verwendete Datensätze pro Zelle.....	127
Tabelle 33:	Batteriemanagementsystem: Materialzusammensetzung und verwendete Datensätze Leiterplatte.....	127
Tabelle 34:	BMS Kabel: Materialzusammensetzung und verwendete Datensätze für weitere BMS Komponenten.....	128
Tabelle 35:	Akkugehäuse: Materialzusammensetzung und verwendete Datensätze	129
Tabelle 36:	Distribution: Angenommene Transportentfernungen und verwendete Datensätze	129
Tabelle 37:	Transportentfernungen und Transportmittel im End-of-Life nach Fisher et al. (2006)	130
Tabelle 38:	Verweis auf die Datengrundlage der Entsorgungsprozesse nach Fisher et al. (2006)	130
Tabelle 39:	EOL: Aus Recyclingprozessen gewonnene Sekundärmaterialien (LCO-Akku)	130
Tabelle 40:	EOL: Aus Recyclingprozessen gewonnene Sekundärmaterialien (NMC-Akku)	131

Abkürzungsverzeichnis

ADP	Abiotic Depletion Factor
AfB	AfB social & green IT gemeinnützige GmbH
AP	Acidification Potential
BMS	Batteriemanagementsystem
BOM	Bill of Materials
C	Capacity
CC	Constant Current
CV	Constant Voltage
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DOD	Depth of Discharge
DUT	Device Under Test
ear	Stiftung elektro-altgeräte register
ElektroG	Elektro- und Elektronikgerätegesetz
EOL	End-of-Life
EP	Eutrophication Potential
GRS	Gemeinsames Rücknahmesystem
GWP	Global Warming Potential
HTP	Humantoxizitätspotential
HTW	Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
kHz	Kilohertz
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)
LCO	Lithium-Kobaltoxid
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
Li-Ion	Lithium-Ionen
LiPo	Lithium-Ionen-Polymer
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
mAh	Milliamperestunden
MJ	Megajoule
mWh	Milliwattstunden
NCA	Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid
ODP	Ozone Depletion Potential

OEM	Original Equipment Manufacturer
ProBas	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente
PVDF	Polyvinylidenfluorid
RT	Raumtemperatur
SBS	Smart Battery System
SEI	Solid Electrolyte Interface
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
Tkm	Tonnenkilometer

Zusammenfassung

Mobile Geräte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), wie Notebook, Smartphone oder Tablet-PC, sind aus dem Leben der meisten Menschen nicht mehr wegzudenken. Ermöglicht wird das auch durch den Einsatz von leistungsfähigen Akkumulatoren (Akkus). Der große Vorteil von Akkus, auch Sekundärbatterien genannt, ist, dass sie, im Gegensatz zu Primärbatterien, nach ihrer Entladung erneut aufgeladen und wiederverwendet werden können.

Lithiumbasierte Akkusysteme dominieren den Bereich der Laptops und Mobiltelefone. Für Lithium-Akkus im Bereich IKT wird eine Reihe unterschiedlicher Kathodenmaterialien eingesetzt, die sich unter anderem in ihrer Energiedichte, der Zyklenbeständigkeit, ihren Sicherheitsaspekten und den Kosten unterscheiden. Lithium-Kobaltoxid (LCO)-Akkus, die lange den Markt dominierten, werden seit einigen Jahren zunehmend von Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC)-Akkus verdrängt. Ebenfalls begrifflich unterschieden werden Lithium-Polymer-Akkus (LiPo), die keinen flüssigen Elektrolyten, sondern einen auf Polymerbasis enthalten, der als feste bis gelartige Folie vorliegt und andersartige, insbesondere dünnere, Bauformen erlaubt.

Eine wichtige Kennzahl für Akkus ist die Kapazität. Die Kapazität wird i.d.R. in Milli-Ampere-Stunden (mAh) angegeben und gibt die Menge an elektrischer Ladung an, die ein Akku speichern und abgeben kann. Im vorliegenden Bericht werden verschiedene Kapazitätsbegriffe unterschieden. Die Nennkapazität (Nominal Capacity) ist die vom Hersteller angegebene Kapazität des Akkus bei Auslieferung, die der Akku bei bestimmungsgemäßem Einsatz erreichen soll. Die Kapazität bei vollgeladenem Zustand (Full Charge Capacity) ist die gegenwärtig speicherbare Kapazität bei voller Ladung. Der Gesundheitszustand (State of Health, SOH) eines Akkus ist der Quotient aus der gegenwärtig speicherbaren Kapazität und der Nennkapazität in Prozent. Ein SOH von 85 % bedeutet, dass der Akku noch 85 % seiner Nennkapazität speichern und abgeben kann.

Ein Ladezyklus (Vollzyklus) bezeichnet einen vollständigen Lade-/Entladevorgang, bei dem 100 % der Nennkapazität des Akkus aufgenommen und abgegeben werden. Dieser Vorgang kann aus mehreren Teilladungen (Teilzyklen) bestehen. Als kalendarische Alterung wird der Degradationsprozess im Akku verstanden, der auch ohne aktive Nutzung eintritt. Ein Akku verliert demnach über die Zeit an Kapazität, auch wenn er nur gelagert wird. Wie hoch der Kapazitätsverlust aufgrund der kalendarischen Alterung ist, hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab, wie bspw. Umgebungstemperatur und Ladezustand, bei dem der Akku gelagert wird. Akkus verlieren auch mit der Nutzung an Kapazität. Der Grad dieser Alterung durch Zyklisierung wird über die Zyklenbeständigkeit angegeben. Eine hohe Zyklenbeständigkeit bedeutet, dass der Akku nur in geringem Maße an Kapazität über die Nutzung verliert. Die Zyklenbeständigkeit eines Akkus kann von vielen Einflussfaktoren bestimmt werden, bspw. der eingesetzten Aktivmasse, der Verarbeitungsqualität und der Umgebungstemperatur, bei der der Akku betrieben wird.

Lebensdauer von Lithium-Akkus

Die technische Lebensdauer von Akkus wird von Herstellern als die Anzahl an Ladezyklen angegeben, die ein Akku durchlaufen kann, bis seine speicherbare Kapazität auf einen bestimmten Wert absinkt. Als Ladezyklus wird der Vorgang beschrieben, bei dem der entladene Akku wieder mit der maximal speicherbaren Energie befüllt wird, wobei dieser Vorgang in mehreren Teilladungen geschehen kann. Die Verwendung des Begriffes Ladezyklus in diesem Bericht entspricht der Definition eines Ladezyklus durch das Smart Battery System (SBS) Forum (SBS Specifications 1998), einem Zusammenschluss verschiedener Hersteller mit dem Ziel offener Standards für Smart-Battery-Systeme.

Das Ende der Lebensdauer eines Akkus ist erreicht, wenn der Akku nicht mehr verwendet werden kann. Eine der Ursachen dafür ist, dass der Akku über die Nutzungsphase so viel seiner

ursprünglichen Kapazität verloren hat, dass der Nutzen des Akkus nicht mehr gegeben ist. Beispiele sind ein Handy, dessen Akku nicht mehr ausreichend Kapazität für die tägliche Nutzung bereitstellen kann oder ein Notebook-Akku, der im Akkubetrieb nicht mehr lange genug Energie bereitstellt, ohne ans Stromnetz angeschlossen zu werden. Die Akku- und Gerätehersteller legen das Lebensende eines Akkus bei 80 % der Nennkapazität fest, also den Zeitpunkt, an dem der Akku nur noch 80 % der für den Zeitpunkt der Inbetriebnahme zugesagten Kapazität hat (vgl. Norm DIN EN 60254-1). Die Norm DIN EN 61960, die Vorgaben für Testverfahren für Akkus macht, legt das Ende der Lebensdauer von Akkus bei 60 % der Bemessungskapazität¹ fest. Das tatsächliche Lebensende von Akkus in der realen Nutzung hängt maßgeblich von den individuellen Anforderungen der Nutzenden ab und kann daher nur bedingt pauschal festgelegt werden.

Untersuchung der Lebensdauer von Tablet-Akkus unter Laborbedingungen

Zur Untersuchung der Lebensdauer von Lithium-Akkus aus der Klasse der Tablet-PCs wurden Zyklisierungsversuche an einer beispielhaften Auswahl handelsüblicher OEM²-Akkus durchgeführt. Obwohl der Fokus der Studie auf Notebook-Akkus liegt, standen diese für die Laboruntersuchungen im Projekt nicht zur Verfügung. Vom Aufbau und der Materialzusammensetzung her sind Tablet-Akkuzellen und aktuelle Notebook-Akkuzellen (z.B. Pouchzellen in aktuellen Ultrabooks) durchaus vergleichbar. Demnach lassen sich die Ergebnisse der Untersuchungen im Labor prinzipiell auch auf aktuelle Notebook-Akkuzellen übertragen. Im Gerät sind zwischen Tablets und Notebooks hingegen unterschiedliche Belastungsprofile zu erwarten, da Notebooks oftmals vergleichsweise performantere Komponenten enthalten und leistungsfähigeren Anwendungen genügen müssen.

Getestet wurden die Akkus von 17 Tablet-PCs verschiedener Hersteller, darunter Geräte von Acer, Amazon, Apple, Asus, Huawei, Lenovo, Dell und Samsung. Die Produktbezeichnungen wurden in der Ergebnisauswertung anonymisiert, da es nicht Ziel der Studie ist, verschiedene Hersteller und Produkte untereinander zu vergleichen. Die Produktbezeichnungen sind im Folgenden daher anonymisiert durch die Bezeichnung Device Under Test (DUT).

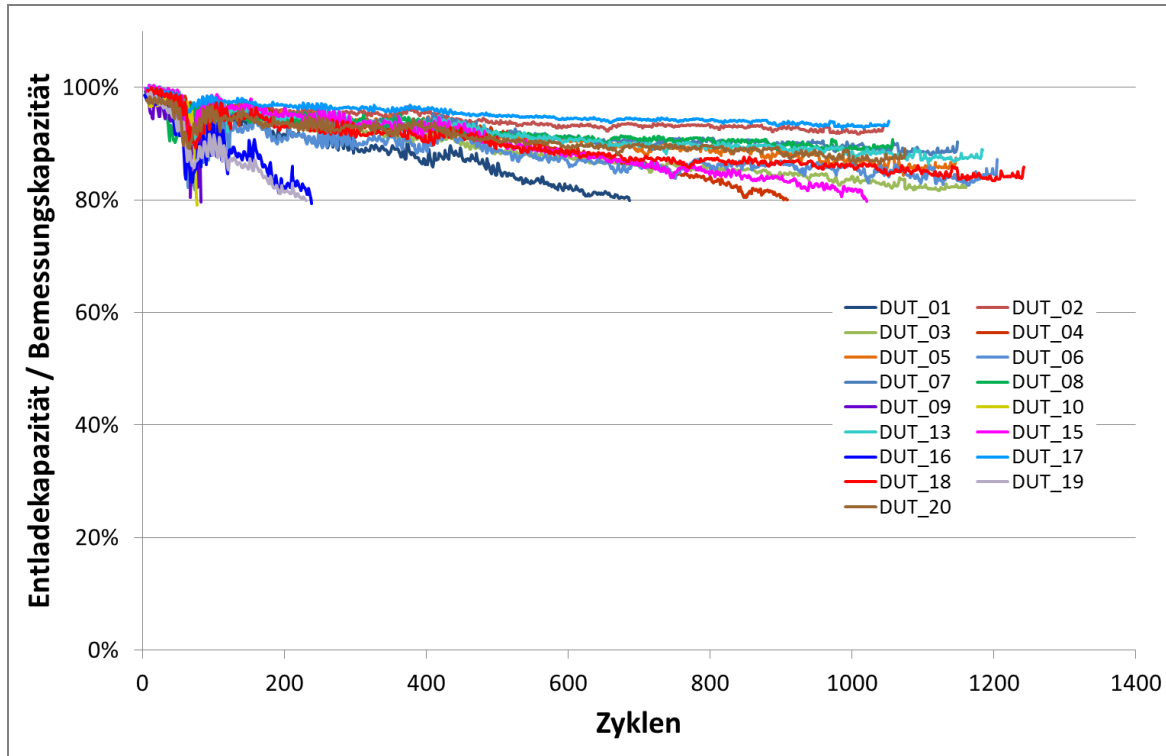
Die Akkumulatoren wurden den Tablets entnommen und an einem Batteriemessgerät getestet. Die Zyklisierung der Akkus erfolgte in Anlehnung an die Norm DIN EN 61960. Die Versuche wurden bei Raumtemperatur ($T=20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) als Vollzyklen durchgeführt. Da es sich bei den untersuchten Akkuzellen um verschiedene Fabrikate unterschiedlicher Hersteller handelt, sind sowohl die im Gerät unter Nutzung des vorhandenen Netzteils angewandten Ladeverfahren als auch die Lastprofile nicht identisch mit den Laborbedingungen. Für die hier durchgeführte vergleichende Untersuchung wurden, abweichend von der o.g. Norm, alle Akkuzellen mit einem einheitlichen Ladeverfahren geladen. Um sicherzustellen, dass keine der Zellen überladen wird, wurde die Ladeschlussspannung auf nur 4,1 V festgelegt, was etwas unterhalb der Ladeschlussspannung aller hier verwendeten Lithium-Akkus liegt – die Ladeschlussspannungen für die untersuchte Akkuklasse liegen, je nach chemischer Zusammensetzung, im Bereich 4,1 V - 4,35 V. Auf diese Weise konnte einerseits die Überladung von Akkuzellen sicher ausgeschlossen werden, andererseits kann von einer mindestens 90%igen Ladung ausgegangen werden. Die Entladung erfolgte galvanostatisch mit einer Entladeschlussspannung von 2,8 V. Sowohl Lade- als auch Entladestrom wurden auf die Nennkapazität bezogen (C-Rate).

¹ Bemessungskapazität ist die Menge an elektrischer Ladung, die eine Einzelzelle oder Batterie innerhalb von 5 h liefern kann, wenn sie nach den in Abschnitt 7.3.1 DIN 61960 festgelegten Bedingungen geladen, gelagert und entladen wird.

² Unter dem englischen Begriff Original Equipment Manufacturer (OEM) bezeichnet man i.d.R. Hersteller von Geräten oder Zubehörteilen, die vollständig in die Geräte anderer Hersteller integriert werden

Der Prüfplan wurde so ausgelegt, dass die Akkus zunächst bei Raumtemperatur ($20 \pm 5^\circ\text{C}$) mit mindestens 1000 Vollzyklen zyklisiert werden sollten. Als Abbruchkriterium wurde in der ersten Versuchsreihe die Unterschreitung von 80 % der Referenzkapazität³ gewählt.

Abbildung 1: Verlauf der Kapazität mit zunehmender Anzahl Ladezyklen (erste Messreihe)

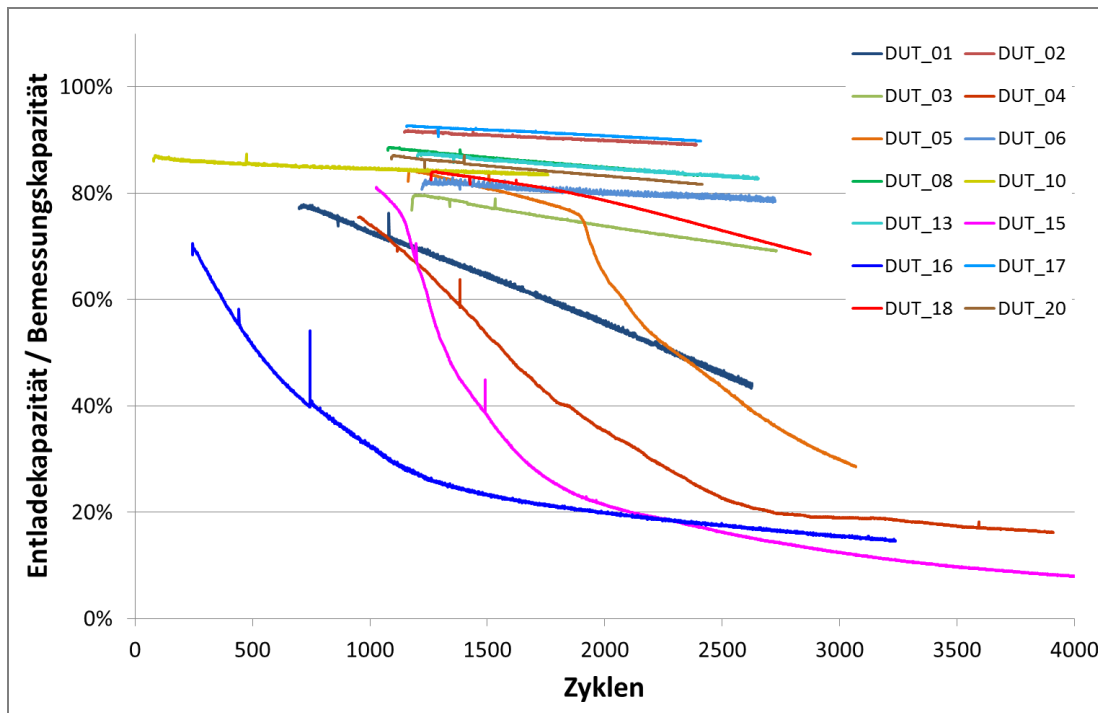


Da die speicherbare Kapazität der Akkumulatoren temperaturabhängig ist, schwankten die Messwerte in der ersten Messreihe, die bei Raumtemperatur und somit beispielsweise unter Tag-Nacht-Schwankungen (im Toleranzbereich der Norm DIN EN 61960) durchgeführt wurde. Diese Schwankungen sind in der Abbildung 1 durch die leicht gezackten Linien zu erkennen. Auf den langfristig beobachteten mittleren Kapazitätsverlust über die Zyklen hatten diese Temperaturschwankungen jedoch keinen Einfluss. Die Akkus DUT_07, DUT_09, DUT_19 unterschritten die 80 %-Grenze, erholten sich nicht mehr und wurden nicht mehr in der zweiten Messreihe weiter zyklisiert.

Weitere Zyklientests wurden mit den Akkus gestartet, die nach 1.000 Zyklen entweder noch über der 80 %-Grenze lagen oder durch temperaturbedingte Schwankungen (im Toleranzbereich $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$) bereits nach ca. 80 Ladezyklen die 80 %-Grenze erreicht hatten, sich aber wieder erholten (DUT_10). Um temperaturbedingte Kapazitätsschwankungen auszuschließen, wurden die Akkuzellen nun auf $22 \pm 0,5^\circ\text{C}$ temperiert.

³ Die Referenzkapazität weicht von der Bemessungskapazität ab, indem ein einheitliches Ladeverfahren anstelle der Ladeverfahren der Hersteller angewendet wird.

Abbildung 2: Verlauf der Kapazität mit zunehmender Anzahl Ladezyklen in einer zweiten Messreihe



Durch die Weiterführung der Zyklisierungsversuche konnte bei einigen Akkumulatoren mit ansteigender Vollzyklenanzahl ein rapider Kapazitätseinbruch beobachtet werden. Vermutlich handelt es sich hierbei um Delaminationseffekte innerhalb der Elektrode, die durch den mechanischen Stress während der Zyklisierung verursacht wurden (die negativen Elektroden von Akkumulatoren dieses Typs (Graphit-Anode) erfahren während der Zyklisierung eine deutliche Volumenänderung).

Die Ergebnisse der Untersuchungen unter Laborbedingung können als Annäherung an das theoretische Potential von Akkus für IKT-Geräte der aktuellen Generation gewertet werden. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Zyklenbeständigkeit von Lithium-Akkus verschiedener Hersteller sehr unterschiedlich ist. In der ersten Messreihe waren Frühausfälle zu verzeichnen, die vermutlich von den eingangs beschriebenen Temperaturschwankungen verursacht wurden. Hier sind zwei der 17 getesteten Akkus bereits nach ca. 80 Ladezyklen ausgeschieden (wovon sich einer wieder erholte und weiter zyklisiert wurde, DUT_10), zwei weitere Akkus unterschritten nach ca. 230 Zyklen die 80%-Marke. Die Verminderung der speicherbaren Kapazität um 20 % wurde bei den weiteren untersuchten Akkuzellen zwischen 687 Vollzyklen (DUT_01) und etwa 4500 Vollzyklen (extrapoliert, DUT_02 / DUT_17) erreicht. Nach 1000 Vollzyklen lagen noch 11 der 17 Akkuzellen oberhalb der 80%-Marke, nach 2000 Zyklen noch 7 der Akkus. Mit diesen Akkus ließen sich die Endgeräte noch sehr zuverlässig betreiben.

Das Verhalten der Nutzerinnen und Nutzer bezüglich der Verwendung einzelner Geräte kann sehr verschieden sein. Die in diesen Tests durchgeführte Vollzyklisierung bildet das Nutzerverhalten und die realen Bedingungen für den in das Gerät eingebauten Akku nicht realistisch ab. Die tatsächliche Degradation der Akkumulatoren hängt erheblich von der Temperatur und dem Nutzerverhalten ab.

Untersuchung der Lebensdauer von Notebook-Akkus im Feld

Die Lebensdauer von Lithium-Akkus wird neben internen Faktoren wie den eingesetzten Aktivmaterialien und der Verarbeitungsqualität auch von externen Faktoren wie der Umgebungstemperatur und dem Ladeverhalten der Nutzerin und des Nutzers und der Ladeelektronik beeinflusst. Da die

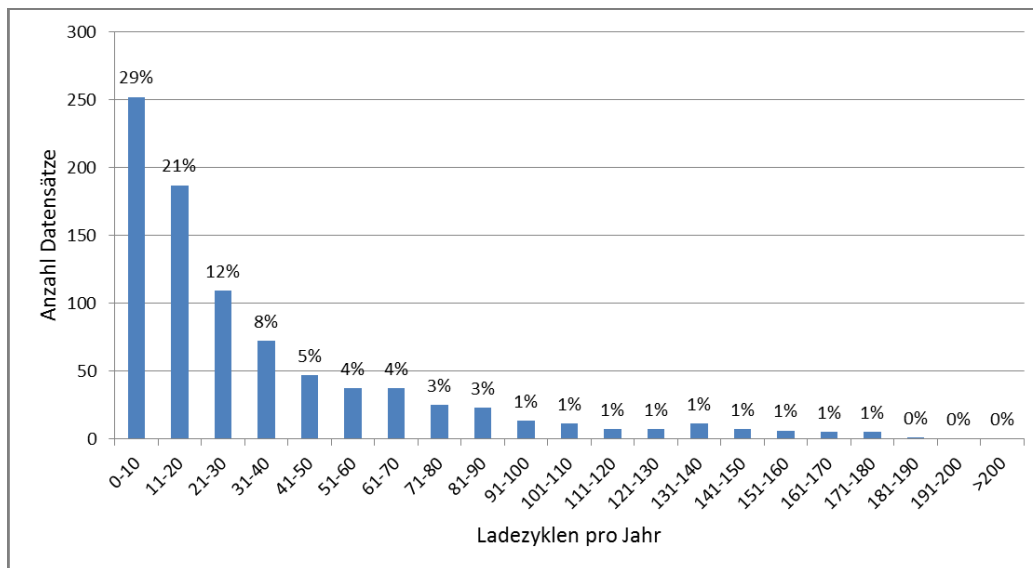
externen Faktoren in den Laboruntersuchungen nicht oder nur begrenzt abgebildet werden können, wurden im Forschungsvorhaben Akkudaten von knapp 900 gebrauchten Notebooks erhoben und ausgewertet. Zusätzlich wurde eine Datenbank mit über 54.000 Datensätzen von gebrauchten Notebooks zur Verifizierung der erhobenen Daten herangezogen.

Im Rahmen einer Kooperation mit dem Refurbishment-Unternehmen AfB in Berlin wurde dem Projektteam der Zugriff auf einen umfangreichen Pool an gebrauchten Notebooks ermöglicht. Die bei AfB vorhandenen Notebooks sind hauptsächlich Businessmodelle namhafter Gerätehersteller, die in der Regel einige Jahre bei Unternehmen und Behörden in der Nutzung waren. Detaillierte Informationen zur Art der Nutzung oder den Nutzungsmustern beim Kunden liegen entweder nicht vor oder konnten aus Datenschutzgründen nicht an das Projektteam übermittelt werden.

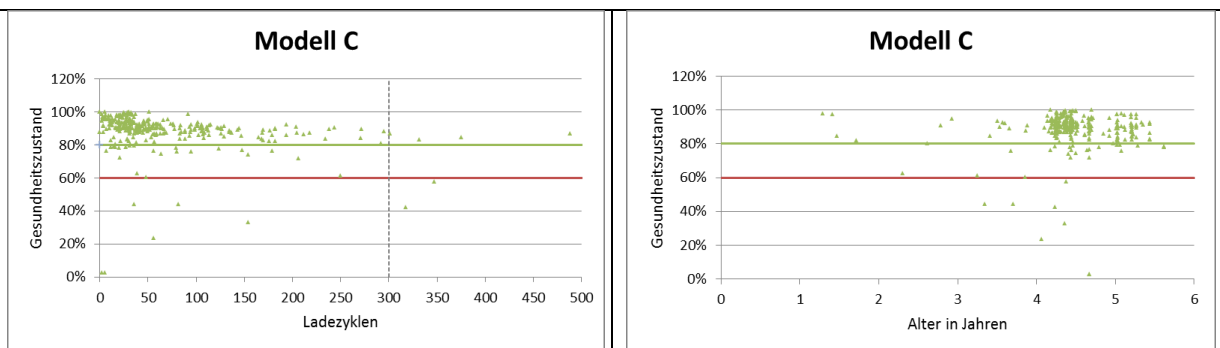
Die Datenerhebung über die Spezifikationen und den Gesundheitszustand der Akkus erfolgte durch kostenfreie Software Tools unabhängiger Entwickler und durch Tools der Notebookhersteller. Im Ergebnis der Datenerhebung bei AfB wurden rund 900 Datensätze individueller Akkus erhoben, die aus insgesamt sechs verschiedenen Notebook-Modellen zweier verschiedener Hersteller stammen. Die erhobenen Daten stellen eine zufällige Stichprobe dar, die nicht repräsentativ für Notebook-Akkus im Allgemeinen ist. Bei einigen Notebook-Modellen konnten nicht alle relevanten Daten ausgelesen werden. Auch die Entwicklung eines eigenen Auslesetools in Kooperation mit dem Fachbereich für Ingenieurwissenschaften der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW) führte im Ergebnis nicht zu einem Tool, das Daten von Akkus aller Notebooks auslesen konnte. Die Erkenntnis ist, dass das Fehlen eines Standards in diesem Bereich die Datenverfügbarkeit für die Nutzenden erheblich einschränkt.

Als zweite Datenquelle wurde dem Vorhaben vom Entwickler der MacOS Anwendung coconutBattery der direkte Zugriff auf eine umfangreiche Datenbank ermöglicht. Diese Datenbank enthielt zum Zeitpunkt der Datenübermittlung mehr als 22.400 Datensätze von individuellen Akkus. Die Notebooks stammen alle vom gleichen Hersteller und können tendenziell, aber nicht ausschließlich, dem Consumer-Bereich zugeordnet werden. Notebook-Akkus, deren Daten an die coconutBattery-Datenbank übertragen werden, befinden sich noch in der Nutzungsphase.

Im ersten Schritt wurde die mobile Nutzungsintensität der Notebooks bestimmt. Als Nutzungsintensität wird im Rahmen des Vorhabens die Anzahl Ladezyklen pro Jahr bezeichnet. Die Nutzungsintensität der Akkus der AfB-Datenbank ist verhältnismäßig gering. 29 % der Akkus wurden im Durchschnitt nur bis zu 10-mal im Jahr vollständig ge- und entladen (auch als Summe von Teilladungen). Dies weist auf eine hauptsächlich stationäre Nutzung im Netzbetrieb hin. Die Nutzungsintensität der Akkus der coconutBattery-Datenbank ist deutlich höher. Überwiegend durchlaufen diese Akkus zwischen 0 und 130 Ladezyklen pro Jahr. Ein Anteil von 3 % der Akkus liegt sogar bei über 350 Ladezyklen pro Jahr.

Abbildung 3: Nutzungsintensität der Akkus der AfB-Datenbank

Im zweiten Schritt wurden die Akkudaten der einzelnen Geräte grafisch ausgewertet, indem der Gesundheitszustand gegen die Ladezyklen und gegen das Alter in Jahren aufgetragen wurde. Bei der Betrachtung der Diagramme, die ihren Gesundheitszustand gegen das Alter der Akkus auftragen, muss bedacht werden, dass nicht die kalendarische Alterung an sich zu erkennen ist. Die Effekte der Nutzung (Zyklisierung) und die der kalendarischen Alterung treten parallel auf und können anhand der erhobenen Daten nicht separat dargestellt werden. Die Daten streuen in den meisten Fällen stark.

Abbildung 4: Grafische Auswertung von Akkus einzelner Notebook-Modelle

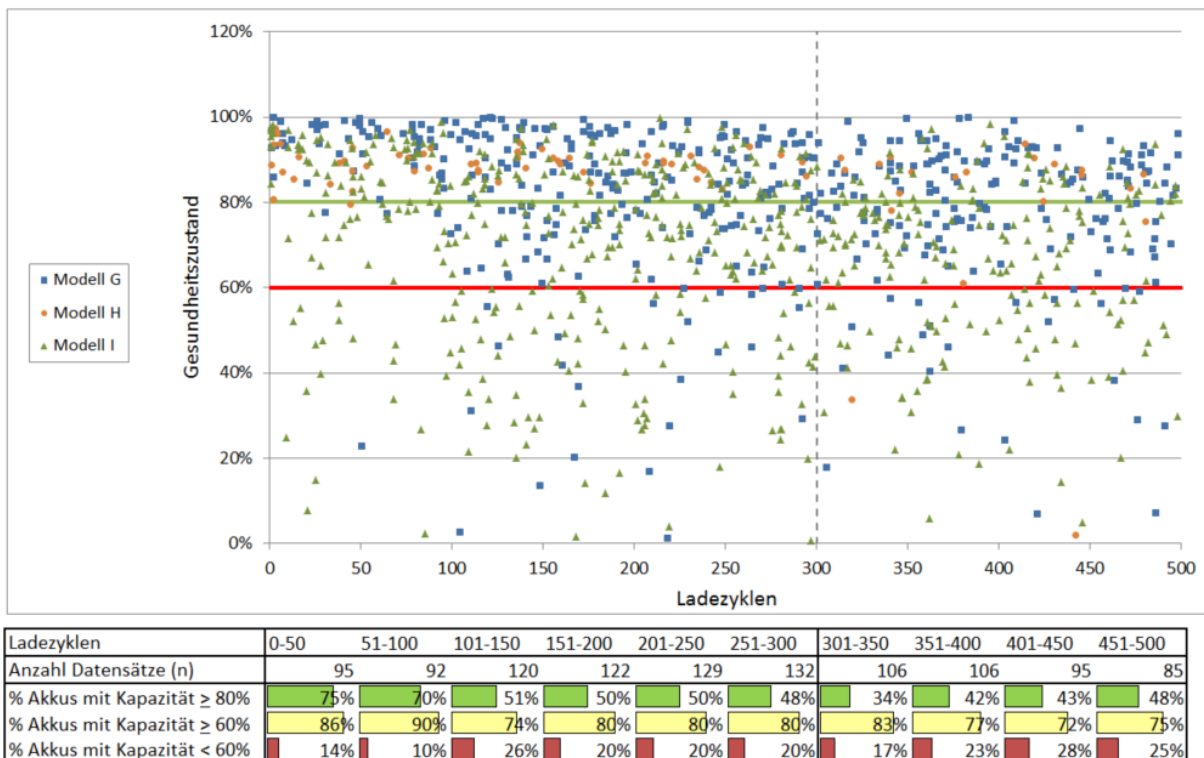
Ein Sonderfall sind die Daten eines Notebook-Modells (Modell E), in dem Akkus von zwei verschiedenen Herstellern verbaut wurden. Die Zyklenbeständigkeit dieser Akkus unterscheidet sich erheblich. Dieser Umstand wird als Hinweis auf die unterschiedliche Qualität von Akkus unterschiedlicher Hersteller interpretiert.

In modellübergreifenden Auswertungen wurden statistische Verteilungen betrachtet. Diese zeigen, wie viele Akkus der Stichproben nach einer bestimmten Anzahl Ladezyklen im Bereich von noch mindestens 80 %, mindestens 60 % oder bereits unter 60 % Gesundheitszustand liegen. Besonders interessant war im Forschungsvorhaben die Frage, wie der Zustand eines Notebook-Akkus nach einer Nutzungsphase von angenommen fünf Jahren im Feld ist. Die zugehörige Verteilung wurde ermittelt, indem nur Akkus betrachtet wurden, die zwischen vier und sechs Jahren alt waren. Die Ergebnisse Stichproben von AfB und coconutBattery weisen darauf hin, dass knapp die Hälfte der Akkus im Alter von 5 (± 1) Jahren bis zu 500 Ladezyklen noch 80 % ihrer Kapazität speichern und abgeben können. Immerhin 75 % der Akkus haben noch mindestens 60 % ihrer Kapazität zur Verfügung.

Aus der Verteilung lassen sich Rückschlüsse über die zu erwartende Nutzungsdauer von Notebook-Akku unter bestimmten Annahmen ableiten. Anhand dieser Auswertung konnte ermittelt werden, ob und wie häufig im Laufe der Nutzungsdauer eines Notebooks ein Akku ausgetauscht werden muss, um eine mobile Nutzung des Geräts zu gewährleisten. Dabei muss jedoch der stichprobenartige Charakter der Datenbasis bedacht werden.

Zur Erleichterung der Verwendung der Daten durch Ökobilanzierer werden drei Szenarien der Nutzung von Notebooks berechnet, die eine niedrige, mittlere und hohe mobile Nutzung abbilden.

Abbildung 5: Darstellung der statistischen Verteilung von Akkus im Alter von 5 (± 1) Jahren (Daten von coconutBattery)



Die Felddaten der AfB-Geräte und der coconutBattery enthalten Datensätze, deren Plausibilität angezweifelt wird. Ob die entsprechenden Daten fehlerhaft im Akku gespeichert oder nicht korrekt ausgelesen werden, konnte im Vorhaben nicht abschließend geklärt werden. Diese Daten wurden weitestgehend bei der statistischen Auswertung nicht mit einbezogen.

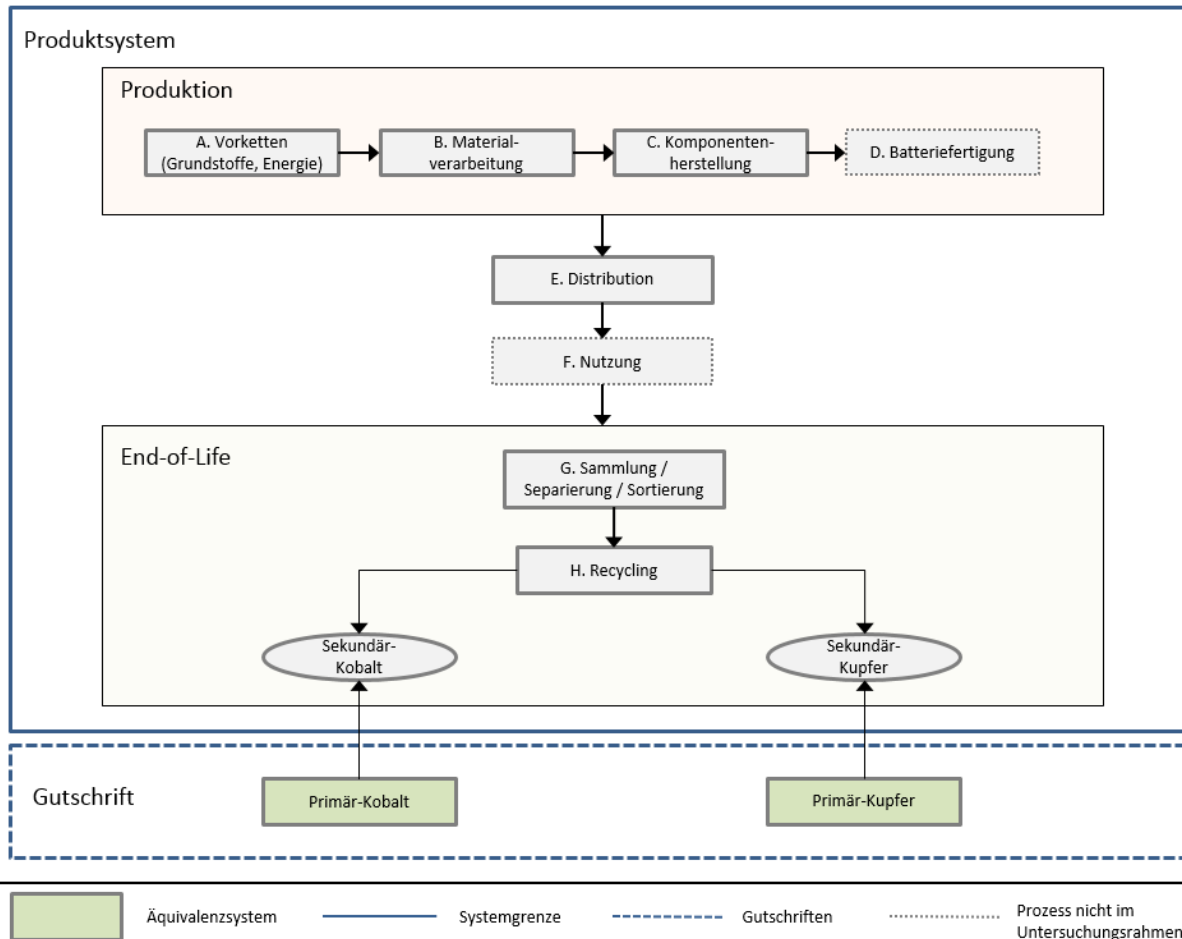
Problematisch bei der Erhebung von Felddaten ist das Fehlen eines Standards, der es ermöglichen würde, über ein definiertes Format und eine definierte Schnittstelle die Akkudaten auslesen zu können. Die Spezifikationen des Smart Battery Systems (SBS) könnten sich hierfür als Standard eignen. Eine weitergehende Normierung der relevanten Soft- und Hardware könnte die Informationslage für den Nutzenden deutlich verbessern.

Untersuchung der Umweltwirkungen eines Notebook-Akkus

Der Untersuchungsgegenstand ist ein Lithium-Akku zum Betrieb in einem Notebook. Das Produktsystem Akku umfasst dabei die Komponenten Zellen, Batteriemanagementsystem (BMS) und das Gehäuse des Akkus. Die Umweltbewertung erfolgt im Hinblick auf die Herstellung (ausgenommen ist die Montage, da hierzu keine Daten vorlagen), Distribution und das End-of-Life des Produktsystems Notebook-Akku. Die Inanspruchnahme von Energie in der Nutzungsphase sowie mögliche Energieverluste, bspw. durch die Selbstentladung des Akkus, werden nicht mit betrachtet. Der Grund

ist, dass diese Faktoren bereits in einer Bilanz des Gesamtproduktsystems Notebook einbezogen sind. Des Weiteren wird angenommen, dass der betrachtete Akku dem Sammelsystem in EOL zugeführt wird. Eine Sammelquote wird demnach nicht einbezogen.

Abbildung 6: Schematische Darstellung des betrachteten Produktsystems



Die funktionelle Einheit ist festgelegt als ein Stück Lithium-Akku zum Betrieb in einem Notebook. Zur Abbildung der Herstellungsphase eines Notebook-Akkus wurden Primärdaten von einem der größten Hersteller von Akkus weltweit erhoben. Die Daten beziehen sich auf die Herstellung eines Akkus mit den folgenden Spezifikationen:

Tabelle 1: Daten für den zugrunde gelegten Akku (Modellierung)

Spezifikation	Wert
Gewicht	259,65 g
Typ	Lithium-Polymer
Bauform	Pouch
Kapazität	7300 mAh
Nennspannung	7,6 V
Energie	55 Wh
Anzahl Zellen	4

In Anlehnung an ISO 14040 wurde ein breites Spektrum an Umweltindikatoren in die Analyse einbezogen. Betrachtet werden folgende Wirkungskategorien nach CML 2001⁴:

- ▶ Erschöpfung abiotischer Ressourcen (Abiotic Depletion Factor, ADF)
- ▶ Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP)
- ▶ Ozonabbaupotential (Ozon Depletion Potential, ODP)
- ▶ Humantoxizitätspotential (Human Toxicity Potential, HTP)
- ▶ Versauerungspotential (Acidification Potential, AP)
- ▶ Eutrophierungspotential (Eutrophication Potential, EP)

Derzeit ist die Datenverfügbarkeit über die Inanspruchnahme von Fläche insbesondere bei Metallen unzureichend. Aus diesem Grund wurde die Flächeninanspruchnahme von Lithium-Akku nicht bewertet. Aus selbigem Grund wurden weitere Wirkungskategorien, wie Wasserstress und Naturraumbeanspruchung, nicht einbezogen.

Zu den Zellen wurden dem Vorhaben eine detaillierte Materialliste (Bill of Materials, BOM) sowie Angaben zur Inanspruchnahme von Ressourcen bei der Fertigung verfügbar gemacht. Daten zum Materialeinsatz und zu den Masseanteilen der Komponenten Batteriemanagementsystem und Gehäuse stammen hingegen aus der Demontage eines Tablet-Akkus, der der Bauform des zu modellierenden Notebook-Akkus entsprach (Pouch). Die Masseanteile der Komponenten wurden anhand des Masseverhältnisses zwischen den Tablet-Akkuzellen und den Notebook-Akkuzellen skaliert.

In einer Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss des Kathodenmaterials untersucht, indem der Masseanteil des Kathodenmaterials Lithium-Kobaltoxid durch die gleiche Masse Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC) ersetzt wurde. Der zugehörige Sachbilanzdatensatz zur Herstellung von NMC stammt aus einer Veröffentlichung von Majeau-Bettez (2011), der für die Herstellung von Akkus für die Elektromobilität modelliert wurde.

Daten zur Distribution stammen aus einer Publikation von Mudgal et al. (2011). Bei der Distribution wurde im Basisfall nur der Transport vom Werk in Nanjing bis zum Hafen in Shanghai einbezogen. Es wurde angenommen, dass der Akku noch vor dem Transport nach Europa in ein Notebook eingebaut wird. Die Lasten der weiteren Distribution müssen dem Produktsystem Notebook zugerechnet werden. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss der Umweltlasten der Distribution untersucht, indem der Transport eines Ersatzakkus vom Werk in China bis zum Endnutzer in Europa abgebildet wurde.

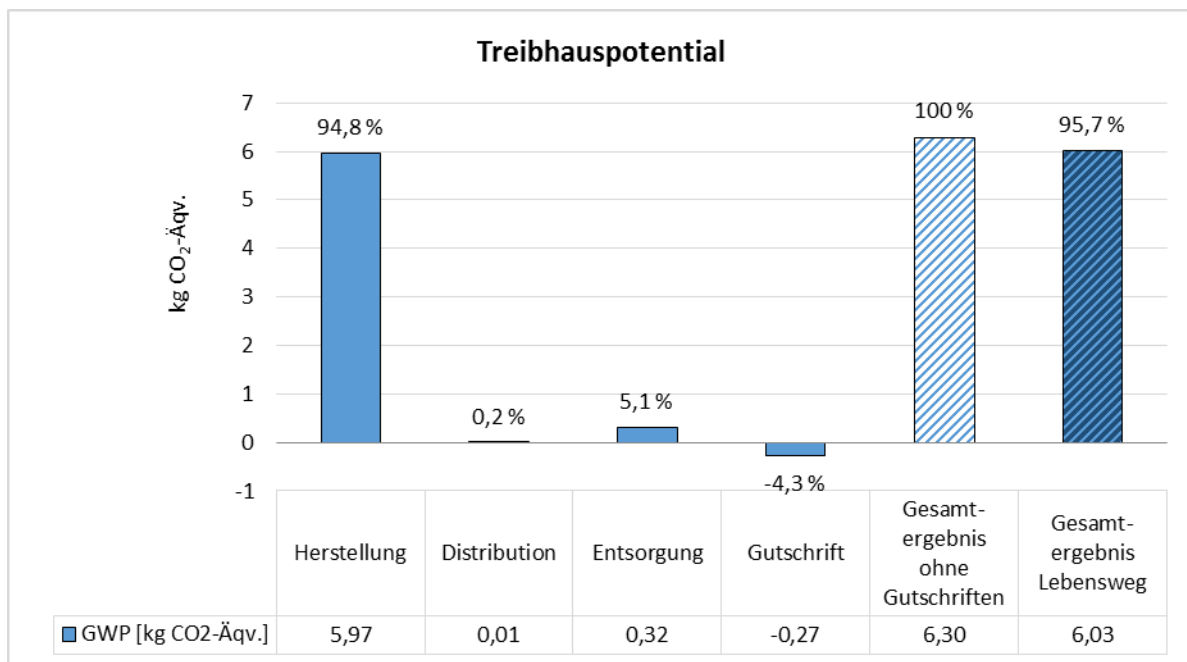
Die Inanspruchnahme von Energie in der Nutzungsphase wird nicht dem Akku selbst, sondern dem Produktsystem Notebook, zugerechnet. Die Nutzungsphase wird daher in der Berechnung der Umweltwirkungen eines Notebook-Akkus über seinen Lebensweg nicht einbezogen.

Daten zu den Prozessschritten einer sachgerechten Entsorgung bis zur Rückgewinnung von Sekundärmetallen (Kobalt und Kupfer) beim Recycling stammen ebenfalls aus der Studie von Fisher et al. (2006).

Anschließend wurden die Herstellungsprozesse aller Komponenten mittels der kommerziell erhältlichen Ökobilanz-Software GaBi und Daten aus den Datenbanken GaBi Professional und ecoinvent modelliert.

⁴ Die CML-Methode ist ein ökologieorientiertes Informations- und Entscheidungsinstrument zur Erstellung einer Ökobilanz gemäß DIN EN ISO 14040, entwickelt im Centrum voor Milieukunde (CML) der Universität Leiden.

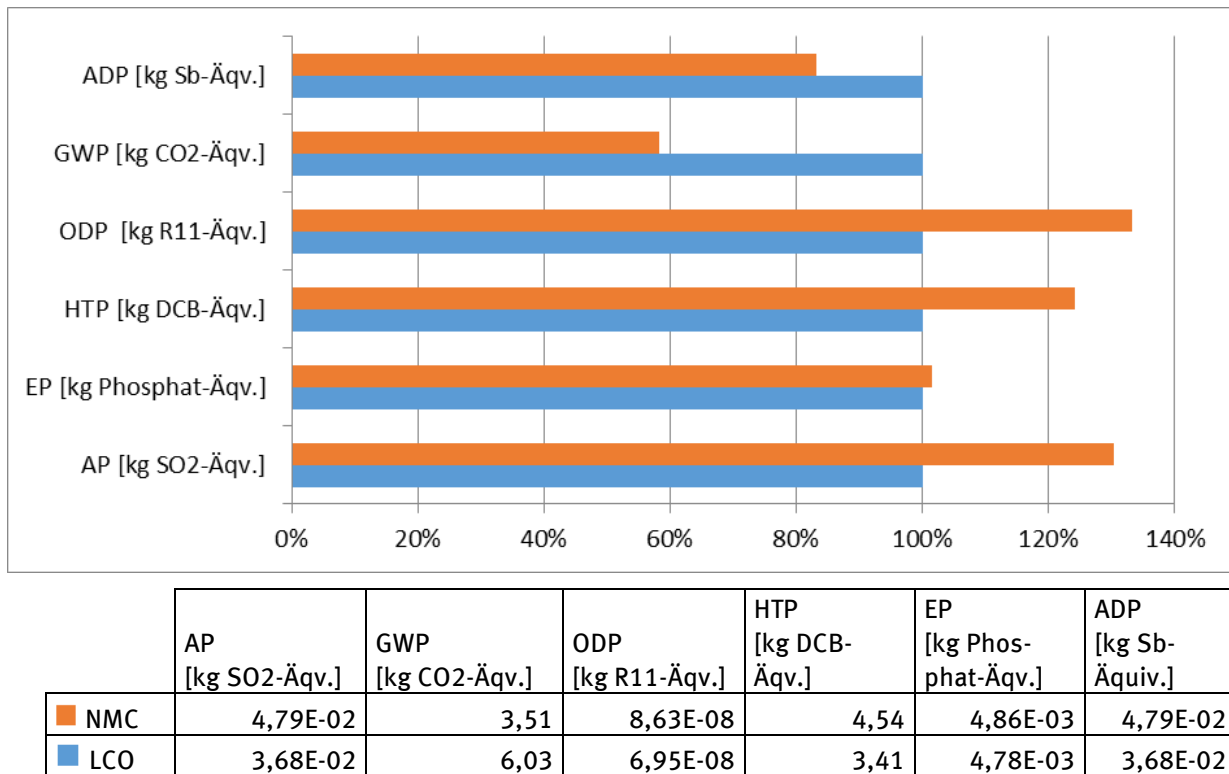
Abbildung 7: Treibhauspotential im Basisfall über den Lebensweg des Notebook-Akkus



Die Herstellungsphase ist in allen Wirkungskategorien dominierend. Die Distribution im Basisfall ist kaum von Bedeutung. Die Umweltlasten, die durch die Entsorgungsprozesse entstehen, werden in einigen Wirkungskategorien durch die Gutschrift (zurückgewonnenes Sekundärmetall) ausgeglichen. Trotzdem ist das Recycling wichtig, damit die wertvollen Metalle (Kobalt und Kupfer) nicht verloren gehen. Kobalt gilt beispielsweise als eines der 20 „critical raw materials“ der EU.

In einer „Hot-Spot-Analyse“ wurde festgestellt, dass der überwiegende Teil der Umweltlasten innerhalb der Herstellungsphase auf die Bereitstellung von Lithium-Kobaltoxid (LCO) zurückzuführen ist, die für 51 % des Treibhauspotentials über den Lebensweg des Akkus verantwortlich ist. Die Sensitivitätsanalyse ergab, dass das Kathodenmaterial NMC in den Wirkungskategorien Erschöpfung abiotischer Ressourcen und Treibhauspotential besser abschneidet als LCO. Das Gegenteil ist jedoch in den anderen Wirkungskategorien der Fall.

Abbildung 8: Umweltlasten der Akkus mit NMC und LCO Kathoden im Vergleich, bezogen auf den gesamten Lebenszyklus eines Notebook-Akkus



Empfehlungen für Hersteller, Verbraucher und Politik

Aus den im Vorhaben gewonnenen Erkenntnissen lassen sich Empfehlungen ableiten, mit denen sich einige der aufgezeigten Problemstellungen adressieren lassen. Dies betrifft die Hersteller einerseits, die ihre Produkte möglichst so gestalten sollten, dass eine Maximierung der Lebensdauer ermöglicht wird und andererseits die Verbraucher, deren Umgang mit Produkten einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Lebensdauer hat. Des Weiteren lassen sich umweltpolitische Empfehlungen ableiten, mit denen der Gesetzgeber den umweltrelevanten Auswirkungen von Produkten begegnen kann.

Eine Maßnahme sollte die Etablierung eines Standards sein, nach dem Hersteller den Nutzenden detaillierte Daten zum Gesundheitszustand des Akkus in IKT-Geräten zugänglich machen. Dieser Standard kann angelehnt werden an die Smart Battery System (SBS) Specifications. Die letzte Revision der SBS Specifications ist jedoch aus dem Jahr 1998 und sollte auf Anwendbarkeit bzw. Notwendigkeit einer Überarbeitung geprüft werden. Die Erarbeitung einer EU Norm für Smart Batteries kann als sinnvolle Grundlage für das weitere Einbringen in produktpolitische Instrumente dienen. Des Weiteren sollte die bestehende Forderung nach der Angabe der Mindestzahl an Ladezyklen bei Notebook-Akkus durch die Hersteller konkretisiert werden. Hier ist eine einheitliche, realitätsnähere Messvorschrift wünschenswert, damit die Herstellerangaben transparent und vergleichbar sind. Zu diesem Zweck kann als Mindestanforderung die Norm DIN EN 61960 herangezogen werden.

Die Gerätehersteller werden aufgefordert, dem Nutzenden softwareseitige Möglichkeiten der Akkupflege bzw. -schonung an die Hand zu geben. Für eine andauernde Nutzung eines Notebooks im Netzbetrieb kann beispielsweise ein durch den Nutzenden festzulegender maximaler Ladestand die Alterung des Akkus verzögern oder verhindern, dass der Akku zu häufig und unnötig der Ladespannung ausgesetzt ist. Des Weiteren wird gefordert, dass Hersteller das Design ihrer Geräte an typische Nutzungsmuster anpassen und die Lüftungsschlitze nicht mehr unten an Geräten anbringen. An-

derfalls kann es leicht zu einem Wärmestau im Gerät kommen, der die Lebensdauer der enthaltenen Komponenten, insbesondere des Akkus, potentiell verkürzt.

Dem Nutzenden wird empfohlen, soweit wie möglich seine Akku-betriebenen Geräte nicht übermäßiger Hitze oder Kälte auszusetzen. Zur Lagerung wird empfohlen, den Akku bei einem Ladezustand von 40 bis 60 % zu lagern, um einer Tiefentladung vorzubeugen, aber auch um eine kontinuierlich hohe anliegende Spannung im Akku zu vermeiden, die die Alterung beschleunigen kann. Weiterhin wird dem Nutzenden dringend dazu geraten, Akkus am Ende der Nutzungsdauer möglichst bei geringer Ladung der sachgerechten Entsorgung zuzuführen.

Summary

Mobile devices of information and communication technology (ICT) such as notebooks, smart phones or tablet PCs, are an indispensable part of most people's lives. The use of high-performance batteries is of great importance. Unlike primary batteries, so called secondary batteries offer the great advantage of being rechargeable and reusable.

Lithium-based battery systems are predominant in laptops and mobile phones. A number of different cathode materials are used for lithium batteries in ICT. They differ in aspects such as energy density, cycle stability, their safety aspects and costs. Lithium cobalt oxide (LCO) batteries that have long dominated the market are increasingly being substituted by lithium nickel manganese cobalt oxide (NMC) batteries. Lithium polymer batteries (LiPo), which contain no liquid electrolyte but a polymer-based electrolyte, are also becoming increasingly popular as they allow for thinner designs.

An important metric for batteries is capacity. Capacity is usually measured in milliampere-hours (mAh) and indicates the amount of electric charge which a battery can store and provide to its host device. In this report different capacity terms are distinguished. The nominal capacity is the capacity specified by the manufacturer of the battery when it is brand new. The capacity in fully charged condition (Full Charge Capacity) is the currently effective capacity when fully charged. The state of health (SOH) of a battery is the quotient of the Full Charge Capacity and the nominal capacity in percent. An SOH of 85 % means that the battery can still store and deliver 85 % of its nominal capacity.

A charge cycle (full charge cycle) means a full charge / discharge process, in which 100 % of the nominal capacity of the battery will be charged and released. This process may consist of several partial charge cycles. Calendar aging is a degradation process in the battery, which occurs even without active use of the battery. The rate at which capacity is lost depends on various influencing factors, such as the ambient temperature and the state of charge while the battery is stored. However, the loss of capacity occurs mostly when batteries are in use. The degree of aging by cycles is expressed through the cycle stability. A battery with high cycle stability will lose a relatively small amount of its capacity in the course of one charge cycle. The cycle resistance of a battery can be determined by many factors, e.g. the chemicals used, the quality of the production processes and the ambient temperature at which the battery is operated.

Lifespan of lithium batteries

Manufacturers define the technical lifespan of a battery using the number of charge cycles the battery can undergo until its original capacity decreases to a certain value. A charge cycle is the process of fully recharging a discharged battery. This process may occur in several partial charging events. The use of the term charge cycle in this report is equivalent to the definition of a charge cycle by the Smart Battery System (SBS) forum (SBS Specifications 1998), a consortium of different manufacturers with the goal of open standards for Smart Battery systems.

The end of the lifespan of a battery is reached once the battery is no longer in use. Reasons for the decommissioning of batteries may include the loss of too much of its original capacity so that it can no longer fulfill its purpose. This is the case for a cell phone battery which can no longer provide sufficient capacity for daily use, or a notebook battery that no longer provides sufficient energy without being connected to the power grid. Battery and device manufacturers define a battery's end of life as a discharge capacity of 80 % of the initial measured capacity, i.e. the point at which only 80 % of the initially available capacity can be stored and delivered (DIN EN 60254-1). The standard DIN EN 61960 provides specifications for test procedures for batteries. The end of the service life of batteries is set at 60 % by the DIN. The actual end of service life of batteries in real use depends largely on the individual requirements of the user and therefore cannot be generalized.

Lifespan of tablet-PC batteries under standardized laboratory conditions

To study the lifespan of lithium batteries used in tablet PCs, repeated cycling experiments were performed on an exemplary selection of commercial OEM⁵ batteries. Although the current study focuses on notebook batteries, these were not available for the laboratory tests in the project. However, the structure and the material composition in tablet batteries and current generation notebook batteries (e.g. pouch cells) are quite comparable. Accordingly, the results of laboratory studies can in principle also be applied to current notebook battery cells. However, as notebooks often times have to meet higher performance requirements compared to tables, different load profiles have to be taken into account

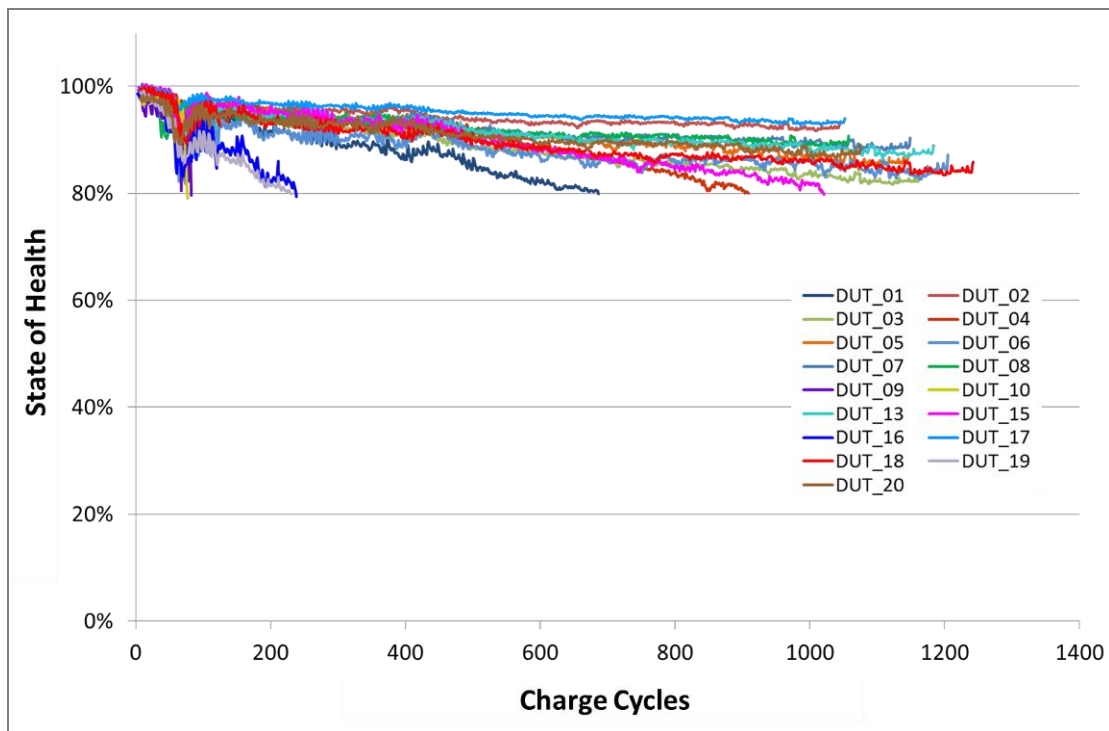
We tested the battery of 17 tablet-PCs from different manufacturers including Acer, Amazon, Apple, Asus, Huawei, Lenovo and Samsung. In the evaluation of the results, the product names are made anonymous, as comparing different manufacturers and products to each other is not the aim of the study. The product names are therefore made anonymous by the designation Device under Test (DUT).

The batteries were extracted from the tablets and tested on a battery meter. The cycling of the batteries was carried out in accordance to the standard DIN EN 61960. The experiments were performed at room temperature ($T=20 \pm 5^\circ\text{C}$) using full charge cycles. Since the batteries under test are from different brands and different manufacturers, the laboratory conditions are not identical to the charging method and the load profiles within the device and using power adapters. To generate comparable results, all battery cells were charged using a uniform charging process. To ensure that none of the cells were overcharged, the final charge voltage was set at only 4.1 V, which is slightly below the final charge voltage of all Li-ion batteries in this study - the charge voltages for the examined battery class is, depending on the chemical composition, in the range of 4.1 V to 4.35 V. Thus overcharging batteries can be avoided and a state of charge of at least 90 % can be assumed. The discharge was then performed at a galvanostatic discharge voltage of 2.8 V. Both charging and discharging were related to the nominal capacity (C-rate).

The protocol was designed so that the batteries should initially be cycled at room temperature ($20 \pm 5^\circ\text{C}$) for at least 1000 full cycles. The stop criterion was chosen to be 80 % of the reference capacity in the first test series.

⁵ The term Original Equipment Manufacturer (OEM) is used to describe a manufacturer of devices or accessory parts, which are integrated fully into devices of another manufacturer

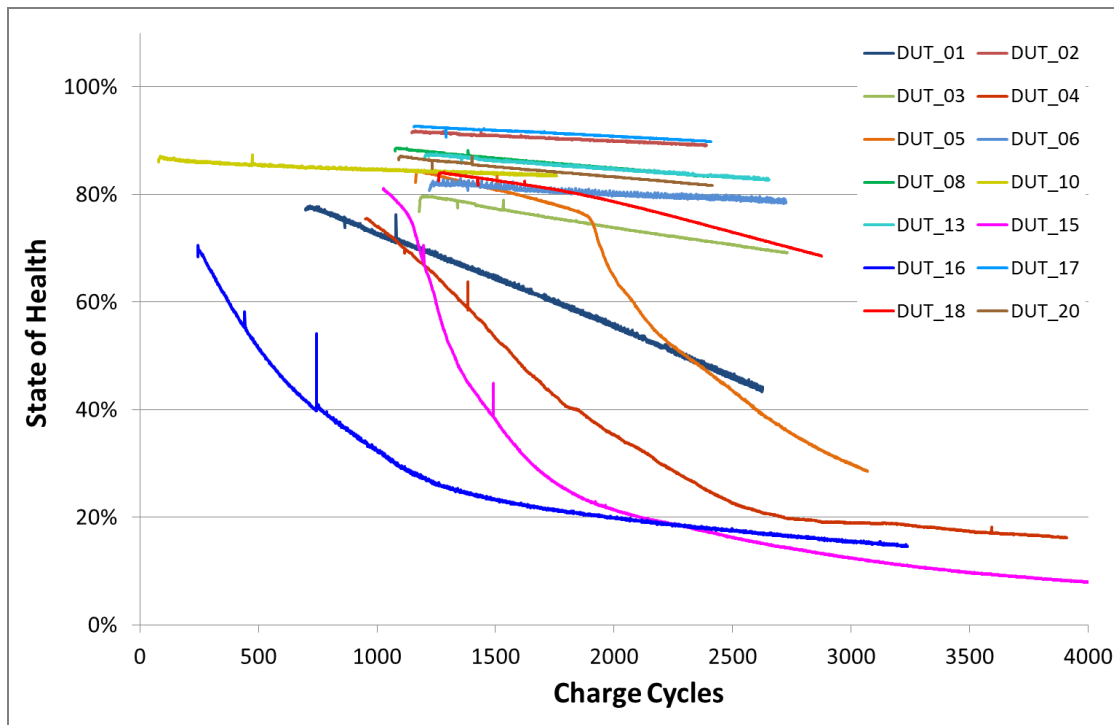
Abbildung 9: Behavior of the discharge capacity with increasing number charging cycles (first measurement series)



Since the full charge capacity of the batteries depends on temperature, the measured values fluctuated in the first series of measurements for example with day-night variations (within the tolerance range of the standard DIN EN 61960). These variations can be seen as the lines in Abbildung 9 are jagged. However, these temperature fluctuations had no impact on the observed long-term average loss of capacity over the cycles. DUT7, DUT9 and DUT19 however lost 20 % of their capacity, did not recover and testing was not continued in a second measurement series.

Further cycling tests were started with the batteries that were still above the 80 % limit after 1000 cycles. Cells which were temporarily below the 80 % limit due to temperature fluctuations were also tested further (DUT_10). In order to exclude temperature-induced capacity variations, the battery cells were kept at $22 \pm 0.5^\circ\text{C}$.

Abbildung 10: Behavior of the discharge capacity with increasing number charge cycles (second measurement series)



After continuing the cycling tests, a rapid loss in capacity could be observed in some batteries. Presumably, this is caused by delamination effects within the electrode, caused by the mechanical stress during the cyclization (the negative electrodes of batteries of this type (graphite anode) experience a significant change in volume during cycling).

The results of the tests performed under laboratory conditions come close to showing the theoretical potential of batteries for ICT devices in the current generation. Furthermore, the results indicate that the cycle stability of lithium batteries from different manufacturers varies considerably. Early failures could be observed in the first measurement series, which were likely caused by temperature variations as described above. Two of the 17 devices under test fell under the 80% threshold after around 80 charging cycles (one of which recovered and was tested further, DUT_10), another two battery cells fell under the 80% threshold after around 230 cycles. For the other battery cells in this test, a decrease in capacity by 20 % could be observed between 687 fully cycles (DUT_01) up to approximately 4.500 full cycles (extrapolated results for DUT_02/DUT_17). After 1000 full charging cycles, 11 out of the 17 tested batteries had retained at least 80% of their initial capacity, after 2000 charging cycles 7 batteries remained above the 80% threshold. These batteries would still be able to reliably run the devices they were designed for.

Also, usage patterns, which differ greatly, are of high importance to the ageing of batteries. The full charge cycle performance tests are not intended to model a real usage pattern. The actual degradation of the batteries in the field largely depends on the temperature and the user behavior.

Lifespan of notebook batteries under real use conditions in the field

The lifetime of lithium batteries is influenced by internal factors such as the active materials used and the quality of its production and external factors such as ambient temperature and the charging behavior of the user and the device electronics. Since external factors can be represented only partially in the laboratory tests, battery data were collected and analyzed from almost 900 used notebooks. In

addition, a database of over 54.000 datasets of used notebook batteries was used to verify the collected data.

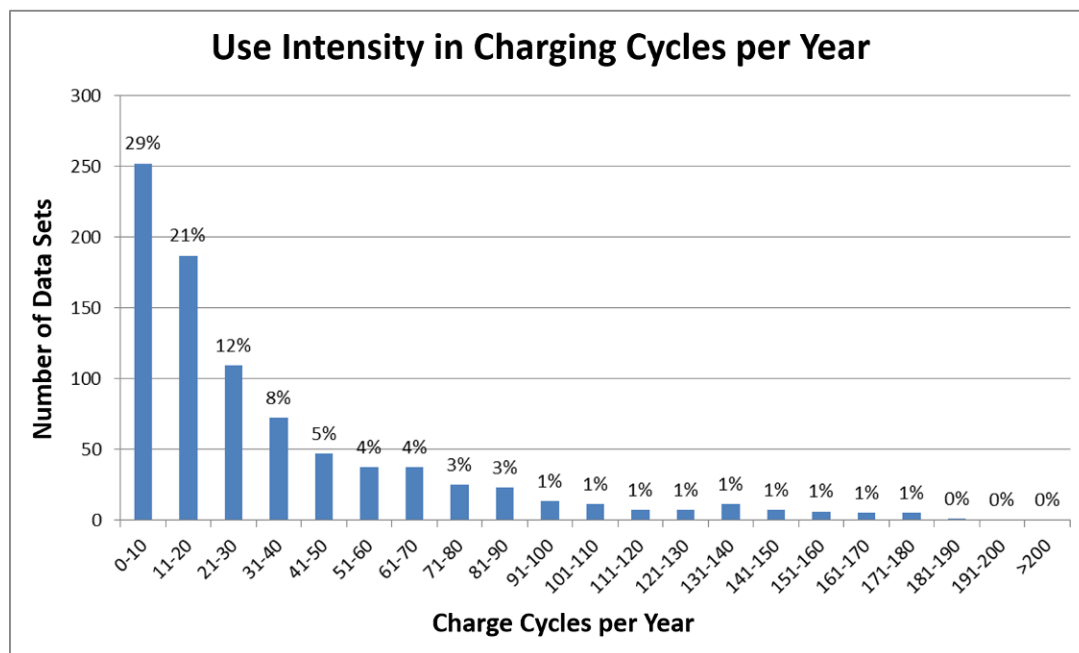
Under a cooperation agreement with the refurbishment company AfB in Berlin the project team gained access to an extensive pool of used notebooks. The notebooks at AfB are mainly business models of renowned equipment manufacturers. They were typically in use for a few years in a business or administrative environment. Detailed information on the type of use or the usage patterns of the previous owners are either not available or have not been submitted to the project team due to data protection.

Data on the specifications and the state of health of batteries were collected using free software tools of independent developers and through the software tools made by notebook manufacturers. As a result of the data collection at AfB, 900 datasets of individual batteries were collected. The data entail a total of six different notebook models from two different manufacturers. It thus cannot be seen as representative of notebook batteries in general. Although, notebook models from other manufacturers were available, the relevant information could not be obtained through the use of the available software. The development of a versatile software tool in cooperation with the Faculty of Engineering of the University of Applied Sciences Berlin (HTW) did not result in a tool that was able to access battery data on any notebook model. The lack of standards for data handling in notebook batteries considerably restricts the data availability for the user.

As a second data source to the project the developer of the MacOS application coconutBattery granted access to an extensive database with more than 22.400 data sets of individual batteries from one manufacturer. It is likely that they are used by private individuals rather than companies or government agencies. Also, it is to be noted that notebook batteries whose data is transmitted to the coconutBattery database are still in the phase of use as opposed to the notebooks with AfB.

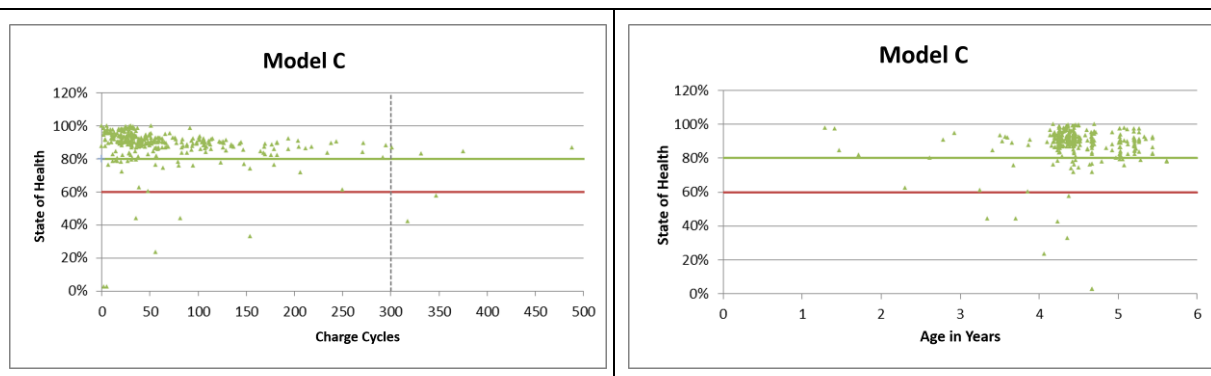
First, the mobile use intensity of the notebooks was determined. The use intensity is understood in this report as the number of charging cycles per year a battery undergoes. The use intensity of the batteries in the AfB database is relatively low. 29 % of the batteries were completely charged and discharged only up to 10 times per year on average (possibly made up of several partial charging events). This hints at a primarily stationary use with connection to the power grid. The use intensity of the batteries in the coconutBattery database is significantly higher. The majority of the batteries are subject to 0-130 charge cycles per year. A share of 3 % of the batteries even went through 350 charge cycles per year or more.

Abbildung 11: Intensity of use of the batteries in the AfB database



In a second step, the battery data of the individual models were analyzed by plotting the state of health (SOH) against the charge cycles as well as against their age in years. When looking at the diagrams plotting SOH versus the battery age one must keep in mind that the actual calendar aging cannot be shown as such from the available data. The effects of the use (cycling) and the calendar ageing occur simultaneously. It is not possible to differentiate both effects on the available data basis. Additionally, when analyzing the data the large scattering becomes evident.

Abbildung 12: Graphical evaluation of individual batteries by notebook models (example)



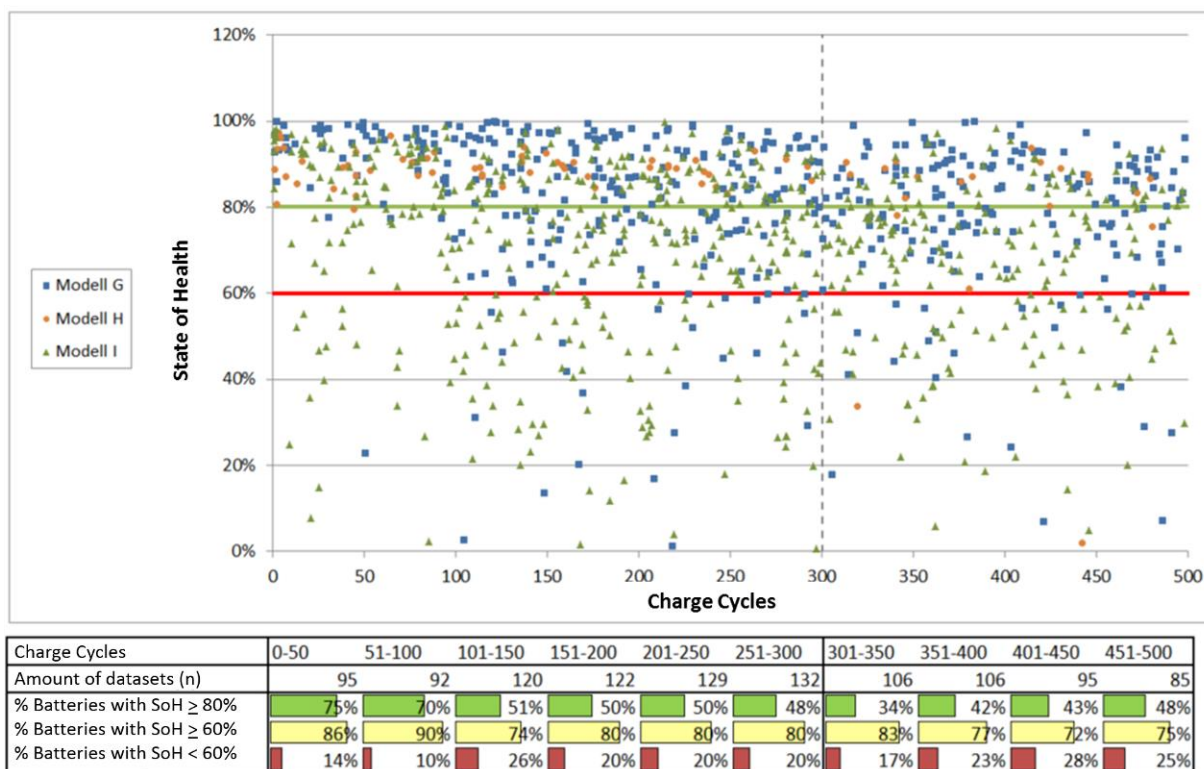
In notebook model E, batteries from two different manufacturers were used. Major differences for both batteries could be observed in terms of cycle stability. This effect may be an indicator for varying qualities of batteries from different manufacturers.

The evaluation of data from different models made it possible to analyze cross-model statistical distributions. The results show the amount of batteries in the sample that have at least 80 %, at least 60 % or below 60 % SOH after a certain number of charging cycles. A main point of interest of the project was to determine the status of a battery's SOH after a use phase of five years. The corresponding statistical distribution was determined by analyzing only batteries, which were between four and six years of age. The results of both AfB and coconutBattery samples indicate that nearly half of the batteries at the age of 5 (± 1) years can still store and deliver 80 % of their capacity even after up to 500 charging cycles. Roughly 75 % of the batteries still retain at least 60 % of their nominal capacity.

Under certain assumptions conclusions can be drawn from the distribution regarding the expected length of the use phase of a notebook battery. On the basis of distribution analysis, it could be determined whether and how often a notebook battery needs to be replaced during the use phase of a notebook to facilitate mobile use of the device. However, it is important to consider the non-representativeness of the data.

To simplify the use of data by a life cycle assessment practitioner, three scenarios for the use of notebooks are presented, representing low, medium and high mobile usage patterns in an administration related use scenario.

Abbildung 13: Statistical distribution of batteries at the age of 5 (± 1) years (data from coconutBattery)



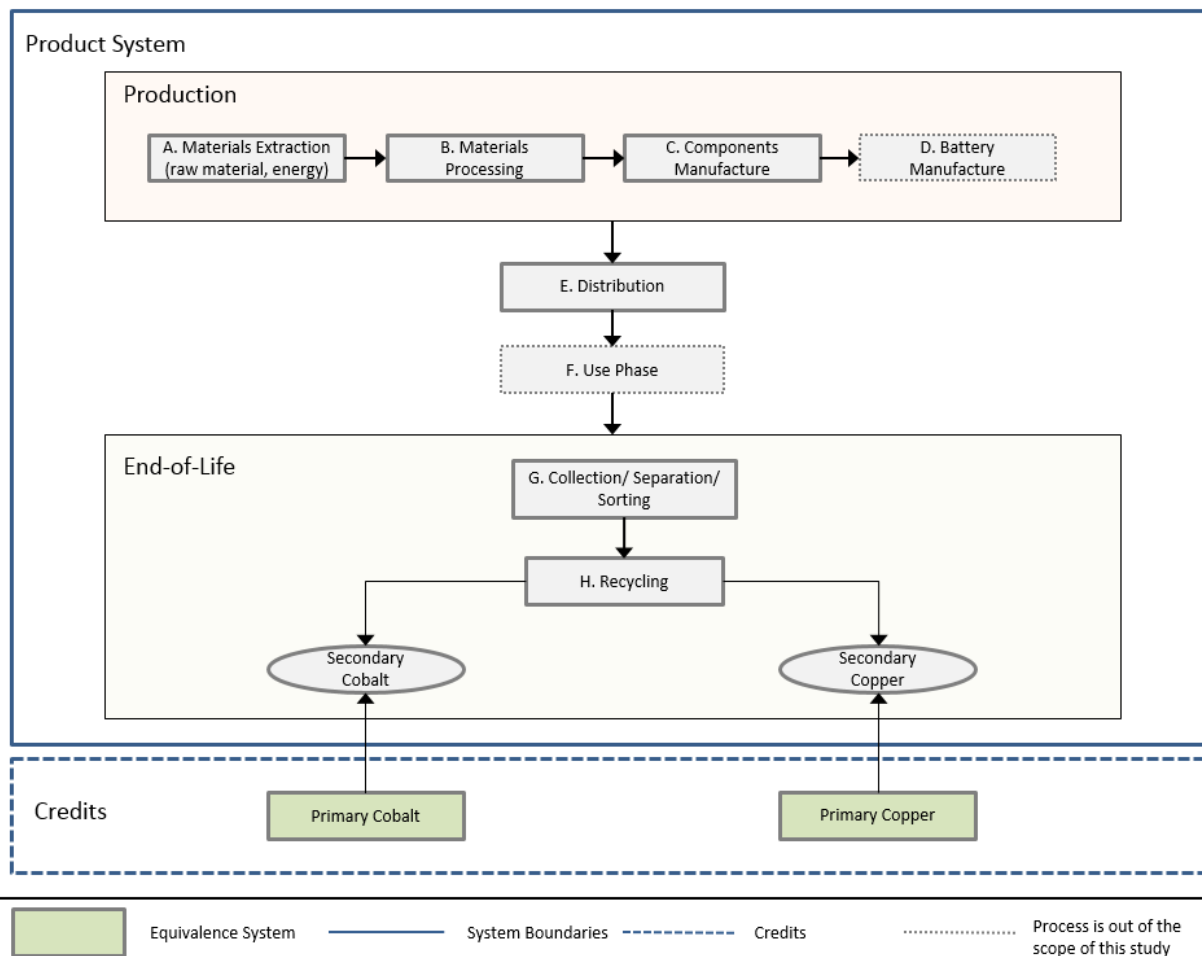
The field data from both AfB and coconutBattery contain data sets whose validity is questionable. Whether the relevant data stored in the battery is faulty or not correctly read by software could not be clarified in the project. These data were not included in the statistical analysis as far as possible.

A major problem in the collection of field data was the lack of a standard which facilitates the gather battery data in a defined format and via a defined interface. The specifications of the Smart Battery System (SBS) could be feasible to fill this gap. Any further standardization of the relevant software and hardware could significantly improve the availability of information for users.

Environmental impacts of a notebook battery

The subject of investigation is the lithium battery of a notebook. The product comprises the battery component cells, battery management system (BMS) and the housing of the battery. The environmental assessment takes into account the production (except for the assembly, as no data was available), distribution and end-of-life (EOL) of the notebook battery. The use of energy in the use phase as well as possible energy losses (e.g. by the battery's self-discharge) are not considered, as these factors are included when assessing the notebook as a product system. Further it is assumed that the battery is in fact collected for EOL treatment, thus a collection rate need not to be applied.

Abbildung 14: Schematic representation of the considered product system



The functional unit is defined as one piece of lithium battery used in a notebook. Primary data from one of the largest manufacturers has been used to model the production phase of a notebook battery. The data refers to the production of a battery with the following specifications:

Tabelle 2: Data for the battery modelling

Specification	Value
Mass	259,65 g
Type	Lithium-Polymer
Shape	Pouch
Capacity	7300 mAh
Nominal voltage	7,6 V
Energy	55 Wh
Number of Cells	4

Based on ISO 14040 a wide range of environmental indicators has been included in the analysis. The following impact categories according to CML 2001⁶ have been considered:

- ▶ Abiotic Depletion Factor (ADF)
- ▶ Global Warming Potential (GWP)
- ▶ Ozone Depletion Potential (ODP)
- ▶ Human Toxicity Potential (HTP)
- ▶ Acidification Potential (AP)
- ▶ Eutrophication Potential (EP)

As data availability for land use – especially relevant for metals – is currently insufficient, the impact category for land use has not been taken into account. The impact categories for water use and use of nature have also been omitted.

A detailed bill of materials (BOM) for the cells as well as information on the use of resources during the production phase has been made available to the project team. However, data on the use of materials and the mass of the battery management system components and housing are derived from the dismantling of a tablet battery comparable to the modeled notebook battery (pouch). The mass proportions of the components were scaled based on the mass ratio between the tablet and the notebook battery cells.

In a sensitivity analysis the influence of the cathode material was investigated. For this purpose, the mass fraction of the cathode material lithium cobalt oxide was substituted by the same mass of lithium-nickel-manganese-cobalt (NMC). The associated life cycle inventory data set for the production of NMC was taken from a publication of Majeau-Bettez (2011) which describes the production of batteries for electric vehicles.

Data for distribution were derived from a publication of Mudgal et al. (2011). The distribution in the base case only entails the transport from the factory in Nanjing to the port in Shanghai. It was assumed that the battery is installed in a notebook before shipment to Europe. The environmental impacts of further distribution need to be attributed to the notebook. In a sensitivity analysis assessing the effects of distribution, the transport of a spare battery was modeled from the factory in China all the way to the end user in Europe.

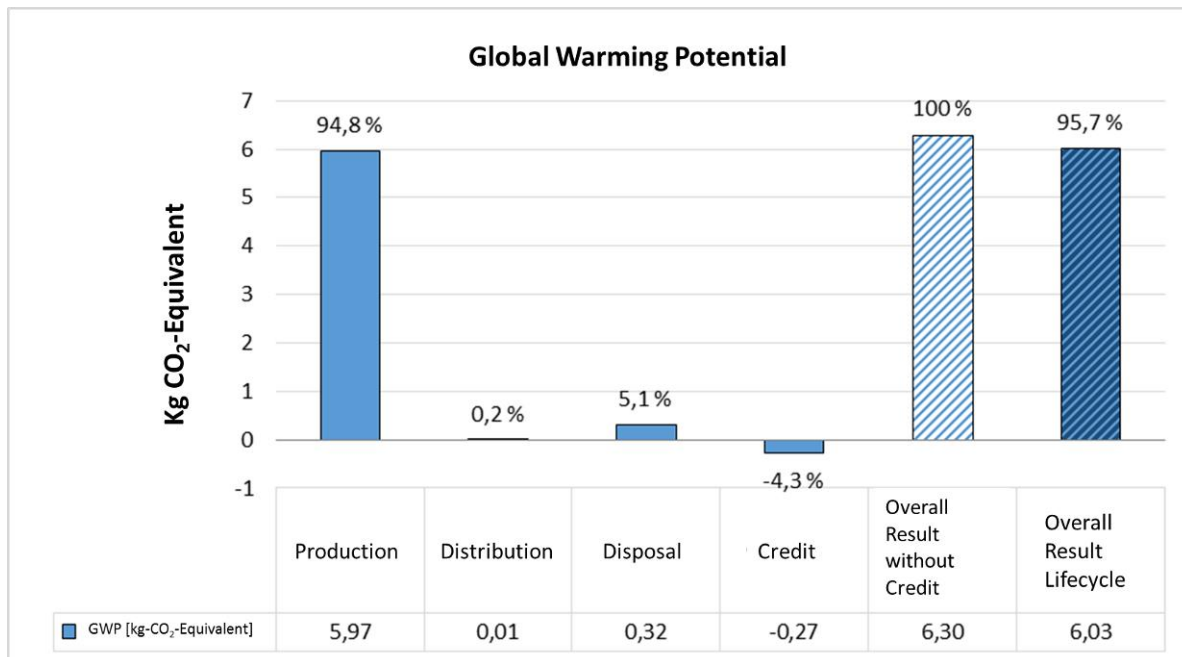
The energy consumption during the use phase is not attributed to the battery itself but needs to be allocated to the product system notebook. The use phase is therefore not included in the assessment of the environmental impacts.

Data on the process steps associated with the proper disposal of the battery up to the recovery of secondary metals (cobalt and copper) through recycling were also taken from the study by Fisher et al. (2006).

Subsequently, the production processes of all components were modeled using the commercial LCA software GaBi and data from the databases GaBi Professional and ecoinvent.

⁶ The CML method is a ecologically oriented information and decision instrument for the realization of life cycle assessments according to DIN EN ISO 14040. It was developed by Centrum voor Milieukunde (CML) at Leiden University.

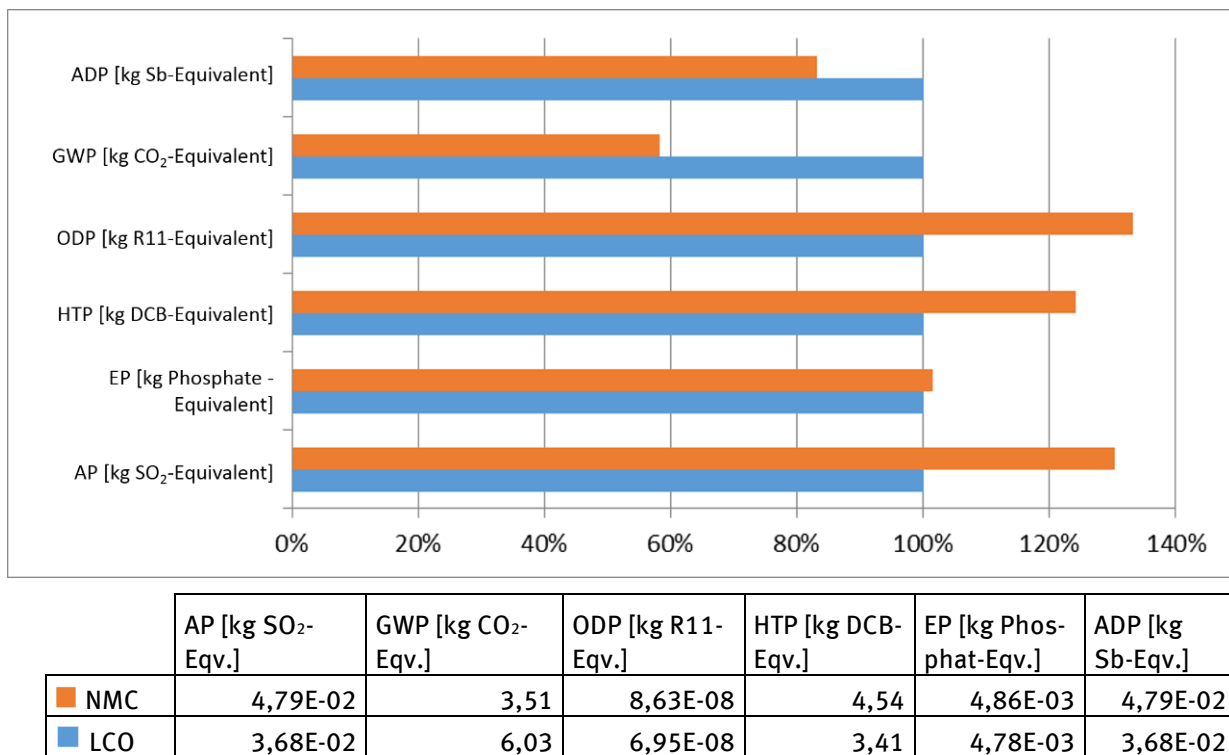
Abbildung 15: Global warming potential in the base case throughout the life cycle of the laptop battery



The production phase is dominant in all impact categories. The impact of distribution in the base case is negligible. The environmental impact caused by the disposal processes can for some impact categories be offset by the credit gained through recovered secondary metals. Nevertheless, recycling is important so that the precious metals contained in the battery are not lost. Cobalt for example is one of the 20 “critical raw materials” in the EU.

In a “hot spot analysis” it was found that the vast majority of environmental impacts within the manufacturing phase are associated with the supply of lithium cobalt oxide (LCO). LCO is responsible for 51 % of the global warming potential over the full life cycle. The sensitivity analysis showed that the NMC cathode material outperforms LCO in the impact categories abiotic resources depletion and global warming potential. However, the opposite is true in the other impact categories.

Abbildung 16: Environmental impacts of the batteries with NMC and LCO cathode in comparison, based on the entire life cycle of a notebook battery



Recommendations for manufacturers, consumers and policy makers

Based on the results of this project it is possible to address some of the aforementioned identified problems and derive recommendations that can be directed to interested parties. Firstly, to the manufacturers, who should implement a product design that allows for the maximization of service life time and secondly to the consumers whose handling of products has non-negligible influence on the life span. Furthermore, recommendations for legislative institutions can be derived to counteract the environmental impacts of products.

Implementing a standard comparable to the Smart Battery System (SBS) Specification should be one of the first steps manufacturers undertake, in order to make detailed information on the status of health of the batteries available to the users. As the SBS's last revision took place in 1998 some applicability checkup must be carried out before using the SBS as an outline for a new standard. Developing an EU standard for smart batteries could serve as a useful basis for further incorporation into product policy instruments. Additionally, the ongoing call for manufacturers to specify the minimum number charge cycles their products support, should be put into more concrete terms. In order to ensure transparency in the process of determining the number of charge cycles and regarding the comparability of the number of cycles a standardized procedure is recommendable. The specifications of the DIN EN 61960 may offer some minimum requirements.

Device manufacturers are encouraged to provide software-based options for battery maintenance and protection to the user. A maximum charge level set by the user may for example counteract the ageing of batteries during continuous use and connection to the power grid. This measure could prevent the constant and possibly sometimes unnecessary high voltage batteries are subjected to when permanently plugged into the power grid. Furthermore the design of the devices needs to be adapted to typical usage patterns. Air outlets at the bottom of a notebook are not effective and may easily cause

heat to build up inside, which potentially shortens the life of the device's components including the battery.

The users are advised to keep their battery powered devices from excessive heat or cold as far as possible. For storage, it is recommended to store the battery at a charge level of 40 to 60 %. This helps to avoid harmful deep discharge and continuous high voltage in the battery that can accelerate aging. Furthermore, the user is urgently advised to properly dispose of their batteries at the end of its useful life, ideally in a low state of charge.

1 Hintergrund und Begriffsbestimmungen

1.1 Begriffsbestimmung

Um die nachstehenden Ausführungen eindeutig zu verstehen, ist es notwendig, die wesentlichen Begriffe des Untersuchungsgegenstandes zu erläutern.

Der Begriff „Batterie“ wird im allgemeinen Sprachgebrauch sowohl für nicht wiederaufladbare Primärzellen als auch für wiederaufladbare Sekundärzellen, die Akkumulatoren, verwendet. Der vorliegende Bericht befasst sich mit Akkumulatoren (Akkus), die in der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) eingesetzt werden.

Es gibt eine Vielzahl von Akkutypen, die sich mehrheitlich in den verwendeten Materialien unterscheiden und danach bezeichnet werden. Bekannte Beispiele sind Nickel-Cadmium-Akkus (NiCd), Nickel-Metallhydrid-Akkus (NiMH) sowie Lithium-Ionen-Akkus (Li-Ion). Der vorliegende Bericht befasst sich mit Lithium-Ionen-Akkus. Aus Gründen der Lesbarkeit wird der Begriff Lithium-Akkus verwendet.

Lithium-Akku ist als Oberbegriff für verschiedene Lithium-Akkutypen zu verstehen. Je nach eingesetztem Elektrodenmaterial wird zwischen verschiedenen Systemen unterschieden, beispielsweise Lithium-Kobaltoxid-Akku (LCO), Lithium-Manganoxid-Akku (LMO) oder Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid-Akku (NMC). Ebenfalls begrifflich unterschieden werden Lithium-Polymer-Akkus (LiPo), die keinen flüssigen Elektrolyten, sondern einen auf Polymerbasis enthalten, der als feste bis gelartige Folie vorliegt und andersartige, insbesondere dünnere, Bauformen erlaubt.

Eine wichtige Kennzahl für Akkus ist die Kapazität. Die Kapazität wird i.d.R. in Milli-Ampere-Stunden (mAh), teilweise aber auch in Milli-Watt-Stunden (mWh), angegeben und gibt die Menge an elektrischer Ladung bzw. Energie an, die ein Akku speichern und abgeben kann. Im vorliegenden Bericht werden verschiedene Kapazitätsbegriffe unterschieden. Einige der Kapazitätsbegriffe und weiterer relevanter Begriffe sind im Englischen klarer definiert als im Deutschen, daher wird der englische Begriff im Folgenden mit angegeben.

- ▶ Die Nennkapazität (Nominal Capacity) ist die vom Hersteller angegebene Kapazität des Akkus bei Auslieferung, die der Akku bei bestimmungsgemäßem Einsatz erreichen soll.
- ▶ Bemessungskapazität ist die Menge an elektrischer Ladung, die eine Einzelzelle oder Batterie innerhalb von 5 h liefern kann, wenn sie nach den in Abschnitt 7.3.1 DIN 61960 festgelegten Bedingungen geladen, gelagert und entladen wird.
- ▶ Referenzkapazität: Wird im Forschungsvorhaben in der Lebensdaueruntersuchung unter Laborbedingungen (Abschnitt 3.1) verwendet. Die Referenzkapazität weicht von der Bemessungskapazität ab, indem ein einheitliches Ladeverfahren anstelle der Ladeverfahren der Hersteller angewendet wird. Die Referenzkapazität ist etwas geringer als die Bemessungskapazität, da die Ladeschlussspannung von 4,1 Volt festgelegt wurde um sicherzustellen, dass keine der Zellen überladen wird. Die Ladeschlussspannungen für die untersuchte Akkuklasse liegen jedoch, je nach Chemie, im Bereich 4,1 V - 4,35 V.
- ▶ Die Kapazität bei vollgeladenem Zustand (Full Charge Capacity) ist die gegenwärtig speicherbare Kapazität bei voller Ladung. Diese Zahl nimmt durch Zyklisierung (Nutzung) und zunehmendem kalendarischen Alter der Akkus ab. Relevant ist hierbei die Entladekapazität, also die Ladungsmenge, die ein Akku (bzw. eine Zelle) abgeben kann. Die im Vergleich höhere Ladekapazität beschreibt hingegen die Ladungsmenge, die in den Akku (eine Zelle) eingeladen wird. Die Differenz zwischen Lade- und Entladekapazität geht durch Wärmeabstrahlung verloren.

- ▶ Der Gesundheitszustand (State of Health, SOH) eines Akkus ist der Quotient aus der Kapazität und der Nennkapazität in Prozent. Ein SOH von 85 % bedeutet, dass der Akku noch 85 % seiner Nennkapazität speichern und abgeben kann.
- ▶ Der Ladezustand (State of Charge, SOC) zeigt an, wie voll der Akku geladen ist. Er wird berechnet als Quotient aus der Menge an eingeladenem Strom und der Kapazität bei vollgeladenen Zustand in Prozent.
- ▶ Ein Ladezyklus bezeichnet einen vollständigen Lade-/Entladevorgang, bei dem 100 % der Nennkapazität des Akkus aufgenommen und abgegeben werden. Dieser Vorgang kann aus mehreren Teilladungen (Teilzyklen) bestehen.
- ▶ Als kalendarische Alterung wird der Degradationsprozess im Akku verstanden, der auch ohne aktive Nutzung des Akkus eintritt. Ein Akku verliert demnach über die Zeit an Kapazität, auch wenn er nur gelagert wird (selbst vor dem Verkauf).
- ▶ Akkus verlieren mit der Nutzung an Kapazität. Der Grad dieser Alterung durch Zyklisierung wird über die Zyklenbeständigkeit angegeben. Eine hohe Zyklenbeständigkeit bedeutet, dass der Akku nur in geringem Maße an Kapazität über die Nutzung verliert.

1.2 Hintergrund

Mobile Geräte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), wie Notebook, Smartphone oder Tablet-PC, sind aus dem Leben der meisten Menschen nicht mehr wegzudenken. Ermöglicht wird das auch durch den Einsatz von leistungsfähigen Akkumulatoren (Akkus). Der große Vorteil von Akkus, auch Sekundärbatterien genannt, ist, dass sie, im Gegensatz zu Primärbatterien, nach ihrer Entladung erneut aufgeladen und wieder verwendet werden können.

In Notebooks und vielen anderen mobilen Geräten der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) hat der Akku oft eine kürzere Lebensdauer als das Gesamtprodukt. Dadurch beeinflusst er maßgeblich die Gesamtumweltbilanz. Bei einem mobilen Gerät, bei dem der Akku nicht ausgewechselt werden kann, kann der Akku auch die Lebensdauer des Gesamtproduktes begrenzen.

Lithiumbasierte Akkusysteme dominieren den Bereich der Laptops und Mobiltelefone. In Digitalkameras und Media-Playern werden außer Lithium-Akkumulatoren (Lithium-Akkus) auch noch Nickel-Metallhydrid (NiMH)-Akkus eingesetzt.

Für mobile Anwendungen in der IKT sind besonders Akkus mit einer hohen spezifischen Energie- und Leistungsdichte gefragt. Mit Energiedichte bezeichnet man die Energiemenge bezogen auf das Gewicht oder das Volumen des Akkus, also Wattstunden pro Gewichtseinheit (Wh/Kg) oder pro Volumeneinheit (Wh/l). Die Leistungsdichte hingegen beschreibt die Leistung der Batterie bezogen auf deren Volumen oder Masse, also hier Watt pro Gewichtseinheit (W/Kg) oder pro Volumeneinheit (W/l). Die verschiedenen Kathodenmaterialien bewirken unterschiedliche Energiedichten und Leistungsdichten. Für Akkus auf Basis von Li-Ionen reichen die Werte für die Energiedichte bis zu 190 Wh/kg (OECD & IEA 2009). Sowohl die Energie- als auch die Leistungsdichte sollten möglichst hoch sein, damit der Akku wenig Platz einnimmt und wenig wiegt. Lithium-Akkus sind daher besonders gut für mobile IKT-Geräte geeignet.

In einer ökobilanziellen Betrachtung muss berücksichtigt werden, dass Lithium-Akkus einer ständigen Weiterentwicklung unterliegen. Das ist vor allem mit dem Bestreben begründet, die Energiedichte sowie Zyklenbeständigkeit der Akkus weiter zu erhöhen, die Herstellungskosten zu reduzieren und sie somit für den mobilen Einsatz weiter zu optimieren. Der Begriff Zyklenbeständigkeit beschreibt die technische Lebensdauer von Akkus: Je größer die Zyklenbeständigkeit, desto geringer ist die Ausprägung der Abnutzungserscheinungen mit jedem

Lade- und Entladevorgang. Aufgrund des unzureichenden veröffentlichten Wissenstands wird eine Primärdatenerhebung auf dem Stand der Technik als dringend erforderlich angesehen.

Bislang gibt es keine öffentlich verfügbare Ökobilanz für typische Akkus (z.B. in Notebooks) in den Einsatzgebieten der IKT, die auf Primärdaten beruht, da die meisten Details zur Herstellung von Lithium-Akkus der Geheimhaltung unterliegen. Die vorhandenen Ökobilanzdaten in der Literatur sowie in öffentlich zugänglichen Datenbanken beruhen auf älteren Basisdaten aus anderen Anwendungsbereichen oder sind Abschätzungen aufgrund der stofflichen Zusammensetzung. Um jedoch die Forschungsfragen dieses Vorhabens beantworten und die Lebenszyklusdaten für Notebook-Akkus adäquat abbilden zu können, ist eine Primärdatenerhebung unter aktiver Beteiligung der Industrie eine unabdingbare Voraussetzung.

Die führenden Produzenten von Notebook-Akkus sind die japanischen Unternehmen Panasonic, Sony und die koreanischen Hersteller Samsung SDI und LG Chem. Tabelle 3 zeigt den prozentualen Marktanteil der Hersteller an den verkauften Lithium-Akkus im Jahr 2013. Über entsprechende Industriekontakte zu einigen der genannten Unternehmen konnten im Vorhaben Primärdatenerhebungen unter aktiver Beteiligung der Industrie durchgeführt werden.

Tabelle 3: Weltmarkt für Lithium-Akkus nach Tohani (2013)

Kategorie	Unternehmen	Herkunftsland	Weltmarktanteil Lithium-Akkus
Marktführer	Panasonic, Sony	Japan	50 – 60 %
	Samsung SDI, LG Chem	Korea, Republik	
Weitere Global Player	Hitachi, NEC Energy Devices	Japan	20 – 30 %
	Saft	Frankreich	
	BYD, China BAK	Volksrepublik China	
	Ultralife Batteries	USA	
Weitere bedeutende Hersteller	Varta Microbatteries, Hyper Batteries	Deutschland	10 – 20 %
	E-One Moli, Electrovaya	Kanada	
	Dow Kokam	USA	
	Cyber Power Electronic Corp	Republik China (Taiwan)	
	GP Batteries	Singapur	
	GS Yuasa	Japan	
	und andere		

Umweltwirkungen von Lithium-Akkus

Es gibt eine Vielzahl von Umweltwirkungen wie zum Beispiel Versauerung, Eutrophierung, Ressourcenverbrauch, Klimaerwärmung und Toxizität, deren Berücksichtigung für die Bewertung von Gesamtumweltauswirkungen unerlässlich ist. Am Beispiel des Rohstoffaufwands lässt sich die Bedeutung einer umfassenden lebenszyklusbezogenen Betrachtung besonders deutlich hervorheben: Zur Herstellung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren werden diverse Rohstoffe, wie Kobalt, Nickel, Mangan, Aluminium oder Lithium benötigt, deren Gewinnung und Verarbeitung mit erheblichem Materialaufwand, Flächen- und Energieverbrauch sowie großen Umweltauswirkungen verbunden sind. In diesem Zusammenhang wurde z.B. auf die Kritikalität von Kobalt bereits in diversen Studien

eingegangen (Europäische Kommission 2014; Angerer et al. 2009; IW Consult GmbH 2011). Neben der Aufforderung des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt 2012), sparsamer mit den natürlichen Ressourcen umzugehen und der Forderung nach einem verbesserten Recycling kann langfristig vor allem die Konkurrenznutzung in Zukunftstechnologien der Energiegewinnung oder Elektromobilität eine Herausforderung bezüglich der Rohstoffverfügbarkeit darstellen.

Aufgrund des kompakten Designs stellen viele IKT-Geräte, wie bspw. Notebooks, bei Recycling- und Entsorgungsvorgängen eine große Herausforderung dar. Nach dem gegenwärtigen Stand der Recyclingtechnik in Deutschland gehen die in den IKT-Geräten enthaltenen Rohstoffe zum größten Teil verloren (Buchert et al. 2012). Im Jahr 2010 konnten in der Europäischen Union 1289 t alte Lithium-Ionen-Batterien eingesammelt werden (GLOBAL 2000 and Foe Europe 2013). Da diese Menge lediglich 5 % der auf den Markt gebrachten Batterien entspricht, zeigt sich das enorme zukünftige Recyclingpotential. Grundsätzlich werden bei einer verbesserten Erfassung und bei optimalem Recycling für die Herstellung von Akkus weniger Primärrohstoffe benötigt. Die Gewinnung von Primärrohstoffen ist in der Regel mit wesentlich höheren Belastungen für die Umwelt und den Menschen verbunden als die Sekundärgewinnung derselben Materialien. Jedoch ist zu konstatieren, dass die bisherigen Recyclingverfahren für Batterien und Akkumulatoren nur sehr selektiv Metalle zurückgewinnen und zwar die wirtschaftlich tragfähigen – vor allem Kobalt. Eine bessere Erfassung kann somit nur einen begrenzten Beitrag zur Ressourcenschonung liefern. Unter diesen Randbedingungen ist insbesondere auf eine lange Lebensdauer der Akkus abzu zielen, um die eingesetzten Rohstoffe möglichst effizient zu nutzen. Zudem beeinflusst die Lebensdauer des Akkus die Lebensdauer des gesamten Gerätes: Wenn die Akku-Kapazität beispielsweise eines Notebooks mit nicht entnehmbarem Akku zu gering wird, ist das für den Nutzer oder die Nutzerin oft der Anlass für einen Neukauf, der andernfalls erst einige Zeit später fällig gewesen wäre.

2 Zielsetzung und Untersuchungsrahmen

2.1 Ziel und Aufgabe

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist, Potentiale zur Ressourceneinsparung im Aktionsfeld Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) auszuloten und aufzuzeigen, wie die IKT dazu beitragen kann, die Ressourceninanspruchnahme insgesamt zu senken.

Für das laufende UFOPLAN-Vorhaben „Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens“ (FKZ 371295301) sollen die Daten zu Lithium-Akkus in die Berechnung der Ökobilanz von Arbeitsplatzcomputern einfließen.

Das Forschungsvorhaben soll die Grundlage schaffen, um Aussagen über die Inanspruchnahme von natürlichen Ressourcen treffen und Optimierungspotentiale aufzeigen zu können. Es sollen Lebenszyklusdaten (von der Wiege bis zur Bahre) erhoben und die Umweltauswirkungen in Anlehnung an die ISO 14040/44 berechnet werden. Hierzu sollen mindestens die Treibhausgasemissionen, das Versauerungspotential und der Verbrauch an Rohstoffen untersucht werden. Darüber hinaus sollen folgende Fragen im Rahmen des Forschungsvorhabens beantwortet werden:

- ▶ Wie kann die Lebensdauer eines Akkus bestimmt werden?
- ▶ Welche geeignete funktionelle Einheit muss gewählt werden, um die Energieeffizienz, Zyklenbeständigkeit, Kapazität und Energiedichte zu berücksichtigen?
- ▶ Wieviel Energie und welche Ressourcen werden bei der Herstellung und Entsorgung von Lithium-Akkus benötigt?
- ▶ Wie kann eine längere Lebensdauer der Lithium-Akkus erzielt werden? Welche Hemmnisse liegen vor?
- ▶ Welche Anforderungen an den Hersteller wären sinnvoll, um mehr Transparenz zu schaffen?

Da ein Anschluss an das UFOPLAN-Vorhaben „Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens“ – FKZ 3712 95 301 beabsichtigt ist, wird die Betrachtung im hier vorliegenden Vorhaben schwerpunktmäßig auf Notebook-Akkus begrenzt.

Die Ergebnisse der Studie stehen der Öffentlichkeit im ProBas-Portal⁷ des Umweltbundesamtes zur Verfügung.

2.2 Marktrelevanz

Im Jahr 2013 betrug der Anteil der Lithium-Akkus im Consumer-Bereich⁸ gemessen am weltweit erwirtschafteten Umsatz der Lithium-Akkus in allen Einsatzbereichen (Elektromobilität, Erneuerbare Energien, Industrie) 60,3 % (Sapru et al. 2014).

Mit einer Wachstumsrate von 7,5 % im Kalenderjahr 2013 wurde durch Lithium-Akkus im Consumer-Bereich ein globaler Umsatz 10,625 Mrd. US\$ erwirtschaftet. Der Wachstumstrend soll

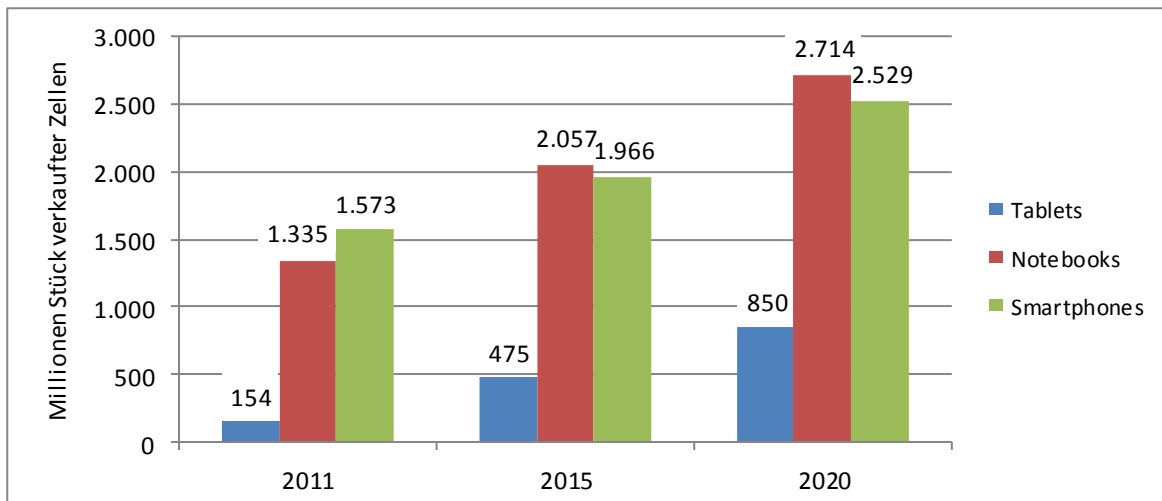
⁷ www.probas.umweltbundesamt.de

⁸ Zum Beispiel Laptops, Smartphones, Tablets, Audio-und Videogeräte und mobile Gaming-Geräte

sich laut Sapru et al. (2014) mit einer jährlichen Wachstumsrate von 8,1 % p.a. bis 2020 auf einen Umsatz von 18,286 Mrd. US\$ fortsetzen.

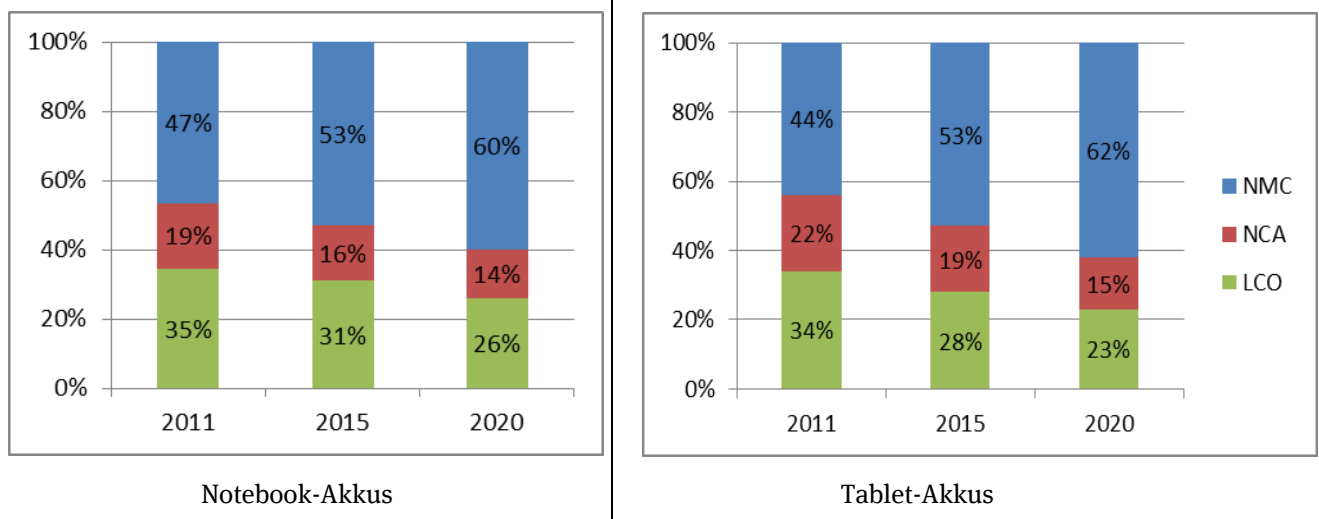
Insbesondere die zunehmende Nachfrage nach Smartphones und Tablets treibt die weltweiten Verkaufszahlen für Lithium-Ionen-Akkus in die Höhe (Sapru et al. 2014). Auch Marktstudien von Roland Berger (2012) sagen insgesamt eine steigende Nachfrage der in den Markt eingehenden mobilen Geräte mit Lithium-Akkus für Tablets, Notebooks und Mobiltelefone bis ins Jahr 2020 voraus (Abbildung 17).

Abbildung 17: Weltweite Verkaufszahlen und Prognosen zu Lithium-Akku-Zellen mobiler IKT nach Roland Berger (2012)



Für Akkus im Bereich IKT wird eine Reihe unterschiedlicher Kathodenmaterialien eingesetzt, die sich unter anderem in ihrer Energiedichte, der Zyklenbeständigkeit, ihren Sicherheitsaspekten und den Kosten unterscheiden. Lithium-Kobaltoxid (LCO)-Akkus, die lange den Markt dominierten, werden seit einigen Jahren zunehmend von Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC)-Akkus verdrängt. Prognosen von Roland Berger (2012) folgend ist bis zum Jahr 2020 mit einem steigenden Einsatz von NMC (62% aller eingesetzten Kathodenmaterialien) in Notebooks auszugehen (Abbildung 18). Akkus mit Nickel-Kobalt-Aluminium (NCA)-Kathode sind im Bereich mobiler IKT von untergeordneter Bedeutung, was insbesondere durch vergleichsweise höhere Kosten und geringere Sicherheit erklärt werden kann.

Abbildung 18: Marktentwicklung der eingesetzten Kathodenmaterialien bei Notebook-Akkus und Tablet-Akkus nach Roland Berger (2012)



2.3 Zusammenfassung des aktuellen Wissenstandes

Bislang gibt es keine öffentlich verfügbare, auf Primärdaten beruhende Ökobilanz für typische Akkus in den Einsatzgebieten der IKT (z.B. in Notebooks), da die meisten Details zur Herstellung von Lithium-Akkus der Geheimhaltung unterliegen. Die vorhandenen Ökobilanzdaten in der Literatur sowie in einschlägigen Datenbanken beruhen bislang auf älteren Daten oder Daten aus dem Anwendungsbereich der Elektromobilität.

Lauwigi et al. (2011) erarbeiteten eine Lebenszyklusanalyse / orientierende Ökobilanz eines typischen Notebook-Akkus mit einer Kapazität von 64 Wh. Die betrachteten Lebenszyklusphasen umfassen die Herstellung, die Nutzung und die Entsorgung. Als Nutzungszeit wurden drei Jahre mit jeweils 20 Ladezyklen pro Monat angenommen. Als Berechnungsgrundlage diente ein Lithium-Akku mit einer Lithium-Kobalt-Elektrode aus einer japanischen Ökobilanz (Ishihara et al. 2002). Als Sensitivität wurde zusätzlich mit einer LiMn_2O_4 -Elektrode gerechnet. Als Ergebnis zeigt sich eine Dominanz der Herstellung des Lithium-Akkus in den untersuchten Umweltwirkungen (Treibhauspotential, Versauerungspotential, Eutrophierungspotential, kumulierter Primärenergiebedarf). In zweiter Linie war die Entsorgung maßgeblich für die Umweltwirkungen. Aus der Sensitivitätsanalyse resultiert ein deutlich höheres GWP für die Produktion und Entsorgung des Lithium-Akkus mit Lithium-Kobalt-Elektrode (4,8 kg $\text{CO}_2\text{-eq/Akku}$) als für den Akku mit Vergleichselektrode (2,8 kg $\text{CO}_2\text{-eq/Akku}$). Wenn man jedoch die unterschiedlichen Energiedichten der beiden Akkutypen einbezieht, unterscheiden sich die GWP-Werte kaum noch. Aus ökobilanzieller Sicht konnte daher weder die eine noch die andere Elektrode bevorzugt werden.

Notter et al. (2010) veröffentlichten eine detaillierte Ökobilanz von Lithium-Manganoxid (LMO)-Akkus für den Einsatz in Elektrofahrzeugen. Mit einem cradle-to-grave-Ansatz wurden die Wirkungskategorien Eco-Indikator-99, Global Warming Potential (GWP), Kumulierter Energieaufwand (KEA) und abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) analysiert. Im Ergebnis zeigt sich, dass der Großteil des GWP der Gewinnung von Kupfer und Aluminium zur Herstellung der Kathode und Anode sowie der Herstellung diverser Kabel und dem Batteriemanagementsystem zuzurechnen ist. Die Rohstoffextraktion von Lithium trägt hingegen nur 2,3 % zur Gesamtumweltwirkung (nach Eco-Indikator-Punkten) bei.

Majeau-Bettez et al. (2011) untersuchten in einer vergleichenden Ökobilanz unter anderem Lithium-Eisenphosphat (LFP)- und Lithium-Nickel-Kobalt-Mangan-Akkumulatoren (NMC) für den Einsatz in

Elektro- und Plug-in-hybridelektrischen Fahrzeugen. In einem cradle-to-gate-Ansatz wurden – mit der funktionellen Einheit von 50 MJ zu speichernder und an den Antriebsstrang abzugebender Energie – insgesamt 13 Wirkungskategorien untersucht. Als Ergebnis zeigte sich, dass die LFP-Akkus in diesen Wirkungskategorien besser abschneiden als NMC-Akkus, was vor allem mit der längeren Nutzungszeit und dem Einsatz von weniger umweltbelastenden Materialien erklärt wird.

Eine auf den beschriebenen Studien (Sekundärdaten) aufbauende und vergleichende Ökobilanz für Lithium-Akkus (NMC, LFP, LMO), eingesetzt in Elektro- und Plug-in-hybridelektrischen Fahrzeugen, wurde 2013 von der US-amerikanischen Environmental Protection Agency (EPA) erarbeitet (Amarakoon et al. 2013). Es wurden Primärdaten von Akkuherstellern und –recyclern in einem cradle-to-grave-Ansatz bilanziert. Im direkten Vergleich der Aktivmaterialien der Kathoden zeigte sich, dass die chemischen Zusammensetzung einen signifikanten Einfluss auf die Umweltauswirkungen hat. Durch den Einsatz von Nickel und Kobalt verursachen NMC-Akkus deutlich höhere Werte in der Kategorie Toxizität als LFP- und LMO-Akkus. Im Herstellungsprozess zeichnen sich NMC-Akkus durch einen 40-50% höheren Energieverbrauch als LFP- und LMO-Akkus aus. Hingegen weisen LFP- und LMO-Akkus aufgrund des höheren Aluminiumbedarfs höheres Ozonabbaupotential auf als NMC-Akkus.

Innerhalb der Herstellungsphase haben nach Einschätzung der genannten Autorinnen und Autoren die folgenden Prozesse die größten Umweltwirkungen:

- ▶ direkter Strom- und Wärmeverbrauch bei der Zell- und Akkuherstellung,
- ▶ die Herstellung der Elektrolytflüssigkeit,
- ▶ die Gewinnung der eingesetzten Metalle (Kupfer, Nickel und Aluminium),
- ▶ die Herstellung der Steuerungselektronik.

2.4 Untersuchungsrahmen

2.4.1 Untersuchungsgegenstand

Der Untersuchungsgegenstand ist ein Lithium-Akku zum Betrieb in einem Notebook. Das Produktsystem Akku umfasst dabei die Komponenten Zellen, Batteriemanagementsystem (BMS) und das Gehäuse. Betrachtet werden die Herstellung der Komponenten (inkl. Rohstoffgewinnung) bis zum fertigen Akku sowie Entsorgung und Recycling.

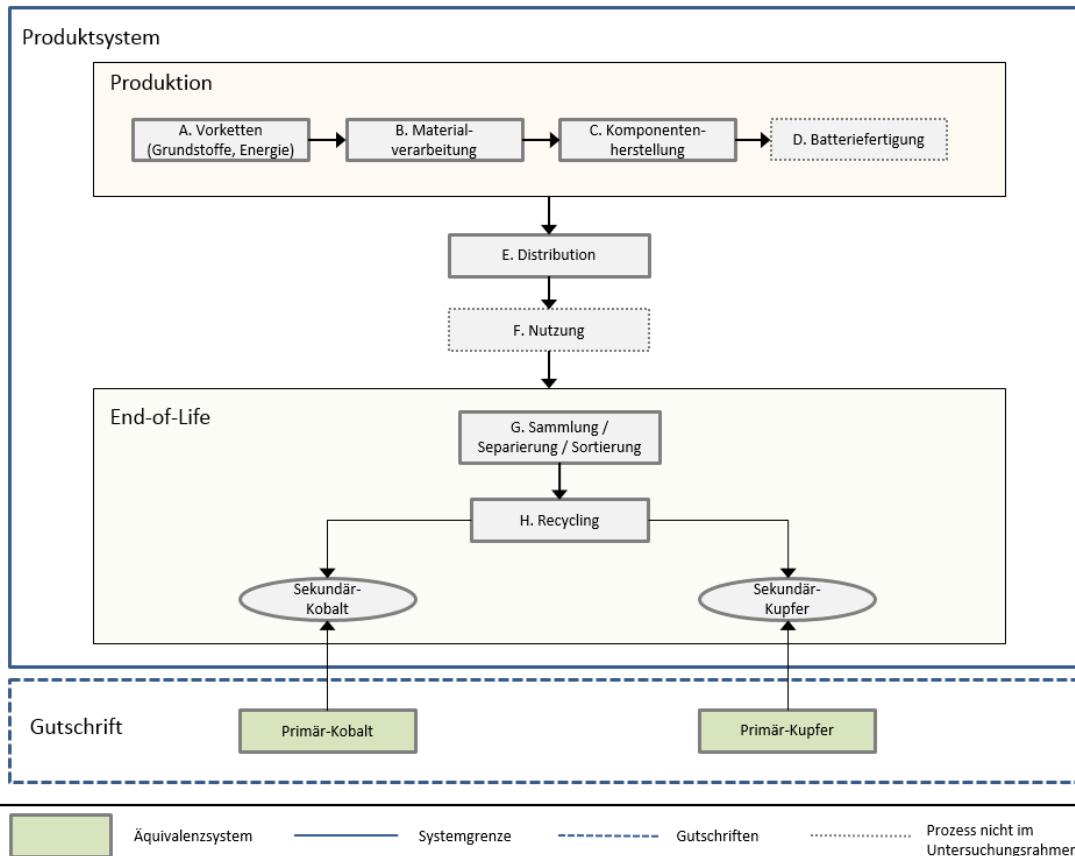
2.4.2 Festlegung der Systemgrenzen

Die Umweltbewertung erfolgt im Hinblick auf die Herstellung, Distribution und das End-of-Life des Notebook-Akkus. Die Nutzungsintensität des Akkus wird stark durch die Nutzung des Gerätes beeinflusst, also des Notebooks. Somit kann die Bilanzierung der Nutzungsphase eines Akkus nur im Gesamtsystem Notebook durchgeführt werden. Aus diesem Grund wird die Nutzungsphase hier nicht betrachtet.

Das gesamte zu untersuchende System ist in Abbildung 19 schematisch dargestellt. Die Produktion kann unterteilt werden in die Bereitstellung der benötigten Rohstoffe (A), der Materialverarbeitung (B), der Herstellung der Produktkomponenten (C) bis zur Fertigung des Akkus (D). Für die Fertigung (Montage) lagen im Vorhaben keine Daten vor. Der Produktion folgt die Distribution des Akkus. Im End-of-Life (EOL) wird die Sammlung ab der Sammelstelle betrachtet, nicht jedoch der eventuelle Transportweg vom Ort der Nutzung bis zur Sammelstelle. Dabei wird angenommen, dass der betrachtete Akku dem Sammelsystem in EOL zugeführt wird, eine Sammelquote wird nicht einbezogen. Danach folgen ggf. die Separierung vom Endgerät und das anschließende Recycling zur Wiedergewinnung einzelner Wertstoffe.

Ebenfalls in Abbildung 19 ist die Wiedergewinnung von Kobalt und Kupfer dargestellt. Es wird angenommen, dass diese Sekundärmetalle die Produktion der entsprechenden Primärmetalle in der gleichen Menge vermeiden. In der Konsequenz werden dementsprechend Aufwendungen und damit Umweltlasten der Primärmaterialproduktion vermieden. Diese vermiedenen Umweltlasten werden in einem Äquivalenzsystem modelliert und dem betrachteten System als Gutschrift angerechnet.

Abbildung 19: Schematische Darstellung des betrachteten Produktsystems und Festlegung der Systemgrenze



2.4.3 Funktion und funktionelle Einheit

Die Funktionelle Einheit ist festgelegt als ein Stück Lithium-Akku zum Betrieb in einem Notebook mit den Spezifikationen aus Tabelle 4.

Tabelle 4: Spezifikationen des betrachteten Notebook Lithium-Akkus

Spezifikation	Wert
Gewicht	259,65 g
Typ	Lithium-Polymer
Bauform	Pouch
Kapazität	7300 mAh
Nennspannung	7,6 V
Energie	55 Wh
Anzahl Zellen	4

2.4.4 Berücksichtigte Wirkungskategorien

In Anlehnung an ISO 14040 wird ein breites Spektrum an Umweltindikatoren in die Analyse einbezogen. Betrachtet werden folgende Wirkungskategorien nach CML 2001 (Guinée et al. 2001):

- ▶ Erschöpfung abiotischer Ressourcen (Abiotic Depletion Factor, ADF)
- ▶ Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP)
- ▶ Ozonabbaupotential (Ozon Depletion Potential, ODP)
- ▶ Humantoxizitätspotential (Human Toxicity Potential, HTP)
- ▶ Versauerungspotential (Acidification Potential, AP)
- ▶ Eutrophierungspotential (Eutrophication Potential, EP)

Derzeit ist die Datenverfügbarkeit über die Inanspruchnahme von Fläche insbesondere bei Metallen unzureichend. Aus diesem Grund wurde die Flächeninanspruchnahme von Lithium-Akku nicht bewertet. Aus selbigem Grund wurden weitere Wirkungskategorien, wie Wasserstress und Naturraumbeanspruchung, nicht einbezogen.

3 Bestimmung der Lebensdauer eines Akkus

Die technische Lebensdauer von Akkus wird von Herstellern über die Anzahl an Ladezyklen angegeben, die ein Akku durchlaufen kann, bis seine speicherbare Kapazität auf einen bestimmten Wert absinkt. Als Ladezyklus wird der Vorgang beschrieben, bei dem der entladene Akku wieder mit Energie befüllt wird. Ein Ladezyklus ist definiert als die Aufnahme von Energie entsprechend der Nennkapazität des Akkus, aber nicht unbedingt in einem zusammenhängenden Vorgang. In der Praxis kann ein Ladezyklus demnach aus mehreren Teilzyklen bestehen, die in Summe der abgegebenen Energie der Nennkapazität des Akkus entsprechen. Ein Ladezyklus (Vollzyklus) ist abgeschlossen, wenn der Akku 100 % seiner Nennkapazität abgegeben (Entladevorgang) und wieder aufgenommen (Ladevorgang) hat. Die Verwendung des Begriffes Ladezyklus in diesem Bericht entspricht damit der Definition eines Ladezyklus durch das Smart Battery System (SBS) Forum (SBS Specifications 1998), einem Zusammenschluss verschiedener Hersteller mit dem Ziel offener Standards für Smart Battery Systeme. Etwaige abweichende Definitionen durch Gerätehersteller werden vernachlässigt.

Lithium-Akkus verlieren mit jedem Lade-/Entladevorgang einen Teil ihrer speicherbaren Kapazität. Der Grad des Kapazitätsverlustes mit der aktiven Nutzung wird durch die individuelle Zyklenbeständigkeit des Akkus reflektiert. Ein Akku mit einer hohen Zyklenbeständigkeit verliert demnach mit jedem durchlaufenen Ladezyklus weniger Kapazität als ein Akku mit einer geringeren Zyklenbeständigkeit. Die Zyklenbeständigkeit eines Akkus kann von vielen Einflussfaktoren bestimmt werden, bspw. der eingesetzten Aktivmasse, der Verarbeitungsqualität bei der Produktion und der Umgebungstemperatur, bei der der Akku betrieben oder gelagert wird.

Auch ohne aktive Nutzung verlieren Lithium-Akkus an speicherbarer Kapazität. Dieser Kapazitätsverlust wird als kalendarische Alterung bezeichnet. Das bedeutet, dass ein Akku ab dem Zeitpunkt der Produktion, also selbst vor der Erstbenutzung, über die Zeit an Kapazität verliert. Bei günstiger Umgebungstemperatur sind diese Verluste jedoch im Bereich von wenigen Prozentpunkten pro Jahr und damit ein untergeordneter Faktor bei der Lebensdauerbetrachtung von Akkus (Jossen & Weydanz 2006).

Das Ende der Lebensdauer eines Akkus ist erreicht, wenn der Akku nicht mehr verwendet wird. Eine der Ursachen dafür ist, dass der Akku über die Nutzungsphase so viel seiner ursprünglichen Kapazität verloren hat, dass der Nutzen des Akkus nicht mehr gegeben ist. Beispiele sind ein Handy, dessen Akku nicht mehr ausreichend Kapazität für die tägliche Nutzung bereitstellen kann oder ein Notebook-Akku, der im Akkubetrieb nicht mehr lange genug Energie bereitstellt, ohne ans Stromnetz angeschlossen zu werden. Die Akku- und Gerätehersteller legen als das Lebensende eines Akkus bei 80 % der Nennkapazität fest, also den Zeitpunkt, an dem der Akku nur noch 80 % der für den Zeitpunkt der Inbetriebnahme zugesagten Kapazität hat (vgl. Norm DIN EN 60254-1). Die Norm DIN EN 61960, die Vorgaben für Testverfahren für Akkus macht, legt das Ende der Lebensdauer von Akkus bei 60 % der Bemessungskapazität fest. Das tatsächliche Lebensende von Akkus in der realen Nutzung hängt maßgeblich von den individuellen Anforderungen des Nutzens ab und kann daher nur bedingt pauschal festgelegt werden.

3.1 Lebensdauer unter standardisierten Laborbedingungen

Zur Untersuchung der Lebensdauer von Lithium-Ionen Akkus aus der Klasse der Tablet-PCs wurden Zyklisierungsversuche an einer beispielhaften Auswahl handelsüblicher OEM⁹-Akkus durchgeführt.

⁹ Unter dem englischen Begriff Original Equipment Manufacturer (OEM) bezeichnet man Hersteller von Geräten oder Zubehörteilen, die vollständig in die Geräte anderer Hersteller integriert werden

Obwohl der Fokus der Studie auf Notebook-Akkus liegt, standen diese für die Laboruntersuchungen im Projekt nicht zur Verfügung. Vom Aufbau und der Materialzusammensetzung her sind Tablet-Akkuzellen und aktuelle Notebook-Akkuzellen (z.B. Pouchzellen in aktuellen Ultrabooks) durchaus vergleichbar. Demnach lassen sich die Ergebnisse der Untersuchungen im Labor prinzipiell auch auf aktuelle Notebook-Akkuzellen übertragen. Im Gerät sind zwischen Tablets und Notebooks hingegen unterschiedliche Belastungsprofile zu erwarten, da Notebooks oftmals vergleichsweise performantere Komponenten enthalten und leistungsfähigeren Anwendungen genügen müssen.

Die Einbau-Akkumulatoren wurden den Tablets entnommen und an einem Batteriemessgerät getestet. Ziel der vergleichenden elektrischen Tests von Akkumulatoren verschiedener Hersteller und Gerätemarken war es, die Akkulebensdauer abzuschätzen und Erkenntnisse über die Lebensdauerstreuung verschiedener Akkumulatoren der betrachteten Geräteklasse zu erhalten.

3.1.1 Beschreibung der Akkus

Es wurden 17 Akkumulatoren verschiedener Hersteller getestet (Tabelle 5). Untersucht wurden ausschließlich prismatische Lithium-Ionen-Polymerzellen (Pouchzellen). Sieben der getesteten Akkupacks bestehen aus je zwei Einzelzellen, von denen nur jeweils eine Zelle getestet wurde.

Tabelle 5: Getestete Akkumulatoren

Produktbezeichnung	Akkukapazität	Akkuenergie
Acer Iconia A510	9800 mAh	36 Wh
Apple iPad mini	4440 mAh	16,5 Wh
Asus Google Nexus 7	4270 mAh	16 Wh
Asus MeMo Pad Smart ME301T	5070 mAh	18,4 Wh
Asus Transformer TF300TG	5880 mAh	22 Wh
Blaupunkt Discovery	7600 mAh	28 Wh
Huawei Media Pad 7	4100 mAh	15 Wh
Intenso TAB714	2400 mAh	8,88 Wh
Kindle Fire HD	4440 mAh	16,4 Wh
Lenovo IdeaTab A2107A	3700 mAh	13,7 Wh
Odys Neo X7	3000 mAh	11,1 Wh
Odys Noon	7800 mAh	28,8 Wh
Samsung Galaxy Note 10.1	7000 mAh	25,9 Wh
Samsung Galaxy Tab 2	4000 mAh	14,8 Wh
Samsung Google Nexus 10 GT-P8110	9000 mAh	33,8 Wh
Sony Xperia Tablet S SGPT121DE/S	6000 mAh	22,2 Wh
Toshiba AT270	3940 mAh	14,6 Wh

3.1.2 Eingangsprüfung

Nach dem Ausbau der Akkus aus den Geräten wurden die Akkus entweder direkt an den Zellen oder hinter der ins Akkupack integrierten Schutzelektronik kontaktiert. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die Messungen, da die Sicherheitselektronik ausschließlich bei Pulsen oder Über- bzw. Unterschreiten der Spannungslimits eine Rolle spielt. Für alle Zellen wurden in Eingangstests Leerlaufspannung und Impedanz (1 kHz) gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Eingangsprüfung

Produktbezeichnung	Kontaktierung: (d) direkt; (s) Schutzelektronik	Leerlauf- spannung	1 kHz Impedanz
Acer Iconia A510	d	3,78 V	27,44 mOhm
Apple iPad mini	d	3,77 V	27,90 mOhm
Asus Google Nexus 7	d	3,72 V	33,45 mOhm
Asus MeMo Pad Smart ME301T	d	2,16 V	33,50 mOhm
Asus Transformer TF300TG	d	3,72 V	27,44 mOhm
Blaupunkt Discovery	s	3,80 V	91,30 mOhm
Huawei Media Pad 7	d	3,80 V	19,56 mOhm
Intenso TAB714	d	3,61 V	38,00 mOhm
Kindle Fire HD	s	3,78 V	100,10 mOhm
Lenovo IdeaTab A2107A	s	3,72 V	77,60 mOhm
Odys Neo X7	s	3,74 V	108,00 mOhm
Odys Noon	d	3,55 V	19,70 mOhm
Samsung Galaxy Note 10.1	d	3,80 V	42,70 mOhm
Samsung Galaxy Tab 2	d	4,09 V	26,70 mOhm
Samsung Google Nexus 10 GT-P8110	d	3,49 V	30,10 mOhm
Sony Xperia Tablet S SGPT121DE/S	d	3,67 V	41,36 mOhm
Toshiba AT270	d	4,03 V	41,50 mOhm

3.1.3 Beschreibung des Zyklisierungsverfahrens

Die Zyklisierung der Akkus erfolgte in Anlehnung an die Norm DIN EN 61960. Die Versuche wurden bei Raumtemperatur ($T=20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) als Vollzyklen durchgeführt. Da es sich bei den untersuchten Akkuzellen um verschiedene Fabrikate unterschiedlicher Hersteller handelt, sind sowohl die im Gerät angewandten Ladeverfahren als auch die Lastprofile nicht identisch mit den Laborbedingungen. Für die hier durchgeführte vergleichende Studie wurden, abweichend von der o.g. Norm, alle Akkuzellen mit einem einheitlichen Ladeverfahren geladen. Um sicherzustellen, dass keine der Zellen überladen wird, wurde die Ladeschlussspannung auf nur 4,1 V festgelegt, was etwas unterhalb der Ladeschlussspannung der meisten Li-Ionen-Akkus liegt – die Ladeschlussspannungen für die untersuchte Akkuklasse liegen, je nach Chemie, im Bereich 4,1 V - 4,35 V. Auf diese Weise konnte einerseits die Überladung von Akkuzellen sicher ausgeschlossen werden, andererseits kann von einer mindestens 90%igen Ladung ausgegangen werden. Die Entladung erfolgte galvanostatisch mit einer Entladeschlussspannung von 2,8 V. Sowohl Lade- als auch Entladestrom wurden auf die Nennkapazität bezogen (C-Rate¹⁰). Der verwendete Prüfplan ist in Tabelle 7 dargestellt.

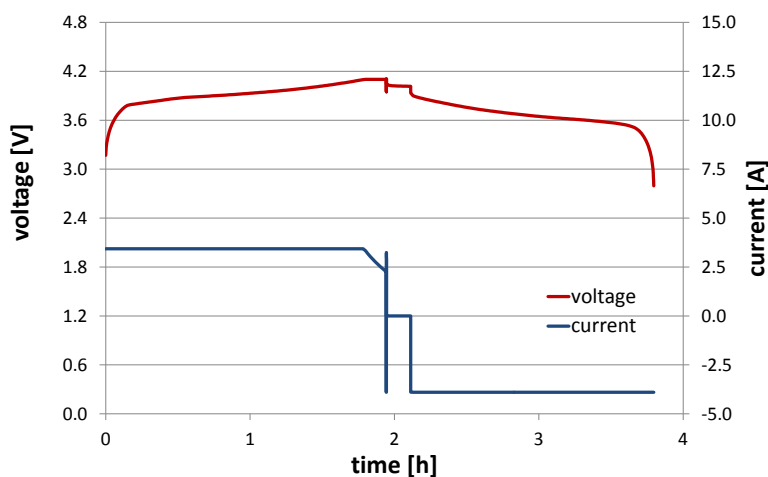
¹⁰ Als C-Rate bezeichnet man den auf die Kapazität bezogenen Lade- oder Entladestrom eines Akkumulators. Beispiel: Wird ein Akku mit einer Kapazität von 2 Ah mit einem Strom von 2 A ge- oder entladen, entspricht dies einer C-Rate von 1.

Tabelle 7: Prüfplan Zyklentests (Ablauf eines einzelnen Zyklus)

Schritt	Beschreibung
1.	Bestimmung Leerlaufspannung (OCV)
2.	Bestimmung 1kHz Impedanz
3.	Entladung (CC) C/2 auf 2,8 V/Zelle
4.	Ladung (CC/CV) 0,44 C bis 4,1 V/Zelle, Icutoff 0,29 C oder 3 h
5.	Entladung (CC) C/5 auf 2,8 V/Zelle (=Nennkapazität bestimmen)
6.	Zyklen-Start a. Ladung wie (4) b. Bestimmung DC-Widerstand c. Entladung (CC) C/2 auf 2,8 V/Zelle
7.	Zyklen-Ende: Abbruch, wenn Kapazität (6c) < 80 % der Referenzkapazität (5) oder mehr als 1000 Zyklen

Der Prüfplan wurde so angelegt, dass eine gute Vergleichbarkeit der Zyklenbeständigkeit gegeben ist – alle Akkus wurden mit dem gleichen Verfahren geladen, lediglich die Ströme wurden auf die Nennkapazität normiert. Damit konnte der Einfluss des Laderegimes (Pulsladung, galvanostatische Ladung, usw.) ausgeschlossen werden. Über die Zyklen kann so neben der Ladekapazitätsdrift (Änderung der einladbaren Kapazität über die Zyklen) und Kapazitätsdrift (Änderung der Kapazität über die Zyklen) auch die Änderung des Innenwiderstands ausgewertet werden. Die Strom- und Spannungskurven eines Lade- und Entladezyklus sind exemplarisch an Zelle DUT_17 in Abbildung 20 dargestellt.

Abbildung 20: Lade / Entladekurve, Beispiel DUT_17, Zyklus 10



Der Prüfplan wurde so ausgelegt, dass die Akkus zunächst bei Raumtemperatur ($20 \pm 5^\circ\text{C}$) mit mindestens 1000 Vollzyklen zyklisiert werden sollten. Als Abbruchkriterium wurde in der ersten Versuchsreihe die Unterschreitung von 80 % der Referenzkapazität gewählt. In einer zweiten Versuchsreihe wurden die noch funktionsfähigen Akkus anschließend bei konstanter Raumtemperatur ($22^\circ\text{C} \pm 0,5\text{K}$) weiter zyklisiert.

3.1.4 Verwendete Geräte

Folgende Geräte wurden für die Messungen verwendet:

- Batteriemessgerät: Basytec CTS Lab

- ▶ Impedanzmessung: Hioki 3560
- ▶ Klimakammer: Vötsch VT4018 (in zweiter Versuchsreihe, s.u.)

3.1.5 Ergebnisse

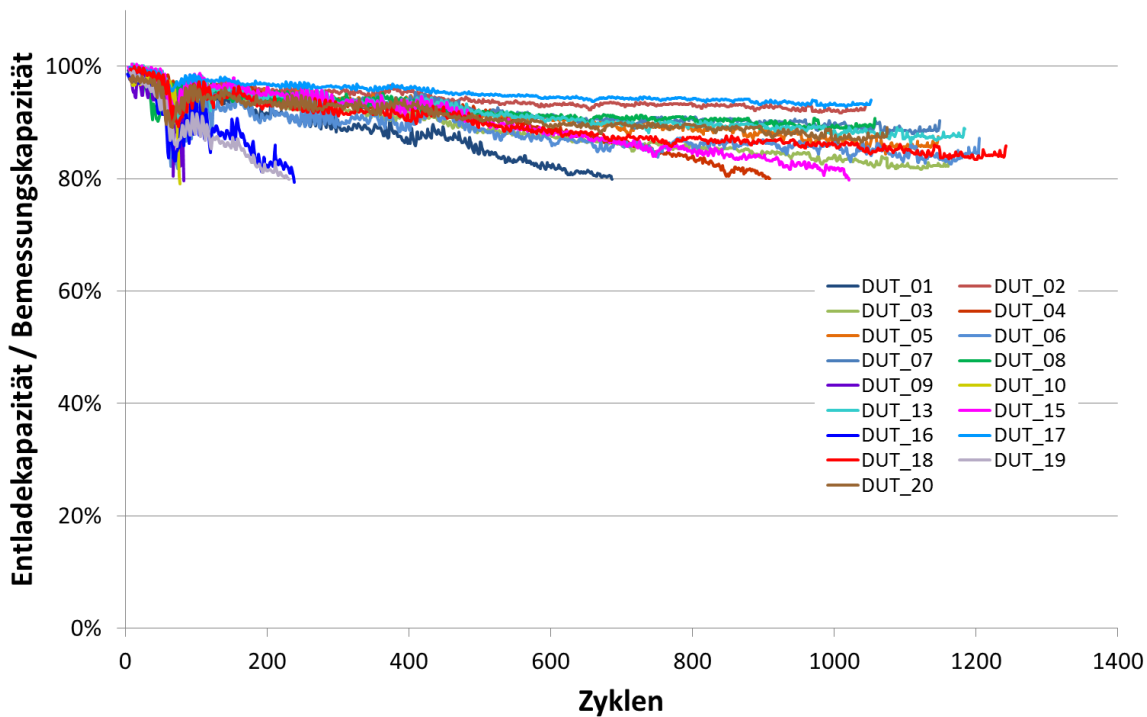
In Anlehnung an die Norm DIN EN 61960 wurde eine Referenzkapazität bestimmt. In Abweichung von dieser Norm wurde für alle Akkutypen dasselbe Ladeverfahren, wie in Abschnitt 3.1.3 beschrieben, verwendet. Wegen der auf 4,1 V begrenzten Ladeschlussspannung wurde nicht für jeden Akkutyp das volle Potentialfenster zur Ladung ausgeschöpft. Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass alle Zellen mit dem gleichen Ladeverfahren geladen werden konnten, ohne sie durch Überladung zu schädigen. Die im Anschluss an die Ladung gemessene Referenzkapazität ist daher jedoch etwas geringer als die Bemessungskapazität¹¹.

Die Produktbezeichnungen wurden in der Ergebnisauswertung anonymisiert, da es nicht Ziel der Studie ist, verschiedene Hersteller und Produkte untereinander zu vergleichen. Die Produktbezeichnungen sind im Folgenden daher anonymisiert durch die Bezeichnung Device Under Test (DUT) ersetzt und in zufälliger Reihenfolge nummeriert, um keine Rückschlüsse zu den Gerätemodellen zuzulassen.

In Abbildung 21 sind die auf die jeweilige Referenzkapazität bezogenen Kapazitäten bei voller Ladung der ersten Messreihe dargestellt. Die Kapazität fiel tendenziell über die Zyklen ab, wobei für die einzelnen Akkumulatoren sehr unterschiedliche Kapazitätsverluste gemessen wurden. Der Kapazitätsverlust lag in der ersten Messreihe zwischen 0,006 %/Zyklus (DUT_17) und 0,26 %/Zyklus (DUT_10). Der Kapazitätsverlust lässt sich mit dem Degradationsmechanismus innerhalb der Zelle erklären. Üblicherweise kommt es an der negativen Elektrode, die meist aus Graphit besteht, zum Aufwachsen einer Deckschicht, was mit dem Verlust von mobilem Lithium einhergeht und damit zu einem Kapazitätsverlust führt. Zur Aufklärung der konkret vorliegenden Degradationsmechanismen wären weitere Versuche und Post-Mortem-Analysen erforderlich, die im Rahmen dieses Projektes aus Kostengründen nicht durchgeführt werden konnten. Temperaturschwankungen, die sich im zulässigen Bereich von $20^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ K}$ bewegten, wirkten sich durch Schwankungen der Kapazität bei voller Ladung aus. Maßgeblichen Einfluss auf die Ausprägung der temperaturabhängigen Schwankungen haben der eingesetzte Elektrolyt und der Zellaufbau, insbesondere die Dicke der Elektrodenschicht (vgl. einschlägige Literatur).

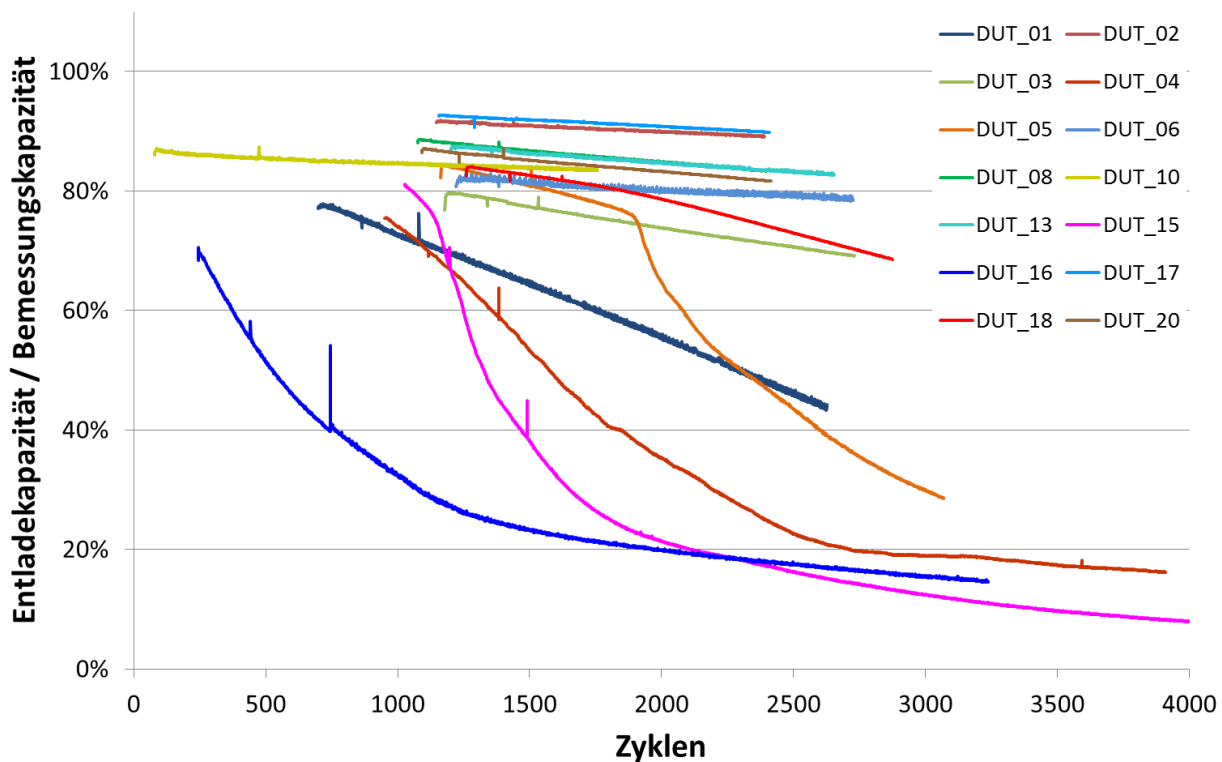
¹¹ Hätte man im Schritt 5 normgerecht eine Bemessungskapazität bestimmen wollen, hätten vorher alle Akkus mit dem vom jeweiligen Hersteller angegebenen Verfahren geladen werden müssen. Damit hätte man jedoch im Zuge der Testung auch die Ladeverfahren selbst verglichen. Daher wurden hier einheitliche Ladeverfahren verwendet - es handelt sich im Schritt 5 also (wie oben beschrieben) nicht um eine Bemessungskapazität, sondern quasi um eine Referenzkapazität.

Abbildung 21: Verlauf der Kapazität mit zunehmender Anzahl Ladezyklen (erste Messreihe)



Weitere Zykientests wurden mit den Akkus gestartet, die nach 1.000 Zyklen entweder noch über der 80 %-Grenze lagen oder durch temperaturbedingte Schwankungen (im Toleranzbereich $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) bereits nach ca. 80 Ladezyklen die 80 %-Grenze erreicht hatten, sich aber wieder erholten (DUT_10, Abbildung 21). Nicht weiter zyklisiert wurden die Akkus, die während der ersten Zyklisierung die 80 %-Grenze unterschritten und sich nicht wieder erholt hatten (DUT_07, DUT_09 und DUT_19). Um temperaturbedingte Kapazitätsschwankungen auszuschließen, wurden die Akkuzellen nun auf $22^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ temperiert. Die Ergebnisse der zweiten Messreihe sind in Abbildung 22 dargestellt.

Abbildung 22: Verlauf der Kapazität mit zunehmender Anzahl Ladezyklen in einer zweiten Messreihe

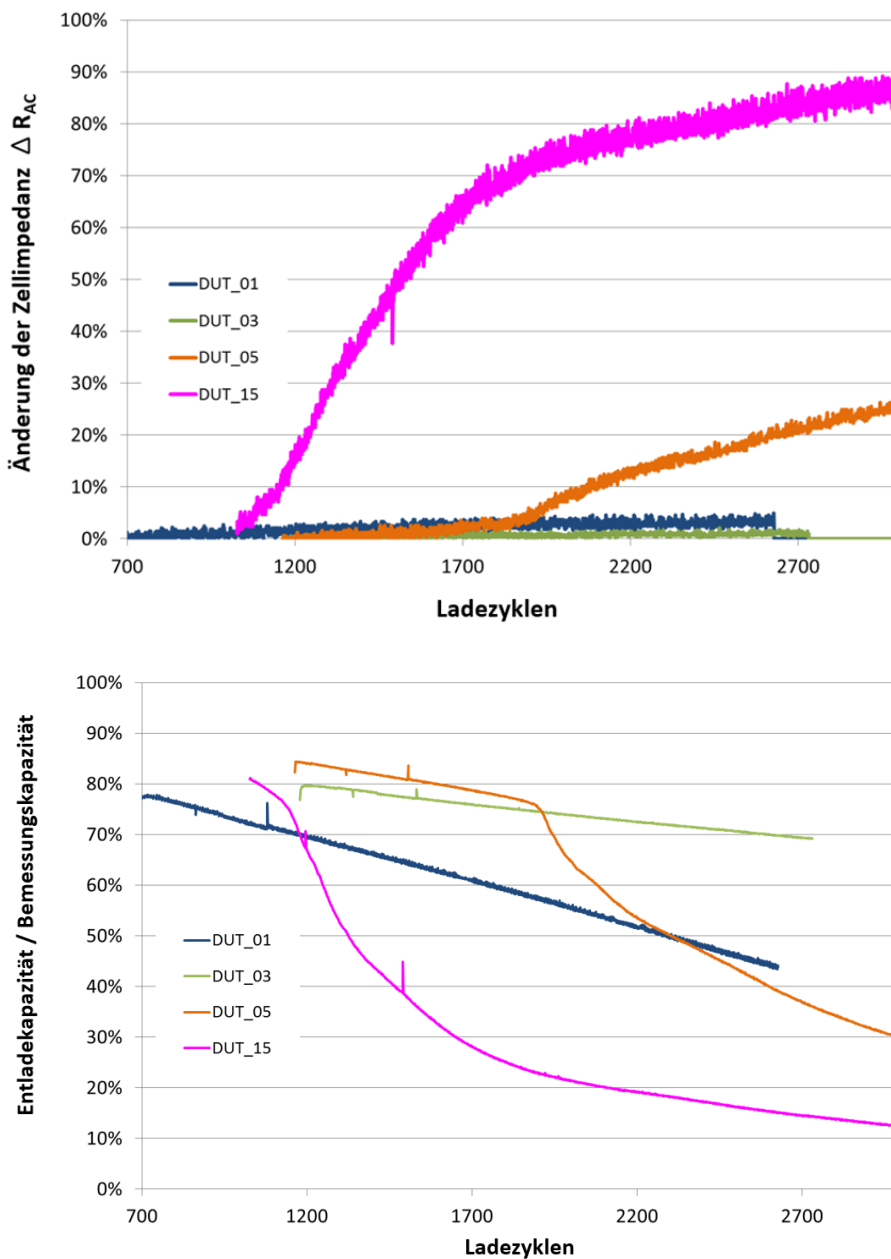


Während der Weiterführung der Zyklisierungsversuche konnte bei einigen Akkumulatoren nach der Abnahme der Kapazität ein rapider Kapazitätseinbruch beobachtet werden (DUT_16, DUT_15, DUT_04 und DUT_05). Vermutlich handelt es sich hierbei um Delaminationseffekte innerhalb der Elektrode, die durch den mechanischen Stress während der Zyklisierung verursacht wurden (die negativen Elektroden von Akkumulatoren dieses Typs (Graphit-Anode) erfahren während der Zyklisierung eine deutliche Volumenänderung). Auf weitere Alterungsmechanismen wird in Abschnitt 3.1.6 näher eingegangen. Bei den zu erkennenden Peaks im Diagramm handelt es sich um messaufbaubedingte Artefakte (kurzzeitige Suspendierung und Neustart einiger Messkanäle).

Mit der Zelldegradation einhergehend steigt üblicherweise der Innenwiderstand (Impedanz) der Akkumulatoren. Der Widerstand wurde jeweils im vollgeladenen Zustand durch Auswertung der Spannungsänderung nach Einprägen eines Messstromimpulses berechnet. Die Änderung des Innenwiderstandes (ΔR_i) an ausgewählten Zellen während der Zyklisierung ist in Abbildung 23 oben dargestellt. Der Innenwiderstand steigt an während die Kapazität fällt (vgl. Abbildung 23, unten).

Es ist erkennbar, dass im Fall von DUT_01 und DUT_03 kein dramatischer Kapazitätsverlust (durch z.B. Delamination o.ä. Ereignisse) eintritt, der Anstieg der Impedanz ist gering und linearer. DUT_05 und DUT_15 hingegen degradieren stark - der Widerstand steigt entsprechend stark an.

Abbildung 23: Änderung des Innenwiderstandes (oben) und der Kapazität (unten) mit zunehmender Anzahl an Ladezyklen



3.1.6 Diskussion

Zur Abschätzung der Akkulebensdauer wurden in diesem Projektteil Vollzyklen an Akkus mit für diese Tablet-Rechner vergleichsweise hoher Strombelastung (Entladung in 2 Stunden) durchgeführt. Auf diese Weise konnten Akkumulatoren verschiedener Geräte und Hersteller vergleichend in relativ kurzer Zeit untersucht werden. Es wurde von jedem Akkutyp jeweils nur ein Exemplar getestet, was einer Stichprobenprüfung gleichkommt und daher nur einen allgemeinen Trend wiedergeben kann.

Herstellerangaben zu den Ladeverfahren der einzelnen Akkus lagen nicht vor. Daher wurden alle Akkumulatoren mit dem gleichen Ladeverfahren geladen. Es wurde sichergestellt, dass keiner der Akkus überladen wurde. Die mit diesem Verfahren eingeladene Kapazität lag damit unter der theoretisch maximal erzielbaren Kapazität. Gleichzeitig kann eine zusätzliche Schädigung der Akkumulatoren durch Überladung ausgeschlossen werden. Selbst die regelmäßige maximale

Aufladung der Akkumulatoren kann zu einer vorzeitigen Degradation führen, was bei den hier durchgeführten Versuchen nicht abgebildet wird, sodass die Lebensdauer eher über- als unterschätzt wird.

Da die Kapazität der Akkumulatoren temperaturabhängig ist, schwankten die Messwerte insbesondere in der ersten Messreihe, die bei Raumtemperatur und somit beispielsweise unter Tag-Nacht-Schwankungen (im Toleranzbereich der Norm DIN EN 61960) durchgeführt wurde. Auf den langfristig beobachteten mittleren Kapazitätsverlust über die Zyklen hatten diese Temperaturschwankungen jedoch keinen Einfluss. Allerdings kann die Abbruch-Grenze (80 % der Referenzkapazität) durch die temperaturbedingt geringere Kapazität vorzeitig erreicht werden (DUT_01 / DUT_09 in Messreihe 1). Im Übrigen ist die Umgebungstemperatur für einen eingebauten Akku in der Regel höher als während unserer Messreihen, siehe dazu auch Kapitel 7.

Das Verhalten der Nutzerin und des Nutzers bezüglich der Verwendung einzelner Geräte kann sehr verschieden sein. Die in diesen Tests durchgeführte Vollzyklisierung bildet das Nutzerverhalten und die realen Bedingungen für den in das Gerät eingebauten Akku daher nicht realistisch ab. Die tatsächliche Degradation der Akkumulatoren hängt erheblich von der Temperatur und dem Nutzerverhalten ab. Die Alterungsmechanismen sind sehr vielschichtig und können hier nicht im Einzelnen diskutiert werden. Die Ursachen und Auswirkungen der einzelnen Zelldegradationsmechanismen sind in der Dissertation von Tröltzsch (2005) beschrieben (Tabelle 8).

Tabelle 8: Alterungsmechanismen nach Tröltzsch (2005)

Effekt	Ursache	Auswirkung
Delamination	Binderdegradation, Ableiterkorrosion, Δ Volumen	C sinkt, R_i steigt
Oxidation Kathode	Überladung, hoher SOC	C sinkt, R_i steigt, T steigt, Gasung
Selbstentladung der Elektroden (Anode/Kathode)	Zersetzung des Elektrolyt-LM	C sinkt
Deckschichtwachstum (Anode / Kathode)	SEI Formation / Δ Volumen durch Zyklisierung	C sinkt, R_i steigt
Abscheidung metallisches Li (Anode)	Überladung, Ladung bei zu tiefer Temperatur	Dendritenwachstum, ggf. Zerstörung Anode
LM – Zersetzung (Elektrolyt)	Hohe Temperatur, Verunreinigungen	C sinkt, Gasung
Leitsalzreduktion (an Anode)	Überladung	Deckschichtwachstum, R_i steigt
Zersetzung Cu-Ableiter	Tiefentladung	ggf. Dendriten, Änderung R_i
Separator-Shutdown	Hohe Temperatur, ggf. Microshorts	Stromtragfähigkeit sinkt

C = Kapazität; **R_i** = Innenwiderstand; **T** = Temperatur

Dendrit: kristalline metallische Lithium-Abscheidung, die zu lokalen Kurzschlüssen (micro shorts) führen kann

Delamination: Ablösen der Elektrode vom Stromableiter

SEI Formation: Ausbilden einer Grenzschicht (solid electrolyte interphase) zwischen Elektrodenpar-

Effekt	Ursache	Auswirkung
tikel und Elektrolyt Elektrolyt-LM: Elektrolyt-Lösemittel (üblicherweise ein Gemisch zyklischer Carbonate SOC: Ladezustand (state of charge)		

Durch die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Versuche konnte gezeigt werden, dass die Zyklenbeständigkeit von Lithium-Ionen-Akkumulatoren verschiedener Hersteller sehr unterschiedlich ist. Am Anfang kommt es bei allen Akkus lediglich zu einem Kapazitätsverlust von 0,006 % bis 0,26 % pro Zyklus, was zu einer entsprechend verkürzten Betriebsdauer der Geräte führt. In der ersten Messreihen waren Frühausfälle zu verzeichnen, die vermutlich von den eingangs beschriebenen Temperaturschwankungen verursacht wurden. Hier sind zwei der 17 getesteten Akkus bereits nach ca. 80 Ladezyklen ausgeschieden (wovon sich einer wieder erholte und weiter zyklisiert wurde, DUT_10), zwei weitere Akkus unterschritten nach ca. 230 Zyklen die 80%-Marke. Die Verminderung der speicherbaren Kapazität um 20 % wurde bei den weiteren untersuchten Akkuzellen zwischen 687 Vollzyklen (DUT_01) und etwa 4500 Vollzyklen (extrapoliert, DUT_02 / DUT_17) erreicht. Nach 1000 Vollzyklen lagen noch 11 der 17 Akkuzellen überhalb der 80%-Marke, nach 2000 Zyklen noch 7 der Akkus. Mit diesen Akkus ließen sich die Endgeräte noch sehr zuverlässig betreiben. Wie beschrieben, sind die im Labor erzielten Ergebnisse jedoch nur sehr eingeschränkt auf reale Bedingungen übertragbar.

Eine dramatische Schädigung der Akkumulatoren geht einher mit dem rapiden Anstieg des Innenwiderstandes. Mittels entsprechender Messinstrumente ließe sich also der Gesundheitszustand einer Akkuzelle über die Messung des Innenwiderstandes ermitteln, vorausgesetzt die mittlere Impedanz und Chargenstreuung von Zellen des Akkutyps ist bekannt.

3.2 Felddatenerhebung zur Untersuchung der Lebensdauer

Die Lebensdauer von Lithium-Akkus wird neben internen Faktoren, wie den eingesetzten Aktivmaterialien und der Verarbeitungsqualität, auch von externen Faktoren beeinflusst, zu welchen beispielsweise die Umgebungstemperatur und das Ladeverhalten des Nutzenden und der Ladeelektronik gezählt werden können. Externe Faktoren können unter Laborbedingungen weitestgehend kontrolliert und konstant gehalten werden, während bei der realen Nutzung im Feld verschiedene Gegebenheiten zu erwarten sind, die durch standardisierte Labortests nur bedingt abgebildet werden können. Die Umgebungstemperatur im Feld hängt beispielsweise vom Wärmemanagement des Endgerätes, insbesondere der Effektivität der Wärmeabführung, und dem Einsatzort, sei es im klimatisierten Büro oder im Freien in wärmeren oder kälteren Regionen, ab. Das Ladeverhalten wird neben den individuellen Gewohnheiten des Nutzenden beeinflusst vom Nutzungsprofil des Notebooks, sei es eine hauptsächlich stationäre Nutzung im Netzbetrieb oder mobile Nutzung im Akkubetrieb. Es ist also zu erwarten, dass sich die Lebensdauer der Akkus im realen Einsatz von den im Labor ermittelten Werten unterscheidet, zumal die im Labor untersuchten Akkus nicht als repräsentativ für die sich am Markt befindlichen Notebook-Akkus betrachtet werden können. Während die Tablet-Akkus der Laboruntersuchung mit aktuellen, zumeist fest im Notebook verbauten Pouchzellen durchaus vergleichbar sind, trifft dies für die nach wie vor gängigen Rundzellen-Akkus nur bedingt zu. Unterschiede betreffen neben der Bauform auch den flüssigen Elektrolyten, der bei Pouchzellen durch ein Polymer ersetzt wird (vgl. Begriffsbestimmungen in Abschnitt 1.1).

Vor diesem Hintergrund wurden im Forschungsvorhaben Akkudaten von knapp 900 gebrauchten Notebooks erhoben und ausgewertet. Zusätzlich wurde eine Datenbank mit über 54.000 Datensätzen von gebrauchten Notebooks zur Verifizierung der erhobenen Daten herangezogen.

3.2.1 Auslesen von Akkudaten

Daten zum Zustand von Lithium-Akkus sind sowohl bei Windows-Notebooks als auch bei MacOS-Geräten durch Softwaretools grundsätzlich ermittelbar. Um Aussagen über die Zyklenbeständigkeit von Akkus machen zu können, müssen folgende Informationen über die Eigenschaften gebrauchter Akkus ermittelt werden: Die Nennkapazität, die Kapazität bei voller Ladung, die Anzahl der bereits durchlaufenen Ladezyklen und das kalendarische Alter des Akkus.

Einige der relevanten Begriffe sind im englischen Sprachgebrauch etabliert, jedoch im Deutschen nicht immer eindeutig definiert. Tabelle 9 beschreibt die Verwendung der Begriffe im vorliegenden Bericht (siehe auch Abschnitt 1.1).

Tabelle 9: Benötigte Akkudaten bei der Datenerhebung

Datenpunkt	Begriff im Englischen	Definition im vorliegenden Bericht
Nennkapazität	Nominal Capacity, Designed Capacity	Die Nennkapazität ist die vom Hersteller angegebene Kapazität des Akkus bei Auslieferung in Milli-Ampere-Stunden (mAh), teilweise auch in Milli-Watt-Stunden (mWh) angegeben.
Kapazität (bei vollgeladenem Zustand)	Full Charged Capacity	Die gegenwärtig speicherbare Kapazität bei voller Ladung in mAh oder mWh; nimmt mit Nutzung und zunehmendem kalendarischen Alter der Akkus ab.
Gesundheitszustand	State of Health (SOH)	Der Gesundheitszustand eines Akkus wird berechnet als Quotient aus der Kapazität und der Nennkapazität in Prozent. Ein SOH von 85 % bedeutet, dass der Akku noch 85 % seiner Nennkapazität speichern und abgeben kann.
Ladezustand	State of Charge (SOC)	Der Ladezustand zeigt an, wie voll der Akku geladen ist. Er wird berechnet als Quotient aus der aktuell verfügbaren Kapazität und der Kapazität im vollgeladenen Zustand in Prozent.
Ladezyklen	Cycle Count	Die Anzahl der bereits durchlaufenen Lade-/Entladezyklen. Ein Ladezyklus kann aus mehreren Teilzyklen bestehen, die in Summe 100 % der Nennkapazität des Akkus ergeben.
Herstellungsdatum	Manufacture Date	Mithilfe des Herstellungsdatums wird das kalendarische Alter des Akkus berechnet

Unter Microsoft-Windows-Betriebssystemen sowie Apple MacOS Betriebssystemen ist es prinzipiell möglich, Informationen über den Zustand der Akkus bereits mit integrierten betriebssystemnahen Tools zu erfassen. Daneben existieren für beide Betriebssysteme kostenlose Programme, die die relevanten Daten abfragen und dem Nutzenden übersichtlich aufbereitet anzeigen können. Weiterhin bieten einige Gerätehersteller kostenlose Tools an, die einen ähnlichen Funktionsumfang erfüllen. Der folgende Abschnitt beschreibt beispielhaft fünf der relevanten Softwaretools zur Erfassung von Akkudaten aus Notebooks.

Anzumerken ist jedoch, dass die Angaben nicht in allen Fällen vollständig und korrekt sind. Unter „Bewertung und Auswahl geeigneter Softwaretools“ gehen wir ausführlich darauf ein.

Energieeffizienzdiagnose-Bericht (Windows Betriebssysteme)

Unter Windows 7 und Windows 8 können Informationen zu Notebook-Akkus mit dem Tool *Powercfg.exe* in einem Energieeffizienzdiagnose-Bericht abgerufen werden.

Abbildung 24: Von der Windows-Energieeffizienzdiagnose ermittelte Akkuinformationen

Akku:Akkuinformationen	
Akku-ID	7196SANYOAL10B31
Hersteller	SANYO
Seriennummer	7196
Chemie	LION
Langfristig	1
Vorgesehene Akkukapazität	48840
Letzte vollständige Aufladung	42347

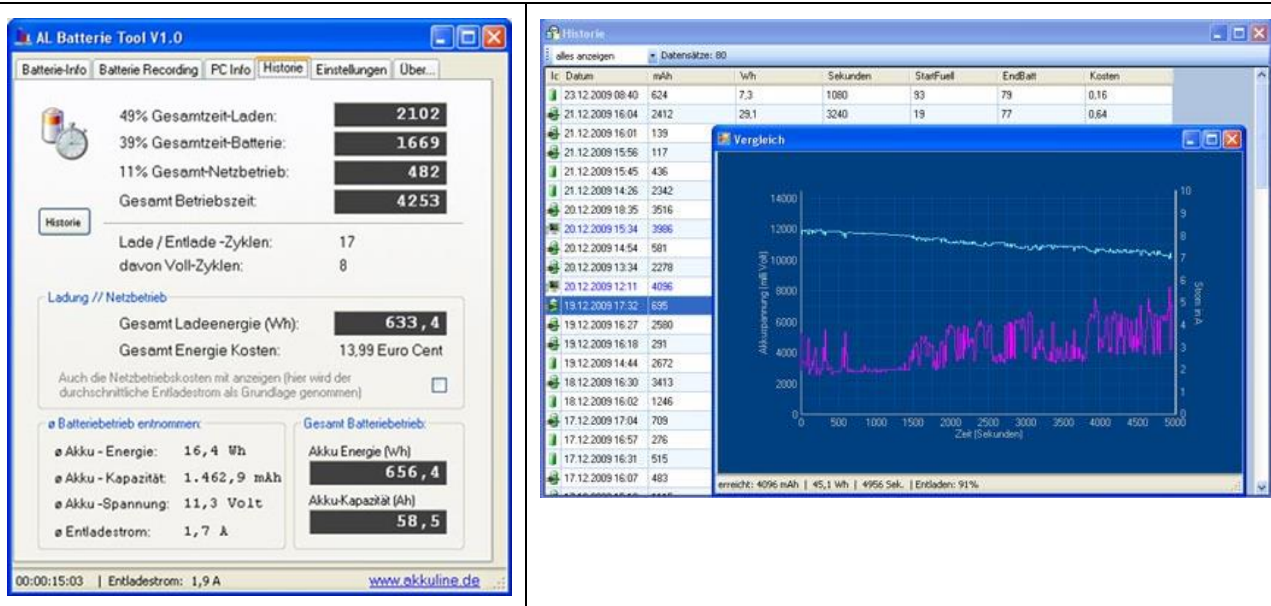
Das standardmäßig installierte Tool gibt nach Abfrage (siehe Abbildung 24) Auskunft über die Akku-ID, den Hersteller, die Nennkapazität und die Kapazität bei voller Ladung. Aus diesen Daten lässt sich der Gesundheitszustand ableiten. Insbesondere die Funktion zur Erstellung eines „Battery report“ unter Windows 8 stellt dem Nutzenden vergleichsweise umfangreiche Informationen zur Historie der Nutzung seit Installation des Betriebssystems zur Verfügung. Neben den o.g. grundlegenden Daten wird in einem Protokoll der Anteil der Nutzung des Notebooks im Netzbetrieb und im Akkubetrieb dargestellt.

AkkuLine Batterie Tool (Windows Freeware)

Mit dem kostenlosen „AkkuLine Batterie Tool“¹² lassen sich Langzeit-Analyse-Daten zur Betriebsdauer des Notebooks, Nutzungszeiten verschiedener Akku-Modi (Lade-Modus und reiner Netzbetrieb), Ladezyklen (und davon Vollzyklen), bisher geladene Energie in Wattstunden, Gesamtwerte für entnommene Kapazität und Energie über die Nutzungsdauer erfassen.

¹² Siehe <http://www.akkuline.de/Blog/post/Freeware-Software-fur-Notebook-Akku.aspx>

Abbildung 25: Akku-Recording mit AkkuLine Batterie Tool



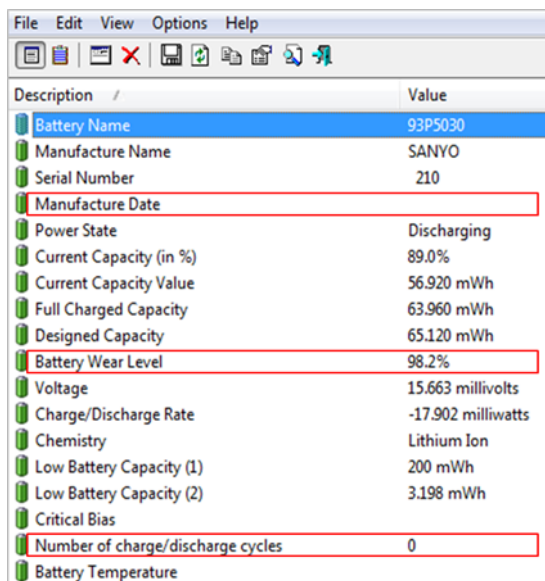
In der Historie werden die ab dem Zeitpunkt der Installation des Programms durchlaufenen Lade- und Entladeverläufe angegeben. Dabei werden beispielsweise Daten zum Zeitpunkt des Beginns der Ladung / Entladung, den eingeladenen / entnommenen Milliampere Stunden, der eingeladenen / entnommen Wattstunden und zur Dauer der Ladung oder Entladung erhoben (Abbildung 25).

BatteryInfoView (Windows Freeware)

Das kostenlose Programm „BatteryInfoView“¹³ bietet eine ähnliche Funktionalität wie das AkkuLine-Tool und greift auf historische Daten zurück, die im Akku vorliegen. Wird das Programm auf einem Notebook ausgeführt, das bereits in der Nutzung ist, zeigt es die seit Nutzungsbeginn durchlaufene Anzahl an Lade-/Entladezyklen an, sofern der Akku bzw. das Gesamtsystem Notebook diese Funktion unterstützt. Ausgelesene Daten können als Textdatei exportiert werden.

¹³ Siehe http://www.nirsoft.net/utills/battery_information_view.html

Abbildung 26: Akkudaten ausgegeben mit BatteryInfoView



Description	Value
Battery Name	93P5030
Manufacture Name	SANYO
Serial Number	210
Manufacture Date	
Power State	Discharging
Current Capacity (in %)	89.0%
Current Capacity Value	56.920 mWh
Full Charged Capacity	63.960 mWh
Designed Capacity	65.120 mWh
Battery Wear Level	98.2%
Voltage	15.663 millivolts
Charge/Discharge Rate	-17.902 milliwatts
Chemistry	Lithium Ion
Low Battery Capacity (1)	200 mWh
Low Battery Capacity (2)	3.198 mWh
Critical Bias	
Number of charge/discharge cycles	0
Battery Temperature	

CoconutBattery (MacOS Freeware)

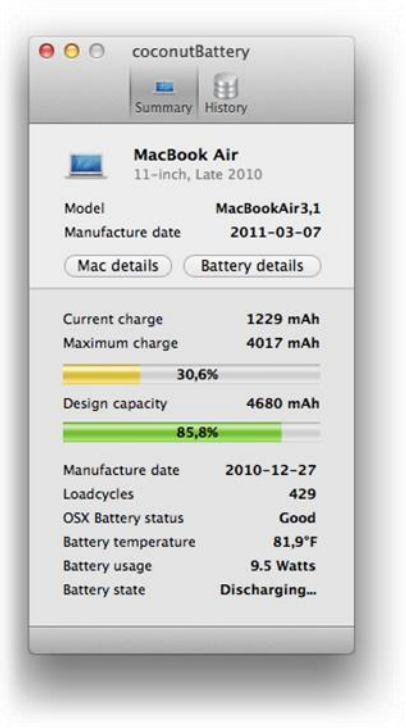
Felddaten zur realen Lebensdauer und Zyklenbeständigkeit von Lithium-Akkus von Apple-Notebooks sind dank der Software „coconutBattery“¹⁴ eines unabhängigen Entwicklers verfügbar. Die Software liest aus den Notebook-Geräten u.a. folgende Daten aus:

- ▶ Nennkapazität
- ▶ Kapazität bei voller Ladung
- ▶ Kalendarisches Alter des Akkus
- ▶ Anzahl durchlaufener Ladezyklen

Sofern die Nutzerin, der Nutzer dem zustimmt, werden diese Daten in eine zentrale Datenbank eingespeist, so dass sich statistische Daten zum Gesundheitszustand der Akkus in Abhängigkeit von Gerätealter und Anzahl der Ladezyklen ermitteln lassen, siehe Abbildung 27.

¹⁴ Siehe <http://www.coconut-flavour.com/coconutbattery/>

Abbildung 27: Akkudaten ausgegeben mit coconutBattery 3.1.1



Tools der Gerätehersteller unter dem Betriebssystem Windows

Einige Notebookhersteller bieten separate Tools unter den Windows-Betriebssystemen an, die dem Nutzenden Informationen zum Zustand der eingesetzten Akkus zur Verfügung stellen. Der Funktionsumfang dieser Tools unterscheidet sich je nach Hersteller stark, es sollen aber dieselben Werte ausgegeben werden wie bei den herstellereinabhängigen Tools.

Abbildung 28: Screenshots von herstellereigenen Tools

Ladekapazität insgesamt:	63.96 Wh
Strom:	0.85 A
Spannung:	15.63 V
Leistung (Watt):	13.23 W
Temperatur:	26 °C
Ladezyklen:	3
Herstellername:	SANYO
Herstellerdatum:	12.09.2012
Datum der Erstverwendung:	-
Seriennummer:	210
Barcodenummer:	1Z7SS33C121
FRU-Teilenummer:	93P5030
Chemische Zusammensetzung:	Lithiumionen

Ausschnitt von Lenovos Energiemanager



Ausschnitt von HP Battery Check

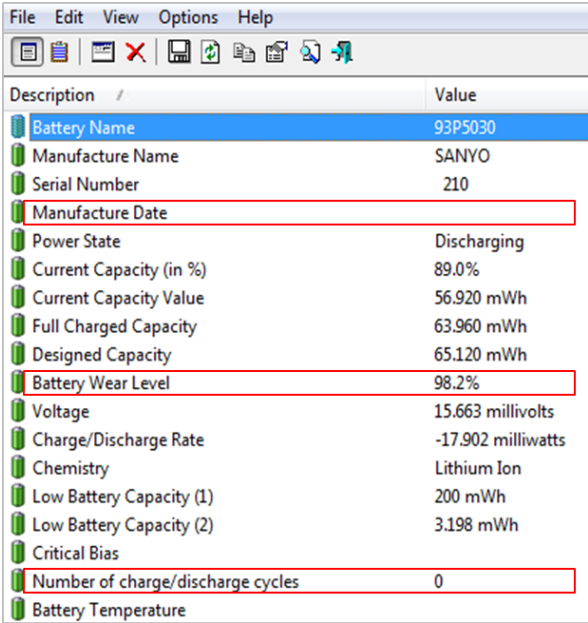
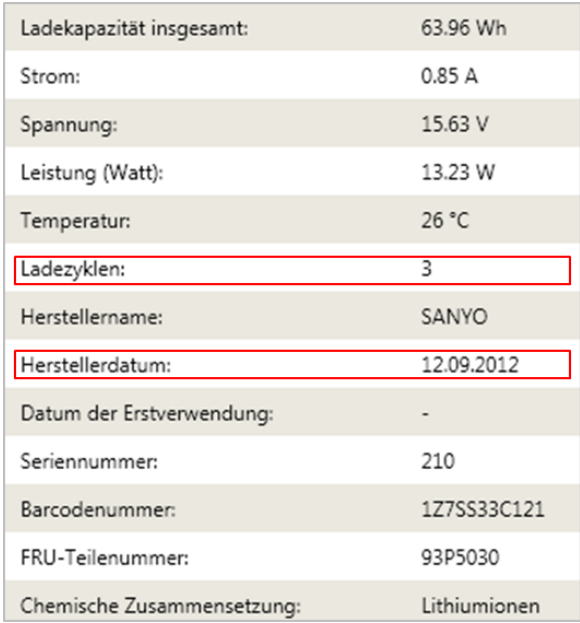
Bewertung und Auswahl geeigneter Softwaretools

Problematisch bei der Erfassung von Akkudaten ist, dass die Vollständigkeit der erfassbaren Datensätze je nach Gerät, Hersteller und eingesetztem Tool unterschiedlich ausfällt. Es werden auch nicht alle Daten korrekt angezeigt. So trat während der Felddatenerhebung der Fall auf, dass im vorgesehenen Feld statt der Kapazität des Akkus der Ladezustand (State of Charge, SOC) des Akkus angezeigt wurde. Bei Geräten mit Windows-Betriebssystemen konnte die Anzahl der durchlaufenen Ladezyklen im stichprobenartigen Praxistest nur durch eigene Tools der Gerätehersteller erfasst werden, während die herstellerübergreifenden Tools sowie die in Windows integrierten Mittel diesen Wert in der Praxis offenbar nicht auslesen können. Bei Geräten mit MacOS sind die Daten mit vergleichsweise geringem Aufwand im Betriebssystem selbst oder durch kostenlose Tools wie coconutBattery auslesbar.

Um für die Felddatenerhebung im Rahmen dieses Forschungsvorhabens bei Notebooks mit Windows Betriebssystem einen vollständigen Datensatz im Sinne der Tabelle 9 zu erhalten, sind die herstellereigenen Softwaretools unverzichtbar. Für die Datenerhebung im Projekt wurde daher ein Vorgehen gewählt, das zunächst BatteryInfoView als herstellerübergreifendes Tool mit Datei-Exportfunktion nutzt, um den Vorgang soweit weit wie möglich zu automatisieren bzw. manuelle Eintragungen und damit mögliche Fehlerquellen auszuschließen. Zusätzlich wurden die Tools der jeweiligen Gerätehersteller zur Vervollständigung der so generierten Datensätze herangezogen, wie beispielhaft in Abbildung 29 dargestellt ist.

Bei Geräten mit dem Betriebssystem MacOS wurde auf Daten des Softwaretools coconutBattery zurückgegriffen (siehe Abschnitt 3.2.3).

Abbildung 29: Erhebung eines vollständigen Datensatzes mittels der Kombination aus BatteryInfoView und einem herstellereigenen Softwaretool

	
BatteryInfoView (Screenshot)	Herstellereigenes Tool (Ausschnitt)

Entwicklung eines Akkutools im Forschungsvorhaben

Um die Datenerhebung zu vereinfachen und zu automatisieren, wurde mit dem Fachbereich Ingenieurwissenschaften der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW) kooperiert. Vier

Studenten der Umweltinformatik programmierten ein Skript unter dem Betriebssystem Windows 7 mit dem Ziel, alle relevanten Akkudaten automatisiert auslesen und in einer Logdatei ablegen zu können. Die wichtigsten Erkenntnisse des Projekts sind im Folgenden zusammengefasst.

Erkenntnisse:

- ▶ Das Auslesen der relevanten Akkudaten (Gesundheitszustand, Ladezyklen, Herstellungsdatum, usw.) ist prinzipiell möglich, solange die Geräte mit den Spezifikationen des Smart Battery System konform sind
- ▶ Nicht alle Gerätehersteller unterstützen die Spezifikationen des Smart Battery Systems
- ▶ In der Dokumentation der Geräte ist die Möglichkeiten der Abfrage von Akkudaten nicht immer beschrieben
- ▶ In der Praxis konnte bei keinem der exemplarischen Testgeräte ein vollständiger Datensatz im Sinne der Tabelle 9 erhoben werden, da die Geräte offenbar nicht die Spezifikationen des Smart Battery System unterstützten

3.2.2 Auswertung der Felddaten von AfB

AfB ist ein Unternehmen, das gebrauchte Elektronikgeräte, hauptsächlich Notebooks und Desktop-PCs, von Unternehmen zurücknimmt, die Daten auf den Festplatten sicher löscht, die Geräte auf Funktion prüft, aufarbeitet und wieder in den Verkauf stellt. Im Rahmen einer Kooperation mit AfB in Berlin wurde dem Projektteam der Zugriff auf einen umfangreichen Pool an gebrauchten Notebooks ermöglicht.

Die bei AfB vorhandenen Notebooks sind hauptsächlich Businessmodelle namhafter Gerätehersteller, die in der Regel einige Jahre bei Unternehmen oder Behörden in der Nutzung waren. Detaillierte Informationen zur Art der Nutzung oder den Nutzungsmustern beim Kunden liegen entweder nicht vor oder wurden aus Datenschutzgründen nicht an das Projektteam übermittelt.

Die Datenerhebung bei AfB erfolgte im Zeitraum zwischen Oktober 2013 und Juli 2014 und wurde mithilfe der eingangs beschriebenen Kombination aus BatteryInfoView und eigenen Tools der Gerätehersteller durchgeführt. Jeder Akku liefert dabei genau einen Datensatz. Dieser Datensatz ist als Momentaufnahme des Gesundheitszustandes des Akkus zu verstehen. Es werden die Daten aufgenommen, die zum Zeitpunkt der Datenerhebung im Mikrokontroller des Akkus gespeichert sind. Die Historie, beispielsweise der Verlauf der Kapazitätsabnahme im Laufe der Nutzungsphase, kann nicht eingesehen werden.

Im Ergebnis wurden 909 Datensätze einzelner Akkus erhoben, die aus insgesamt sechs verschiedenen Notebook-Modellen zwei verschiedener Hersteller stammen. Alle erhobenen Daten wurden in einem einheitlichen Format in einer Datenbank abgelegt, welche im Folgenden als AfB-Datenbank bezeichnet wird.

Es wird darauf hingewiesen, dass die bei AfB erhobenen Daten eine zufällige Stichprobe sind, die nicht repräsentativ für Notebook-Akkus ist. Ebenfalls sind die in der Stichprobe enthaltenen Notebook-Modelle und Hersteller nicht repräsentativ. Bei der Datenerhebung wurden die zufällig zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Notebook-Akkus ausgelesen, eine Erhebung repräsentativer Daten war im Vorhaben nicht vorgesehen.

Inhalt und Zusammensetzung der Datenbank

Die im Rahmen der Kooperation mit AfB erhobenen Felddaten wurden zunächst hinsichtlich lücken- und fehlerhafter Datensätze geprüft. Es wurden 21 Datensätze aus der Datenbank entfernt, bei denen entweder mindestens einer der benötigten Datenpunkte nicht erfasst wurde oder die offensichtlich

fehlerhaft waren. Beispielsweise lag das Herstellungsdatum eines Akkus im Jahr 1980; ein weiterer Datensatz enthielt die Angabe eines Herstellungsdatums, das nach dem Zeitpunkt der Datenerhebung lag. Diese Angaben werden auf mögliche Fehler bei der manuellen Übertragung in die AfB-Datenbank während der Datenerhebung zurückgeführt. Nach dem Entfernen dieser Datensätze verblieben 888 nutzbare Datensätze in der AfB-Datenbank.

Weitere Unregelmäßigkeiten in den Daten sind im Folgenden aufgelistet. Die zugehörigen Datensätze wurden jedoch nicht aus der Datenbank entfernt, um Subjektivität bei der Auswertung zu vermeiden.

- ▶ In 73 Datensätzen wurde die gegenwärtige Kapazität so hoch wie oder höher als die Nennkapazität ausgegeben (Gesundheitszustand > 100 %), obwohl teilweise bereits mehrere hundert Ladezyklen durchlaufen wurden und das Alter der Akkus teilweise mehrere Jahre beträgt. Im Prinzip ist ein Gesundheitszustand von über 100 % erklärbar, da sich Akkuhersteller ihren Kunden gegenüber absichern wollen und die Kapazität bei der Herstellung oberhalb der Nennkapazität ansetzen. Bei älteren oder viel genutzten Akkus scheint dieser Wert dennoch nicht plausibel.
- ▶ 14 Datensätze enthalten die Angabe, dass trotz hohen kalendarischen Alters und geringem Gesundheitszustand noch kein Ladezyklus oder nur sehr wenige Ladezyklen durchlaufen wurden. Dies ist prinzipiell erklärbar, wenn ein Akku unter nicht idealen Bedingungen ohne Nutzung gelagert wird (vgl. Kapitel 8) oder permanent im Netzbetrieb genutzt wurde.

Tabelle 10 listet die betrachteten Geräte und die jeweilig erfassten Stückzahlen anonymisiert auf. Die Anzahl bzw. der prozentuale Anteil der Modelle an der Gesamtmenge an Datensätzen ist ebenfalls in Tabelle 10 sowie in Abbildung 30 dargestellt.

Die erfassten Notebook-Modelle wurden zwischen den Jahren 2008 und 2010 am Markt eingeführt. Dementsprechend sind neuere Technologieentwicklungen hier nicht vertreten. Beispielsweise werden alle Notebook-Modelle in der AfB-Datenbank durch Akkus mit Rundzellen betrieben, während seit wenigen Jahren ein Trend hin zu Pouchzellen (LiPo-Akkus) zu beobachten ist.

Die Modelle A und B gehören zu unterschiedlichen Produktgenerationen derselben Produktlinie eines Herstellers und weisen ähnliche Spezifikationen auf. Unterschiede ergeben sich in der Aktualität der verbauten Komponenten; beispielsweise findet sich in Modell A ein Intel Core2Duo Prozessor und in Modell B ein im Vergleich aktuellerer Vertreter der Intel-Core-i-Serie wieder.

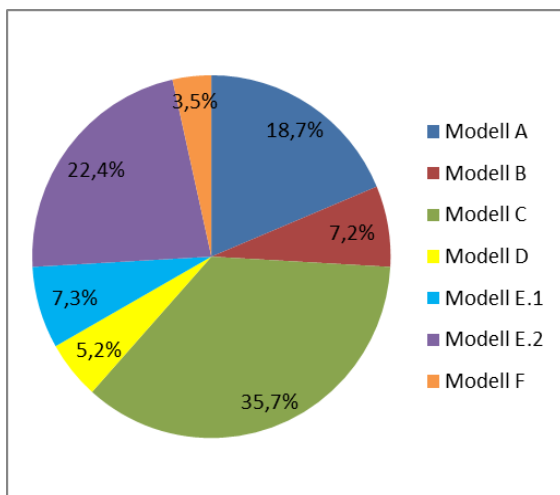
Für Modell E ergibt sich die Besonderheit, dass vom Notebookhersteller Akkus von zwei verschiedenen Akkuherstellern eingesetzt wurden. Dabei enthalten 25 % der Notebooks Akkus von einem Hersteller (Modell E.1) und rund 75 % Akkus vom zweiten Hersteller (Modell E.2). Die Hersteller der Akkus der anderen Notebook-Modelle lassen sich aus den vorhandenen Daten nicht bestimmen.

Bei AfB waren Akkus von Notebooks zwei weiterer Gerätehersteller in großer Stückzahl verfügbar, deren Daten jedoch nicht vollständig ausgelesen werden konnten. Von beiden Herstellern werden keine Softwaretools angeboten, die es ermöglichen, die Zahl der durchlaufenen Ladezyklen zu erfassen.

Tabelle 10: Anonymisierte Zusammensetzung der AfB-Datenbank nach Notebook-Modellen

Bezeichnung	Notebook-Hersteller	Markteintritt des Modells	Displaygröße	Akkukenndaten		Anzahl Datensätze	Anteil am Datenpool
				Nennkapazität	Zellen		
Modell A	Hersteller 1	2008	12 Zoll	2200 mAh	3 Zellen	166	18,7 %
Modell B	Hersteller 1	2010	12 Zoll	5225 mAh	6 Zellen	64	7,2 %
Modell C	Hersteller 1	2009	14 Zoll	5100 mAh	6 Zellen	317	35,7 %
Modell D	Hersteller 1	2010	14 Zoll	4910 mAh	6 Zellen	46	5,2 %
Modell E.1	Hersteller 2	2008	14 Zoll	5200 mAh	6 Zellen	65	7,3 %
Modell E.2	Hersteller 2	2008	14 Zoll	5200 mAh	6 Zellen	199	22,4 %
Modell F	Hersteller 2	2010	14 Zoll	5200 mAh	6 Zellen	31	3,5 %
Summe						888	100 %

Abbildung 30: Prozentuale Anteile der Modelle am Datenpool



Die erhobenen Datensätze enthalten jeweils mindestens die folgenden Daten:

- ▶ Herstellungsdatum des Akkus
- ▶ Nennkapazität
- ▶ Kapazität bei voller Ladung
- ▶ Anzahl durchlaufener Ladezyklen

Aus den vorhandenen Daten konnten weitere relevante Daten abgeleitet werden, wie in den folgenden Paragraphen beschrieben wird.

Das **Alter des Akkus** zum Zeitpunkt der Datenerhebung wurde über die Zeitspanne zwischen dem Herstellungsdatum und dem Datum der Datenerhebung bestimmt:

$$\text{Alter der Akkus} = \text{Datum der Datenerhebung} - \text{Herstellungsdatum}$$

Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Nutzungsdauer exakt dem Alter eines Akkus entspricht. Die Nutzungsdauer ist die Zeitspanne, in welcher das Notebook und der enthaltene Akku

beim Nutzenden aktiv genutzt werden. Dies kann sich vom Erwerb bis zur Entsorgung erstrecken, ggf. wird der Akku aber als Ersatzakku nach dem Kauf gelagert oder nach dem Ende der aktiven Nutzung vor der Entsorgung durch den Nutzer oder die Nutzerin gelagert. Die Nutzungsdauer kann aus den vorhandenen Daten nicht bestimmt werden, da hierzu Angaben fehlen. Nicht bekannt ist in der Regel die Zeitspanne zwischen der Herstellung und der Erstbenutzung sowie die Zeitspanne zwischen dem Ende der Nutzung und der Datenerhebung.

Der **Gesundheitszustand** der Akkus wurde über den Quotienten der Kapazität bei voller Ladung und der Nennkapazität ermittelt:

$$\text{Gesundheitszustand [\%]} = \text{Kapazität} / \text{Nennkapazität}$$

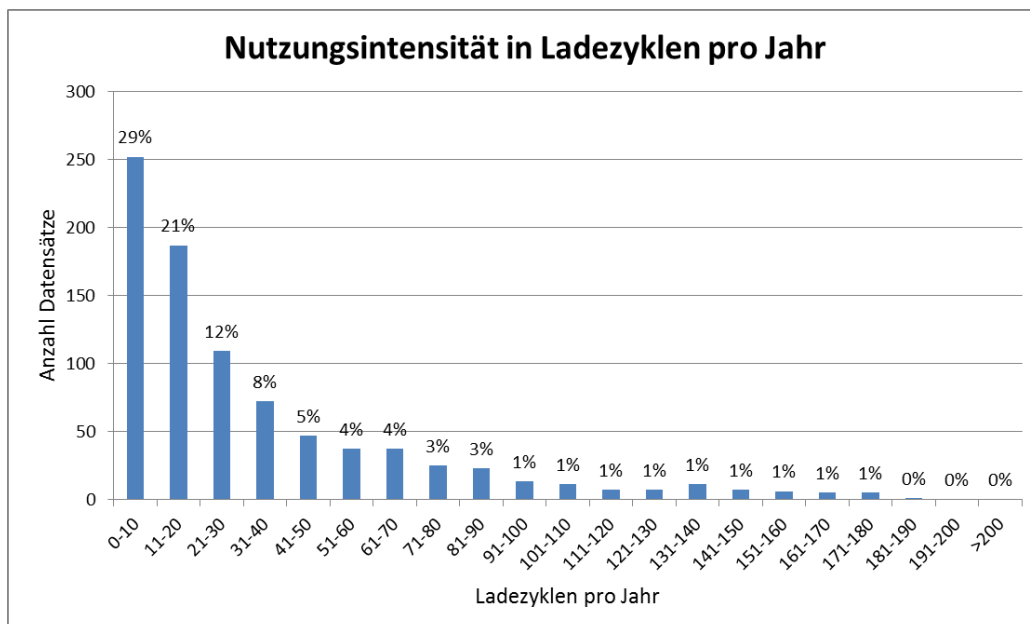
Die **Nutzungsintensität** der Akkus wurde über die Anzahl der durchlaufenen Ladezyklen (im Folgenden: Ladezyklen) und das Alter der Akkus bestimmt und wird in Ladezyklen pro Jahr angegeben:

$$\text{Nutzungsintensität} = \text{Ladezyklen} / \text{Alter in Jahren}$$

Darstellung der Nutzungsintensität

Abbildung 31 zeigt die Nutzungsintensität der Akkus aus der Stichprobe von AfB, die zwischen den erhobenen Datensätzen erheblich schwankt. Über die verschiedenen Modelle hinweg ergibt sich das Bild, dass die Geräte offenbar relativ wenig mobil im Akkubetrieb genutzt wurden. Tatsächlich fällt mit 29 % der größte Anteil der Akkus in den Bereich von 10 Ladezyklen pro Jahr oder weniger. 75 % der Akkus wurden pro Jahr 50-mal oder weniger vollständig entladen und aufgeladen. Die Vermutung, dass eine durch Frühausfälle bedingte Häufung bei 0 bis 1 Ladezyklen zu finden sein könnte, bestätigte sich bei der Analyse der Daten nicht. In diesem Bereich finden sich lediglich 3 % der Datensätze.

Abbildung 31: Verteilung der Nutzungsintensität der Akkus in der AfB-Datenbank

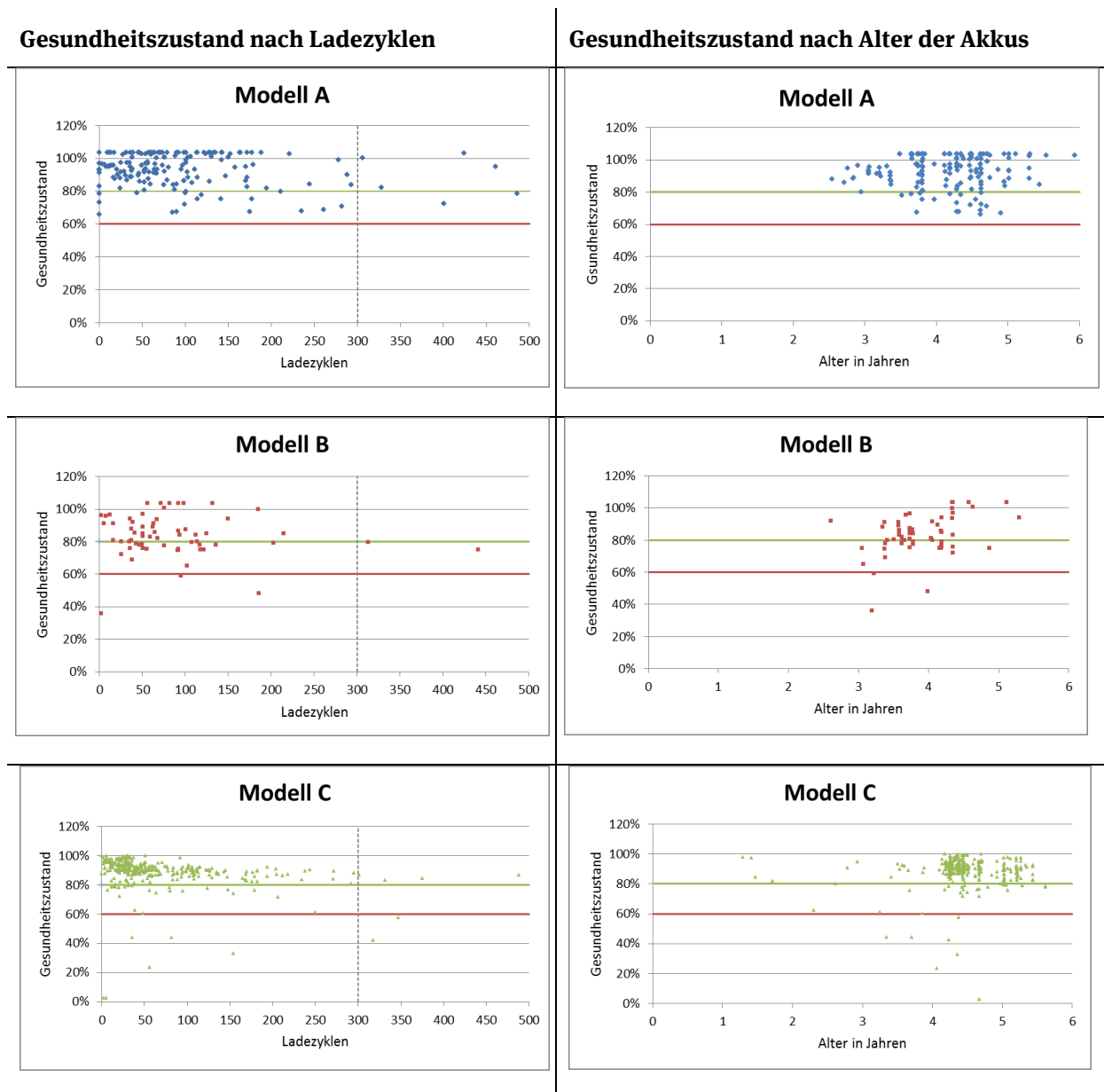


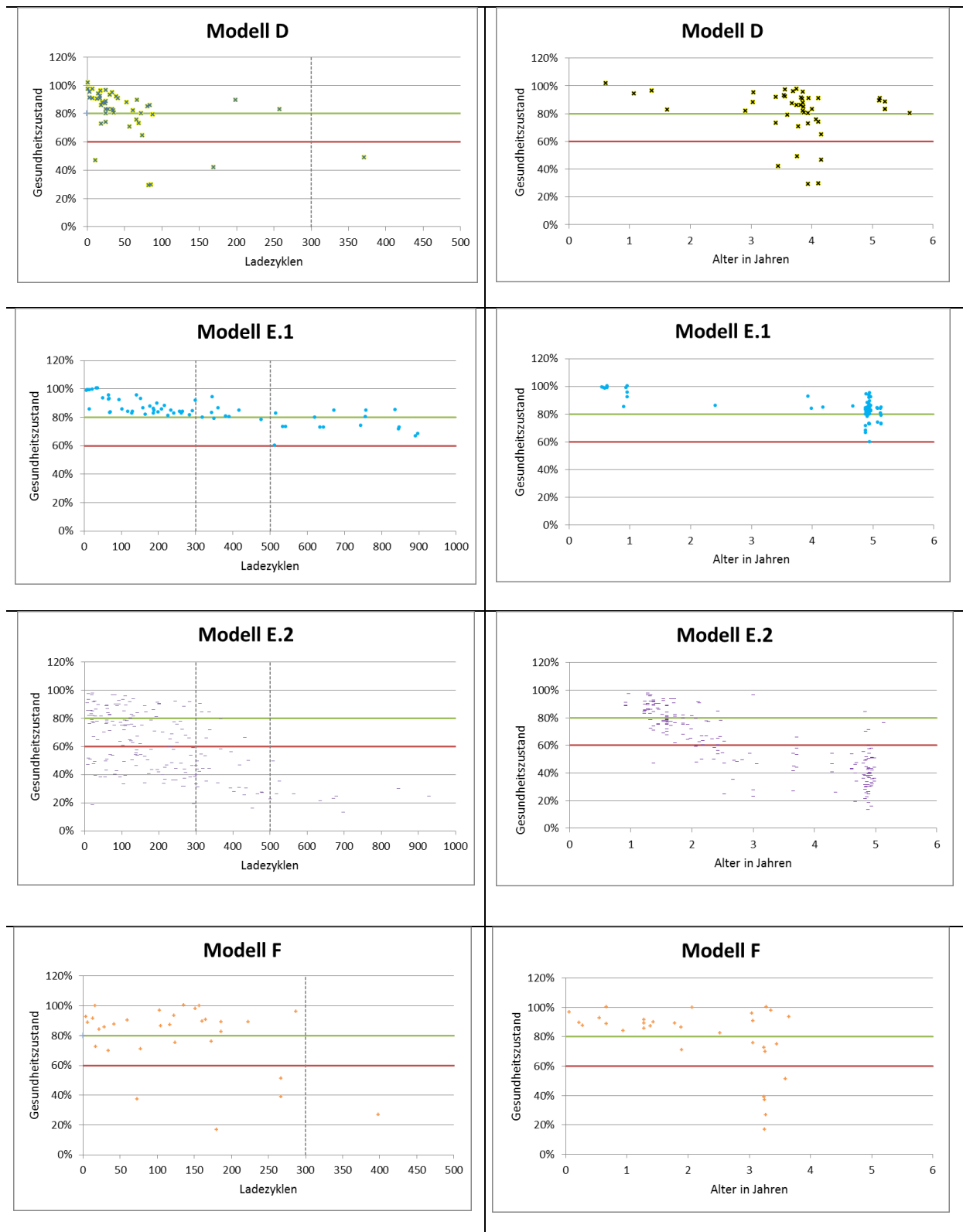
Auswertung der Daten nach Modell

Im nächsten Schritt wurden die Datensätze nach Modell sortiert grafisch ausgewertet, indem die Ladezyklen gegen den Gesundheitszustand sowie das Alter der Akkus gegen den Gesundheitszustand aufgetragen wurden (Abbildung 32).

In der Industrie wird das Absinken der speicherbaren Kapazität auf 80 % oftmals mit dem Lebensende eines Akkus gleichgesetzt (vgl. DIN EN 60254-1). Die DIN EN 61960 (siehe Kapitel 3.1.3) setzt das Lebensende des Akkus bei 60 % der Nennkapazität an. Beide Werte sind durch Markierungen in den Graphiken angezeigt. Des Weiteren sind Markierungen bei 300, 500 und 1000 Ladezyklen gesetzt. Diese beziehen sich auf typische Herstellerangaben zur Zyklenbeständigkeit der Akkus, bevor diese 80 % ihrer Nennkapazität unterschreiten.

Abbildung 32: Grafische Einzelauswertung der AfB-Daten nach Notebook-Modell





Einige Akkus scheinen bereits nach wenigen Dutzend Ladezyklen nur noch 20 bis 40 % ihrer Nennkapazität speichern zu können. Hier ist zu beachten, dass in der vorliegenden Darstellung die Zyklenbeständigkeit nicht isoliert von der kalendarischen Alterung der Akkus betrachtet werden kann, da die Effekte gleichzeitig auftreten. Je nach Nutzerverhalten kann ein Akku trotz weniger durchlaufener Ladezyklen bereits mehrere Jahre alt sein, was eine deutliche Kapazitätsverminderung bedeuten kann. Beispielsweise kann das der Fall sein, wenn das Notebook überwiegend im Netzbetrieb arbeitet, wenn es also an eine Dockingstation oder ein Netzkabel angeschlossen ist.

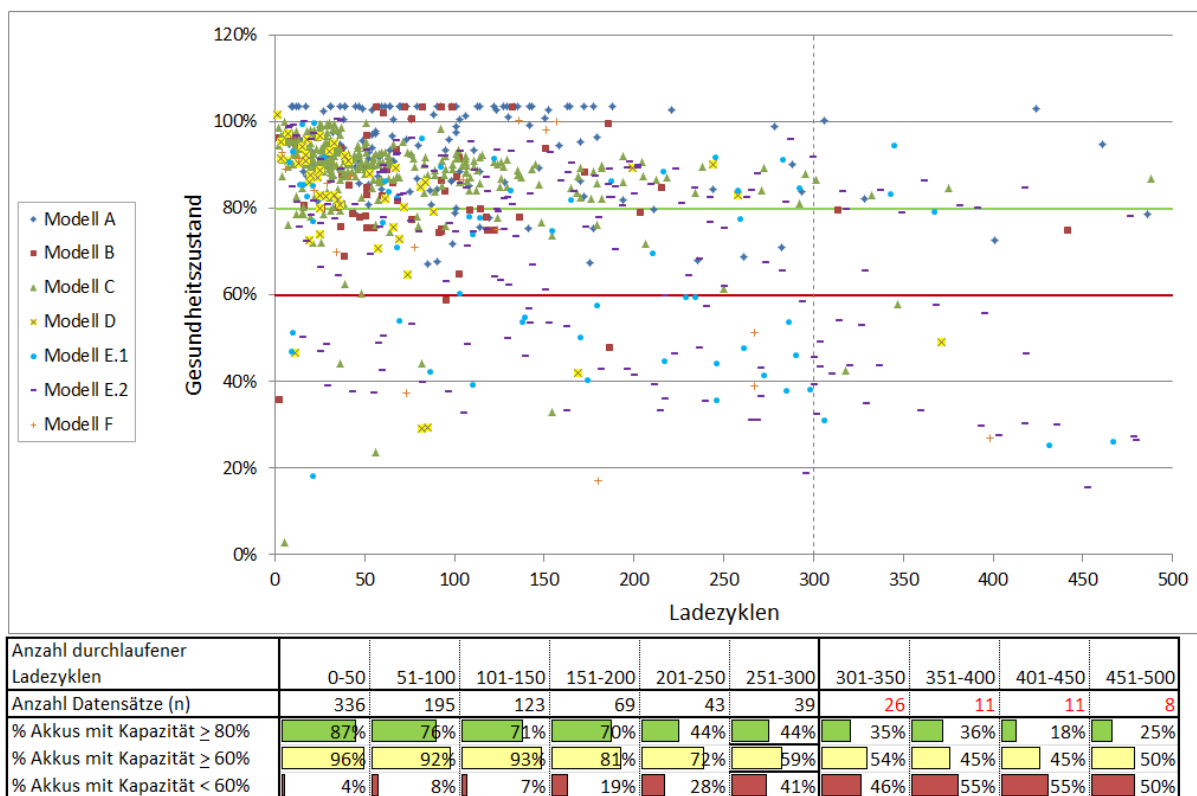
Wie bereits eingangs erwähnt sind Unregelmäßigkeiten in einigen Datensätzen erkennbar, deren Plausibilität aber nicht objektiv ausgeschlossen werden kann (vgl. S.67). Bei den Modellen A und B des gleichen Herstellers ist eine Reihe von Datenpunkten auffällig. Für etliche Akkus der Modelle A und B wird ein Gesundheitszustand von über 100 % angegeben, obwohl sie bereits mehr als 100 oder 150 Ladezyklen durchlaufen haben sollen. Bei Modell A wird für einige Akkus, die noch keinen Ladezyklus durchlaufen haben sollen, ein deutlich reduzierter Gesundheitszustand angegeben.

Im Modell E wurden Akkus von zwei verschiedenen Herstellern verbaut. Wie in den zugehörigen Diagrammen in Abbildung 32 zu erkennen ist, unterscheiden sich die Akkus der Modelle E.1 und E.2 in der vorhandenen Stichprobe bzgl. ihrer Zyklenbeständigkeit erheblich. Während der Gesundheitszustand der Akkus des Modells E.1 auch nach über 800 Ladezyklen zwischen 60 % und 80 % liegt, unterschreiten die Akkus des Modells E.2 die 60 %-Grenze bereits im Bereich zwischen 300 und 500 Ladezyklen. Des Weiteren streuen die dem Modell E.2 zugehörigen Datenpunkte zum Gesundheitszustand und zum Alter der Akkus wesentlich stärker als dies bei Modell E.1 der Fall ist.

Bei der Betrachtung der Diagramme, die das Alter der Akkus gegen ihren Gesundheitszustand auftragen, muss bedacht werden, dass nicht die kalendarische Alterung an sich zu erkennen ist. Die Effekte der Nutzung (Zyklisierung) und die der kalendarischen Alterung treten parallel auf und können anhand der erhobenen Daten nicht separat dargestellt werden. Weiterhin wird darauf hingewiesen, dass die Angabe zum Alter der Akkus neben der Nutzungsphase auch die mögliche Lagerung beim Kunden bzw. bei AfB vor der Datenerhebung enthält, wie eingangs beschrieben.

Modellübergreifende Auswertung

In Abbildung 33 sind die Datenpunkte aller Modelle gemeinsam abgebildet. Die Auswertung in der Tabelle unterhalb der Grafik zeigt jeweils den prozentualen Anteil der Akkus, die nach einer bestimmten Zyklenzahl noch mindestens 80 % ($\geq 80\%$), mindestens 60 % ($\geq 60\%$) oder weniger als 60 % ($< 60\%$) ihrer Nennkapazität speichern und abgeben können. Die Ladezyklen auf der X-Achse werden in Intervallen von je 50 Ladezyklen zusammengefasst. Die Anzahl vorhandener Datensätze oberhalb von 300 Ladezyklen ist verhältnismäßig gering, womit die statistische Aussagekraft der Stichprobe in diesem Bereich geringer wird. Der Bereich über 500 Ladezyklen wird nicht dargestellt, da nur insgesamt 27 Akkus diese Grenze übersteigen (vgl. Abbildung 32 Modelle E.1 und E.2). Das Diagramm zeigt somit 861 Datensätze.

Abbildung 33: Modellübergreifende Darstellung und Auswertung der Felddaten von AfB

Wie zu erwarten ist, nimmt der Anteil der Akkus mit einem Gesundheitszustand von mindestens 80 % und mindestens 60 % mit steigender Anzahl durchlaufener Ladezyklen ab. Im gleichen Maße nimmt der Anteil der Akkus mit einem Gesundheitszustand von unter 60 % zu. Die Anzahl der Datensätze nimmt ab 300 Ladezyklen erheblich ab. Dies ist allerdings auch auf die ungleichmäßige Verteilung der betrachteten Notebook-Modelle über die Intervalle zurückzuführen.

3.2.3 Auswertung der Felddaten von coconutBattery

Der Entwickler der MacOS Anwendung coconutBattery ermöglichte den direkten Zugriff auf eine umfangreiche Datenbank. Diese Datenbank enthielt zum Zeitpunkt der Datenübermittlung im Oktober 2013 mehr als 54.600 Datensätze. Anders als bei den Daten von AfB werden in der Regel mehrere Datensätze von einem Akku aufgenommen. Die Datenbank enthielt Daten von mehr als 22.400 individuellen Akkus, d.h. dass die Datenbank im Durchschnitt mehr als zwei Datensätze je Akku aufweist, die jeweils zu unterschiedlichen Zeitpunkten an coconutBattery übermittelt wurden.

Während die bei AfB erhobenen Daten von Notebook-Akkus stammen, die eine (erste) Nutzungsphase bereits durchlaufen haben und bei AfB zum Wiederverkauf aufbereitet werden, erhält coconutBattery-Daten von Akkus, die sich noch in der aktiven Nutzungsphase befinden. Hier ist der Vorgang der Datenaufnahme in die Datenbank wie folgt zu verstehen: Der Nutzende installiert die Software coconutBattery. Bei Einwilligung des Nutzenden werden Daten zum Gesundheitszustand des Akkus an die zentrale Datenbank von coconutBattery übermittelt. Die Datensätze werden anonym (d.h. ohne Informationen über den Nutzenden) übermittelt, jedoch sendet jeder Akku eine individuelle Identifikationsnummer an die Datenbank. Dem Nutzer oder der Nutzerin wird ein Vergleichswert übermittelt, der den Gesundheitszustand des eigenen Akkus mit dem anderer Nutzender vergleicht. Dieser Vorgang kann wiederholt eintreten: Falls die Nutzerin oder der Nutzer vom gleichen Gerät aus wiederholt Datensätze an die coconutBattery-Datenbank überträgt, liegen zum entsprechenden Akku mehrere Datensätze zum Gesundheitszustand zu verschiedenen Zeitpunkten vor.

Analog zu den bei AfB erhobenen Datensätzen liegen auch hier keine Informationen zu Nutzungsprofilen vor. Im Gegensatz zu den Business-Notebooks bei AfB können die Notebooks der coconutBattery Datenbank tendenziell, aber nicht ausschließlich, dem Consumer-Bereich zugeordnet werden. Der Einsatz dieser Notebooks in Wirtschaft oder Verwaltung ist auch aus dem Grund nicht plausibel, da zu vermuten ist, dass aus Sicherheitsgründen das Auslesen von Daten aus firmeneigenen Notebooks in eine firmenfremde Datenbank nicht gestattet ist. Weiterhin ist bezüglich dieser Daten darauf hinzuweisen, dass die entsprechende Software nicht bereits vorinstalliert ist, sondern erst durch den Benutzer bewusst auf dem Gerät installiert wird. Es ist also durchaus möglich, dass bevorzugt an einer Akkuschonung ihrer Geräte interessierte Nutzerinnen und Nutzer die Software installierten oder durch andere Gründe eine nicht repräsentative Stichprobe aus den Notebook-Nutzenden entstand.

Inhalt und Zusammensetzung der Datenbank

Die Datenbank enthielt etwa zu einem Drittel unvollständige Daten, die zunächst entfernt wurden. In diesen Datensätzen war beispielsweise keine Angabe zur Anzahl durchlaufener Ladezyklen enthalten.

Um eine Vergleichbarkeit mit der AfB-Datenbank herzustellen, wurde die folgende Anpassung der Datenstruktur der coconutBattery Datenbank vorgenommen:

- ▶ Von jedem Akku wird nur der zeitlich letzte übermittelte Datensatz in die Auswertung einbezogen. So wird sichergestellt, dass einzelne Akkus, von denen mehrere Datensätze vorliegen, die Ergebnisse nicht verfälschen

Nach diesen Schritten enthielt die Datenbank noch 19.911 nutzbare Datensätze. Diese stammen von drei unterschiedlichen Notebook-Modellen des gleichen Herstellers, die jeweils in einer unterschiedlichen Anzahl von Modellvarianten vorliegen (siehe Tabelle 11). Die insgesamt 39 Modellvarianten unterscheiden sich unter anderem im Markteintritt, den Akkukennndaten und der Anzahl vorhandener Datensätze in der Datenbank. Der Übersichtlichkeit halber wird nur zwischen den drei Modellen unterschieden und die relevanten Datenpunkte werden in Bereichen angegeben.

Tabelle 11: Anonymisierte Auflistung der in der coconutBattery Datenbank enthaltenen Notebook-Modelle in verschiedenen Ausführungen (plausible Datensätze)

Bezeichnung	Zahl der Modellvarianten	Markteintritt (Bandbreite)	Displaygröße	Akkukapazität (Bandbreite)	Anzahl Datensätze	Anteil am Datenpool
Modell G	8	2006 - 2010	13 Zoll	5020 – 5770 mAh	2.792	14,0 %
Modell H	10	2008 - 2013	11 Zoll 13 Zoll	5090 – 7150 mAh	4.131	20,7 %
Modell I	21	2007 - 2013	13 Zoll 15 Zoll 17 Zoll	5500 – 8450 mAh	12.988	65,2 %
Summe					19.911	100 %

Analog zu den bei AfB erhobenen Daten enthalten die in der coconutBattery Datenbank vorhandenen Datensätze mindestens die folgenden Datenpunkte:

- ▶ Herstellungsdatum des Akkus
- ▶ Nennkapazität

- Kapazität bei voller Ladung
- Anzahl durchlaufener Ladezyklen

Zusätzlich enthalten die Datensätze die folgende Angabe:

- Alter des Akkus in Monaten

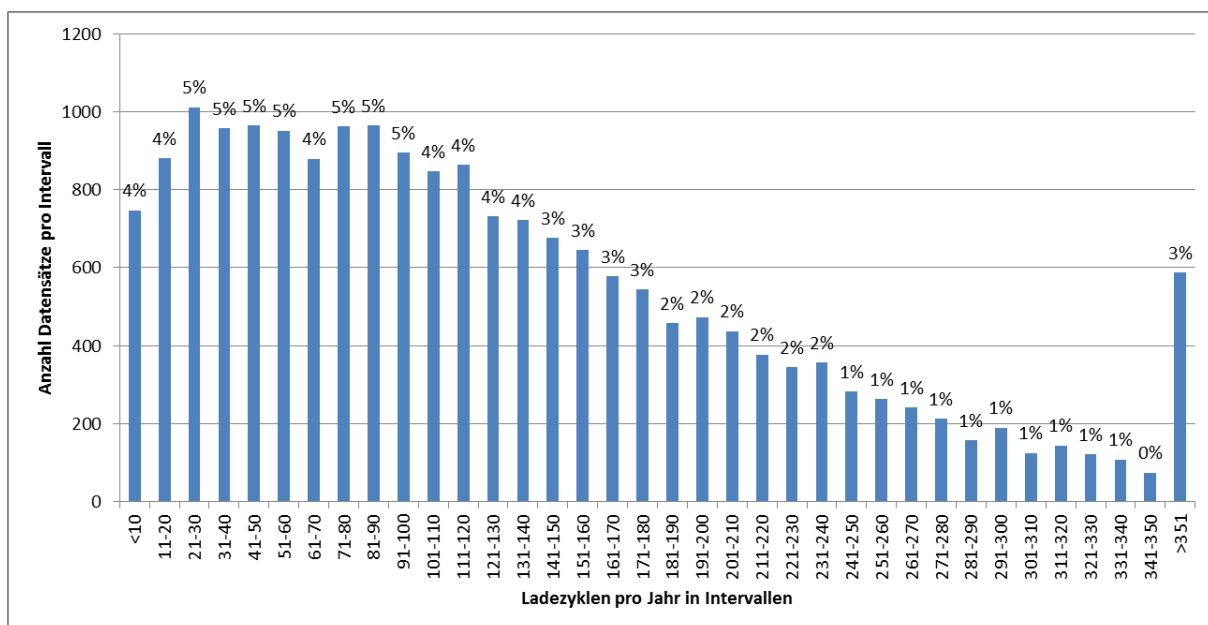
Analog zu den AfB Daten wurden daraus die folgenden zusätzlichen Daten ermittelt:

- Gesundheitszustand
- Nutzungsintensität

Darstellung der Nutzungsintensität

Die ermittelte Nutzungsintensität der Akkus aus der coconutBattery-Datenbank unterscheidet sich erheblich von der Nutzungsintensität der AfB-Notebooks. Die Notebooks aus der coconutBattery-Datenbank sind offenbar zu einem erheblich größeren Teil in der mobilen Nutzung im Akkubetrieb als die Notebooks bei AfB. Abbildung 34 zeigt die Verteilung der vorhandenen Datensätze über die Nutzungsintensität in Ladezyklen pro Jahr. Die Verteilung verläuft gleichmäßiger und ein klarer Schwerpunkt ist nicht erkennbar. Die Bandbreite der abgebildeten Nutzungsintensität der Akkus ist wesentlich höher als bei AfB. Immerhin 3 % der Akkus werden offenbar durchschnittlich mehr als 350-mal pro Jahr vollständig aufgeladen

Abbildung 34: Verteilung der Nutzungsintensität der Akkus in der coconutBattery Datenbank

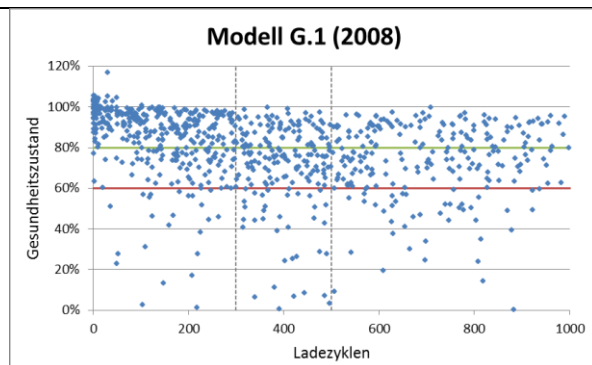


Auswertung der Daten nach Modell

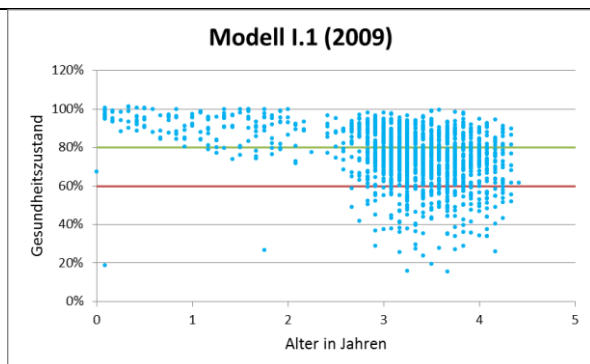
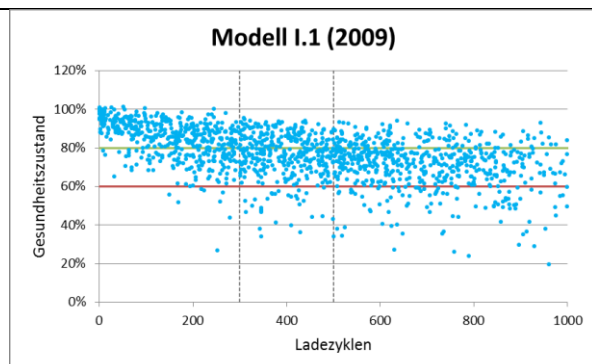
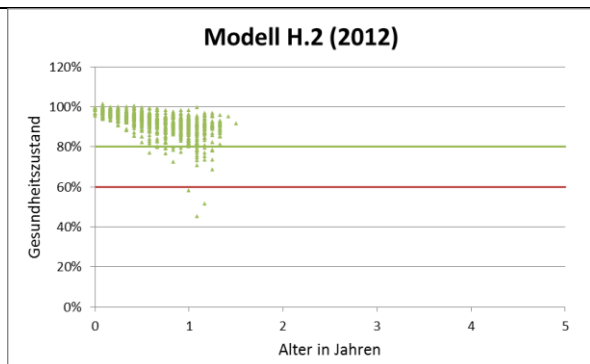
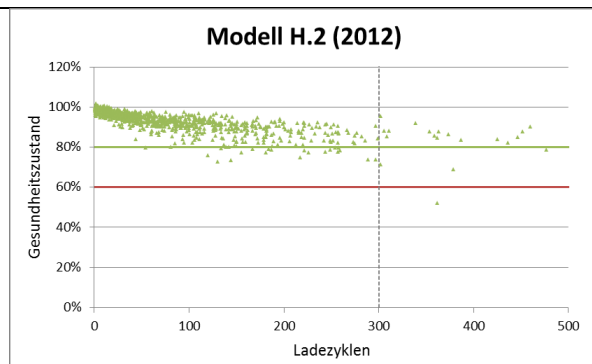
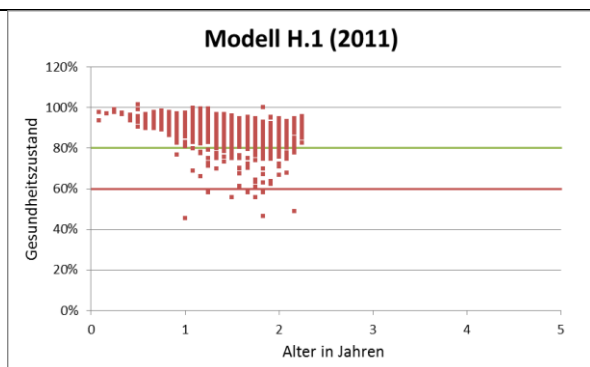
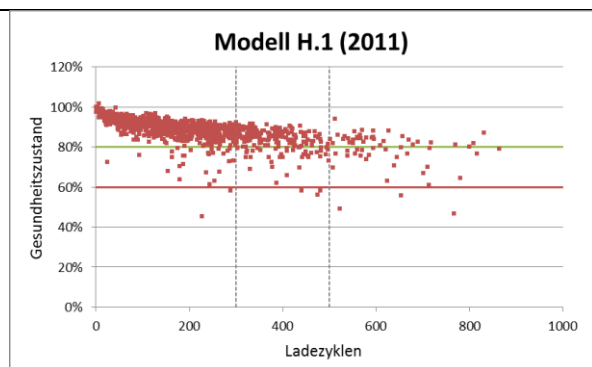
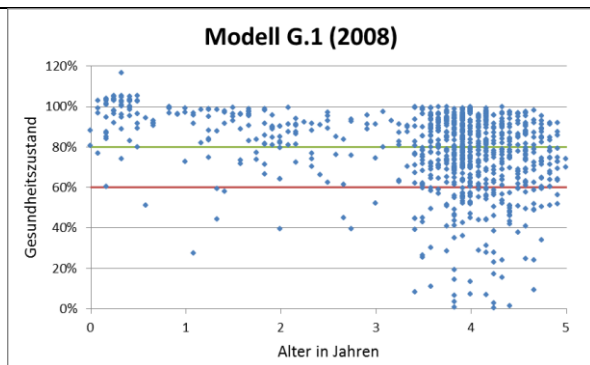
Aufgrund der großen Vielfalt an Modellvarianten (insgesamt 39) wurden lediglich einige Modellvarianten exemplarisch grafisch ausgewertet. Von den Modellen G und H wurden Modellvarianten ausgewertet, die den größten Anteil bezogen auf Stückzahlen ausmachen. Für Modell I wurden neben der Modellvariante mit der größten Stückzahl zusätzlich zwei weitere Modelle ausgewertet, die ebenfalls in großer Stückzahl vertreten sind und die eine große Bandbreite bezogen auf den Markteintritt aufweisen.

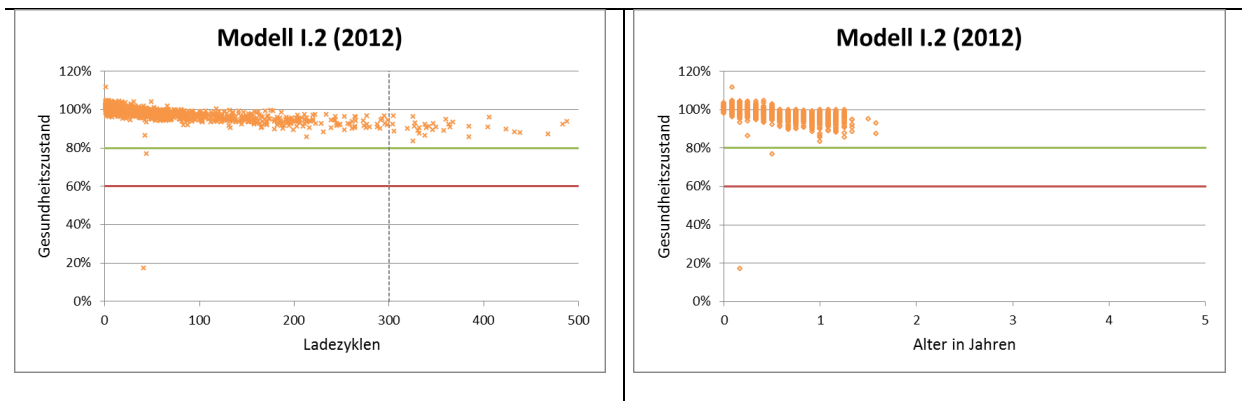
Abbildung 35: Grafische Einzelauswertung der coconutBattery Daten nach Notebook-Modell

Gesundheitszustand nach Ladezyklen



Gesundheitszustand nach Alter der Akkus



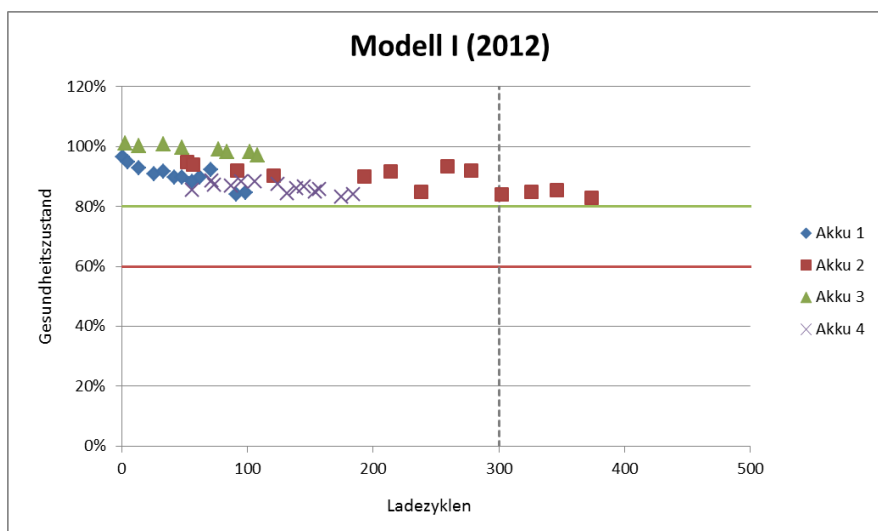


Für die Diagramme, die den Gesundheitszustand der Akkus gegen ihr Alter darstellen, wurde die im Datensatz enthaltene Angabe zum Alter des Akkus in Monaten (in ganzen Zahlen) verwendet. Dies erklärt die größere Auflösung der Diagramme im Vergleich zu den für die AfB-Daten erstellten Diagramme.

Die grafische Auswertung lässt vermuten, dass die Streuung der Daten bei jüngeren Modellen (Markteintritt ist im Diagrammtitel vermerkt) tendenziell geringer ausfällt, als bei älteren Modellen.

Wie eingangs beschrieben liegen zu vielen Akkus mehrere Datensätze in der coconutBattery Datenbank vor, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten an die Datenbank übermittelt wurden. Von diesen mehrfachen Einträgen wurde in den vorangegangenen Auswertungen, wie beschrieben, nur der jeweils jüngste Datensatz berücksichtigt. Akkus, die mehr als zehn Datensätze übermittelt haben, ermöglichen jedoch einen Blick auf den Verlauf der Kapazitätsabnahme. Deshalb wurden sie separat grafisch ausgewertet, um das zu erwartende Absinken des Gesundheitszustandes mit zunehmender Nutzung und zunehmendem Alter der Akkus sichtbar zu machen. Abbildung 36 zeigt beispielhaft den Verlauf des Gesundheitszustandes von vier individuellen Akkus einer Modellvariante von Modelle I (Markteintritt 2012).

Abbildung 36: Exemplarische Darstellung des Verlaufs des Gesundheitszustandes ausgewählter individueller Akkus

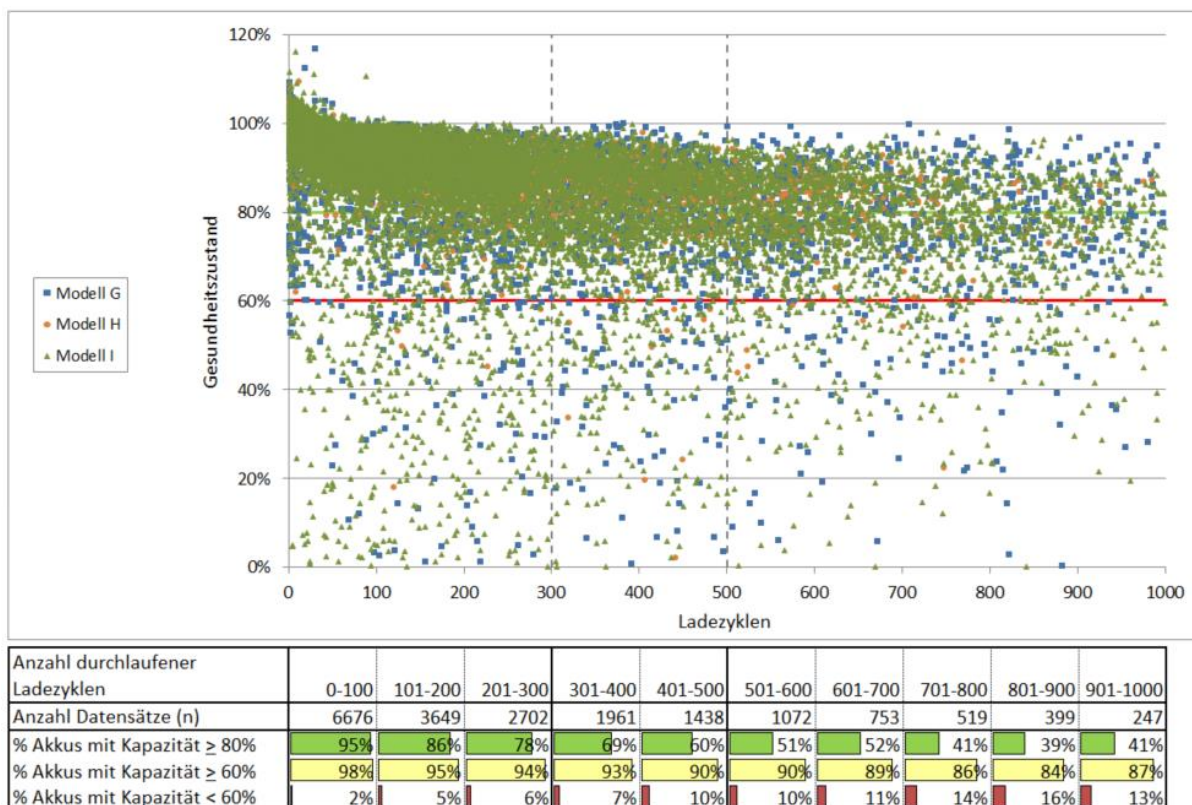


Der Gesundheitszustand nimmt erwartungsgemäß tendenziell mit der Nutzung ab, verläuft jedoch nicht unbedingt linear. Teilweise nimmt die Kapazität im Verlauf der Nutzung offenbar wieder zu. Dies wird als Schwankung in der Kapazität interpretiert, die durch äußere Einflussfaktoren verursacht wird (bspw. die Umgebungstemperatur, vgl. temperaturbedingte Schwankungen in Abbildung 21).

Modellübergreifende Auswertung

In Abbildung 33 sind die Datenpunkte aller Modelle gemeinsam abgebildet. Die statistische Auswertung in der Tabelle unterhalb der Grafik zeigt jeweils den prozentualen Anteil der Akkus, die nach einer bestimmten Zyklenzahl noch mindestens 80 % ($\geq 80\%$), mindestens 60 % ($\geq 60\%$) oder weniger als 60 % ($< 60\%$) ihrer Nennkapazität speichern und abgeben können. Die Datenmenge ist im Vergleich zur AfB-Datenbank erheblich höher. Des Weiteren ist der Bereich der durchlaufenen Ladezyklen bis 1.000 Ladezyklen erweitert (X-Achse), während bei den AfB-Daten nur wenige Akkus mehr als 500 Ladezyklen durchlaufen haben.

Abbildung 37: Modellübergreifende Darstellung und statistische Auswertung der Felddaten von coconutBattery



Analog zur Auswertung der AfB-Daten wird der Anteil der Akkus mit mindestens 80 % und 60 % mit zunehmender Zahl der Ladezyklen tendenziell geringer. In der coconutBattery-Stichprobe haben nach bis zu 300 Ladezyklen noch 78 % der Akkus mindestens 80 % ihrer Nennkapazität zur Verfügung, nach bis zu 500 Ladezyklen noch 60 % und nach bis zu 1000 Ladezyklen sind es noch 41 % der Akkus.

3.2.4 Auswertung von Akkus im Alter von 5 ± 1 Jahren

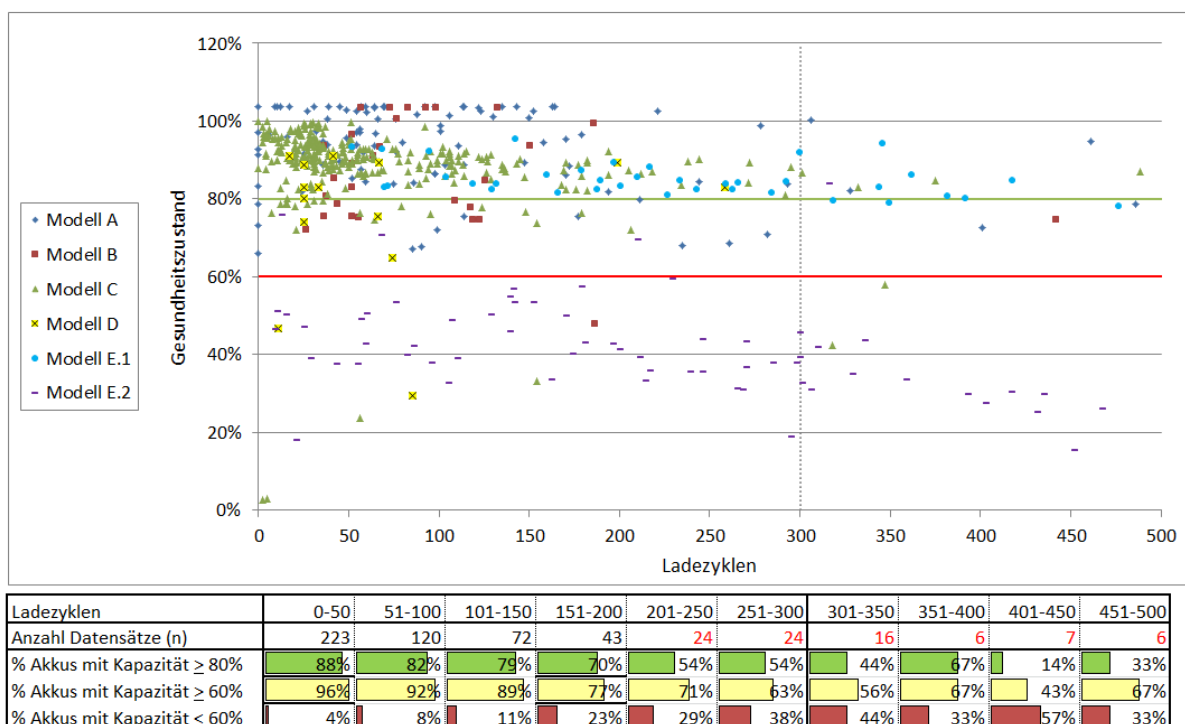
Eine der zentralen Fragen im Forschungsvorhaben ist, ob der Akku eine geringere Lebensdauer hat als das Gesamtsystem Notebook. Wie ist also der Gesundheitszustand eines Akkus nach fünf Jahren in der Nutzung im Feld einzuschätzen? Die im Vorhaben erhobenen Felddaten können als Stichprobe Anhaltspunkte dafür liefern.

Für die Gesamtauswertung wurden die Datenbanken von AfB und coconutBattery zunächst bezüglich der Altersstruktur der enthaltenen Datensätze aneinander angepasst. Dabei wurden nur die Datensätze behalten, die von Akkus stammen, die zwischen 4 und 6 Jahren alt sind. Die übrigen Datensätze wurden entfernt. Dies erlaubt Rückschlüsse auf den Gesundheitszustand von Notebook-

Akkus im Feld nach einer Nutzungsphase von 5 (± 1) Jahren. Um eine Darstellung für die AfB und coconutBattery-Daten zu erzeugen, die jeweils einen vergleichbaren Ausschnitt zeigt, wurde der Bereich der Darstellung auf bis zu 500 durchlaufene Ladezyklen beschränkt. Die Datenmenge für Akkus mit mehr als 500 Ladezyklen ist in der AfB-Datenbank sehr gering (vgl. Abbildung 32).

Abbildung 38 zeigt die Datenpunkte der Akkus im Alter von 4 bis 6 Jahren mit bis zu 500 durchlaufenen Ladezyklen aus der AfB-Datenbank. Bei dieser Betrachtung entfallen 347 von insgesamt vorhandenen 888 Datensätzen, die Summe der betrachteten Datensätze verringert sich somit auf 541. Das Alter aller Akkus von Modell F liegt unter 4 Jahren, diese tauchen daher nicht in der Auswertung auf (vgl. Abbildung 32, Modell F).

Abbildung 38: Auswertung der Daten von Akkus im Alter von 5 (± 1) Jahren der AfB-Datenbank

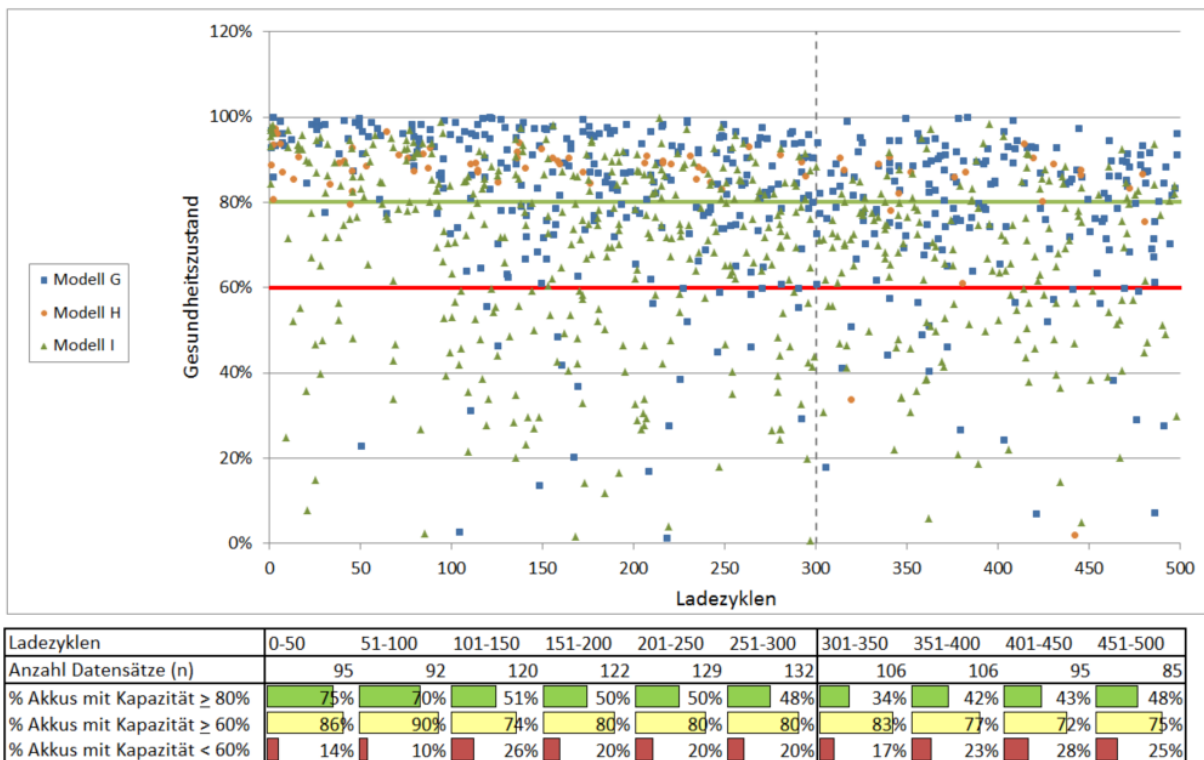


Den hohen Anteil von Akkus mit mindestens 80 % und 60 % ihrer Nennkapazität im Bereich bis zu 100 Ladezyklen wird vor allem durch eine Häufung von Datenpunkten des Modells C verursacht. Die Anzahl der vorhandenen Datensätze pro Intervall nimmt von links nach rechts ab.

Unregelmäßigkeiten treten hier insbesondere im Bereich ab 350 Ladezyklen auf. Wegen der sehr geringen Anzahl an Daten in diesem Bereich ist eine Auswertung nicht sinnvoll.

Im Fall der coconutBattery Datenbank entfallen bei der Betrachtung der 4 bis 6 Jahre alten Akkus 18.045 von 19.911 Datensätzen, es bleiben 1.866 Datensätze erhalten. Von diesen sind die 1.082 Datensätze der Notebooks abgebildet, die bis zu 500 Ladezyklen durchlaufen haben.

Abbildung 39: Auswertung der Daten von Akkus im Alter von 5 (± 1) Jahren der coconutBattery Datenbank



Analog zur Darstellung der AfB-Daten verhält sich der Verlauf des Gesundheitszustandes über die Nutzung in der coconutBattery-Stichprobe zum überwiegenden Teil erwartungsgemäß.

Unregelmäßigkeiten in Form eines größer werdenden Anteils von Akkus mit mindestens 80 % und 60 % Gesundheitszustand sind dennoch im Bereich von 400 bis 500 Ladezyklen zu beobachten. Dies ist allerdings auch auf die ungleichmäßige Verteilung der betrachteten Notebook-Modelle über die Intervalle zurückzuführen.

3.2.5 Berechnung von Szenarien der Nutzung

Die Auswertung der Felddaten zur Lebensdauer dient der Verwendung für einen generischen Akku im Rahmen einer Ökobilanz. In Verbindung mit bekannten Nutzungsmustern bzw. einer bekannten Nutzungsintensität kann die oben dargestellte Verteilung genutzt werden, um abzuschätzen, ob ein generischer Akku nach einer bestimmten Zyklenzahl noch über 80 %, über 60 % oder weniger als 60 % seiner Nennkapazität speichern und abgeben kann.

Festlegen der Rahmenbedingungen und Szenarien

Der Schwerpunkt lag auf der Bestimmung der Lebensdauer eines Akkus zur Verwendung in einem Notebook, das in verwaltungsähnlicher Umgebung eingesetzt wird. Aus diesem Grund wurde zur Ableitung der Szenarien primär auf die AfB-Datenbank zurückgegriffen. Als Alternative wurde jedoch ebenfalls die coconutBattery Datenbank herangezogen, die tendenziell dem Consumer-Bereich zugeordnet wird (vgl. Abschnitt 3.2.3).

Basierend auf dem Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes „Zeitlich optimierter Ersatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten“ (Prakash et al. 2012) wurde die folgende Annahme bzgl. der Nutzungsdauer von Notebooks getroffen:

- Die Nutzungsdauer von Notebooks liegt bei 5 Jahren

Die Nutzungsintensität wurde aus der bei AfB erhobenen Stichprobe zur Lebensdauer von Notebooks in der Verwaltung (vgl. Abschnitt 3.2.2) über das arithmetische Mittel berechnet. Um Ausreißer nach oben und unten nicht in die Berechnung einzubeziehen, wurde das um 3 % getrimmte arithmetische Mittel angewandt:

- Das arithmetische Mittel der Nutzungsintensität liegt bei 31,1 Ladezyklen (LZ) pro Jahr.

Als Basisfall orientierten wir uns an der o.g. Zahl und rundeten diese auf 30 LZ/Jahr ab (Szenario 2). Davon ausgehend wurden Szenario 1 (stationäre Nutzung) und Szenario 3 (hohe mobile Nutzung) abgeleitet. Die Begrifflichkeiten (mittlere und hohe mobile Nutzung) beziehen sich dabei stets auf die Nutzung von Notebooks im Kontext der Verwaltung. Im Consumerbereich können die Zahlen im Vergleich wesentlich höher liegen (vgl. Abschnitt 3.2.3).

- **Szenario 1:** Stationäre Nutzung: 10 LZ/Jahr
- **Szenario 2:** Mittlere mobile Nutzung: 30 LZ/Jahr (Basisfall)
- **Szenario 3:** Hohe mobile Nutzung: 50 LZ/Jahr

Berechnung des Gesundheitszustandes der Akkus nach Szenarien

Szenario 1: Nutzung eines Notebooks in der Verwaltung überwiegend im Netzbetrieb

Ein Notebook wird bei der verwaltungsähnlichen Nutzung stationär genutzt und nur selten vom Netz getrennt mobil betrieben. Die mobile Nutzungsintensität ist dementsprechend gering und wird mit 10 Ladezyklen pro Jahr angenommen. Die Anzahl der durchlaufenen Ladezyklen nach 5 Jahren entspricht:

$$\text{Ladezyklen nach 5 Jahren Nutzung: } 10 \text{ Ladezyklen pro Jahr} * 5 \text{ Jahre} = 50 \text{ Ladezyklen}$$

Anhand der Auswertung der Felddaten der AfB-Datenbank (Abbildung 38) lässt sich die folgende Aussage treffen: Für einen generischen Akku, der nach 5 ± 1 Jahren in einer verwaltungsähnlichen Nutzung 50 Ladezyklen durchlaufen hat (Intervall 0-50 LZ in den beiden o.g. Abbildungen), gilt die in Tabelle 12 (Spalte AfB) angegebene Verteilung:

Tabelle 12: Verteilung des Gesundheitszustandes in Szenario 1

Gesundheitszustand	Prozentualer Anteil der Akkus der Stichproben (Akkus im Alter 4-6 Jahre)	
	AfB (n=223)	coconutBattery (n=95)
≥ 80 %	88 %	75 %
≥ 60 %	96 %	86 %
< 60 %	4 %	14 %

Nach 50 durchlaufenen Ladezyklen und 4-6 Jahren Nutzungszeit hatten im Fall der bei AfB erhobenen Stichprobe rund 88 % der Akkus noch mindestens 80 % ihrer Nennkapazität zur Verfügung, rund 96 % der Akkus hatten noch mindestens 60 % ihrer Nennkapazität verfügbar. Rund 4 % der Akkus liegen nach 50 Ladezyklen bereits im Bereich von unter 60 % der Nennkapazität (vergleiche dazu Abbildung 38).

Wie eingangs beschrieben sind die Ergebnisse der Auswertung der coconutBattery Stichprobe (Abbildung 39) als Alternative ebenfalls in Tabelle 12 mit angegeben (rechte Spalte). Hier hatten nach 50 Ladezyklen und 4-6 Jahren Nutzungszeit rund 75 % der Akkus noch mindestens 80 % ihrer Nennkapazität zur Verfügung, rund 86 % der Akkus hatten noch mindestens 60 % ihrer

Nennkapazität verfügbar. Rund 14 % der Akkus liegen nach 50 Ladezyklen und 4-6 Jahren Nutzung bereits im Bereich von unter 60 % der Nennkapazität (vergleiche dazu Abbildung 39).

Szenario 2: Nutzung eines Notebooks in der Verwaltung mit höherem Anteil mobiler Nutzung

Ein Notebook wird bei der verwaltungsähnlichen Nutzung hauptsächlich stationär, jedoch auch regelmäßig mobil im Akkubetrieb genutzt, beispielsweise bei Dienstreisen. Die mobile Nutzungsintensität ist höher als in Szenario 1 und beläuft sich auf 30 Ladezyklen pro Jahr. Die Anzahl der durchlaufenen Ladezyklen nach 5 Jahren entspricht:

$$\text{Ladezyklen nach 5 Jahren Nutzung: } 30 \text{ Ladezyklen pro Jahr} * 5 \text{ Jahre} = 150 \text{ Ladezyklen}$$

Aus den Felddaten (Abbildung 38 und Abbildung 39) lässt sich für Akkus, die nach 5 ± 1 Jahren in einer verwaltungsähnlichen Nutzung 150 Ladezyklen durchlaufen haben (Intervall 101-150 LZ in den beiden o.g. Abbildungen), die in Tabelle 13 dargestellte Verteilung ableiten:

Tabelle 13: Statistische Verteilung des Gesundheitszustandes in Szenario 2

Gesundheitszustand	Prozentualer Anteil der Akkus der Stichproben (Akkus im Alter 4-6 Jahre)	
	AfB (n=72)	coconutBattery (n=120)
$\geq 80 \%$	79 %	51 %
$\geq 60 \%$	89 %	74 %
$< 60 \%$	11 %	26 %

Szenario 3: Nutzung eines Notebooks in der Verwaltung mit hohem Anteil mobiler Nutzung

Ein Notebook wird bei der verwaltungsähnlichen Nutzung mehrheitlich stationär genutzt, jedoch oftmals mobil im Akkubetrieb verwendet. Die mobile Nutzungsintensität ist nochmals höher als in Szenario 2 und beläuft sich auf 50 Ladezyklen pro Jahr. Die Anzahl der durchlaufenen Ladezyklen nach 5 Jahren entspricht:

$$\text{Ladezyklen nach 5 Jahren Nutzung: } 50 \text{ Ladezyklen pro Jahr} * 5 \text{ Jahre} = 250 \text{ Ladezyklen}$$

Aus den Felddaten (Abbildung 38 und Abbildung 39) lässt sich für Akkus, die nach 5 ± 1 Jahren in einer verwaltungsähnlichen Nutzung 250 Ladezyklen durchlaufen haben (Intervall 201-250 Ladezyklen in den beiden o.g. Abbildungen), die in Tabelle 14 dargestellte Verteilung ableiten:

Tabelle 14: Statistische Verteilung des Gesundheitszustandes in Szenario 3

Gesundheitszustand	Prozentualer Anteil der Akkus der Stichproben (Akkus im Alter 4-6 Jahre)	
	AfB (n=24)	coconutBattery (n=129)
$\geq 80 \%$	54 %	50 %
$\geq 60 \%$	71 %	80 %
$< 60 \%$	29 %	20 %

3.2.6 Diskussion

Zur Abschätzung der Lebensdauer von Notebooks im Feld wurden Daten aus zwei verschiedenen Quellen ausgewertet. Die Daten von AfB bilden einen geringen Ausschnitt der Notebooks im Markt. Die Auswahl wurde zufällig durch die Geräte bestimmt, die zum Zeitpunkt der Datenerhebung bei

AfB verfügbar waren. Die Notebooks stammen aus einer verwaltungsnahen Nutzung. Die Daten kommen damit einer Stichprobe gleich und die Ergebnisse können nicht auf andere Geräte oder Nutzungsmuster übertragen werden. Die Datenbasis der coconutBattery Datenbank ist wesentlich umfangreicher. Dennoch sind ausschließlich Notebooks eines einzelnen Herstellers enthalten. Die Daten bilden ebenfalls nur einen begrenzten Ausschnitt des Notebookmarktes ab und die Ergebnisse können ebenfalls nicht als repräsentativ angesehen werden.

Aus den bei AfB erhobenen Felddaten lässt sich entnehmen, dass die mobile Nutzungsintensität des Akkus (Ladezyklen / Alter in Jahren) von Notebooks in der verwaltungsnahen Nutzung gering ausfällt. Diese liegt hier bei durchschnittlich 31 Ladezyklen pro Jahr. Zur Erweiterung der Datenbasis wurden beim Umweltbundesamt (UBA) für 37 Notebooks die Zahl der Ladezyklen und das Alter der Akkus erhoben. Die berechnete durchschnittliche Nutzungsintensität beträgt hier knapp 24 Ladezyklen im Jahr und liegt damit noch unter der Nutzungsintensität der bei AfB ausgelesenen Akkus. Dies kann damit begründet werden, dass ein hoher Anteil der Notebooks beim UBA von Beschäftigten genutzt werden, deren Arbeitsform alternierende Telearbeit¹⁵ vorsieht. Diese Notebooks werden somit wenig mobil genutzt. Für die AfB Notebooks schließen wir ebenfalls auf einen geringer Anteil der mobilen Nutzung und einen entsprechend höheren Anteil der stationären Nutzung im Netzbetrieb schließen.

Die Nutzungsintensität bei den Akkus aus der coconutBattery-Datenbank fällt im Vergleich erheblich höher aus. Die Bandbreite der Werte reicht hier bis über 350 Ladezyklen pro Jahr. Insbesondere diese sehr hohen Werte lassen vermuten, dass die Ladezyklen möglicherweise doch nicht so gezählt werden, wie durch den Smart Battery Standard definiert. Bei Nachfrage beim Hersteller wurde bestätigt, dass ein Vollzyklus nicht anhand der Nennkapazität sondern an der gegenwärtig speicherbaren Kapazität (Full Charge Capacity) bemessen wird. Bei abnehmender Kapazität und gleichbleibender Nutzung würde sich demnach die Anzahl der Ladezyklen erhöhen.

Die Felddaten wurden ausgewertet, indem der Gesundheitszustand der Akkus gegen Ladezyklen bzw. das Alter der Akkus aufgetragen wurde. Die Daten streuen in dieser Darstellung i.d.R. stark. Die Streuung ist jedoch weniger stark bei Notebook-Modellen, die in den letzten Jahren am Markt eingeführt wurden (vgl. Abbildung 35). Hierzu liegen jedoch ausschließlich Datensätze von Notebooks eines einzelnen Herstellers vor (aus der coconutBattery-Datenbank). Rückschlüsse auf eine insgesamt positive Entwicklung durch Fortschritt in der Akkutechnologie bzw. der Herstellungsprozesse können daher nicht gezogen werden.

Unterschiede in der Qualität von Notebook-Akkus verschiedener Hersteller wurden anhand eines Notebook-Modells festgestellt, in dem der Hersteller Akkus von zwei verschiedenen Akkuherstellern verbaute. Hier liegt die Zyklenbeständigkeit der Akkus des einen Herstellers anscheinend erheblich über der Akkus des anderen Herstellers (vgl. Modell E.1 und E.2 in Abbildung 32). Im Rahmen des Expertenworkshops (Kapitel 6) wurden weitere Hinweise auf mögliche Mängel in Produktionsprozessen mancher Hersteller gegeben. Diese Erkenntnisse geben Anlass dazu, herstellerübergreifende Mindestanforderungen an die Zyklenbeständigkeit und die Herstellungsprozesse von Akkus anzustreben (für weitere Ausführungen dazu siehe Kapitel 8).

Die modellübergreifende Auswertung der AfB-Stichprobe ergab, dass nach bis zu 300 Ladezyklen nur noch 44 % der Akkus mindestens 80 % ihrer Nennkapazität zur Verfügung hatten, nach bis zu 500 Ladezyklen waren es nur noch 25 %. Bei coconutBattery sind die entsprechenden Anteile mit 78 % und 60 % bedeutend größer. Ein direkter Vergleich dieser Zahlen ist jedoch unzulässig, da die

¹⁵ Das UBA unterstützt seine Beschäftigten dabei, Berufstätigkeit und Familie besser vereinbaren zu können. Daher gestaltet es flexible Arbeitszeiten mit verschiedenen Arbeitsformen (beispielsweise Telearbeit).

Altersstruktur der erhobenen Daten und die unterschiedliche Nutzung der Akkus in den beiden Stichproben deutlich voneinander abweichen. Wie im Vergleich von Abbildung 32 und Abbildung 35 (grafische Einzelauswertung der Notebook-Modelle) zu erkennen ist, liegt der Schwerpunkt bei den Akkus von AfB im Alter von vier bis fünf Jahren. Bei den coconutBattery-Daten ergibt sich ein differenzierteres Bild und es sind wesentlich mehr jüngere Akkus enthalten.

Der Auswertung der Akkus im Alter von 5 ± 1 Jahren (Abbildung 38 und Abbildung 39) lässt sich entnehmen, dass der überwiegende Teil der Akkus der Stichproben bei AfB und coconutBattery selbst im Szenario mit hohem Anteil mobiler Nutzung nach 5 ± 1 Jahren (mit insgesamt 201 bis 250 Zyklen) noch in einem brauchbaren Zustand sind: Hier weisen noch mindestens 50 % der Akkus mindestens 80 % ihrer Nennkapazität auf; mehr als 60 % Kapazität haben immerhin noch 71 % (AfB) bzw. 80 % (coconutBattery) der Akkus.

Im direkten Vergleich weisen die Akkus der AfB Stichprobe im Bereich geringer Ladezyklen eine bessere Zyklenbeständigkeit auf als die Akkus der coconutBattery-Stichprobe. Auch hier können jedoch keine Pauschalaussagen getroffen werden. Die Häufung eines Modells im Diagramm zur AfB-Stichprobe (Modell C in Abbildung 38) im Bereich bis zu 100 Ladezyklen und oberhalb der 80 % Marke beeinflusst hier die statistische Verteilung maßgeblich. Die ausschließliche Betrachtung der vier bis sechs Jahre alten Akkus bedeutet im Übrigen auch, dass die betrachtete Akkutechnologie mindestens vier bis sechs Jahre alt ist und nicht mehr den aktuellen Stand der Technik abbildet.

Beide Datenbanken enthalten einige Datensätze, deren Plausibilität angezweifelt wird. Ob die entsprechenden Daten fehlerhaft im Akku gespeichert oder nicht korrekt ausgelesen werden, konnte im Vorhaben nicht abschließend geklärt werden. Die Datenverfügbarkeit bei der Erhebung von Felddaten ist zusätzlich dadurch eingeschränkt, dass die Hersteller offenbar nicht die Spezifikationen des Smart Battery Systems (SBS) anwenden. Eine weitergehende Normierung der relevanten Soft- und Hardware könnte die Informationslage für Nutzende deutlich verbessern.

3.3 Abschließende Diskussion zur Lebensdauerbestimmung

Die Ergebnisse der Untersuchungen unter Laborbedingung können als Annäherung an das theoretische Potential von Akkus für IKT-Geräte der aktuellen Generation gewertet werden. Den Ergebnissen zufolge können zwei der 17 untersuchten Tablet-Akkus (DUT_02 / DUT_17) nach bis zu 4500 Ladezyklen (extrapoliert) noch 80 % ihrer ursprünglichen Kapazität speichern und abgeben. Die Hälfte der getesteten Akkus hatte nach 1900 Vollzyklen noch mindestens 80 % der anfänglichen Kapazität zur Verfügung. Die Streuung der Zyklenbeständigkeit und damit der Akkulebensdauer ist auch unter Laborbedingungen hoch: Frühausfälle waren bereits nach 83 und 230 Ladezyklen zu verzeichnen. Ein weiterer Akku mit geringerer Zyklenbeständigkeit hatte 20 % seiner Kapazität nach 687 Vollzyklen verloren.

Selbst unter der Grenze von 80 % könnten die Endgeräte mit den gealterten Akkus noch zuverlässig betrieben werden. Jedoch kann auch bei der geringen Stichprobe ein Qualitätsunterschied in den untersuchten Akkus beobachtet werden. Zwei der 17 untersuchten Akkus reagierten bei einer Temperaturschwankung, die sich in einer üblichen Umgebungstemperatur von $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ bewegte, durch einen drastischen Kapazitätsverlust. Ein weiterer Akku (DUT_16), reagierte ebenfalls sensibler auf die Temperaturschwankung, erholte sich aber, sodass er weiter zyklisiert werden konnte. Nach nur wenigen Zyklen konnte auch bei DUT_16 ein rapider Kapazitätseinbruch beobachtet werden.

Wie beschrieben, sind die im Labor erzielten Ergebnisse nur sehr eingeschränkt auf reale Bedingungen übertragbar. Die Zyklenbeständigkeit ist auch bei Akkus neuerer Generation differenziert zu bewerten.

Die Felddaten zeichnen ein differenzierteres Bild. Bei einigen Modellen sinkt die Kapazität nach nur wenigen Dutzend Ladezyklen drastisch ab. Dem gegenüber stehen Modelle, deren Kapazität mit der Nutzung wesentlich flacher abfällt. In beiden Fällen ist nicht bekannt, wie diese Geräte tatsächlich genutzt worden sind. Generell bilden die Felddaten viele Faktoren ab, deren Einfluss auf die Lebensdauer wir im Vorhaben jedoch nicht bestimmen konnten.

Obwohl Frühausfälle zu verzeichnen sind, haben dennoch mehr als 50 % der Akkus der beiden Stichproben nach 5 (± 1) Jahren in der Nutzung mehr als 80 % ihrer Kapazität zur Verfügung. Im Szenario mit geringer mobiler Nutzung (Szenario 1) haben sogar mehr als 88 % der Akkus der AfB-Stichprobe nach 5 (± 1) Jahr noch mindestens 80 % ihrer Nennkapazität zur Verfügung.

Der Anteil der mobilen Nutzung von Notebooks im Akkubetrieb in der verwaltungsnahen Nutzung ist sehr gering. Für den Consumerbereich kann die Frage nach der Mindestanzahl der Ladezyklen, die ein Akku schafft, relevanter sein, da Notebooks hier offenbar wesentlich häufiger mobil im Akkubetrieb genutzt werden.

Die Frage nach den Faktoren, die im Netzbetrieb den größten Einfluss auf die kalendarische Alterung von Akkus haben, bspw. das Aufrechterhalten einer hohen Spannung im Akku oder die Wärmeentwicklung im Gerät, war nicht im Untersuchungsrahmen des Forschungsvorhabens enthalten und kann anhand der erhobenen Daten nicht beantwortet werden.

Nutzung der Daten zur Lebensdauer im Forschungsvorhaben

Im Rahmen einer Ökobilanz eines Notebooks muss die Frage beantwortet werden, ob unter den zu treffenden Annahmen der Akku im Laufe der Nutzungsphase ausgetauscht werden muss. Die Verteilung in Abschnitt 3.2.4 und die aufgestellten Szenarien in Abschnitt 3.2.5 können dabei zur Orientierung herangezogen werden. Dabei gilt es, die Einschränkungen hinsichtlich der Aussagekraft und Repräsentativität zu beachten. Des Weiteren ist die abgebildete Akkutechnologie nicht mehr auf dem neuesten Stand der Technik. Ob neuere Akkutechnologie eine wesentliche Verbesserung der Zyklenbeständigkeit mit sich bringt, kann anhand der erhobenen Daten nicht geklärt werden. Die Ergebnisse der im Labor untersuchten aktuellen Tablet-Akkus können nicht ohne weiteres auf die tatsächliche Nutzung im Gerät übertragen werden.

4 Lebenszyklusdaten

Lebenszyklusdaten umfassen die In- und Output-Flüsse eines Produktes im Verlauf seines Lebensweges. Je nach den definierten Systemgrenzen werden die Prozesse zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung betrachtet, von der Rohstoffbereitstellung bis hin zum Recycling oder zur Entsorgung. Dabei werden alle relevanten Stoff- und Energieströme aufgenommen und in einem Systemfließbild abgebildet. Zur Abbildung dieser Prozesse wurde auf die kommerziellen Ökobilanzierungssoftware und -Sachbilanzdatenbanken von GaBi Professional und ecoinvent zurückgegriffen sowie auf Daten zur Materialzusammensetzung des Akkus von einem Akku-Hersteller.

4.1 Herstellungsphase

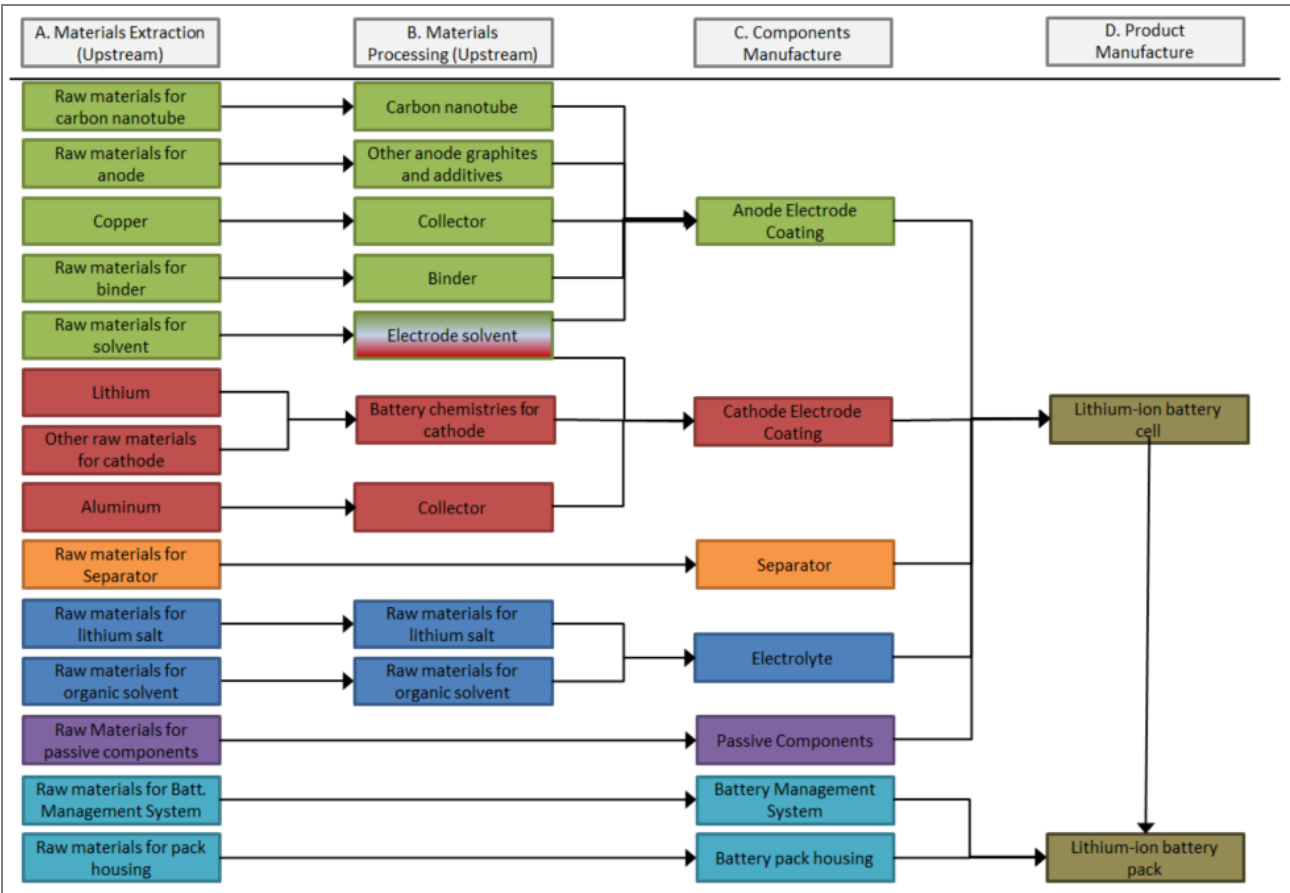
4.1.1 Produktsystem

Das Produktsystem Notebook-Akku besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten: Den Zellen, dem Batteriemanagementsystem (BMS) und dem Gehäuse. Lithium-Akkus für mobile IKT-Geräte enthalten eine oder mehrere Zellen, die in Reihe oder parallel geschaltet die Aufnahme, Speicherung und Abgabe von Energie ermöglichen. Während Smartphones und Tablet-PCs oftmals mit einer Zelle auskommen, werden für Notebooks in der Regel zwei, drei, vier, sechs, aber selten mehr Zellen verschaltet. Das BMS besteht aus einer bestückten Leiterplatte und Verkabelungen, die die Zellen untereinander und mit der Leiterplatte verbinden. Es überwacht den Ladezustand der Zellen und erfüllt sicherheitsrelevante Funktionen wie den Schutz vor Über- und Tiefentladung der Zellen. Das Gehäuse verkapselt die Zellen und das BMS.

Zur Energieversorgung von Notebooks kommen je nach Bauform sowohl Lithium-Akkus mit Rundzellen als auch flache Akkus mit Pouchzellen zum Einsatz. Da der Trend bei mobiler IKT in Richtung flacher Bauformen geht, kommen zunehmend Pouchzellen zum Einsatz (Abschnitt 2.2). Um diesem Trend Rechnung zu tragen, wurde im Forschungsvorhaben ein Akku mit Pouchzellen als Grundlage für die Modellierung und Bewertung gewählt. Pouchzellen sind oftmals fest im Endgerät verbaut und lassen sich in der Regel nicht entnehmen, ohne dass man das Endgerät mit entsprechendem Werkzeug öffnet. Im schlimmsten Fall sind die Pouchzellen mit dem Gehäuse verklebt, wodurch eine Entnahme und somit der Austausch des Akkus nicht mehr ohne weiteres möglich ist.

Abbildung 40 stellt schematisch die Herstellungsphase eines Lithium-Akkus dar, unterteilt in die Abschnitte A bis D. Abschnitt A („materials extraction“) enthält die Prozesse zur Rohstoffbereitstellung und die entsprechenden Vorketten, beispielsweise Bergbauarbeiten zur Gewinnung von Metallen. Für diese Prozesse wurden im Vorhaben keine Primärdaten erhoben. In Abschnitt B („materials processing“) werden aus den Rohstoffen die für die Akkuherstellung benötigten Materialien gefertigt. In Abschnitt C („components manufacture“) werden aus den Materialien Komponenten gefertigt und in Abschnitt D („product manufacture“) werden die Komponenten zum Produkt zusammengesetzt.

Abbildung 40: Schematische Darstellung der Herstellungsphase eines Lithium-Akkus (in Anlehnung an Amarakoon et al. 2013)



Der im Vorhaben betrachtete generische Notebook-Akku basiert auf den Angaben eines der weltweit größten Hersteller von Akkus. Dieser übermittelte einige Kenndaten zum Gesamtprodukt Notebook-Akku (Tabelle 15) sowie Daten zur Materialzusammensetzung und Herstellung der Akkuzellen.

Tabelle 15: Kenndaten zum Referenzakku (Herstellerangaben)

Typ	Lithium-Ionen-Polymer (LiPo)
Bauform	Pouch
Zellchemie	LCO
Kapazität	7300 mAh
Anzahl Zellen	4
Gewicht pro Zelle	59,51 g

Daten zum BMS und dem Gehäuse des Akkus standen vom Hersteller nicht zur Verfügung. Ebenso wenig wurde das Gesamtgewicht eines vollständigen Notebook-Akkus übermittelt. Um diese Lücke zu schließen, wurde zur Modellierung von BMS und Gehäuse ein aus den Laboruntersuchungen (Abschnitt 3.1) vorhandener Tablet-Akku herangezogen. Um die Vergleichbarkeit der Komponenten BMS und Gehäuse zwischen dem Tablet-Akku und dem zu modellierenden Notebook-Akku zu gewährleisten, wurde der Aufbau von Notebook-Akkus und Tablet-Akkus der Bauform „Pouch“ anhand von öffentlich verfügbaren Demontageaufnahmen, beispielsweise auf der Webseite von

ifixit¹⁶, miteinander verglichen. Im Ergebnis ist der Aufbau von Notebook-Akkus und bei Tablet-Akkus in der Bauform „Pouch“ vergleichbar. Bei der Faktensuche durch die Analyse öffentlich zugänglicher Quellen konnten keine gegenteiligen Daten oder Aussagen identifiziert werden. Bedeutende Unterschiede bestehen lediglich zu Notebook-Akkus in der Bauform mit Rundzellen. Hier unterscheiden sich der Aufbau der Zellen und das Gehäuse erheblich von Tablet-Akkus – diese Bauform wurde jedoch in der ökobilanziellen Untersuchung nicht betrachtet.

Abbildung 41 zeigt den Tablet-Akku vor der Demontage. Zu erkennen ist das Gehäuse, das aus einem Kunststoffrahmen und einer die Zellen umspannenden Kunststoffolie besteht. Des Weiteren lässt sich ein hervorstehender Teil des Gehäuses erkennen, in dem die Leiterplatte untergebracht ist und davon ausgehend Kabel und ein Anschluss zur Verbindung des Akkus mit dem Endgerät.

Abbildung 41: Tablet-Akku vor der Demontage (Vorderseite)



Im ersten Schritt der Demontage wurde das Gehäuse entfernt, woraufhin die drei verschalteten Lithium-Ionen-Zellen sowie das BMS sichtbar wurden (Abbildung 42). Ein Tablet-Akku mit vier Zellen stand im Vorhaben nicht zur Verfügung.

Abbildung 42: Tablet-Akku nach Entfernung des Gehäuses



Nach vollständiger Demontage des Akkus wurden die Gewichtsanteile der Komponenten bestimmt (Tabelle 16). Die Massenverteilung der Komponenten des Tablet-Akkus ist in Abbildung 43 dargestellt. Die gleiche Verteilung wurde auch für den Notebook-Akku angenommen. Mithilfe dieser Verteilung wurde die Masse der Komponenten auf einen Notebook-Akku mit vier Zellen skaliert: Über das bekannte Gewicht der vier Notebookzellen (vgl. Tabelle 15) wurde über das Masseverhältnis der Komponenten des Tablet-Akkus (Abbildung 43) das Gewicht der Komponenten BMS und Gehäuse des Notebook-Akkus (im Verhältnis zur Masse der Zellen) berechnet. Tabelle 16 (rechte Spalte) zeigt

¹⁶ <https://de.ifixit.com/>

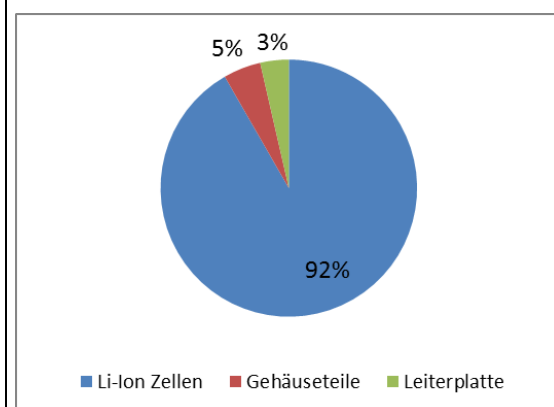
im Ergebnis die absolute Massenverteilung der Komponenten des betrachteten Notebook-Akkus. Die prozentuale Massenverteilung entspricht der des Tablet-Akkus. Dabei ist zu beachten, dass dieser Ansatz lediglich eine Abschätzung der Masse der Komponenten BMS und Gehäuse des Notebook-Akkus liefert. Wie eingangs beschrieben ist der Aufbau von Akkus mit Pouchzellen zwischen Tablet-PCs und Notebooks durchaus vergleichbar. Daher wurde angenommen, dass die Größenordnungen durch diesen Ansatz realitätsnah abgebildet werden können. Des Weiteren ist zu beachten, dass die drei Zellen des demontierten Tablet-Akkus tatsächlich eine geringere Masse aufweisen als die Summe der vier Notebook-Akkus laut Herstellerangaben. Demnach hat auch der Notebook-Akku als Ganzes eine geringere Masse als der Tablet-Akku.

Nicht betrachtet wurde der Einsatz von Energie bei der Fertigung des Akkus, also das Zusammensetzen der einzelnen Komponenten, da dem Forschungsvorhaben hierzu keine Daten zur Verfügung standen. Es wird jedoch angenommen, dass dieser Prozess keinen intensiven Energieeinsatz benötigt und die Ergebnisse der Umweltbilanz nicht maßgeblich beeinflusst.

Tabelle 16: Massenverteilung der Komponenten des Tablet- und des Notebook-Akkus (gerundete Werte)

Komponente	Masse [g] (Tablet-Akku)	Masse [g] (Notebook-Akku)
Zellen (insg.)	254,5	238,0
Gehäuseteile	13,1	12,3
Leiterplatte	3,5	3,3
Kabel	6,8	6,4
Gesamtgewicht	277,6	259,6

Abbildung 43: Massenverteilung der Komponenten des Tablet-Akkus und Notebook-Akkus (gerundete Werte)



4.1.2 Zellen

Akkuzellen bestehen im Wesentlichen aus fünf Komponenten: Der Kathode, der Anode, dem Elektrolyten, dem Separator sowie passiven Komponenten. Detaillierte Informationen zur Herstellung von Akkuzellen sind selten verfügbar und unterliegen oftmals der Geheimhaltung. Der Hersteller, der die Daten zu Materialzusammensetzung und Prozessaufwendungen übermittelte, stellte ebenfalls keine detaillierten, beschreibenden Informationen zur Verfügung. Im Folgenden werden die Produktionsabläufe anhand von Sekundärdaten vereinfacht beschrieben.

Die Fertigung von Akkuzellen umfasst die Herstellung der Elektrodenmaterialien und die anschließende Herstellung der Akkuzellen. Die Elektrodenmaterialien werden aus Aktivmaterialien in Pulverform, Bindemittel, Lösungsmittel und Additiven in einem Mixer angerührt und anschließend auf Stromabnehmerfolien aufgetragen. Als Stromabnehmermaterialien haben sich Aluminium für die Kathode und Kupfer für die Anode etabliert. Im nächsten Schritt werden die Folienbahnen zurechtgeschnitten und nach dem Schema Separator-Anode-Separator-Kathode gestapelt und im Gehäuse integriert. Im Anschluss wird der Elektrolyt eingefüllt, es muss den Separator vollständig durchdringen sowie die angrenzenden Elektroden benetzen (Daniel 2013). Anschließend werden die Zellen unter zunehmender Spannung durch Lade- und Entladezyklen aktiviert und weni-

ge Wochen gelagert. Im letzten Schritt werden die Zellen hinsichtlich ihres Widerstandes und ihrer Kapazität eingestuft und ggf. mit möglichst gleichwertigen Zellen in Akkupacks zusammengefasst.

Daten zur Materialzusammensetzung und den Prozessaufwendungen für die Produktion der Akkuzellen wurden von einem weltweit führenden Akkuhersteller bereitgestellt. Die Modellierung der Akkuzellen im Vorhaben basiert auf einer nicht veröffentlichten Ökobilanz des Herstellers, die dem Vorhaben zur Verfügung gestellt wurde. Die grundlegenden Kenndaten der Referenzakkuzelle sind wie oben in Tabelle 15 angegeben. Die detaillierte Materialzusammensetzung mit Angaben zu den jeweilig notwendigen Verfahrensschritten zur Herstellung ist in Tabelle 17 aufbereitet. Die Herstellung der Zellen findet in der Volksrepublik China statt. Der zeitliche Bezug der erhobenen Daten ist Dezember 2013.

Tabelle 17: Materialzusammensetzung einer Zelle des Notebook-Akkus (Herstellerangaben)

Komponente	Bestandteile	Materialien	Masse pro Zelle [g]
Kathode	Aktivmasse	Lithium-Kobaltoxid (LiCoO ₂ , LCO)	24,62
	Additive	Ruß	0,51
		Polyvinylidenfluorid (PVDF)	0,51
	Stromableiter	Aluminium	3,40
	Gewicht Komponente		29,04
Anode	Aktivmasse	Graphit	12,18
	Additive	Ruß	0,13
		Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR)	0,19
	Stromableiter	Kupfer	4,82
	Gewicht Komponente		17,32
Elektrolyt	Lösungsmittel	Carbonat (Ethylencarbonat und Propylencarbonat)	7,5
	Salz	Lithiumhexafluorophosphat (LiPF ₆)	0,8
	Gewicht Komponente		8,3
Separator	Polyolefin	Polyolefin	2,27
	Gewicht Komponente		2,27
Passive Komponenten	Gehäuse	Aluminium	2,36
	Positiver Pol	Aluminium	0,1
	Negativer Pol	Nickel	0,1
	Positiver interner Pol	Aluminium	0,01
	Negativer interner Pol	Kupfer	0,01

	Isoliermaterial	Polypropylen	0,001
	Gewicht Komponente		2,581
Gesamtgewicht einer Zelle			59,51

Die vom Akkuhersteller übermittelten Daten zur Inanspruchnahme von Elektrizität, Dampf, Wasser und Stickstoff bei Herstellung bis zur Fertigstellung einer Akkuzelle sind in Tabelle 18 zusammengefasst. Die Angaben wurden ermittelt, in dem der Verbrauch der Werkshalle im Jahr 2013 durch die im gleichen Jahr hergestellte Anzahl Akkuzellen dividiert wurde. Eine Aufschlüsselung dazu, bei welchen Prozessen in welchen Anteilen Strom, Stickstoff, Dampf und Wasser verwendet werden, wurde vom Hersteller nicht übermittelt.

Tabelle 18: Prozessaufwendungen zur Herstellung einer Akkuzelle (Herstellerangaben)

Ressource	Menge
Elektrizität	0,2346 kWh
Dampf	0,0975 kg
Wasser	0,6425 kg
Stickstoff	0,00795 Nm ³

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, werden für Akkus in mobiler IKT eine Reihe unterschiedlicher Kathodenmaterialien eingesetzt, die sich unter anderem in ihrer Energiedichte, Zyklenbeständigkeit und ihren Sicherheitsaspekten unterscheiden. Lithium-Kobaltoxid (LCO)-Akkus, die lange den Markt dominierten, werden seit einigen Jahren zunehmend von Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC)-Akkus verdrängt. Prognosen zufolge ist bis zum Jahr 2020 mit einem steigenden Einsatz von NMC (62% aller eingesetzten Kathodenmaterialien) in Notebooks auszugehen (vgl. Abbildung 18). Um dieser Entwicklung Rechnung zu tragen, wurde im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse neben der Betrachtung des oben beschriebenen LCO-Akkus eine Sachbilanz für einen NMC-Akku erstellt und bewertet (Kapitel 5.2.1).

4.1.3 Batteriemanagementsystem (BMS)

Das Batteriemanagementsystem besteht aus einer Leiterplatte, die mit verschiedenen Bauteilen wie Mikrochips (integrated circuit, IC), Widerständen und Kondensatoren bestückt ist. Verkabelungen dienen der Kontaktierung der Akkuzellen untereinander und mit der Leiterplatte sowie dem Anschluss des Akkus an das Endgerät. Diese werden ebenfalls dem BMS zugerechnet. Das BMS überwacht die Temperatur und den Ladezustand der Akkuzellen. Es regelt die Ladung und Entladung. Es speichert Informationen über den Zustand der Zellen und es kommuniziert mit dem Ladegerät und dem Endgerät.

Die Sachbilanzdaten für das im Forschungsvorhaben modellierte Notebook-Akku-BMS wurden anhand eines Tablet-Akku-BMS generiert. Hierzu wurden die Fläche und das Gewicht der Leiterplatte eines Tablet-Akkus bestimmt und wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben auf den zu modellierenden Notebook-Akku skaliert. Die elektronischen Bauteile wurden gezählt, durch einen Experten der TU Berlin identifiziert (Benecke, Stephan 2014) und mit Datensätzen aus den Datenbanken von GaBi und ecoinvent hinterlegt. Dazu wurde das in der GaBi Ökobilanz-Datenbank enthaltene Modell für bestückte Leiterplatten verwendet. Dabei mussten die in der GaBi Datenbank vorhandenen Datensätze teilweise so skaliert werden, dass sie als Annäherung die Bauteile der realen Leiterplatte abbilden konnten. Die Skalierung wurde, je nach Bauteil, anhand von Masse oder Volumen linear durchgeführt. Die jeweilige Begründung sowie die angewandten Skalierungsfaktoren sind in Tabelle 33 im Anhang einsehbar.

Die Leiterplatte ist in Abbildung 44 dargestellt (Anschluss an das Endgeräte ist bereits entfernt, vgl. auch Abbildung 42). Die Bauteile und real vorhandene Mengen (ohne Skalierung) sind in Tabelle 19 aufgelistet.

Abbildung 44: Leiterplatte des Tablet-Akkus

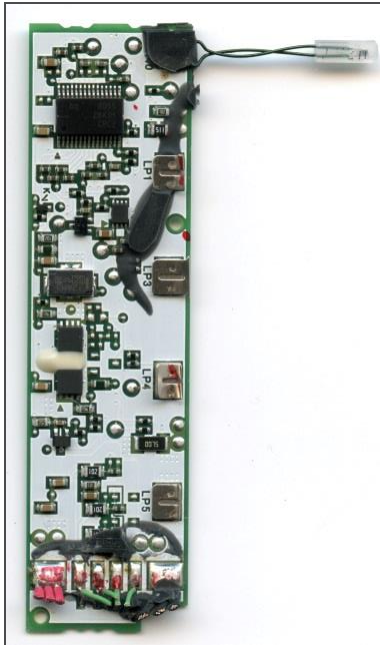


Tabelle 19: Bauteile der Leiterplatte

Bauteile	Menge
IC Lademanager	3 Stück
IC Ladezustandsmesser	1 Stück
Thermoelement	1 Stück
SMD-Widerstand	10 Stück
Keramikkondensator	48 Stück
Sicherung	1 Stück
Transistor	2 Stück
Steckverbinder	0,4 g
Lötzinn	0,083 g
FR4 Leiterplatte, 4-lagig	13,3 cm ²
Gesamtgewicht	3,29 g

Zur Bestimmung der Materialien der Kabel und deren Ummantelung wurde die Expertenschätzung eines Materialwissenschaftlers des Fraunhofer IZM herangezogen (Walter 2014). Der vollständige auf den generischen Notebook-Akku umgerechnete Datensatz zum BMS ist in Tabelle 20 dargestellt. Die benötigte Menge an Energie für den Bestückungsvorgang wird anhand der angegebenen Fläche der Leiterplatte genähert.

Tabelle 20: Materialzusammensetzung und Gewicht des Batteriemanagementsystems

Bestandteile	Materialien / Bauteile	Masse [g]
Leiterplatte (bestückt)	Diverse Bauteile (Tabelle 19)	3,3
Anschlusskabel	Kupferdraht, Polyvinylchlorid (PVC)-Ummantelung	0,6
Verbindungskabel	Aluminium, Polyimid-Ummantelung	5,4
Steckverbinder	Polyethylen (PE), Kupfer, diverse	0,4
Gewicht Komponente		9,7

4.1.4 Gehäuse

Das Gehäuse des untersuchten Pouchzellen-Akkus besteht im Wesentlichen aus einem Kunststoffrahmen und einer Folie, die die Zellen umschließt und zusammenhält (siehe Abbildung 41). Daten zum Gewicht der Gehäuseteile wurden im Zuge der Demontage des Tablet-Akkus bestimmt. Die eingesetzten Materialien wurden abgeschätzt und wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben auf den zu modellierenden Notebook-Akku umgerechnet, die Ergebnisse sind in Tabelle 21 aufgelistet. Daten zu den Prozessaufwendungen der Fertigung des Gehäuses aus den Materialien liegen nicht vor und daher sind nicht in der Berechnung der Umweltwirkungen enthalten. Da der Masseanteil der Gehäuseteile am Akku bei 5% liegt (Abbildung 43) und der erwartete Energieinput in

der Fertigung der Gehäuseteile als relativ gering eingeschätzt wird, wird der Beitrag zu den Umweltwirkungen als vernachlässigbar betrachtet.

Tabelle 21: Materialzusammensetzung des Gehäuses des untersuchten Lithium-Akkus

Komponente	Bestandteile	Materialien	Masse [g]
Gehäuse	Kunststoffrahmen	Polypropylen (PP)	8,37
	Kunststofffolie	Verbund aus PP und Polycarbonat (PC) / Polystyrol (PS)	3,80
	Thermoplast	Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	0,12
	Gewicht Komponente		12,29

4.2 Distribution

Die Distribution verläuft unterschiedlich, je nachdem ob der Akku zum Einbau in ein Notebook oder als Ersatzakku verwendet wird. Der im Vorhaben betrachtete Basisfall ist ein Akku für den Einbau in ein Notebook. Hier wird pauschal nur der Transportweg vom Werk bis zum Hafen in Shanghai berechnet (Tabelle 22, erste Zeile). Dies ist im betrachteten Basisfall der Übergabepunkt für die Bilanzierung des Produktsystems Notebook. Einem Ersatzakku wird der Transport vom Werk bis zum Nutzenden zugerechnet (Tabelle 22).

Der erste Abschnitt der Distribution ist der Transportweg innerhalb des Produktionslandes China vom Werk des Akkuherstellers in der Stadt Nanjing zum Hafen in Shanghai per Lastkraftwagen über 304 Kilometer. Der zweite Abschnitt ist der Transport über den Seeweg von Shanghai zum Hafen in Rotterdam (NL) mittels Frachtschiff über 19.380 Kilometer. Laut Mudgal et al. (2011) beträgt der Transportweg von dort aus bis zum Distribution Center in Belgien 200 Kilometer. Der letzte betrachtete Abschnitt ist die Distribution von dort aus bis zum europäischen Endnutzer, laut Mudgal et al. (2011) 1500 km. Die Distribution vom Markt bis zum Endkunden wird nicht betrachtet, da hier keine verlässlichen Daten vorliegen.

Tabelle 22: Angenommene Transportentfernungen und Transportmittel bei der Distribution

Abschnitt	Szenario	Transport- entfernung [km]	Transport- mittel	Quelle
Werk Nanjing – Hafen Shanghai	Einbauakku; Ersatzakku	304	LKW > 16t	https://www.google.de/maps
Hafen Shanghai – Rotterdam	Ersatzakku	19.380	Frachtschiff	http://www.searates.com/de/reference/portdistance/
Rotterdam – Dis- tribution Center (Belgien)	Ersatzakku	200	LKW > 16t	Mudgal et al. (2011)
Distribution Cen- ter (Belgien) – Europäischer Endnutzer	Ersatzakku	1.500	LKW > 16t	Mudgal et al. (2011)

4.3 Nutzungsphase

In der Nutzungsphase durchgeführte Lade- und Entladevorgänge dienen der Versorgung eines Notebooks mit Energie. Der Akku speichert die Energie temporär und gibt sie bei Bedarf an das Gerät ab. Die Inanspruchnahme von Energie muss dementsprechend dem Endgerät und nicht dem Akku zugerechnet werden.

Der Energiewirkungsgrad von Lithium-Akkus, definiert als der Quotient aus entnommener Arbeit zu zugeführter Arbeit, wird in der Literatur mit 0,95 Wh/1 Wh angegeben (Jossen & Weydanz 2006). Dementsprechend gehen 5 % der eingesetzten Energie in Form von Abwärme verloren. Des Weiteren ist die Selbstentladung zu beachten, die bei Lithium-Akkus mit ca. 1 % pro Monat jedoch verhältnismäßig gering ausfällt (Schnabel, P. 2015).

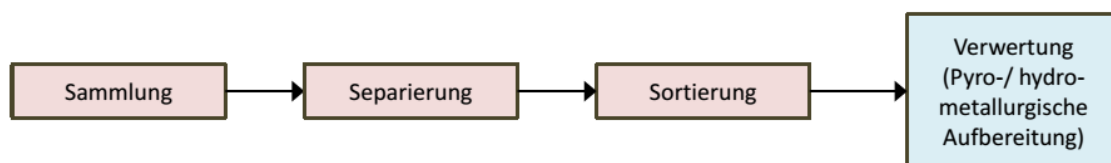
Der erstellte Sachbilanzdatensatz für den Lebenszyklus eines Notebook-Akkus ist im Kontext mit vorhergegangenen Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes zu sehen (vgl. Kapitel 2.1). Der Akkudatensatz wird herangezogen, um den Akku als Komponente des Gesamtsystems Notebook zu bilanzieren. Nichtsdestotrotz spielt die Nutzungsphase eine Rolle in der Umweltbewertung von Lithium-Akkus. Entscheidend ist, ob während der Nutzungsphase des Gesamtgerätes (z. B. des Notebooks) der Akku ausgetauscht werden muss oder ob er (mindestens) so lange hält wie das Notebook. Das hängt ab von der angenommenen Anzahl von Ladezyklen, die das Notebook über die gesamte Nutzungsphase benötigt und von der Zahl der Ladezyklen, die der Akku erbringt. Hier kann auf die Erkenntnisse der Lebensdaueruntersuchungen in Kapitel 3 zurückgegriffen werden: Die Daten zur Lebensdauer lassen sich in vereinfachte Szenarien übersetzen, die in Abschnitt 3.2.5 eingehend diskutiert werden. Der Bilanzierer eines Produktsystems (Notebook, Tablet o.ä.) kann auf die Beschreibung der Szenarien Bezug nehmen, um zu entscheiden, ob ein Akku während der Nutzungsphase des Endgerätes ausgetauscht werden muss oder nicht.

Die Energieverluste durch Selbstentladung des Akkus, Standby-Verluste des Ladegerätes usw. sind im Energiebedarf des Notebooks enthalten und werden so bei der Bilanzierung des Gesamtsystems Notebook berücksichtigt.

4.4 End-of-Life (EOL)

Die End-of-Life-Phase beginnt generell mit dem Entledigungswillen des Endnutzers und wird grob in die vorgeschalteten Prozesse der Sammlung, Separierung und Sortierung sowie die Aufbereitung bzw. Verwertung geteilt (Abbildung 45).

Abbildung 45: Verfahrensschritte für Akkus nach der Nutzungsphase



4.4.1 Vorgeschaltete Prozesse

Die Sammlung von Gerätebatterien erfolgt über das Gemeinsame Rücknahmesystem Batterien (GRS Batterien) oder über eines der drei derzeit eingerichteten „herstellereigenen Rücknahmesysteme für Gerätebatterien“ (REBAT, ERP Deutschland und Öcorecell). Verlässliche Daten zur Sammelquote von Akkus spezifischer Produktgruppen (Notebooks, Tablets, o.ä.) existieren aktuell nicht. Die Sammelquote wird daher nicht in die Betrachtung der Entsorgungsprozesse einbezogen. Es wird angenommen, dass der betrachtete Akku vom Nutzer an die Sammelsysteme übergeben wird. Da dem For-

schungsvorhaben für die Verbringung eines Altakkus (ggf. im Notebook integriert) bis zur Sammelstelle ebenfalls keine zuverlässigen Daten vorlagen, beginnt die Bilanzierung des EOL ab der Sammelstelle.

Zur Abbildung der Transportprozesse der Sammlung von der Sammelbox bis zur Recyclinganlage im Basisfall wurde auf Daten von Fisher et al. (2006) zurückgegriffen (Tabelle 23). Die angegebenen Transportentfernungen beziehen sich regional auf das Vereinigte Königreich (UK) und werden als Annäherung an entsprechende Transportentfernungen in Deutschland herangezogen. Mögliche Transportprozesse vom Ort der Nutzung bis hin zur Sammelbox der Sammelsysteme werden nicht betrachtet, da hierzu keine verlässlichen Daten zur Verfügung stehen.

Tabelle 23: Transportentfernungen und Transportmittel im End-of-Life nach Fisher et al. (2006)

Abschnitt	Transportentfernung [km]	Transportmittel
Sammelbox – Lager	160	Van < 3,5t
Lager – Sortieranlage	400	LKW 16t
Sortieranlage – Recyclinganlage	1.250	LKW 28t

Die Separierung der Gerätebatterien von den Elektroaltgeräten geschieht meist als Vorbehandlungsschritt händisch in Behandlungsanlagen (Erstbehandler). Sommer (2013) beziffert die Separierungsrate (Separierung der Gerätebatterien aus den Elektrogeräten) bei diesem Verfahrensschritt mit 100 %. Werden die Notebook-Akkus bereits separiert durch eines der Rücknahmesysteme erfasst, so erfolgt die Sortierung durch beauftragte Betriebe, die häufig manuell an Fließbändern oder mit sensorbasierter Sortiertechnik die Batterietypen bzw. chemischen Subsysteme mit hoher Reinheit voneinander trennen können (Sommer 2013). Die Sortierungsquote ist im Allgemeinen mit 95 ± 5 % anzunehmen, so Sommer (2013).

Für Altbatterien, die nicht durch die Sammelstellen (Handel, Behandlungsanlagen für Elektroaltgeräte, öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger) erfasst werden und damit nicht direkt dem formellen Recycling zugeführt werden, sind mindestens drei weitere Entsorgungswege denkbar:

- ▶ Einlagerung beim Nutzenden („Hoarding“)
- ▶ Unsachgemäße Entsorgung über den Hausmüll
- ▶ Export im Gebrauchtgerät

Es kann angenommen werden, dass ein Teil der Altbatterien, die nicht durch die Sammelstellen erfasst werden und damit nicht direkt dem formellen Recycling zugeführt werden, beim Nutzenden nach der Nutzungsphase gelagert werden. Dem Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) zufolge lagerten in deutschen Haushalten im Jahr 2013 beispielsweise mehr als 105 Millionen ausgemusterte Alt-Handys (BITKOM 2015). Eine Lagerung der Geräte beim Nutzenden („Hoarding“) bedeutet im Rückschluss, dass auch die Akkus einer zeitverzögerten Entsorgung und damit dem Recycling zugeführt werden, womit eine Sammelquote von bis zu 100 % denkbar wäre.

Ein weiterer denkbarer Verbleib ist die unsachgemäße Entsorgung im Hausmüll. Laut Dimitrakakis et al. (2009) landen jedoch Lithium-Akkus selten im Hausmüll. Notebook-Akkus finden in der Studie keine gesonderte Benennung. Huismann (2012) schreibt, dass IT-Equipment mittlerer Größe, wie Desktop PCs oder Notebooks, selten im Hausmüll gefunden werden. Es kann angenommen werden, dass die Entsorgung von Notebooks über den Hausmüll nach aktueller Datenlage kein wesentlicher Entsorgungspfad ist.

Es ist denkbar, dass ein Teil der Notebooks und deren Akkus, die nicht vom Sammelsystem erfasst werden, als gebrauchte Elektronik aus Deutschland ins Ausland exportiert werden. Nach Sander & Schilling (2010) wird die aus Deutschland im Jahr 2008 exportierte Menge an neuen Elektro- und Elektronikgeräten, gebrauchten Geräten und Elektro- und Elektronik-Altgeräten nach Afrika und Asien auf etwa 155.000 Tonnen geschätzt. Laut der Warenanmeldungen beim Export machen Computer 4 % der exportierten gebrauchten Elektro- und Elektronikgeräte aus. Spezifische Daten für den Export von Notebooks und Notebook-Akkus konnten nicht ermittelt werden. Der Anteil von Altgeräten, die fälschlicherweise als gebrauchte Geräte exportiert werden, ist nicht bekannt (Sander & Schilling 2010). Begründet durch die schwierige Datenlage wird der mögliche Export von Alt-Notebooks und deren Akkus nicht in die Betrachtung mit einbezogen.

4.4.2 Aufbereitung und Verwertung

Die Verwertungsoptionen für verbrauchte Lithium-Akkus sind pyrometallurgisch, hydro-metallurgisch, kryogen, pyrolytisch und Abwandlungen oder Kombinationen solcher Prozesse. Allen Verwertungsverfahren gemeinsam ist die Produktion von Sekundärrohstoffströmen, die (nach voriger Behandlung) in anderen Industrieprozessen eingesetzt werden. Gemäß Weyhe (2013) ist die Metallrückgewinnung in diesen Prozessen auf wenige spezifische Metalle ausgerichtet. Demnach wird aus LCO-Akkus Kobalt und Kupfer wiedergewonnen, aus NMC-Akkus Kobalt, Kupfer und Nickel. Nebenmetalle, wie beispielsweise Aluminium, Lithium, Mangan, Graphit und Eisen gehen bei diesen Verfahren verloren (Tabelle 24).

Tabelle 24: Recyclete und nicht recycelte Materialien nach Kathodenmaterial (Weyhe 2013)

Lithium-Akku-Typ:	LCO	NMC
Recyclete Metalle:	Co, Cu	Co, Ni, Cu
Nicht recycelte Metalle:	Li, C, Fe, Al	Li, Fe, C, Al, Mn

Nach Weyhe (2013) sind die vorrangig implementierten Verwertungsoptionen pyro- und hydrometallurgische Prozesse.

Hydrometallurgische Verfahren vereinen einen mechanischen und einen chemischen Verfahrensschritt. Der mechanische Schritt dient zum Auftrennen der Batterien/Akkus und separiert bspw. Metalle (Gehäuse), Plastik und Papier von restlichen Bestandteilen der Batterie, vor allem der Aktivmasse (Fisher 2006). Aus der Aktivmasse, welche aus Anoden- und Kathodenmaterial besteht, werden im chemischen Schritt im Anschluss an den mechanischen Schritt durch nasschemische Lösungs- und Fällungsschritte bei niedrigen Temperaturen die Metalle in Form von Metallverbindungen zurückgewonnen.

Die pyrometallurgische Behandlung von Batterien/Akkus nutzt hohe Temperaturen zur Transformation der Metalle. Zur Rückgewinnung der Wertstoffe in metallischer Form werden Schmelzaggregate eingesetzt. Eine Übersicht über die aktuellen Recyclingunternehmen mit den entsprechenden Behandlungsverfahren, zusammengetragen von Siret (2012) und Weyhe (2013), ist in Tabelle 25 gegeben.

Tabelle 25: Übersicht zu Verfahren bei den Recyclingunternehmen für Lithium-Akkus nach Siret (2012) und Weyhe (2013)

Unternehmen	Prozess	Batterietyp	Kapazität pro Jahr	Produkte
UMICORE (Belgien)	Pyro- und hydrometallurgisch	Consumer- + Industrie	7000 t	LiCoCO ₂ und LiNiMn-CoO ₂ für neue Batterien,

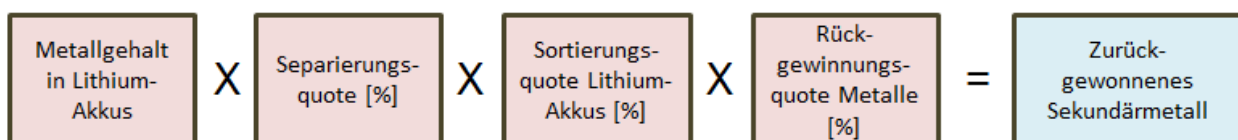
Unternehmen	Prozess	Batterietyp	Kapazität pro Jahr	Produkte
		Li-Ion Batterie		Cu, Fe, Schlacke für Zement
XSTRATA Nickel (Kanada + Norwegen)	Pyro- und hydrometallurgisch	Co-basierte Li-Ion Batterie	> 4000 t	Legierung Ni, Cu, Co
TOXCO (Kanada)	Kryogen + hydrometallurgisch	Consumer Li-Ion	3500 t	Li ₂ CO ₃ , Co cake
SONY/SUMITOMO (Japan)	Pyrometallurgisch	-	-	Co + Teile von Fe, Cu, Al
ACCUREC (Deutschland)	Vorbehandlung + pyrometallurgisch	Consumer- + Industrie Li-Ion Batterie	850 t (steigend)	CoMn-Legierung, Lithiumchlorid
AKKUSER (Finnland)	Trockentechnologie (Zerkleinern)	Consumer Li-Ion	< 300 t	Co- und Ni-Fractionen
BATREC* (Schweiz)	Zerkleinern unter inerter Atmosphäre; pyrometallurgisch	-	1000 t	Co, NE-Schrott, Ni Schrott, Plastik
RECUPYL* (Frankreich)	Hydrometallurgisch	Consumer Li-Ion	110 t	Co-Oxid, Li ₂ CO ₃ , NE-Metalle, Edelstahl
SNAM (Frankreich)	Vorbehandlung + Mahlen		350 t (steigend)	Co-Puder, Graphit

* Primärdaten wurden von Fisher et al. (2006) bei BATREC und RECUPYL erhoben

Wie in Tabelle 25 ersichtlich, unterscheiden sich die Recyclingunternehmen u.a. durch ihre Prozessführung und Absatzprodukte. Daher ist die Datenlage zu (spezifischen) Rückgewinnungsquoten schwierig. Fisher et al. (2006) ist eine der wenigen Veröffentlichungen, die detaillierte Prozessdaten aus Batterierecyclinganlagen im Betrieb nennt. Untersucht wurden der Valibat-Prozess der Unternehmen Recupyl (hydrometallurgisch) und Batrec (pyrometallurgisch).

Die Berechnung der Rückgewinnung von Sekundärmetallen erfolgt nach dem in Abbildung 46 dargestellten Schema. Die im Basisfall zurückgewonnenen Mengen sind im Anhang in Tabelle 39 im Anhang aufgelistet.

Abbildung 46: Berechnung der Menge des zurückgewonnenen Sekundärmetalls



4.5 Allokation von Lasten und Gutschriften des Recyclings

Das Ziel des Recyclings ist die Rückgewinnung von Wertstoffen, jedoch sind die angewandten Prozesse durch die Inanspruchnahme von Ressourcen und den Ausstoß von Emissionen ebenso mit Umweltlasten verbunden. Je nach angewandtem Verfahren werden unterschiedliche Materialien

zurückgewonnen, in der Regel Wertstoffe wie Metalle. Diese Sekundärmaterialien führen – unter der Annahme einer vergleichbaren Materialqualität wie die Primärmaterialien – zur Vermeidung der Produktion von entsprechenden Primärmaterialien. Diese Verringerung an Ressourceninanspruchnahme kann dem betrachteten System als Gutschrift zugerechnet werden. Für die Allokation der Gutschriften existieren verschiedene Ansätze: Je nach betrachtetem System kann argumentiert werden, dass die Lasten und Gutschriften des Recyclings dem primären Produktsystem oder aber dem sekundären bzw. weiteren nachfolgenden Produktsystemen zugeschrieben werden sollten, oder zwischen diesen aufgeteilt werden. In einem „closed-loop-System“ wird davon ausgegangen, dass die zurückgewonnenen Materialien qualitativ den entsprechenden Primärmaterialien gleichwertig sind und nach dem Recycling in die Produktion des gleichen Guts eingehen. Im Gegensatz dazu wird im „open-loop-System“ angenommen, dass die zurückgewonnenen Sekundärmaterialien zur Herstellung anderer Produkte verwendet werden.

Im Forschungsvorhaben wurde das Modell eines „quasi-closed-loop-Systems“ angenommen, um Verknüpfungen mit anderen Systemen über einen „open-loop“ Ansatz zu vermeiden (Klöppfer und Grahl 2009). Des Weiteren wurde der Ansatz des Umweltbundesamtes gewählt, jeweils 50 % der Umweltlasten des Recyclings dem betrachteten Produktsystem und 50 % einem sekundären, nicht betrachteten Produktsystem zuzuschreiben. Ebenso werden 50 % der Gutschriften der durch die Produktion von Sekundärmaterialien vermiedenen Primärmaterialproduktion dem betrachteten Produktsystem zugeschrieben und 50 % dem nicht betrachteten sekundären Produktsystem.

4.6 Diskussion der Datenqualität

Die Zellen sind mit einem Masseanteil von 92 % und dem höchsten Anteil an den Umweltwirkungen (Kapitel 5) die wichtigste Komponente des Notebook-Akkus. Zur Abbildung der Herstellungsphase wurden Primärdaten von einem der weltweit führenden Hersteller für Akkuzellen erhoben. Die Daten stammen aus einer unveröffentlichten Ökobilanz des Herstellers und enthalten neben einer Auflistung der verwendeten Materialien für alle Zellkomponenten auch Angaben zur Herstellung der Materialien und der Verarbeitungsschritte bis zur fertigen Zelle. Des Weiteren wurden Daten zur Inanspruchnahme von Strom, Wasser, Wasserdampf und Stickstoff beim Fertigungsprozess zur Verfügung gestellt. Die Art der Datenzusammenstellung durch den Hersteller wurde nicht vollständig an uns übermittelt. Es kann angenommen werden, dass die Materialzusammensetzung der Zellen dem Hersteller gut bekannt ist. Die Inanspruchnahme von Strom, Wasser, Dampf und Stickstoff wurde berechnet, indem der Jahresverbrauch einer Fertigungshalle durch die Anzahl der jährlich in der Halle gefertigten Akkuzellen dividiert wurde.

Die Modellierung der Herstellungsprozesse erfolgte auf Basis der Ökobilanz des Herstellers, die dem Vorhaben zur Verfügung gestellt wurde. Die Prozesse wurden mit Daten aus den kommerziellen Datenbanken GaBi Professional und ecoinvent durchgeführt. Detaillierte Angaben dazu, welche Datensätze dem Herstellungsmodell hinterlegt wurden, sind im Anhang (Abschnitt 11.1) zu finden. Die interne datenbezogene Qualitätssicherung der kommerziellen Datenbank von PE International (thinkstep) und ecoinvent wurden im Vorhaben nicht untersucht.

Der Prozessschritt mit der größten Umweltwirkung (Kapitel 5) ist der zur Bereitstellung von Lithium-Kobaltoxid (LCO). Dieser Datensatz ist herstellereinspezifisch. Die Details der Modellierung sind in der o.g. Ökobilanz des Herstellers weitestgehend beschrieben.

Die Zellen werden in China hergestellt und Datensätze mit chinesischem Bezug wurden eingesetzt, soweit verfügbar. Wo keine Prozessdaten mit chinesischem Bezug zur Verfügung standen, wurden andere Prozesse zur Annäherung herangezogen (vgl. Datenbasis in Abschnitt 11.1).

Für das Batteriemanagementsystem stammen die Primärdaten nicht von einem Notebook-Akku, sondern wurden mithilfe eines vom Aufbau her vergleichbaren Tablet-Akkus erhoben (vergleiche

Abschnitt 4.1.3). Die Bauteile der Leiterplatte wurden von einem Experten der TU Berlin (Benecke 2014) bestimmt und über ein parametrisiertes Modell in der Ökobilanzsoftware GaBi von PE International abgebildet. Die Daten beruhen also auf einer realen Akku-Leiterplatte, während die Daten für die Herstellung der Bauteile, der Leiterplatte selbst und die Prozesse zur Fertigung vollständig auf Daten aus der GaBi Datenbank beruhen.

Zur Erhebung von Primärdaten für das Gehäuse des Akkus wurde, analog zum Vorgehen bei der Leiterplatte, der Tablet-Akku herangezogen. Die Masseanteile wurden entsprechend einem Notebook-Akku mit vier Zellen skaliert (vgl. Abschnitt 4.1.1). Die Materialzusammensetzung wurde von einem Experten des Fraunhofer IZM (Walter 2014) abgeschätzt und durch Daten der ecoinvent Datenbank hinterlegt. Wir nehmen an, dass die Daten korrekt sind, können dies jedoch ohne weitergehende Untersuchungen nicht garantieren. Analysen auf stofflicher Ebene wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht durchgeführt, da hierzu keine Mittel zur Verfügung standen.

Sachbilanzdaten für die vorgeschalteten Prozesse im End-of-Life und die Verwertungsprozesse stammen aus einer Publikation von Fisher et al. (2006) und beruhen auf Primärdaten von zwei Recyclingunternehmen. Wir gehen nicht davon aus, dass die Daten repräsentativ sind, weil die beiden Unternehmen nur einen kleinen Teil des europäischen Marktes umfassen (Tabelle 25). Es existieren jedoch zu Verwertungsprozessen keine aktuellen öffentlich zugänglichen Datenquellen zur Abbildung der Verwertungsprozesse. Weyhe (2013) beschreibt die Rückgewinnung von Wertstoffen aus dem Batterierecycling je nach Lithium-Akku Subsystem (LCO, NMC, usw.).

Die interne datenbezogene Qualitätssicherung von PE International (thinkstep) und ecoinvent wurde nicht untersucht.

Zusammenfassend ist zu sagen: Die Daten zur Abbildung des End-of-Life stammen von verschiedenen Literaturquellen. Ihre Qualität ist nur schwer abzuschätzen. Eine Primärdatenerhebung wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht durchgeführt.

5 Abschätzung der Umweltwirkungen

Im folgenden Kapitel 5.1 werden zunächst beispielhaft für die Ergebnisse der einzelnen Wirkungskategorien das Treibhauspotential und die Erschöpfung abiotischer Ressourcen über den gesamten Lebensweg des Notebook-Akkus dargestellt. Die Wirkungskategorien wurden auf Basis der im Kapitel 4 vorgestellten Daten und Annahmen und den in Kapitel 2.4 definierten Systemgrenzen ermittelt. Die Nutzungsphase wird, entsprechend dem gesetzten Bilanzrahmen und den getroffenen Annahmen, nicht betrachtet und nicht dargestellt.

In den darauf folgenden Abschnitten wird im Rahmen einer „Hot-Spot-Analyse“ die Produktion des Akkus als die Lebenszyklusphase mit den größten Umweltwirkungen im Detail betrachtet. In Kapitel 5.2 werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, bei denen wichtige Parameter variiert wurden, um die Auswirkungen auf die Ergebnisse und damit deren Robustheit zu untersuchen.

In einigen der nachfolgenden Diagramme werden Abkürzungen für die Wirkungskategorien wie folgt verwendet:

- ▶ ADF: Erschöpfung abiotischer Ressourcen (Abiotic Depletion Factor, ADF)
- ▶ GWP: Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP)
- ▶ ODP: Ozonabbaupotential (Ozon Depletion Potential, ODP)
- ▶ HTP: Humantoxizitätspotential (HTP)
- ▶ AP: Versauerungspotential (Acidification Potential, AP)
- ▶ EP: Eutrophierungspotential (EP)

5.1 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

In allen untersuchten Wirkungsindikatoren hat die Herstellungsphase den weitaus größten Anteil. Beispielhaft sind in den folgenden Abbildungen das Treibhauspotenzial und die Erschöpfung abiotischer Ressourcen dargestellt. Die vollständige Darstellung für alle Wirkungsindikatoren ist im Anhang zu finden (Abbildung 57 ff).

Abbildung 47 zeigt sowohl das Treibhauspotential über den gesamten Lebensweg mit und ohne Anrechnung von Gutschriften aus dem Recycling als auch die Anteile der einzelnen Lebensphasen des Akkus. Insgesamt ergibt sich für den gesamten Lebenszyklus des modellierten Notebook-Akkus der Ausstoß von 6,14 kg CO₂-Äquivalenten¹⁷. Mit 94,8 % entfällt der größte Anteil des Treibhauspotenzials auf die Herstellung, gefolgt von der Entsorgung mit 5,1 % und der Distribution mit 0,2 %. Die beim Recycling wiedergewonnenen Materialien wirken sich positiv auf die Gesamtbilanz aus: Aufgrund der Gutschriften verringert sich der Wert für das Treibhauspotential um 4,3 %.

Abbildung 48 zeigt die Erschöpfung abiotischer Ressourcen in der gleichen Darstellungsform. Hervorzuheben ist der bedeutende Einfluss der Rückgewinnung von Sekundärmetallen im Recycling, wodurch sich das Ergebnis in dieser Wirkungskategorie um 21,7 % verbessert.

¹⁷ Der Wert des CO₂-Äquivalenten bezogen auf die mittlere Erwärmungswirkung von 100 Jahren

Abbildung 47: Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP, in Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Äquivalenten) über 100 Jahre über den gesamten Lebenszyklus

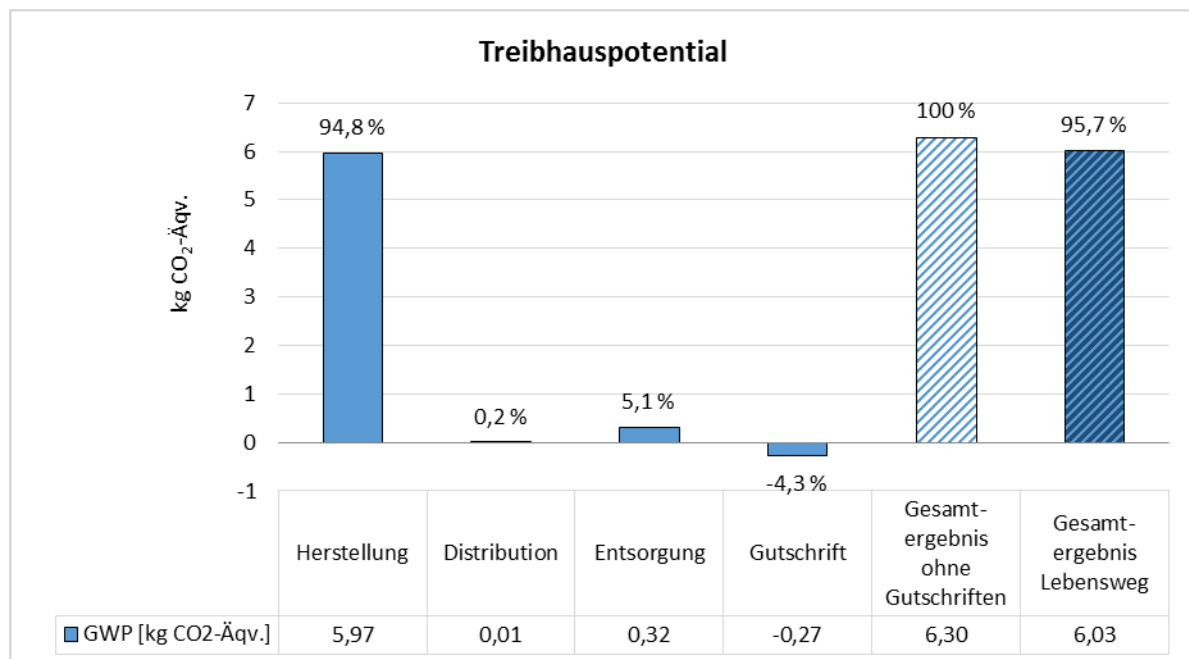
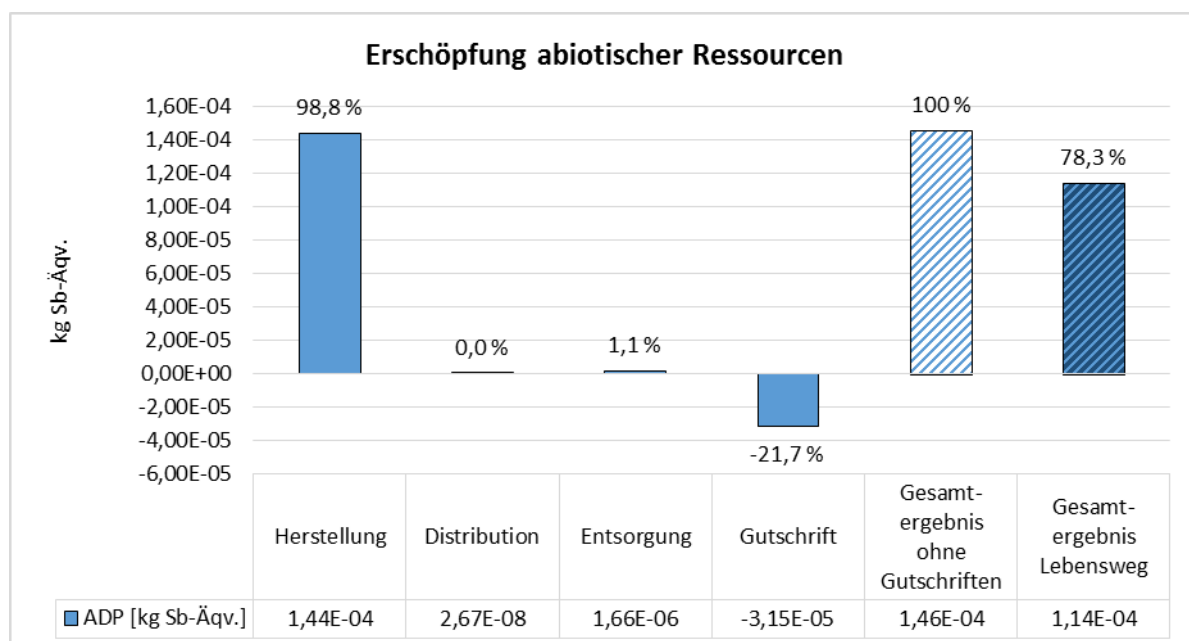


Abbildung 48: Erschöpfung abiotischer Ressourcen (Abiotic Resource Depletion Potential, ADP, in Antimon (Sb)-Äquivalenten) über den gesamten Lebenszyklus



Hot-Spot-Analyse der Herstellungsphase

Im Folgenden wird die Herstellungsphase als die Lebenszyklusphase mit dem weitaus größten Beitrag in allen betrachteten Wirkungskategorien in einer „Hot-Spot-Analyse“ genauer untersucht.

Abbildung 49 zeigt die anteiligen Umweltlasten der Komponenten des Akkus (Zellen, Batteriemanagementsystem und Gehäuse) in der Herstellungsphase, Tabelle 26 zeigt die zugehörigen absoluten Werte. Der Herstellung der Zellen ist mit 65 bis 100 % der Großteil der

Umweltlasten in allen Wirkungskategorien zuzurechnen. Das Batteriemanagementsystem (BMS) trägt, je nach Wirkungskategorie, bis zu 35 % der Umweltlasten bei, das Gehäuse bis zu 1 %.

Abbildung 49: Anteilige Umweltwirkungen der Akku-Komponenten in der Herstellungsphase

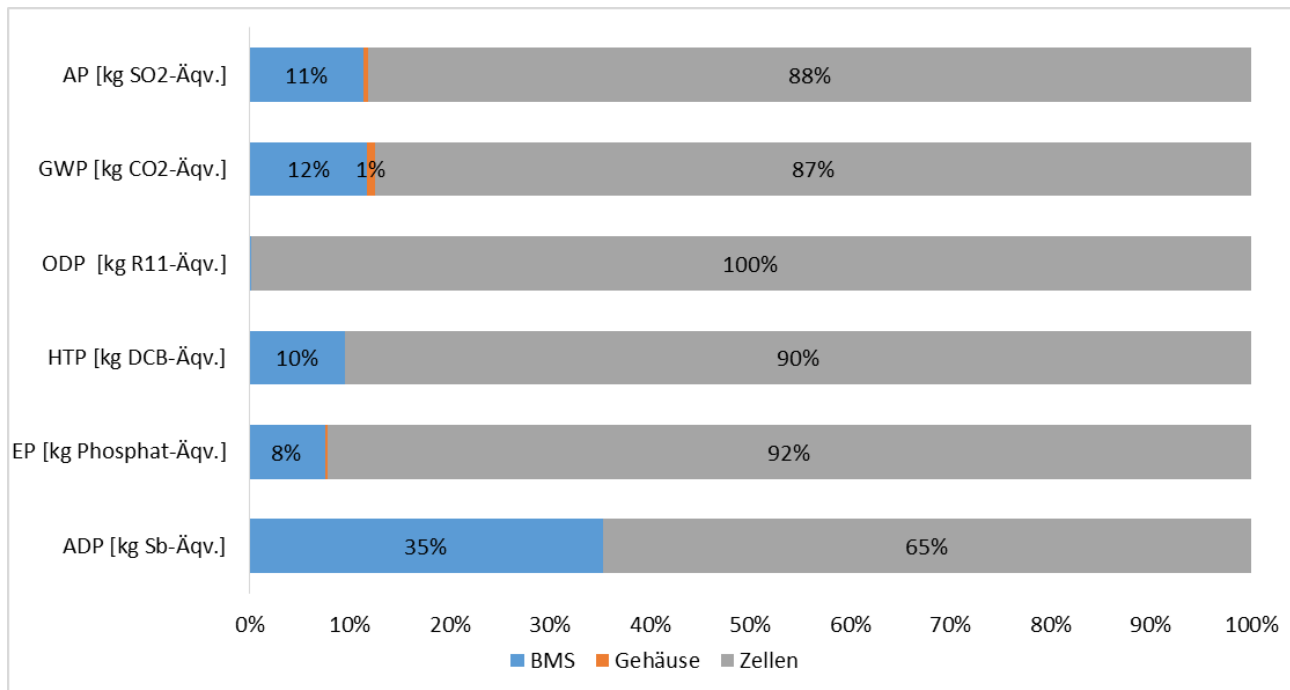


Tabelle 26: Umweltwirkungen der Akku-Komponenten in der Herstellungsphase

Wirkungskategorie	BMS	Gehäuse	Zellen
AP [kg SO ₂ -Äqv.]	4,12E-03	1,65E-04	3,20E-02
GWP [kg CO ₂ -Äqv.]	7,04E-01	4,54E-02	5,22E+00
ODP [kg R11-Äqv.]	1,39E-10	2,51E-13	6,09E-08
HTP [kg DCB-Äqv.]	3,30E-01	6,15E-04	3,14E+00
EP [kg Phosphat-Äqv.]	3,81E-04	1,39E-05	4,63E-03
ADP [kg Sb-Äqv.]	5,07E-05	2,89E-09	9,31E-05

Eine detaillierte Betrachtung der Herstellung der Zellen und des Beitrages der verarbeiteten Materialien folgt in Abbildung 50. In vier der sechs betrachteten Wirkungskategorien kann, mit Anteilen von 62 bis 90 %, der Großteil der Umweltlasten der Kathode zugerechnet werden. Im Fall des Humantoxizitätspotentials hat der Elektrolyt mit 37 % den größten Einfluss, gefolgt von der Kathode mit 26 % und der Anode mit 13 %. Es ist zu beachten, dass die gezeigten Werte jeweils gerundet sind und daher in Summe nicht immer exakt 100 % betragen. Im Fall der abiotischen Ressourcenerschöpfung trägt die Anode mit 68 % den größten Anteil bei, gefolgt von der Kathode mit 31 % Anteil. Die Aufwendungen zur Herstellung der Zellen umfassen die Bereitstellung der Elektrizität (Strom), Stickstoff, Dampf und Wasser. Tabelle 29 zeigt die zugehörigen absoluten Werte.

Abbildung 50: Anteilige Umweltwirkungen der Zellkomponenten in der Zellherstellung

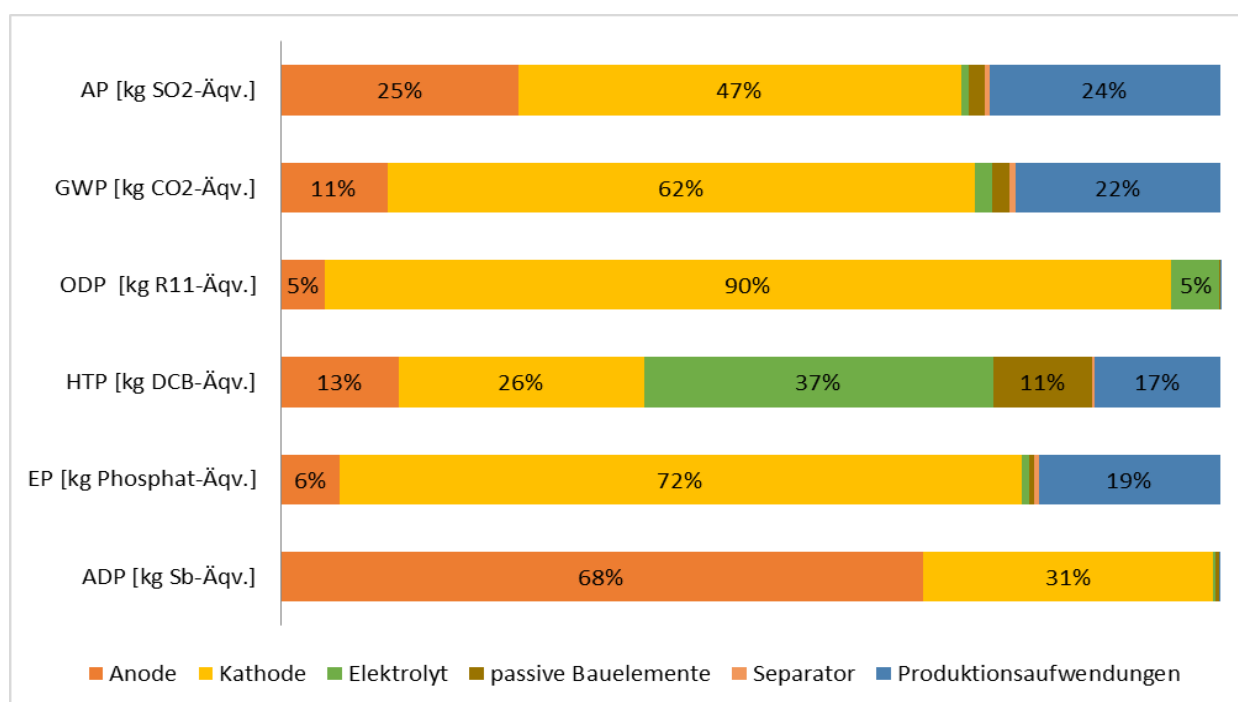


Tabelle 27: Umweltwirkungen der Zellkomponenten in der Zellherstellung

Wirkungskategorie	Anode	Kathode	Elektrolyt	Pass.Bau.	Separator	Prod.Aufw.
AP [kg SO ₂ -Äqv.]	8,12E-03	1,54E-02	2,37E-04	8,35E-04	1,77E-04	7,85E-03
GWP [kg CO ₂ -Äqv.]	5,94E-01	3,29E+00	9,34E-02	1,20E-01	3,55E-02	1,13E+00
ODP [kg R11-Äqv.]	2,89E-09	5,48E-08	3,14E-09	1,39E-11	1,68E-13	1,33E-11
HTP [kg DCB-Äqv.]	3,98E-01	8,17E-01	1,17E+00	3,32E-01	6,48E-03	4,21E-01
EP [kg Phosphat-Äqv.]	2,90E-04	3,36E-03	3,67E-05	3,54E-05	2,04E-05	8,93E-04
ADP [kg Sb-Äqv.]	6,37E-05	2,87E-05	1,42E-07	3,45E-07	1,19E-09	1,44E-07

Die anteiligen Umweltlasten der in der Kathodenherstellung verwendeten Materialien sind in Abbildung 51 dargestellt. Hier ist deutlich erkennbar, dass der Großteil der Umweltwirkungen in vier der sechs betrachteten Wirkungskategorien auf die Produktion von Lithium-Kobaltoxid zurückzuführen ist. Der Binder Polyvinylidenfluorid (PVDF) trägt ungefähr die Hälfte des Ozonabbaupotentials (ODP) bei und auf Aluminium gehen 55 % des Humantoxizitätspotentials der Kathode zurück.

Abbildung 51: Anteilige Umweltwirkungen der Kathodenmaterialien in der Herstellung

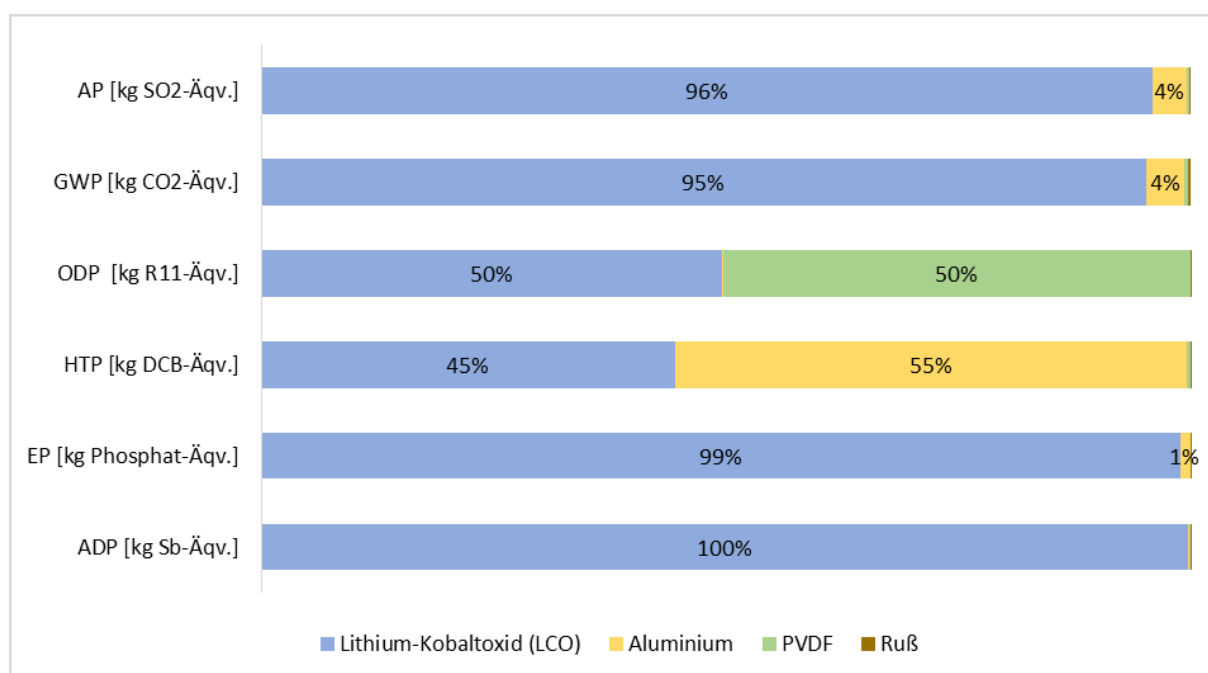


Tabelle 28: Umweltwirkungen der Kathodenmaterialien in der Herstellung

Wirkungskategorie	LCO	Aliminium	PVDF	Ruß
AP [kg SO ₂ -Äqv.]	1,44E-02	5,65E-04	4,00E-05	2,90E-05
GWP [kg CO ₂ -Äqv.]	3,10E+00	1,32E-01	1,62E-02	9,18E-03
ODP [kg R11-Äqv.]	2,72E-08	5,59E-11	2,76E-08	1,18E-11
HTP [kg DCB-Äqv.]	3,64E-01	4,48E-01	4,23E-03	1,25E-04
EP [kg Phosphat-Äqv.]	3,31E-03	3,63E-05	2,98E-06	8,61E-07
ADP [kg Sb-Äqv.]	2,87E-05	5,25E-08	3,69E-08	9,28E-10

5.2 Sensitivitätsanalyse und Szenarien

In der Sensitivitätsanalyse werden wichtige Parameter des betrachteten Systems verändert, um die Robustheit der Ergebnisse zu untersuchen.

Im Ergebnis der Hotspot Analyse (Abschnitt 5.1) wurde festgestellt, dass auf das Kathodenmaterial Lithium-Kobaltoxid (LCO) ein großer Anteil Umweltlasten der Akkuherstellung zurückzuführen ist. So verursacht die Herstellung von LCO mit 3,26 kg CO₂-Äquivalenten 59 % des Treibhauspotentials der Zellherstellung und 51 % bezogen auf den gesamten Lebensweg. In Abschnitt 5.2.1 werden Daten aus der Literatur herangezogen, um Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC) als Kathodenmaterial vergleichend zu bewerten.

In Abschnitt 5.2.2 werden die Umweltwirkungen der Distribution untersucht, wenn der Akku nicht wie im Basisfall vor der Verbringung nach Europa in ein Notebook eingebaut wird, sondern als Ersatzakku die Transportwege zurücklegt.

5.2.1 Einfluss des Kathodenmaterials

Die Sachbilanzdaten für die Herstellung des Kathodenmaterials NMC stammen aus einer Veröffentlichung von Majeau-Bettez et al. (2011). Hierbei ist zu beachten, dass dieser Datensatz

primär für den Bereich der Elektromobilität erstellt wurde und die Übertragbarkeit auf den Bereich IKT nicht abschließend geklärt ist. Im Prinzip ist jedoch davon auszugehen, dass die Aufwendungen zur Materialherstellung für beide Einsatzgebiete vergleichbar sind. Tabelle 29 zeigt die Sachbilanz der Kathode mit modifizierter Aktivmasse. Für diese Sensitivitätsanalyse wurde lediglich LCO durch dieselbe Menge NMC ersetzt, aber keine weiteren Änderungen an der Sachbilanz vorgenommen. Gemäß Graf (2013) ist die Energiedichte von LCO mit 624 Wh/kg und NMC mit 592 Wh/kg vergleichbar.

Tabelle 29: Modifizierte Materialzusammensetzung einer NMC Kathode

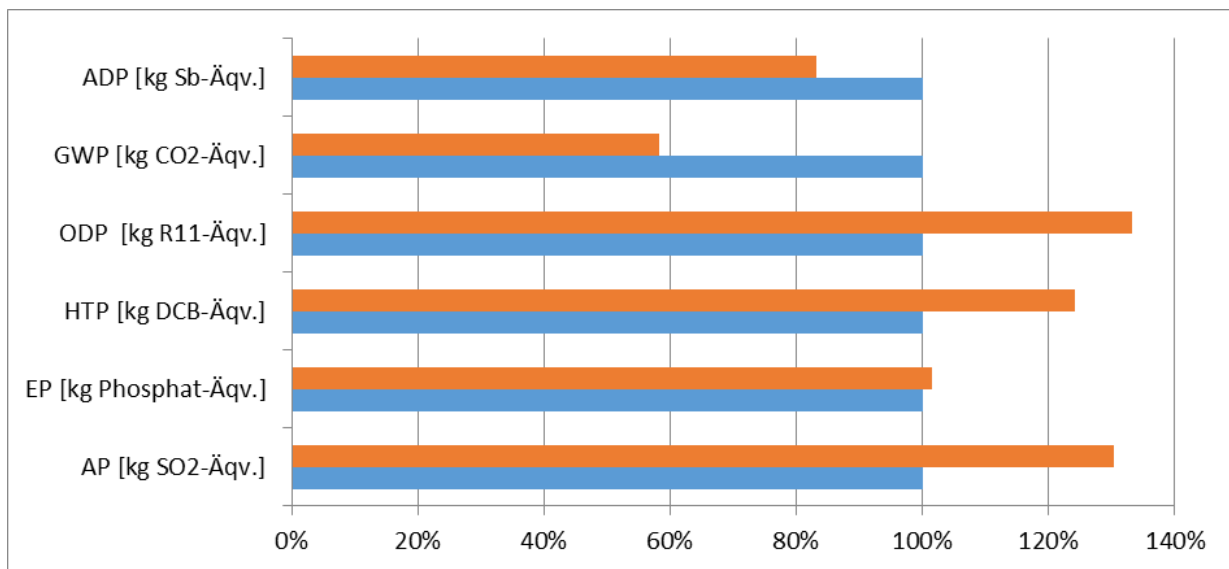
Bestandteile	Materialien	Masse pro Zelle [g]
Aktivmasse	$\text{LiNi}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.4}\text{O}_2$ (NMC)	24,62
Additive	Ruß	0,51
Additive	PVDF	0,51
Stromableiter	Aluminium	3,40
Masse der Komponente		29,04

Abbildung 52 zeigt die Umweltlasten der modellierten Akkus mit NMC- und LCO-Kathoden über den gesamten Lebenszyklus. Das Balkendiagramm stellt zur auf den Basisfall (LCO Akku) normierte Werte dar, während die Datentabelle die absoluten Werte zeigt. Im Vergleich schneidet der Akku mit NMC-Kathode in den Wirkungskategorien Treibhauspotential und abiotischer Ressourcenverbrauch besser ab als der Akku mit LCO-Kathode. In den Wirkungskategorien Ozonabbaupotential, Humantoxizitätspotential, Eutrophierungspotential und Versauerungspotential schneidet der NMC-Akku hingegen schlechter ab als der Akku mit LCO-Kathode.

Das schlechtere Abschneiden des Akkus mit LCO-Kathode in den Wirkungskategorien Treibhauspotential und abiotischer Ressourcenverbrauch ist auf die Bereitstellung von Lithium-Kobaltoxid zurückzuführen. Das schlechtere Abschneiden des Akkus mit NMC-Kathode ist jeweils auf die Umweltlasten zurückzuführen, die mit der Bereitstellung von Nickelsulfat zur Herstellung von NMC verbunden sind.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Datensätze zu LCO und NMC aus verschiedenen Datenquellen stammen, deren Untersuchungsrahmen und Detaillierungsgrad sich unterscheiden. Die in Abbildung 52 gezeigten Ergebnisse sind zu einer ersten Orientierung im Vergleich zwischen den Kathodenmaterialien geeignet, sie sollten aber durch weitere Forschungsarbeiten präzisiert werden. Dies lag jedoch nicht im Fokus dieses Vorhabens.

Abbildung 52: Umweltlasten der Akkus mit NMC und LCO Kathoden im Vergleich, bezogen auf den gesamten Lebenszyklus eines Notebook-Akkus



	AP [kg SO2-Äqv.]	GWP [kg CO2-Äqv.]	ODP [kg R11-Äqv.]	HTP [kg DCB-Äqv.]	EP [kg Phosphat-Äqv.]	ADP [kg Sb-Äqv.]
■ NMC	4,79E-02	3,51	8,63E-08	4,54	4,86E-03	4,79E-02
■ LCO	3,68E-02	6,03	6,95E-08	3,41	4,78E-03	3,68E-02

5.2.2 Distribution eines Ersatzakkus

Im Basisfall wird der hergestellte Akku vor der Verbringung nach Europa in ein Notebook eingebaut. Die Transportwege werden dem Produktsystem Notebook zugerechnet. Alternativ soll untersucht werden, wie sich die Umweltauswirkungen ändern, wenn der Akku als Ersatzakku nicht in einem Gerät verbaut wird und als solcher den Transport antritt. In dem Fall sind Umweltlasten der Distribution vom Werk bis zum Endnutzer dem Akku zuzurechnen. Die Transportwege und Transportmittel sind in Tabelle 22 dargestellt.

Im Ergebnis sind die Umweltlasten der Distribution für einen Ersatzakku bedeutend höher. Tabelle 30 zeigt die Ergebnisse in allen Wirkungskategorien in absoluten Zahlen und den gerundeten Faktor, um den die Ergebnisse des Ersatzakkus im Vergleich zum Basisfall erhöht sind.

Tabelle 30: Umweltwirkungen der Szenarien der Distribution im Vergleich

Wirkungskategorie [Einheit]	Einbauakku	Ersatzakku	Faktor
AP [kg SO2-Äqv.]	5.72E-05	1.57E-03	27
GWP [kg CO2-Äqv.]	1.05E-02	1.23E-01	12
ODP [kg R11-Äqv.]	1.69E-09	1.73E-08	10
HTP [kg DCB-Äqv.]	2.52E-03	5.27E-02	21
EP [kg Phosphat-Äqv.]	1.75E-05	2.61E-04	15
ADP [kg Sb-Äqv.]	2.67E-08	1.83E-07	7

Die Distribution nimmt beim Ersatzakku einen größeren Anteil an den Umweltwirkungen über den Lebensweg ein als im Basisfall. Dennoch liegt die Distribution damit nur im Bereich von wenigen Prozent bezogen auf den gesamten Lebensweg. Die Herstellungsphase bleibt unverändert die Lebenszyklusphase mit den größten Umweltlasten.

5.3 Diskussion

Die Herstellungsphase trägt eindeutig den größten Anteil an den Umweltlasten über den Lebensweg des Notebook-Akkus in allen Wirkungskategorien. Dies liegt am Einsatz von Energie und Materialien zur Herstellung eines Notebook-Akkus, von der Rohstoffbereitstellung bis hin zum fertigen Produkt. Die Distribution vom Werk bis zum Konsumenten trägt nur einen unbedeutenden Anteil bei, insbesondere im Basisfall (Akku zum Einbau in ein Notebook), wenn nur der Transport vom Werk bis zum Hafen betrachtet wird. Die Aufwendungen zur Entsorgung des Akkus tragen wenige Prozentpunkte bei. Das Ausmaß, in dem die Umweltbilanz durch die Rückgewinnung von Sekundärmetallen verbessert wird, ist in den verschiedenen Wirkungskategorien sehr unterschiedlich. Im Fall des Treibhauspotentials kann die erteilte Gutschrift die Umweltlasten der Entsorgungs- bzw. Recyclingprozesse nicht aufwiegen. Besonders positiv ist der Effekt des Recyclings im Fall der Erschöpfung abiotischer Ressourcen (ADP).

In der Hot-Spot-Analyse konnte gezeigt werden, dass die Umweltlasten der meisten Wirkungskategorien maßgeblich durch die Bereitstellung des Kathodenmaterials Lithium-Kobaltoxid (LCO) erzeugt werden. So verursacht die Herstellung von LCO rund 51 % des Treibhauspotentials bezogen auf den gesamten Lebensweg des Akkus.

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss des verwendeten Kathodenmaterials auf die Gesamtumweltbilanz untersucht. Im Ergebnis schneidet ein Akku mit NMC-Kathode in den Wirkungskategorien Treibhauspotential und Erschöpfung abiotischer Ressourcen besser, in den Wirkungskategorien Eutrophierungspotential, Versauerungspotential, Ozonabbaupotential und Humantoxizitätspotential jedoch schlechter ab als der Akku mit LCO-Kathode. Beim Betrachten der Ergebnisse muss man jedoch berücksichtigen, dass die hinterlegten Sachbilanzdaten aus unterschiedlichen Quellen stammen und daher nur bedingt miteinander vergleichbar sind.

Trotz der genannten Einschränkungen in der Vergleichbarkeit kann der Unterschied zwischen LCO und NMC in den Materialien selbst begründet werden. Beispielsweise liegt das Treibhauspotential der Bereitstellung eines Kilogramms primärem Mangan mit rund 2,6 kg CO₂-Äquivalenten weit unter dem Treibhauspotentials der Bereitstellung eines Kilogramms Kobalt (rund 8,2 kg CO₂-Äquivalente). Während der LCO-Akku rund 59 g Kobalt enthält, wird im NMC-Akku nur rund 12 g Kobalt verarbeitet, jedoch knapp 23 g Mangan.

Die Modellierung des EOL beruht ausschließlich auf Literaturdaten. Eine Datenerhebung zum End-of-Life zur Verifizierung und Prüfung der Vollständigkeit konnte im Rahmen dieses Vorhabens nicht durchgeführt werden. Die Gutschriften aus dem Recycling verbessern die Umweltlasten über den Lebensweg zwischen 4,3 % und 21,7 %. Die Umweltlasten der Entsorgungsprozesse kann die erteilte Gutschrift nicht in jedem Fall ausgleichen. Dennoch ist das Recycling sinnvoll, denn es senkt die Nachfrage nach Rohstoffen und die Umweltentlastung ist durch die große Menge der weltweit produzierten Geräte durchaus bedeutsam. Kobalt wird darüber hinaus zu den 20 ‚critical raw materials‘ der EU gezählt (Europäische Kommission 2014).

6 Expertenworkshop zu Lithium-Akkus

Zur Verifizierung von im Forschungsvorhaben erhobenen Daten und getroffenen Annahmen wurde im April 2014 eine eintägige Veranstaltung durch das Projektteam in Zusammenarbeit mit dem Umweltbundesamt durchgeführt. Dabei wurden die großen Themenblöcke des Forschungsvorhabens (Lebensdauer, Sachbilanz, Umweltwirkungen) im Kreis von Vertretern aus der Industrie und Wissenschaft zur Diskussion gestellt. Im Folgenden sind die wichtigsten Erkenntnisse der Veranstaltung zusammengefasst.

Faktoren, die die Lebensdauer von Akkus beeinflussen:

- ▶ Volumenänderung der Zellen durch Ladevorgänge. Es entsteht mechanischer Stress, worauf die verschiedenen Materialien unterschiedlich reagieren.
- ▶ Hohe Spannungen bei vollem Ladezustand, welche zu Oxidationsreaktionen des Elektrolyten führen.
- ▶ Mangelnde Qualität in Produktionsprozessen, was bspw. unerwünschten Feuchtigkeitsgehalt in den Akkuzellen zur Folge haben kann (Wasser reagiert mit dem Elektrolyt zu Flusssäure, welche korrosiv auf die Akkukomponenten einwirkt).
- ▶ Das Maß, zu welchem der Akku geladen (state of charge, SOC) und entladen (depth of discharge, DOD) wird. Eine Verminderung der maximalen Ladung (SOC) oder maximalen Entladung (DOD) kann die Lebensdauer eines Akkus verlängern.
- ▶ Die interne Betriebstemperatur im Endgerät ist besonders relevant für die Lebensdauer der Akkus. Durch spezifische Softwareaktualisierungen im Powermanagement konnte diese bei einem Hersteller um bis zu 10°C gesenkt werden.
- ▶ Optimierte Betriebssysteme die weniger Systemressourcen benötigen, können die Lebensdauer der Akkus durch einen verminderten Energieverbrauch verlängern.

Allgemeine Hinweise:

- ▶ Die im Labortest angewandte Ladeschlussspannung von 4,1 V ist relativ niedrig angesetzt, um den aktuellen Stand der möglichen Ladeschlussspannung bei Lithium-Akkus abzubilden (bei modernen Akkus sind Werte von 4,2 üblich bzw. sogar bis 4,25 V).
- ▶ Es wurde bestätigt, dass der aktuelle Labortest nicht alle Faktoren, welche die Lebensdauer beeinflussen, abbilden kann. Hierfür wären weitere Untersuchungen notwendig - insbesondere weitere Zykientests mit unterschiedlichen Temperaturbedingungen in einer Klimakammer. Die kalendarische Alterung und die unterschiedliche Art, wie der Akku geladen und entladen wird, können im Labor nur mit großem (Zeit-)Aufwand abgebildet werden.
- ▶ Eine Materialanalyse könnte den Zusammenhang zwischen stofflicher Zusammensetzung und Kapazitätsabnahme untersuchen; die kalendarische Alterung beispielweise von Manganoxid-Akku beträgt ca. 1 % pro Monat.
- ▶ These: Die Kühlung von Pouchzellen-Akkus kann durch die Nähe zum Aluminiumgehäuse mancher Notebooks optimiert werden.
- ▶ Die Normen IEC/EN 61951-1, IEC/EN 60622, IEC/EN 61951-2 bzw. IEC/EN 61960 spezifizieren die Kennzeichnung von Akkus. Aus der Kennzeichnung lassen sich einige Informationen herauslesen, z.B. steht „L“ für Lithium-Ionen, „C“ für Kobalt und das „R“ für die zylindrische bzw. das „P“ für die prismatische Bauform. Es können jedoch keine Rückschlüsse auf die Beschaffenheit der Kathoden gezogen werden, welche bspw. mit Kobalt

beschichtet ist, so dass die genaue Zusammensetzung des Kathodenmaterials unbekannt bleibt.

- ▶ Die Entsorgung von Batterien/Akkus im Hausmüll ist per Gesetz verboten, jedoch lassen sich in der Praxis beispielsweise in den Output-Fractionen von mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen Batteriereste nachweisen.
- ▶ Lithium-Akkus haben einen Ladewirkungsgrad von bis zu 95 %. Das bedeutet, dass ungefähr 5 % der zum Aufladen aufgewandten Energiemenge durch Wärmeverluste verloren gehen.

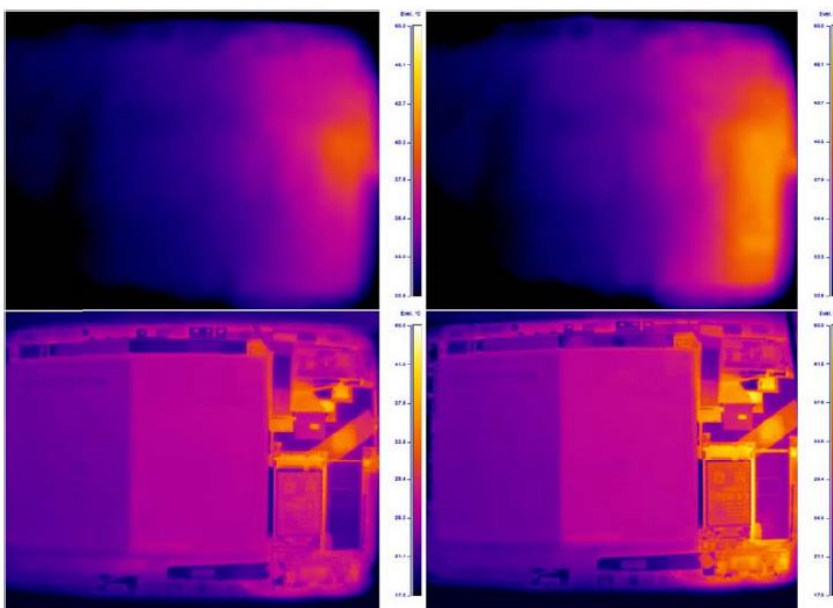
7 Wärmemanagement mobiler IKT-Geräte

Einer der wesentlichen lebensdauerbegrenzenden Faktoren für Akkus ist Wärme. Das Design von IKT-Geräten kann ein mehr oder weniger gutes Wärmemanagement für die Akkus bewirken, abhängig davon, welche Verlustwärme in den einzelnen Komponenten entsteht (sowohl intern im Akku als auch in benachbarten elektronischen Komponenten) und wie diese abgeführt wird.

Bei Notebooks wird die im Gerät entstehende Wärme in der Regel durch aktive Lüfter abgeführt. Hier hat die Positionierung der Lüftungsschlitze, hinter denen Ventilatoren aktiv für Luftzirkulation in und aus dem Gerät sorgt, eine entscheidende Rolle. Typischerweise sind die Lüftungsschlitze an der Unterseite des Gerätes, nach hinten heraus und/oder seitlich angebracht. Die Abführung der Wärme durch Belüftungsschlitze an der Unterseite eines Notebooks wird in der Regel durch die Anbringung von Gummipoppen ermöglicht, welche das Gerät auf einer glatten Oberfläche wenige Millimeter erhöht stehen lassen. Je nach der Beschaffenheit der Oberfläche, auf welcher das Notebook steht, wird die Effektivität dieses Belüftungsmechanismus eingeschränkt. Als Beispiel sei ein privater Konsument genannt, der das Notebook zum Arbeiten, Surfen oder Filme schauen auf Schoß, Sofa, Bett oder Teppich abstellt. Hier kann es zu einem Wärmestau im Gerät kommen, welcher die Betriebstemperatur des Akkus erhöhen kann und sich langfristig negativ auf die Lebensdauer niederschlägt (siehe Alterungsmechanismen in Tabelle 8).

Der Einfluss der Positionierung der Akkuzellen im Endgerät auf die Betriebstemperatur kann anhand von Thermografieaufnahmen verdeutlicht werden. Abbildung 53 zeigt Thermografieaufnahmen eines Tablet-PC mit geöffneter und ungeöffneter Rückseitenabdeckung sowie im Akku- und im Netzbetrieb aus einer Studie von Schischke et al. (2013). Neben der Elektronik (jeweils rechts im Bild) lassen sich die zwei großen Akkuzellen erkennen. Anhand der Färbung ist zu sehen, dass die Akkuzelle, welche näher an der Elektronik positioniert ist, wärmer ist als die Umgebung, während die von der Elektronik abgewandte Akkuzelle kaum wärmer ist als die Umgebung.

Abbildung 53: Thermografieaufnahmen eines Tablet-PCs: Ungeöffnet (oben) und mit geöffneter Rückseitenabdeckung (unten); im Akkubetrieb (links) und im Netzbetrieb (rechts)



Das Gehäuse von mobilen IKT Geräten wie Notebooks, Smartphones und Tablets besteht in der Regel aus Kunststoffen und/oder Metallen und Legierungen. Die Wahl des Gehäusematerials hat ebenfalls einen Einfluss auf das thermische Management des Gerätes: Kunststoffgehäuse (Abbildung 54) führen die Wärme schlechter ab als Metallgehäuse (Abbildung 55), so dass sich diese an der Entste-

hungsquelle (Elektronik) konzentriert. Das Metallgehäuse führt die Wärme gleichmäßiger ab (Abbildung 55). Im Umkehrschluss kann dies aber auch bedeuten, dass Wärme vermehrt über das Gehäuse bis zum Akku geleitet wird.

Abbildung 54: Thermografieaufnahmen eines Tablet-PCs mit einem Gehäuse aus Kunststoff

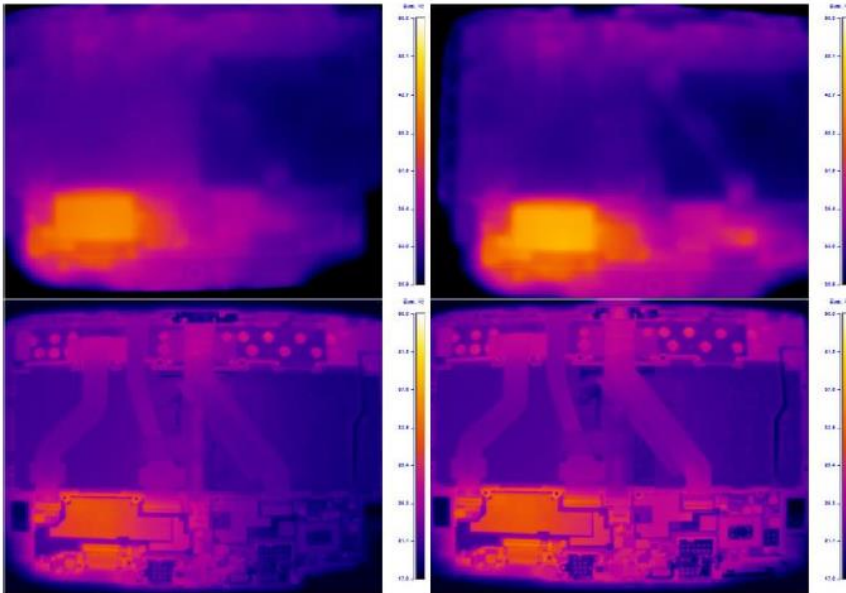
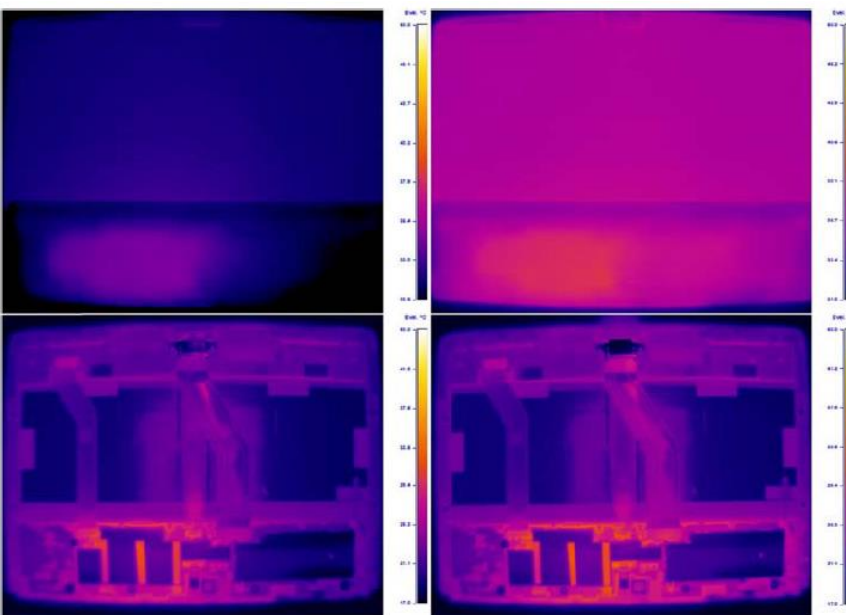


Abbildung 55: Thermografieaufnahmen eines Tablet-PCs mit einem Gehäuse aus Metall



Zusammenfassend kann die Aussage getroffen werden, dass die Positionierung von Akkus im Gerät einen Einfluss auf die Temperatur der Akkuzellen und damit potentiell auf deren Lebensdauer hat. Die Wahl des Gehäusematerials hat ebenfalls einen Einfluss auf die Temperatur der Zellen. Das Abwägen der Vor- und Nachteile von Kunststoff und Metall auf das Wärmemanagement der Geräte lag nicht im Fokus dieses Forschungsvorhaben und eine eindeutige Aussage kann daher an dieser Stelle nicht getroffen werden.

8 Empfehlungen für Hersteller, Verbraucher und Politik

Aus den im Vorhaben gewonnenen Erkenntnissen lassen sich Empfehlungen ableiten, mit denen sich einige der aufgezeigten Problemstellungen adressieren lassen. Dies betrifft die Hersteller einerseits, die ihre Produkte möglichst so gestalten sollten, dass eine Maximierung der Lebensdauer ermöglicht wird. Zum anderen betrifft es die Verbraucher, deren Umgang mit Produkten einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Lebensdauer hat. Des Weiteren lassen sich umweltpolitische Empfehlungen ableiten, mit denen der Gesetzgeber den Umweltauswirkungen von Produkten entgegensteuern kann.

8.1 Empfehlungen für umweltpolitische Maßnahmen

Datenverfügbarkeit für den Endverbraucher

Eine der Erkenntnisse aus diesem Vorhaben ist, dass Daten zum Gesundheitszustand von Akkus für den Verbraucher oftmals nur schwierig und lückenhaft zugänglich sind. Je nach Hersteller und Notebook-Modell fehlen Daten über die Anzahl der durchlaufenen Ladezyklen, die Kapazität bei voller Ladung und die Nennkapazität – und damit den Gesundheitszustand (SOH) - oder das Herstellungsdatum. Dem Verbraucher ist es damit in vielen Fällen nicht möglich, sich über den Zustand des Akkus im eigenen Gerät zu informieren, obwohl gerade der Akku im Vergleich zu anderen Komponenten im Notebook ein wesentliches Verschleißteil ist. Teilweise bieten die Endgerätehersteller proprietäre Softwaretools an, welche Daten aber oftmals nur lückenhaft, mitunter sogar falsch, oder aggregiert zur Verfügung stellen, bspw. in der Form einer Bewertung des Gesundheitszustandes als „gut“ oder „kritisch“. Die den Nutzerinnen und Nutzern zur Verfügung stehenden Informationen sind zwischen verschiedenen Modellen und Herstellern nicht einheitlich. Dem Nutzenden ist es somit nicht möglich, eine informierte Entscheidung über die weitere Nutzung oder den Austausch eines Geräteakkus zu treffen. Zudem ist es dem Nutzenden ggf. nicht möglich, rechtzeitig Gewährleistungsansprüche zu stellen. Es behindert ferner die Weitervermarktung gebrauchter Notebooks, weil Refurbisher und potenzielle Kunden nicht einschätzen können, in welchem Zustand der Akku ist.

Über die Smart Battery System (SBS) Specifications sind standardisierte Informationen über die Eigenschaften und den Gesundheitszustand des Akkus in mobilen IKT Geräten verfügbar. Der Definition nach ist eine Smart Battery eine mit spezieller Hardware ausgestattete Batterie (bzw. ein Akku), die dem Endgerät (z.B. dem Notebook) Informationen zum momentanen Zustand sowie Vorausberechnungen zur Verfügung stellt (SBS Specifications 1998). In den SBS Specifications ist definiert, welche Daten dem Nutzenden zugänglich gemacht werden sollen. Es finden sich Begriffsdefinitionen und Vorgaben dazu, in welchem Register der Elektronik des Akkus ein bestimmter Wert hinterlegt werden soll. Das SBS wurde im Jahr 1995 von Duracell und Intel begründet, die letzte Revision der SBS Specifications stammt von 1998. Die „list of adopters“ (Liste der Anwender) des SBS, die auf der Webseite aufgeführt sind¹⁸, ist kurz und schließt keinen der großen Akkuhersteller ein. Eine Erkenntnis des Vorhabens ist, dass die SBS Specifications kaum durch die Hersteller umgesetzt werden.

Es konnte im Vorhaben nicht abschließend geklärt werden, weshalb der Akku die Daten zum eigenen Gesundheitszustand nicht korrekt bzw. nicht im durch das SBS vorgesehenen Register abspeichert. Ebenfalls konnte nicht abschließend geklärt werden, ob die Betriebssysteme die Daten korrekt über die vorgesehene Schnittstelle abfragen können. Um den Nutzerinnen und Nutzern Daten zum Zu-

¹⁸ Siehe <http://sbs-forum.org/adopters.html> (abgerufen 26.06.2015)

stand von Geräteakkus in einem standardisierten Format jederzeit problemlos zugänglich zu machen, bedarf es mindestens des Zusammenspiels von Akku, Endgerät und Betriebssystem.

Es lassen sich die folgenden Empfehlungen zur Prüfung für eine Umsetzung in Form einer freiwilligen Selbstverpflichtung der Hersteller oder die Integration in produktpolitische Instrumente ableiten:

- ▶ Dem Verbraucher sollen mindestens die folgenden Akkudaten verfügbar gemacht werden:
 - Zahl der bisher durchlaufenen Ladezyklen (Cycle Count)
 - Nennkapazität (Nominal Capacity/Design Capacity)
 - Kapazität bei voller Ladung (Full Charge Capacity)
 - Ladezustand (State of Charge)
 - Herstellungsdatum des Akkus (Manufacture Date)
 - Hersteller des Akkus
 - Aktuelle Temperatur des Akkus
- ▶ Die Definition der Datenpunkte soll zwischen den Herstellern standardisiert sein, beispielsweise im Sinne der SBS Specifications.
- ▶ Die Daten sollen auch durch herstellerunabhängige Software ausgelesen werden können (z.B. Betriebssystem, herstellerunabhängige Softwaretools), das Auslesen soll nicht auf herstellereigene Softwaretools beschränkt sein.
- ▶ Die Übernahme der SBS Specifications für diesen Zweck soll auf ihre Anwendbarkeit und die Notwendigkeit der Überarbeitung hin geprüft werden. Auch sollte geprüft werden, ob aktuellere Standards existieren, die das gleiche Ziel verfolgen, beispielsweise aus dem Bereich der Elektromobilität. Andernfalls sollte die Sinnhaftigkeit einer Aktualisierung der SBS Specifications als Grundlage für eine Standardisierung geprüft werden.
- ▶ Die Erarbeitung einer internationalen Norm für Smart Batteries kann als sinnvolle Grundlage für das weitere Einbringen in produktpolitische Instrumente dienen. Es wird daher angeregt, dass unter der Ökodesign-Richtlinie ein Mandat für eine Norm für Smart Batteries an CEN erteilt wird. Diese Norm sollte verpflichtender Bestandteil der Ökodesign-Anforderung für Computer werden.
- ▶ Alternativ könnte die zu erarbeitende Norm für Smart Batteries in die bestehende Norm DIN EN 61960 eingearbeitet werden.

Mindestanzahl Ladezyklen

Die Mindestanzahl der Ladezyklen bei sachgemäßer Nutzung des Akkus soll vom Endgerätehersteller garantiert werden. Aktuell beinhaltet die Ökodesign-Richtlinie die Anforderung bezogen auf Notebooks, dass „*die erreichbare Mindestanzahl der Ladezyklen eines Akkus*“ in den „*technischen Unterlagen und auf frei zugänglichen Websites bereitgestellt werden*“ muss (Verordnung (EU) Nr. 617/2013). An dieser Stelle ist eine Konkretisierung der Anforderungen notwendig, welche die folgenden Punkte adressiert:

- ▶ Zur Bestimmung der Mindestzahl der Ladezyklen müssen die Hersteller eine standardisierte Messvorschrift verwenden, um die Ergebnisse vergleichbar zu ermitteln und glaubhaft darstellen zu können. Zu diesem Zweck kann als Mindestanforderung die im Vorhaben angewandte Norm DIN EN 61960 herangezogen werden.

- ▶ Damit die Hersteller die o.g. Anforderung in einem absehbaren Zeitrahmen erfüllen können, kann die Messung beim Erreichen des Grenzwertes von 80% der Nennkapazität abgeschlossen werden (statt 60 % wie in DIN EN 61960 angegeben).
- ▶ Als eine Alternative zur Forderung nach einer Mindestzahl der Ladezyklen kann eine Zyklisierung nach DIN EN 61960 für eine definierte Anzahl Ladezyklen (z.B. 300 oder 1000) durchgeführt werden, unter Angabe des am Ende der Zyklisierung verbleibenden Gesundheitszustandes in Prozent.
- ▶ Denkbar wäre auch eine Kombination der beider Angaben: Der Hersteller gibt entweder an, wie viele Zyklen der Akku im Betrieb durchlaufen kann, bis er einen SOH von 80 % unterschreitet; oder, wenn diese Zahl höher als (beispielsweise) 1000 ist, dann gibt er den SOH nach genau 1000 Zyklen an. Das hätte den Vorteil, dass die Hersteller zyklenbeständiger Akkus nicht durch besonders zeitraubende Messreihen belastet werden.
- ▶ Es wird empfohlen, zu prüfen, ob es möglich und sinnvoll ist gerätespezifischen Lastprofilen in den Messvorschriften einzubeziehen, um die Zyklisierung den realen Bedingungen im Gerät weiter anzupassen.
- ▶ Bei immer mehr Geräten können Nutzerinnen und Nutzer den Akku nicht mehr selber wechseln. Erklärtes Ziel des Umweltbundesamtes ist es, dies zu unterbinden (Odenthal 2014). Bis dies erreicht ist, wäre es denkbar, die Mindest-Ladezyklenzahl daran zu koppeln, ob der Akku auswechselbar ist oder nicht. Wenn der Akku vom Nutzer oder der Nutzerin ausgetauscht werden kann, dann sollte der Akku beispielsweise mindestens 1000 Zyklen durchhalten, bis der SOH von 80 % unterschritten wird. Wenn der Nutzer oder die Nutzerin den Akku aber nicht selbst austauschen kann, muss der Hersteller eine höhere Zyklenzahl (bspw. 2000) gewährleisten.

8.2 Maßnahmen zur Lebensdauerverlängerung seitens der Hersteller

Softwareseitige Einstellmöglichkeiten zur Akkupflege

Aus den bei AfB erhobenen Felddaten lässt sich entnehmen, dass ein großer Anteil der Notebooks relativ wenig mobil genutzt wurden. Die hauptsächliche stationäre Nutzung im Netzbetrieb (z.B. an einer Dockingstation) durch Nutzerinnen und Nutzer kann dazu führen, dass der Ladezustand des Akkus permanent nahe 100 % gehalten wird, was auf Dauer zu Zellschädigungen führen kann (vgl. Alterungsmechanismen in Tabelle 8). Die Möglichkeit zum Eingriff der Nutzerinnen und Nutzern in das Lademanagement des Notebooks und damit eine softwareseitige Möglichkeit zur aktiven Akkupflege durch den Nutzenden ist von einigen wenigen Herstellern durch verschiedene Ansätze bereits realisiert, fehlt bei anderen jedoch noch vollständig.

Als Beispiel sei die softwareseitige Einstellungsmöglichkeit eines Herstellers erwähnt, die dem Nutzenden erlaubt, im Netzbetrieb einen maximalen Ladezustand festzulegen sowie einen unteren Ladezustand, ab dem die Ladeelektronik wieder mit dem Laden beginnt. Dies erfolgt entweder über das Aktivieren einer Einstellung zur Optimierung der Akkulebensdauer und die Begrenzung auf einen festgelegten maximalen Ladezustand, oder die manuelle (frei wählbare) Festlegung der oberen und unteren Grenzen für den Ladezustands durch den Nutzenden. Diese Möglichkeiten zur Akkupflege sollen leicht zugänglich sein und ausreichende Informationen zum Verständnis durch den Nutzenden bereitstellen.

Designempfehlung für effektives Wärmemanagement

Damit das Wärmemanagement von Notebooks effektiv funktioniert, muss gewährleistet sein, dass die Luftein- und -auslässe nicht blockiert sind. Durch die Luftauslässe wird von aktiven Ventilatoren Wärme aus dem Gerät abgeleitet. Bei einigen Notebook-Modellen sind die Lüftungsschlitze an der Unterseite angebracht. Dieses ungünstige Design kann je nach Nutzungsszenario zu einem Wärmestau im Gerät führen, beispielsweise wenn das Notebook auf einem weichen Untergrund steht. Eine klare Designempfehlung an die Hersteller ist also, das Design an typische Nutzungsszenarien anzupassen und die Luftauslässe seitlich und/oder hinten am Gerät anzubringen um ein effektives Wärmemanagement zu ermöglichen.

Der Akku darf im Gerät nicht in unmittelbarer Nähe von Wärmequellen angebracht sein.

Qualitätsgeprüfter Herstellungsprozess

Aus den bei AfB erhobenen Felddaten lässt sich entnehmen, dass zwischen Akkus verschiedener Hersteller erhebliche qualitative Unterschiede bestehen können. Im Rahmen des Expertenworkshops wurden darüber hinaus Hinweise auf mangelnde Herstellungsprozesse gegeben.

Um die Lebensdauer der Akkus und damit einhergehend die Lebensdauer von Geräten mit fest eingebauten Akkus zu maximieren, sollten Herstellungsprozesse festzulegenden Qualitätsmerkmalen unterliegen. Dies kann einerseits durch die Hersteller in Form einer freiwilligen Selbstverpflichtung oder durch Erarbeitung einer Rahmenrichtlinie umgesetzt werden, die besagt, welche Standards und Mindestbedingungen bei der Herstellung berücksichtigt und eingehalten werden müssen. Ggf. wären solche Standards und Mindestbedingungen noch zu erarbeiten.

Endnutzer sollten den Akku selber wechseln können

Wenn in einem Gerät der nicht wechselbare Akku defekt ist oder die Kapazität auf ein für den Nutzenden nicht mehr akzeptables Niveau gesunken ist, kann dies dazu führen, dass das Gerät vorzeitig ausgemustert wird. Nutzerinnen und Nutzer sollten daher die Möglichkeit haben, Akkus selber auszutauschen

Bereitstellen von Informationen für den Kunden

Das Nutzerverhalten kann die Lebensdauer von Lithium-Akkus maßgeblich beeinflussen. Dementsprechend veröffentlichen Gerätehersteller teils umfangreiche Informationen zum korrekten Umgang mit den Akkus, um zu einer langen Lebensdauer beizutragen. Trotzdem sind sich nicht alle Nutzenden über den korrekten Umgang mit den Akkus bewusst. Beispielsweise ist das Wissen um den Memory-Effekt weit verbreitet, der z.B. bei NiCd-Akkus die Kapazität durch Teilladungen verringert. Viele Nutzerinnen und Nutzer wissen jedoch nicht, dass der Memory-Effekt bei modernen Lithium-Akkus keine Rolle mehr spielt und Teilladungen für die Lebensdauer dieser Akkus sogar günstiger sind als Vollzyklen (vgl. Abschnitt 8.3). Den Herstellern wird daher empfohlen, den Nutzenden Informationen zum korrekten Umgang mit Lithium-Akkus zur Verfügung zu stellen. Die Informationen sollen einfach zugänglich sein, beispielsweise in Form eines Merkblattes, das mobilen IKT Geräten oder Ersatzakkus beigelegt wird. Unbedingt zu erwähnen ist dabei beispielsweise die Warnung vor einer schädigenden Tiefentladung oder zu warmer oder zu kalter Lagerung von Akkus, die die Akkulbensdauer drastisch reduzieren kann (vgl. Alterungsmechanismen in Tabelle 8).

8.3 Empfehlungen für einen angemessenen Umgang mit Lithium-Akkus

Im Folgenden sind Informationen und Empfehlungen von Herstellern und Dritten zu Ladeverhalten, Lagerung und Entsorgung von Lithium-Akkus mobiler IKT zusammengefasst. Um die Umweltlasten von Akkus zu minimieren, wird empfohlen, die Lebensdauer durch die Berücksichtigung der genannten Einflussfaktoren zu erhöhen.

Auswahl des geeigneten Gerätes

Wie beschrieben, wurden die im Rahmen dieser Studie untersuchten Notebooks weniger intensiv mobil genutzt als erwartet. Die Hälfte der bei AfB ausgelesenen Akkus hatte 20 oder weniger Zyklen im Jahr durchlaufen (vgl. Abbildung 31). Für Nutzerinnen und Nutzer, die ihre Geräte nicht oder kaum im Akkubetrieb nutzen, sondern an der Dockingstation am Arbeitsplatz oder im heimischen Betrieb, wären auch Mini-PCs o.ä. geeignet, ggf. ergänzt durch einen Pool von Notebooks für Dienstreisen.

Ladeverhalten

Den oben bereits erwähnten Memory Effekt gibt es bei Lithium-Akkus nicht. Es ist also nicht notwendig oder förderlich, den Akku ganz zu entladen bzw. ganz aufzuladen. Das Gegenteil ist der Fall: Daten von Mähliß (2014) zeigen, dass Vollzyklen, also Aufladen des Akkus bis 100 % (state of charge, SOC) und Entladen (depth of discharge, DOD) bis 0 % der speicherbaren Kapazität, die Lebensdauer im Vergleich zu Teilzyklen stark verkürzen. Flache Lade-/Entladezyklen hingegen können die Lebensdauer von Akkus bedeutend optimieren. Dem Nutzenden wird daher empfohlen, das Gerät rechtzeitig ans Stromnetz anzuschließen, bevor der Ladezustand soweit absinkt, dass sich das Gerät selbst ausschaltet – beispielsweise bereits bei einem Ladezustand von 20 %. Es ist darüber hinaus empfehlenswert, softwareseitige Einstellmöglichkeiten zur Akkupflege zu nutzen, wie sie in Abschnitt 8.2 beschrieben sind. Diese brechen den Ladevorgang ab, bevor der Ladezustand von 100 % erreicht wird, was die Zellspannung vermindert und die Alterung des Akkus tendenziell verzögert.

Um eine übermäßige Erwärmung des Gerätes und des Akkus zu vermeiden, wird empfohlen, bei Zimmertemperatur und möglichst im ausgeschalteten Zustand zu laden.

Wärmemanagement

Wie oben erwähnt, leiten Luftauslässe im Gerät entstehende Wärme ab, i.d.R. mithilfe von aktiven Ventilatoren. Daher sollte ein Notebook mit Luftein- und -auslässen auf der Unterseite nicht auf einer unebenen bzw. weichen Oberfläche (Schoß, Sofa, Bett, Teppich) abgestellt betrieben werden, da hier die Luftauslässe blockiert werden können und damit die Wärmeabfuhr nicht gewährleistet ist. Des Weiteren kann sich im Laufe der Zeit Staub im Gerät festsetzen, welcher ebenfalls die Wärmeabfuhr im Gerät und die Effektivität der Ventilatoren einschränken kann. Daher sollte nach einiger Zeit der Verwendung (z.B. einmal im Jahr oder alle zwei Jahre) das Gerät gereinigt und von Staub befreit werden. Es wird empfohlen, diese Reinigung von entsprechend geschultem Personal durchführen zu lassen, um eine mögliche unsachgemäße Behandlung durch den Nutzenden auszuschließen und somit Defekte am Gerät zu vermeiden.

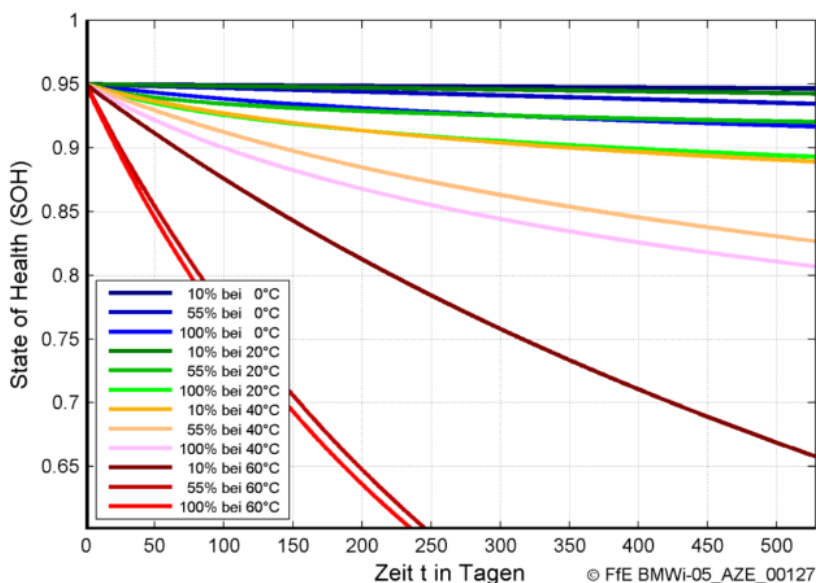
Nutzung und Lagerung

Kälte und extreme Hitze reduzieren die Lebensdauer eines Akkus erheblich. Daher sollte ein Gerät, das über einen Akku mit Energie versorgt wird, bei extremen Temperaturen nicht betrieben und geladert oder geladen werden. Beispielsweise sollte das Handy nicht auf einer Fensterbank bei Sonneneinstrahlung gelegt werden.

Es wird generell empfohlen, Lithium-Akkus bei einem Ladestand von 40 bis 60 % zu lagern. Dieses Vorgehen vermeidet einerseits eine kontinuierlich hohe anliegende Spannung und reduziert damit verbundene Alterungsmechanismen (Kapitel 3.1.6) und beugt andererseits einer möglichen, den Akku schädigenden Tiefentladung vor. Bei einer längeren Dauer der Lagerung sollte der Akku nach einigen Monaten wieder teilaufgeladen werden, um ihn so auf mittlerem Niveau zu halten. Auch sollte bei einer hauptsächlichen Nutzung eines Notebooks im Netzbetrieb der Akku entfernt werden (einer der Gründe, warum Notebook-Akkus grundsätzlich entnehmbar sein sollten). Gerätehersteller bieten teilweise Software Tools an, die die Lebensdauer der eingesetzten Akkus verlängern sollen. Dazu gehören Energiemanager, bei denen sich ein „Erhaltungsmodus“ für Notebook-Akkus einstellen lässt. So kann der Ladestand auf z.B. maximal 60 % festgelegt werden, um eine permanent hohe anliegende Spannung im Netzbetrieb oder während der Lagerung zu vermeiden. Eine Wirkung auf die Lebensdauererweiterung dieser Softwaretools wurde im Rahmen des Vorhabens nicht untersucht.

Der Einfluss der Umgebungstemperatur und des Ladestandes bei der Lagerung wurde von Mezger & Nobis (2012) anhand eines Lithium-Eisenphosphat-Akkus untersucht (Abbildung 56). Die Ergebnisse zeigen, dass der Verlust an speicherbarer Kapazität mit zunehmender Temperatur und mit zunehmendem Ladestand (SOC) zunimmt.

Abbildung 56: Kalendarische Alterung von Lithium-Akkus unter verschiedenen Bedingungen (Temperatur und SOC) (Mezger & Nobis 2012)



Entsorgung. Am Ende ihrer Lebensdauer gehören Altakkus und auch Altbatterien keinesfalls in den Hausmüll oder gar in die Umwelt. Geräte-Altbatterien/-Altakkus können zum Beispiel bei den Sammelstellen der Vertreiber (Händler) zurückgegeben werden. Teilweise nehmen auch die Kommunen Altbatterien/-Altakkus zurück, zum Beispiel über Schadstoffmobile oder auf Recyclinghöfen. Detaillierte Informationen zu lebensdauererweiternden Maßnahmen und zur Entsorgung sind ebenfalls in der Ratgeberbroschüre des Umweltbundesamtes „Batterien und Akkus“¹⁹ zu finden.

Die Gesetzeslage zum Umgang mit Altbatterien bzw. Altakkus ist durch das Batteriegesetz klar geregelt. Demnach sind Besitzer von Altbatterien dazu verpflichtet, diese einer vom unsortierten Siedlungsabfall getrennten Erfassung zuzuführen (vgl. Abschnitt 4.4.1). Für eine zeitnahe Entsorgung

¹⁹ Siehe <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4414.pdf>

von verbrauchten Lithium-Akkus spricht darüber hinaus, dass sie bei Beschädigungen exotherme Reaktionen auftreten können. Sie gelten daher als Gefahrgut. Ein weiterer Grund für eine sachgerechte Entsorgung ist der Gehalt an wertvollem Metall, das nur durch Recycling zurückgewonnen und dem Materialkreislauf zugeführt werden kann. Kobalt gilt beispielsweise als eines von 20 sogenannten ‚critical raw material‘ (Europäische Kommission 2014). Diese strategischen Materialien gelten als zentral wichtig für die Wirtschaft der Europäischen Union, weisen jedoch ein hohes Versorgungsrisiko auf.

9 Schlussfolgerungen und weiterer Forschungsbedarf

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie machen deutlich, dass die Lebensdauer von Lithium-Akkus der IKT je nach Hersteller und Modell deutlich schwankt. Aktuelle IKT-Akkus können unter Laborbedingungen einige tausend Ladezyklen durchlaufen, während die Akkus im Feld teilweise nur wenige hundert Ladezyklen durchlaufen, bis ihre Kapazität deutlich abnimmt. Die Lebensdauer der Akkus ist ein bedeutender Faktor in der Nutzungsdauer nicht nur des Akkus, sondern auch in der Nutzungsdauer des Endgerätes, vor allem wenn der Akku nicht auswechselbar ist.

Der Folgende weitere Forschungsbedarf ist feststellbar:

- ▶ Die Erkenntnisse zur Lebensdauer basieren auf nicht repräsentativen Stichproben. Um die oben getroffenen Aussagen zu verifizieren, ist eine wesentlich breitere, repräsentative Datenbasis wünschenswert. Der Ansatz der kostenlosen Software coconutBattery kann hier als Grundlage zur Datenerhebung als Vorbild dienen. Daten aktueller Geräte aus den letzten zwei Jahren wären besonders hilfreich, um den aktuellen Stand der Technik widerspiegeln zu können; dabei ist zu beachten, dass ein Teil der derzeit am Markt befindlichen Geräte nicht das Smart Battery System unterstützt.
- ▶ Die Laboruntersuchungen bilden das theoretische Potential der Akkus ab. Obwohl die DIN EN 61960 vorgibt, dass das Laderegime des jeweiligen Akkuherstellers Anwendung finden soll, wurde in der vorliegenden Studie lediglich ein Laderegime für alle Zellen verwendet, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. Hier ergibt sich Forschungsbedarf zu einem Standardisierungsverfahren zur vergleichenden Analyse der Lebensdauer von Akkus verschiedener Typen/Hersteller unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens in Form eines standardisierten Lastprofils.
- ▶ Als Verschleißteil kann der Akku eine Hürde für die Weiterverwendung von IKT Geräten im Sinne einer Zweitnutzung sein. Ohne zuverlässige Angaben zum Gesundheitszustand des Akkus ist es beispielsweise einem Refurbisher nicht möglich, einem interessierten Kunden Fragen zum Zustand des Akkus zu beantworten. Dazu kann bei einigen Geräten zwar eine Angabe zum Gesundheitszustand in Prozent ermittelt werden, vermehrt im Kundeninteresse ist aber eine Angabe zur Zeitdauer, die das Gerät noch mit dem Akku betrieben werden kann. Auch aus dem Kreis der Teilnehmer des Expertenworkshops (siehe Kapitel 6) wurde Interesse an einem Softwaretool bekundet, das ähnlich wie BatteryInfoView oder coconutBattery Daten zum Gesundheitszustand ausliest und zusätzlich Vorhersagen über die verbleibende Betriebsdauer eines Gerätes im Akkubetrieb macht. Dazu können entsprechende Algorithmen entwickelt werden, die in Kombination mit einem Benchmarktest den Gesundheitszustand eines Akkus in eine Betriebsdauer unter verschiedenen Nutzungsszenarien umrechnen. Voraussetzung dafür wäre Smart Battery System oder ein vergleichbares standardisiertes System.
- ▶ Die Ergebnisse der Umweltbilanz zeigen, dass die Herstellung des Akkus die dominante Lebenszyklusphase ist. Das End-of-Life trägt in den betrachteten Wirkungskategorien jeweils nur wenige Prozentpunkte zu den Gesamtumweltlasten bei. Das EOL wurden mehrheitlich auf Basis einer Studie von Fisher et al. (2006) modelliert, welche nicht auf repräsentativen Daten beruht (vgl. Tabelle 25). Es ist als unbedingt erforderlich anzusehen, aktuellere Primärdaten bei einem der großen Recyclingunternehmen zu erheben, um die Effekte des Recycling akkurater zu berücksichtigen.

Weiterhin sollten folgende Fragen und Themen in zukünftigen Forschungsvorhaben untersucht werden:

- ▶ Basiert die Angabe zu den bereits durchlaufenen Ladezyklen im Akku bei allen Herstellern auf den gleichen Datenpunkten (z.B. gegenwärtig speicherbare Kapazität oder Nennkapazität)?
- ▶ Welche Faktoren begünstigen irreversiblen Kapazitätsverlust auch wenn ein Akku nur wenig geladen wird?
- ▶ Welche Faktoren beeinflussen bei der Produktion die Zyklenbeständigkeit bzw. Temperaturempfindlichkeit des Akkus?
- ▶ Überprüfung und ggf. Weiterentwicklung der Smart Battery Specifications

10 Quellenverzeichnis

- Amarakoon, S., Smith, J., & Segal, B. (2013): Application of Life-Cycle Assessment to Nanoscale Technology: Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles. No. EPA 744-R-12-001. 2013.
- Angerer, G., Erdmann, L., Marscheider-Weidemann, F., Scharp, M., Lüllmann, A., Handke, V., & Marwede, M. (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchen-spezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zu-künftige Rohstoffnachfrage. ISI-Schriftenreihe „Innovationspotentiale“. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag. ISBN 978-3-8396-0014-6.
- Batteryuniversity.com (2014): BU-205: Types of Lithium-ion.
http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion. Zugriff: 15.10.2014.
- Benecke, Stephan (2014). Persönliches Treffen mit Stephan Benecke, Elektrotechniker im Forschungsschwerpunkt Technologien der Mikroperipherik, TU Berlin am 13. August 2014.
- BITKOM (2015): Erstmals mehr als 100 Millionen Alt-Handys zu Hause
http://www.bitkom.org/de/presse/30739_78445.aspx Zugriff: 15.06.2015
- Buchert, M., Manhart, A., Bleher, D., Pingel, D. (2012): Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. Öko-Institut e.V. im Auftrag des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Recklinghausen.
- Daniel, Claus (2013): Materials and Processing for Lithium-ion Batteries.
<http://www.tms.org/pubs/journals/jom/0809/daniel-0809.html>. Zugriff: 15.03.2015.
- Dimitrakakis, E., Janz, A., Bilitewski, B., Gidarakow, E. (2009): Small WEEE: Determining recyclables and hazardous substances in plastics. Journal of Hazardous Materials 161 (2009) 913–919.
- Deutsches Institut für Normung (2006): Blei-Antriebsbatterien - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfungen (IEC 60254-1:2005); Deutsche Fassung EN 60254-1:2005. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin.
- Deutsches Institut für Normung (2011): Akkumulatoren und Batterien mit alkalischen oder anderen nichtsäurehaltigen Elektrolyten – Lithium-Akkumulatoren und -batterien für tragbare Geräte (IEC 61960:2011); Deutsche Fassung EN 61960:2011. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin.
- ear. (2014): Stiftung Elektro-Altgeräte Register. Vertreten durch den Vorstand Alexander Goldberg. <http://www.stiftung-ear.de/>. Zugriff: 08.09.2014.
- Ecoinvent Centre (2014): ecoinvent data v3.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, Schweiz.
- ElektroG (Elektro- und Elektronikgerätegesetz) (2005): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten vom 16.03.2005.
- EC (European Commission) (2010): Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials; Brussels, Belgium. European Commission. http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf. Zugriff: 23.10.2013.
- Europäische Kommission (2014): MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN über die Überprüfung der Liste kritischer Rohstoffe für die EU und die Umsetzung der Rohstoffinitiative. Brüssel, Belgien.
- Fisher, K., Wallén, E., Laenen, P. P., & Collins, M. (2006): Battery waste management life cycle assessment. Final report for publication. Environmental Resources Management.
- GLoBAL 2000 and Foe Europe (2013): Less is more Resource efficiency through waste collection, recycling and reuse of aluminium, cotton and lithium in Europe.
- Graf, Christian (2013): Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien. Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Reiner Korthauer (ZVEI). Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Guineé, J.B., Huppes, G., Heijungs, R. (2001): An LCA guide for decision support. In: Environmental Management and Health. Vol.12, 3, 2001. MCB University Press.

- Huisman, J., Magalini, F., Kuehr, R., Maurer, C., Ogilvie, S., Poll, J., Delgado, C., Artim, E., Szlezak, J., Stevels, A. (2008): Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment - Final Report. United Nations University Bonn. Study No. 07010401/2006/442493/ETU/G4. http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/final_rep_unu.pdf. Zugriff: 25.02.2013.
- Ishihara, K., Kihira, N., Terada, N., & Iwahori, T. (2002): Environmental burdens of large lithium-ion batteries developed in a Japanese national project. Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan.
- IW Consult GmbH (2011): Rohstoffsituation Bayern – keine Zukunft ohne Rohstoffe, Strategien und Handlungsoptionen. IW Consult GmbH Köln. München.
- Jeroen B. Guinée u.a. (2001): An LCA guide for decision support. In: Environmental Management and Health. Vol.12, 3, MCB University Press.
- Guinée, J.B., Huppes, G., Heijungs, R. (2001): Developing an LCA guide for decision support. Environmental Management and Health, Vol. 12 Iss: 3, pp.301 - 311
- Jossen, A.; Weydanz, W. (2006): Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen. Inge Reichardt Verlag.
- Kim, T.H., Park, J.S., Chang, S.K., Choi, S., Ryu, J.H., Song, H.K. (2012): The Current Move of Lithium Ion Batteries Towards the Next Phase. Advanced Energy Materials, 2012, 2, 860–872.
- Klöpffer, W., & Grahl, B. (2009): Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. John Wiley & Sons. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim.
- Lauwigi, C., Schüler, D., Quack, D., & Vogt, R. (2011): PROSA Kurzstudie: Wiederaufladbare Lithium-Batterien für den Einsatz in tragbaren Geräten. Entwicklung der Vergabekriterien für ein Klimaschutzbezogenes Umweltzeichen. Institut für Energie-und Umweltforschung & Öko-Institut, Heidelberg & Darmstadt.
- Mähliß, J. (2014): Marktanalyse und aktuelle Trends. Vortrag auf dem Expertentreffen „Lithium-Akkus“ des Umweltbundesamtes am 8. April 2014. Berlin.
- Majeau-Bettez, G., Hawkins, T. R., & Strømman, A. H. (2011): Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plug-in hybrid and battery electric vehicles. Environmental science & technology, 45(10), 4548-4554.
- Mezger, T., Nobis, P. (2012): Batteriemessungen im Rahmen des Projekts AZE. E.ON Energie AG, Stadtwerke München GmbH, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
- Mudgal, S., Le Guern, Y., Tinetti, B., Chanoine, A., Pahal, S., Witte, F. (2011): Comparative Life-Cycle Assessment of nickel-cadmium (NiCd) batteries used in Cordless Power Tools (CPTs) vs. their alternatives nickel-metal hydride (NiMH) and lithium-ion (Li-ion) batteries. BIO Intelligence Service, Paris, Frankreich.
- Notter, D. A., Gauch, M., Widmer, R., Wager, P., Stamp, A., Zah, R., & Althaus, H. J. (2010): Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. Environmental science & technology, 44(17), 6550-6556.
- Odenthal Dr., Guido (2014): Austauschbarkeit von Akkus. http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/austauschbarkeit_akkus_odendahl.pdf UBA-Fachtagung am 22. Mai 2014 in Berlin. Zugriff: 10.08.2015
- OECD & IEA (2009): Technology Roadmap, Electric and plug-in hybrid electric vehicles, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)/ International Energy Agency (IEA), 2009.
- PE (thinkstep): GaBi Software-System and Databases for Life Cycle Engineering. Copyright TM. Stuttgart, Echterdingen, 1992 - 2015
- Prakash, S., Liu, R., Schischke, K., Stobbe, L. (2012): Zeitlich optimierter Ersatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten. <http://www.uba.de/uba-info-medien/4316.html>. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Zugriff: 15.06.2015
- Roland Berger (2012): The Lithium-Ion Battery Value Chain. Istanbul.
- Sander, K. & Schilling, S. (2010): Optimierung der Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektroaltgeräten / Elektroschrott. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

- Sapru, V., Khan, I., Gamble, R. (2014): Analysis of the Global Lithium-ion Battery Market: Growth Opportunities and Market Outlook. Frost & Sullivan.
- SBS Specifications (1998): Smart Battery System Specifications, Smart Battery Data Specification, Revision 1.1, December 11, 1998, <http://smartbattery.org/specs/sbdat110.pdf>. Zugriff: 15.05.2015.
- Schnabel, P. (2015): Elektronik-Kompendium.de, Lithium-Ionen-Akkus, <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0810281.htm> Zugriff 15.06.2015
- Siemens (2013): Battery Manufacturing Process. <http://www.industry.siemens.com/topics/global/en/battery-manufacturing/process/pages/default.aspx>. Zugriff: 26.10.2014.
- Siret, C. (2012): Vortrag LCA 2012 –AVNIR. EV&HEV battery developments and perspectives: Closed-loop battery recycling (SAFT).
- Sommer, P. (2013): Recycling Potential of Rare Earth Elements and Cobalt in WEEE-Batteries. Diplomarbeit. Technische Universität Berlin, Fachgebiet Abfallwirtschaft. Berlin.
- Schischke, K., Stobbe, L., Scheiber, S., Oerter, M. Nowak, T., Schlösser, A., Riedel, H., Nissen, N.F. (2013): Disassembly Analysis of Slates: Design for Repair and Recycling Evaluation. Fraunhofer IZM. Berlin.
- Sziegoleit, H. (2013): Sortierung von Gerätebatterien. Tagungsbeitrag zur "Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz" am 4. und 5. März 2013. Tagungsband "Recycling und Rohstoffe", Auflage 6, ISBN: 978-3-935317-97-9. Berlin.
- Tohani, M. (2013): Global Lithium-ion Battery Market – Growth Trends and Application Analysis. Frost & Sullivan.
- Tröltzsch, U. (2005): Modellbasierte Zustandsdiagnose von Gerätebatterien. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München. München.
- Umweltbundesamt. (2012). Deutsche verbrauchen zu viele Hi-Tech-Metalle, Presse-Information 043/2012 des UBA. Recycling von Lithium-Ion-Batterien. <http://www.umweltbundesamt.de/presse/presseinformationen/deutsche-verbrauchen-zu-viele-hi-tech-metalle>. Zugriff: 10.05.2013.
- Walter, Hans (2014). Persönliche Kommunikation mit Hans Walter vom Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration am 13.06.2014.
- Weyhe, R. (2013): Recycling von Lithium-Ion-Batterien. Tagungsbeitrag zur "Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz" am 4. und 5. März 2013. Tagungsband "Recycling und Rohstoffe", Auflage 6, ISBN: 978-3-935317-97-9. Berlin.

11 Anhang

11.1 Bill of Materials und Datenbasis

Tabelle 31: Akkuzelle: Materialzusammensetzung und verwendete Datensätze

Komponente	Bestandteile	Materialien	Masse pro Zelle [g]	Prozess	Datenbank
Kathode	Aktivmasse	LiCoO ₂ (LCO)	24,62	CN: Lithium Cobalt Oxide	GaBi (Herstellerspezifisch)
	Additive	Ruß	0,51	DE: Ruß (C-Träger, aus Ethin Herstellung)	GaBi
		PVDF	0,51	DE: Polyvinylidene fluoride	GaBi
	Stromableiter	Aluminium	3,40	DE: Aluminium Blech Mix	GaBi
	Gewicht Komponente		29,04		
Anode	Aktivmasse	Graphit	12,18	CN: Graphite Powder	GaBi
	Additive	Ruß	0,13	Ruß (C-Träger, aus Ethin Herstellung)	GaBi
		SBR	0,19	DE: Styrol-Butadien-Kautschuk Mix	GaBi
	Stromableiter	Kupfer	4,82	GLO: Kupfer Mix (99,999% aus Elektrolyse)	GaBi
	Gewicht Komponente		17,32		
Elektrolyt	Lösungsmittel	Carbonat (Ethylen-carbonat und Propylencarbonat)	7,5	DE: Carbonate Mix	GaBi
	Salz	LiPF ₆	0,8	JP: Lithium Hexafluorophosphate	GaBi
	Gewicht Komponente		8,3		
Separator	Polyolefin	Polyolefin	2,27	DE: Kunststoff Spritzgussbauteil	GaBi

	Gewicht Komponente		2,27		
Passive Komponenten	Gehäuse	Aluminium	2,36	DE: Aluminium Blech Mix	GaBi
	Positiver Pol	Aluminium	0,1	DE: Aluminium Blech Mix	GaBi
	Negativer Pol	Nickel	0,1	GLO: Nickel Mix	GaBi
	Positiver interner Pol	Aluminium	0,01	DE: Aluminium Blech Mix	GaBi
	Negativer interner Pol	Kupfer	0,01	DE: Copper sheet	GaBi
	Isoliermaterial	Polypropylen	0,001	RER: Polypropylen Spritzgussteil (PP)	GaBi
	Gewicht Komponente		2,581		
Gesamtgewicht einer Zelle			59,51		

Tabelle 32: Akkuzelle: Prozessaufwendungen bei der Herstellung und verwendete Datensätze pro Zelle

Ressource	Menge	Prozess	Datenbank
Elektrizität	0,2346 kWh	CN: Strom Mix	GaBi
Dampf	0,0975 kg	CN: Prozessdampf aus Steinkohle 85 %	GaBi
Wasser	0,6425 kg	DE: Wasser (entsalzt, ionisiert)	GaBi
Stickstoff	0,00795 Nm3	EU-27: Stickstoff	GaBi

Tabelle 33: Batteriemanagementsystem: Materialzusammensetzung und verwendete Datensätze Leiterplatte

Bauteile	Menge/Anzahl auf realer Leiterplatte	Skalierung auf vorhandene Datensätze	Basis der Skalierung	Prozess	Datenbank
IC Lademanager	3 Stück	0,45 Stück	Materialzusammensetzung ähnlich SSOP-Typ (Massefaktor 6,74)	IC SSOP 14 (120mg) 6.0x5.3x1.75	GaBi

IC Ladezustands- messer	1 Stück	0,51 Stück	Skalierung über Volumen	IC TSSOP 48 (102mg) 6.1x12.5x1.2	GaBi
Thermoelement	1 Stück	0,01 g (Approx.)	Entfällt	Nickel, 99,5 %, ab Werk (Ap- proximation)	GaBi
SMD-Widerstand	10 Stück	15,2 Stück	6 Stk. Typ 0603: keine Skalie- rung; 4 Stk. Typ 0805: Skalierung über Masse laut Umbrella Specs ²⁰	Widerstand Dickfilm Flat Chip 0603 (2.1mg)	GaBi
Keramikkondensator	48 Stück	48 Stück	Entfällt	Keramikkondensator MLCC 01005 mit unedlen Metallen (0,054 mg) 0,4x0,2x0,22	GaBi
Sicherung	1 Stück	8 Stück	Aufbau prinzipiell vergleichbar mit SMD Kondensator MLCC; Ska- lierung über Masse	Widerstand Dickfilm Flat Chip 0603 (2.1mg)	GaBi
Transistor	2 Stück	1,3 Stück	Skalierung über Volumen: SOT23: 3,8mm ³ ; SOT323: 2,5mm ³	Transistor signal SOT223 3 leads (110mg) 3.8x7.65x2.3	GaBi
Lötzinn	0,083 g	0,083 g	Entfällt	Lötpaste SnAg4Cu0.6	GaBi
FR4 Leiterplatte, 4- lagig	13,3 cm ²	13,3 cm ²	Entfällt	Leiterplatte 4 Lagen, starr, FR4, chem- elek AuNi Finisch (sub- traktive Methode)	GaBi
Gesamtgewicht	3,29 g				

Tabelle 34: BMS Kabel: Materialzusammensetzung und verwendete Datensätze für weitere BMS Komponenten

Bestandteile	Materialien / Bauteile	Masse [g]	Prozess	Datenbank
--------------	------------------------	-----------	---------	-----------

²⁰ Umbrella Specifications auf der Webseite des ZVEI <http://www.zvei.org/Verband/Fachverbaende/ElectronicComponentsandSystems/Seiten/Umbrella-Specifications.aspx>

Anschlusskabel	Kupferdraht, Polyvinylchlorid (PVC)-Ummantelung	0,6	EU-15: Kupfer Draht ELCD/ECI	GaBi
Verbindungskabel	Aluminium, Polyimid-Ummantelung	5,4	DE: Aluminium Blech Mix PE	GaBi
Steckverbinder	Polyethylen (PE), Kupfer, diverse	0,4	Anschluss, Computer, Peripheriestecker, ab Werk	ecoinvent

Tabelle 35: Akkugehäuse: Materialzusammensetzung und verwendete Datensätze

Bestandteile	Materialien	Masse [g]	Prozess	Datenbank
Kunststoffrahmen	Polypropylen (PP)	8,37	RER: Polypropylen Spritzgussteil (PP)	GaBi
Kunststofffolie	Verbund aus PP und Polycarbonat (PC) / Polystyrol (PS)	3,80	DE: Polypropylen Folie (PP) (ohne Additive)	GaBi
Thermoplast	Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	0,12	DE: Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR) Mix (Approximation)	GaBi
Gewicht Komponente		12,29		

Tabelle 36: Distribution: Angenommene Transportentfernungen und verwendete Datensätze

Abschnitt	Transport-entfernung [km]	Tonnenkilo-meter [tkm]	Transportmittel	Prozess	Datenbank
Werk Nanjing – Hafen Shanghai	304	0,08	LKW > 16t	Transport, Lkw >16t, Flottendurchschnitt	ecoinvent
Hafen Shanghai – Rotterdam	19.380	5,03	Frachtschiff	OCE: Transport, Frachter Übersee	ecoinvent
Rotterdam – Distribution Center (Belgien)	200	0,05	LKW > 16t	RER: Transport, Lkw >16t, Flottendurchschnitt	ecoinvent
Distribution Center (Belgien) – Europäischer Endnutzer	1500	0,39	LKW > 16t	RER: Transport, Lkw >16t, Flottendurchschnitt	ecoinvent

schnitt

Tabelle 37: Transportentfernungen und Transportmittel im End-of-Life nach Fisher et al. (2006)

Abschnitt	Transport- entfernung [km]	Tonnenkilo- meter [tkm]	Transportmittel	Prozess	Datenbank
Sammelbox - Lager	160	0,04	Van < 3,5t	RER: Transport, LKW, 3.5 – 7.5t, Euro 4	ecoInvent
Lager - Sortieranlage	400	0,10	LKW 16t	RER: Transport, Lkw >16t, Flottendurchschnitt	ecoInvent
Sortieranlage - Recyclinganlage	1250	0,32	LKW 28t	CH: Transport, Lkw >28t, Flottendurchschnitt	ecoInvent

Tabelle 38: Verweis auf die Datengrundlage der Entsorgungsprozesse nach Fisher et al. (2006)

Entsorgungsprozesse	Vorgenommene Anpassungen	Quelle	Abschnitt
Sortierung in Sortieranlage	Nicht modelliert wurden einmalige Aufwendungen.	Fisher et al. (2006)	S. 53, Tabelle 2.9
Hydrometallurgische Aufbereitung von Lithium-Akkus	Nicht modelliert wurden einmalige Aufwendungen. Zurückgewonnene Sekundärmaterialien siehe Tabelle 39.	Fisher et al. (2006)	S. 63, Tabelle 2.27
Pyrometallurgische Aufbereitung von Lithium-Akkus	Nicht modelliert wurden einmalige Aufwendungen. Zurückgewonnene Sekundärmaterialien siehe Tabelle 39.	Fisher et al. (2006)	S. 65, Tabelle 2.28

Tabelle 39: EOL: Aus Recyclingprozessen gewonnene Sekundärmaterialien (LCO-Akku)

Sekundärmaterial	Eingesetzte Masse pro Akku in der Herstellung	Für das Recycling verfügbare Masse bei angenommener Sortierung	Dem modellierten System als Gutschrift angerechnete Masse bei 50 % Allokation nach UBA Ansatz (vgl. Abschnitt 4.5)	Prozess	Datenbank
------------------	---	--	--	---------	-----------

		rungsquote von 95 %			
Kobalt	0,0593 kg ²¹	0,0563 kg	0,0282 kg	GLO: Cobalt, ab Werk (invertiert)	ecoinvent
Kupfer	0,0193 kg	0,0183 kg	0,0092 kg	Kupfer Mix (99,999% aus Elektrolyse) (invertiert)	ecoinvent

Tabelle 40: EOL: Aus Recyclingprozessen gewonnene Sekundärmaterialien (NMC-Akku)

Sekundärmaterial	Eingesetzte Masse pro Akku in der Herstellung	Für das Recycling verfügbare Masse bei angenommener Sortierungsquote von 95 %	Dem modellierten System als Gutschrift angerechnete Masse bei 50 % Allokation nach UBA Ansatz (vgl. Abschnitt 4.5)	Prozess	Datenbank
Kobalt	0,0120 kg	0,0114 kg	0,0057 kg	GLO: Cobalt, ab Werk (invertiert)	ecoinvent
Kupfer	0,0193 kg	0,0183 kg	0,0092 kg	Kupfer Mix (99,999% aus Elektrolyse) (invertiert)	ecoinvent
Nickel	0,0240 kg	0,0228 kg	0,0114 kg	GLO: Nickel, 99,5%, ab Werk (invertiert)	ecoinvent

²¹ Die eingesetzte Masse Kobalt pro Akku wurde über den stöchiometrischen Massenanteil der Elemente Lithium, Kobalt und Sauerstoff in Lithium-Kobaltoxid (LiCoO₂) bestimmt. Kobalt macht dabei 60,2 Gew.% an der Verbindung LCO aus. Die eingesetzte Menge LCO pro Akku beträgt 0,09848 kg (24,62 g pro Zelle).

11.2 Ergebnisse der Abschätzung der Umweltwirkungen

Abbildung 57: Erschöpfung abiotischer Ressourcen (Abiotic Resource Depletion Potential, ADP, in Antimon (Sb)-Äquivalenten) über den gesamten Lebenszyklus

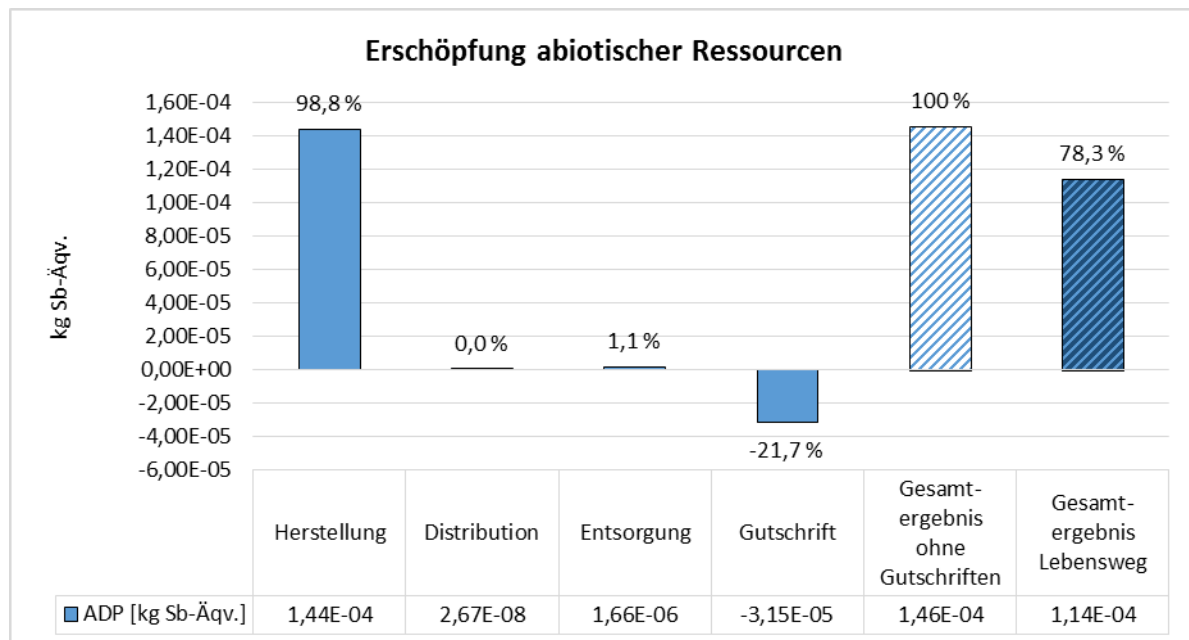


Abbildung 58: Versauerungspotential (Acidification Potential, AP, in Schwefeldioxid (SO₂)-Äquivalenten) über den gesamten Lebenszyklus

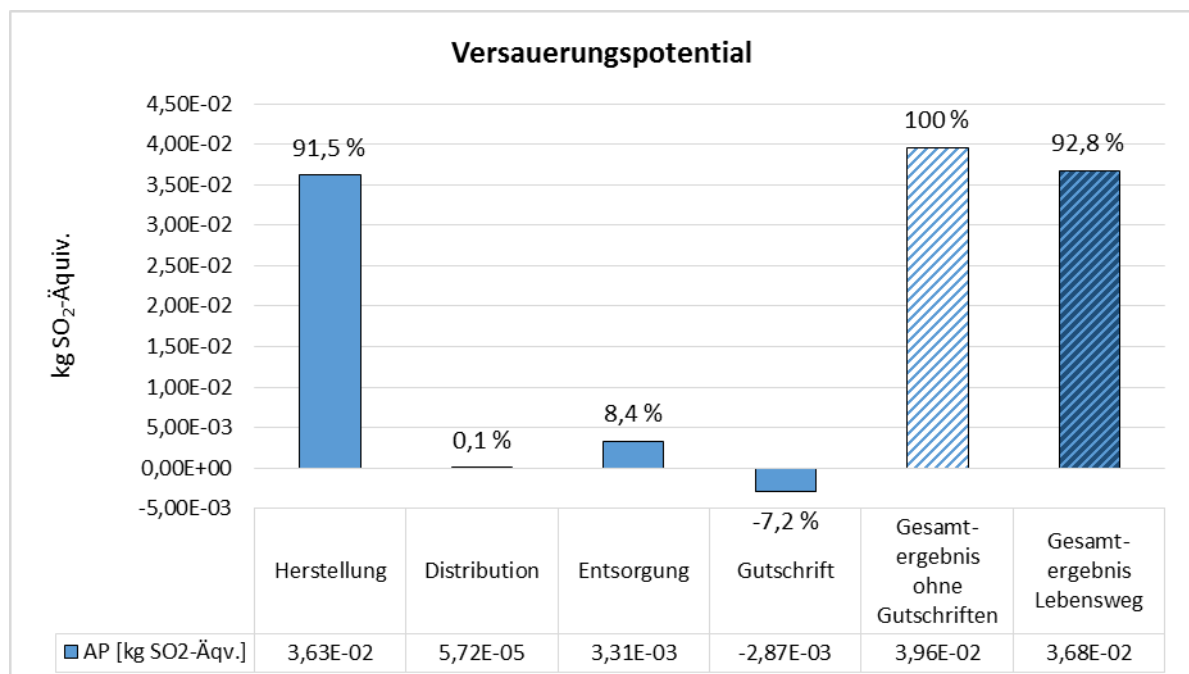


Abbildung 59: Eutrophierungspotential (Eutrophication Potential, EP, in Phosphat-Äquivalenten) über den gesamten Lebenszyklus

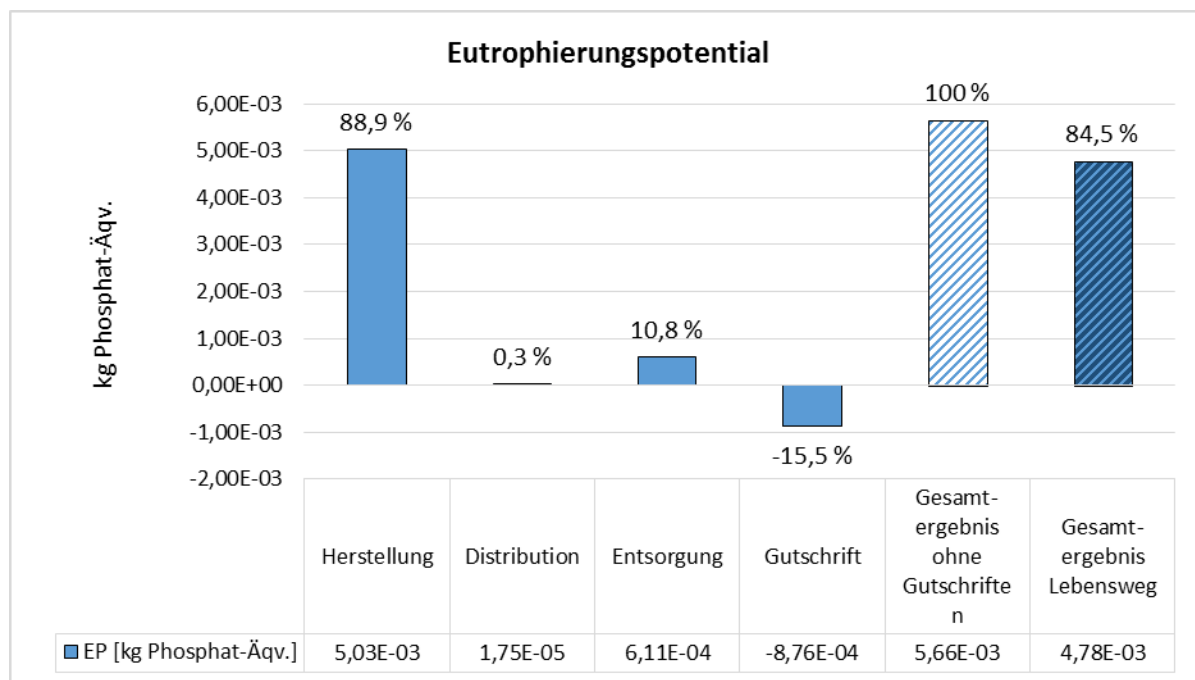


Abbildung 60: Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP) über 100 Jahre in kg Kohlenstoffdioxid-Äquivalenten über den gesamten Lebenszyklus

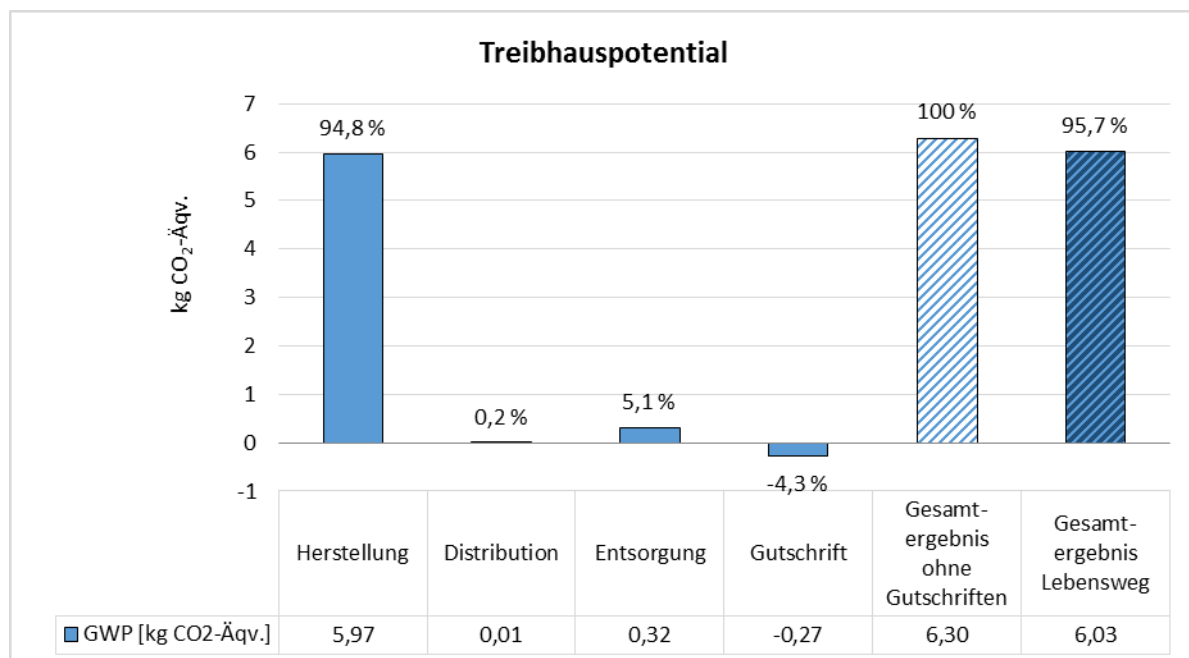


Abbildung 61: Humantoxizitätspotential (Human Toxicity Potential, HTP, in Dichlorbenzol (DCB)-Äquivalenten) über den gesamten Lebenszyklus

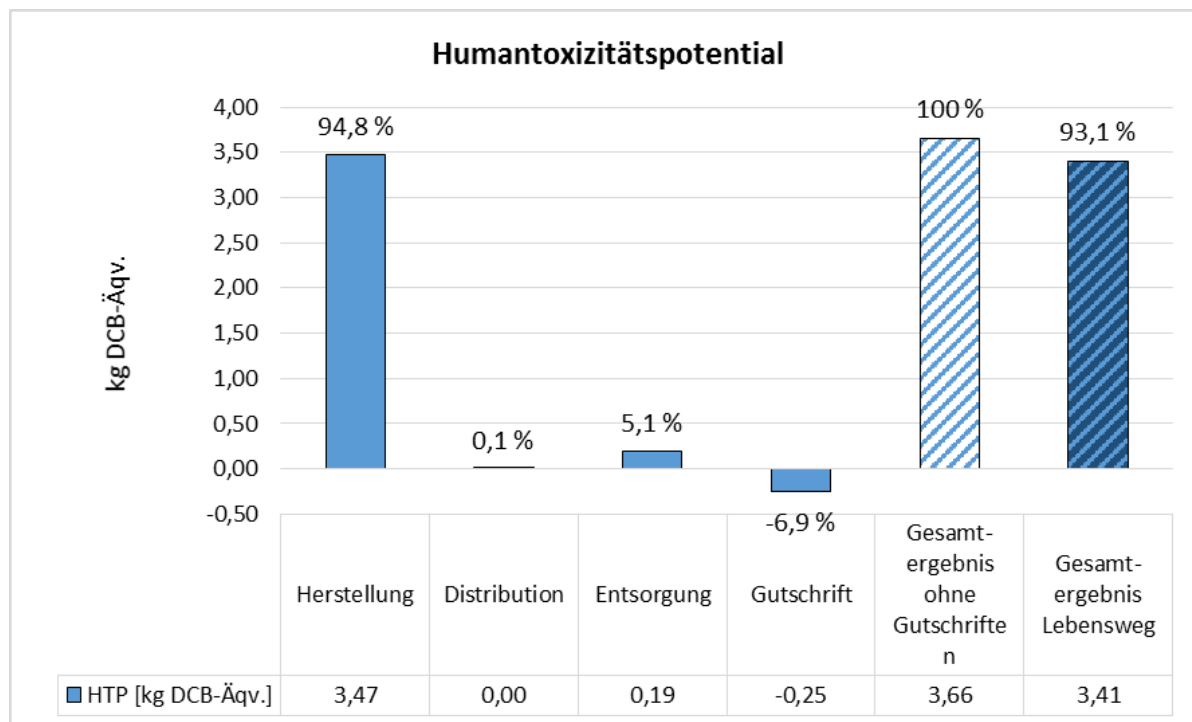
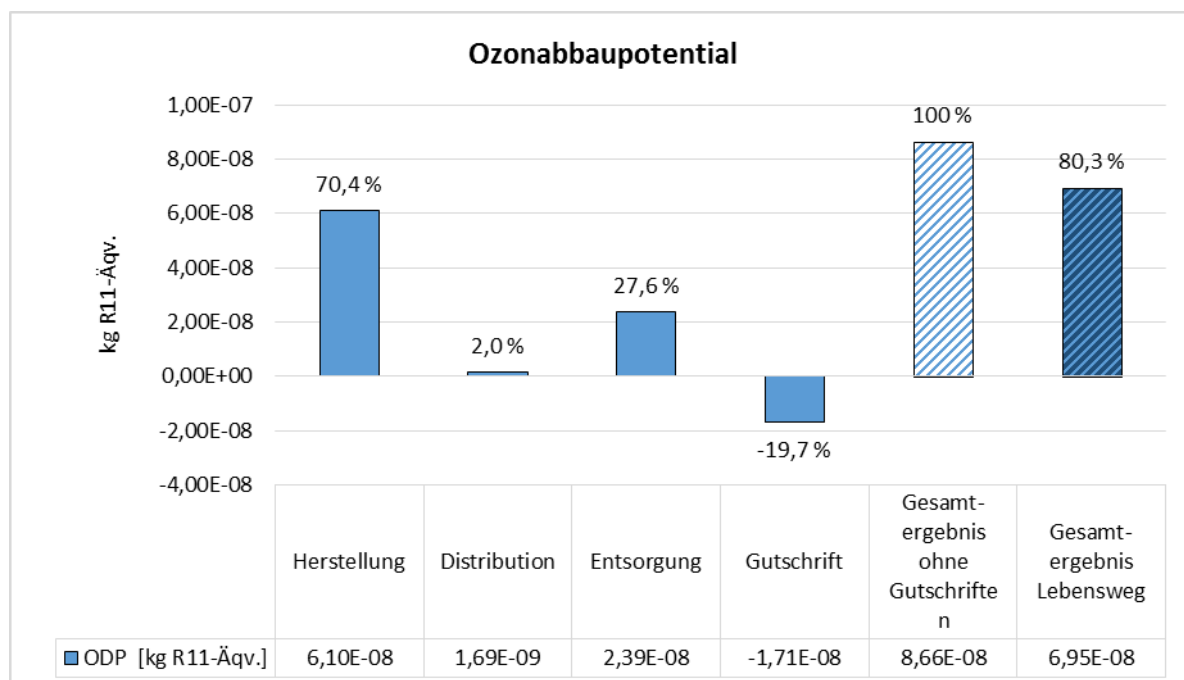


Abbildung 62: Ozonabbaupotential (Ozone Depletion Potential, ODP, in Trichlorfluormethan (R11)-Äquivalenten) über den gesamten Lebenszyklus



11.3 Detaillierte Betrachtung des Ozonabbaupotential im EOL

Der Anteil der Ergebnisse für die Entsorgung in der Umweltwirkungskategorie Ozonabbaupotential sind mit 27,6 % der Gesamtwirkung über den Lebensweg auffallend hoch (Abbildung 62). Eine detailliertere Betrachtung der Prozesse der Entsorgung ergab, dass die Transportprozesse (siehe angenommene Transportdistanzen in Tabelle 23) allein ca. 53 % der Umweltlasten in der Entsorgung verursachen. Das Ozonabbaupotential der Transportprozesse ist auf die Bereitstellung von Diesel zum Betrieb der LKW zurückzuführen. Knapp 47 % Anteil am Ozonabbaupotential der Entsorgungsphase - und damit knapp 13 % des Ozonabbaupotentials über den Lebensweg - wird durch die Prozesse der hydro- und pyrometallurgischen Verwertung (nach Fisher et al. 2006) verursacht.

Abbildung 63: Ozonabbaupotential (Ozone Depletion Potential, ODP, in Trichlorfluormethan (R11)-Äquivalenten) in den EOL Prozessen

