



**Ökobilanz PV-Anlage und Batterie**  
für das Garderoben- und  
Clubgebäude in Zürich Höngg  
Schlussbericht

## **IMPRESSUM**

### **Auftraggeberin:**

Stadt Zürich,  
Amt für Hochbauten,  
Fachstelle Nachhaltiges Bauen,  
Amtshaus III, Lindenhofstrasse 21  
8021 Zürich

### **Bearbeitung:**

Philippe Stolz  
Rolf Frischknecht  
treeze Ltd., Uster  
info@treeze.ch

### **Projektleitung:**

Yvonne Züger  
Fachstelle Nachhaltiges Bauen,  
Amt für Hochbauten

### **Projektteam:**

Thomas Kessler (Stadt Zürich, AHB)  
Carl Paatz (Stadt Zürich, AHB)  
Yves Stettler (Basler & Hofmann AG, Zürich)  
Yvonne Züger (Stadt Zürich, AHB)

Download als pdf von

<https://www.stadt-zuerich.ch/py-batterie>

Zürich, März 2018

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	5
1 Einleitung.....	8
2 Untersuchungsumfang.....	9
2.1 Bezugsgrösse.....	9
2.2 Systemumfang .....	9
2.3 Datengrundlage.....	9
2.4 Bewertungsmethoden.....	10
3 Sachbilanz .....	11
3.1 Übersicht.....	11
3.2 PV-Anlage .....	11
3.3 Lithium-Ionen Batterien .....	12
4 Wirkungsabschätzung.....	19
4.1 Übersicht.....	19
4.2 PV-Anlage .....	19
4.3 Lithium-Ionen Batterien .....	20
5 Datenqualität .....	22
6 Ausblick .....	24
Literaturverzeichnis.....	25
A Anhang: Umweltkennwerte von Strom ab PV-Batterie-System .....	27

# Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr (annum)
AC	Wechselstrom (engl. alternating current)
BMS	Batteriemanagementsystem
CH	Schweiz
CH <sub>4</sub>	Methan
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CO <sub>2</sub> -eq	Kohlendioxid-Äquivalent
DC	Gleichstrom (engl. direct current)
DOD	Entladungstiefe (engl. depth of discharge)
ENTSO-E	Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber (engl. European Network of Transmission System Operators for Electricity)
FePO <sub>3</sub>	Eisenphosphat
GCGH	Garderoben- und Clubgebäude Höngg
GWP	Treibhauspotenzial (engl. global warming potential)
kg	Kilogramm
km	Kilometer
kWh	Kilowattstunde
kWp	Kilowattpeak
L	Liter
Li	Lithium
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
MJ	Megajoule
multi-Si	multikristallines Silizium
NCM	Nickel Cobalt Mangan Oxid
PV	Photovoltaik
SOH	Restkapazität / Gesundheitszustand (engl. state of health)
t	Tonne
tkm	Tonnenkilometer (Einheit für Gütertransporte)
UBP	Umweltbelastungspunkte

# Zusammenfassung

Das Amt für Hochbauten der Stadt Zürich plant derzeit die Erstellung eines Garderoben- und Clubgebäudes in Zürich Höngg (GCGH). Das Gebäude soll mit einer Photovoltaikanlage (PV-Anlage) und möglicherweise mit einem Batteriespeicher ausgerüstet werden. Für den Batteriespeicher stehen verschiedene Typen und Speicherkapazitäten zur Diskussion. Der Umweltfussabdruck der für das Garderoben- und Clubgebäude vorgesehenen Solaranlage wird mit einer Ökobilanz ermittelt. Zusätzlich werden die Umweltauswirkungen von heutigen, zukünftigen und wiederaufbereiteten (second-life) Lithium-Ionen Batterien quantifiziert und miteinander verglichen.

Als Bezugsgrössen werden 1 kWp Maximalleistung der Photovoltaikanlage bzw. 1 kWh Speicherkapazität der Batterie gewählt. Die Ökobilanz der PV-Anlage umfasst die Herstellung der PV-Module, der dachintegrierten Unterkonstruktion, der elektrischen Installation und der Wechselrichter. In der Ökobilanz der Batteriesysteme werden die Herstellung bzw. Aufbereitung (im Fall von second-life Batterien) der Lithium-Ionen Batterien inklusive der Produktion des Batteriemanagementsystems, des Kühlsystems, der Batteriezellen und des Batteriegehäuses berücksichtigt. Die Herstellung der Elektronik für die Steuerung der Batterien, der Verkabelung und des Systemgehäuses sind ebenfalls in der Ökobilanz enthalten. Die Sachbilanzen der PV-Anlage und der Batteriesysteme werden mit Hintergrunddaten des KBOB Ökobilanzdatenbestands DQRv2:2016 verknüpft. Für die Wirkungsabschätzung werden die Indikatoren Gesamtumweltbelastung (UBP'2013), Primärenergiebedarf (erneuerbar und nicht erneuerbar) und Treibhausgasemissionen verwendet.

Die geplante PV-Anlage besteht aus 230 multikristallinen Silizium (multi-Si) PV-Modulen mit einer spezifischen Maximalleistung von 161 Wp/m<sup>2</sup>. Die PV-Anlage ist in das Dach des Garderoben- und Clubgebäudes integriert und hat eine Maximalleistung von 60 kWp. Die Wechselrichter, die elektrische Installation und die Unterkonstruktion werden mit Sachbilanzen des KBOB Ökobilanzdatenbestands modelliert.

Für das Speichersystem mit heute verfügbaren Batterien werden aktuelle und transparent dokumentierte Sachbilanzen zu Lithium-Ionen Batterien mit einer Kathode aus Nickel Cobalt Mangan Oxid (NCM) verwendet. Die Energiedichte dieser Batterien beträgt 105 Wh/kg. Der Materialbedarf für das Stahlgehäuse, die Elektronik und die Verkabelung wird basierend auf einer früheren Ökobilanz von PV-Batterie-Systemen abgeschätzt. Für die Energiedichte von zukünftigen Lithium-Ionen Batterien wird eine Verdoppelung gegenüber heutigen Batterien angenommen (210 Wh/kg). Die Sachbilanzen der Herstellung von LiNCM Batterien werden als Grundlage verwendet und in relevanten Bereichen (Kupfer für die Anode und Strombedarf für die Zellenherstellung) angepasst. Das Speichersystem mit wiederaufbereiteten Batterien wird basierend auf Daten zu einem laufenden Projekt zur Zweitnutzung von Batterien aus Elektrorollern der Post modelliert. Um den Aufwand für das Testen und Sortieren der gebrauchten Lithium-Ionen Batterien zu reduzieren, wird jede Batterie mit einer Leiterplatte ausgestattet, die eine individuelle Bewirtschaftung ermöglicht. Da die Batterien nach der Nutzung in Elektrorollern noch einen finanziellen Restwert haben, werden die Herstellungsaufwände für Lithium-Ionen Batterien ökonomisch auf die Erst- und die Zweitnutzung alloziert. Somit wird der second-life Batterie basierend auf den aktuellen Preisen ein Siebtel der Herstellungsaufwände einer neuen LiNCM Batterie angerechnet. Die Energiedichte der second-life Batterien liegt bei 84 Wh/kg (80 % der Kapazität einer neuen Batterie).

Die Umweltkennwerte der geplanten 60 kWp PV-Anlage des Garderoben- und Clubgebäudes in Zürich Höngg sind in Tab. Z. 1 aufgeführt und werden mit einer ähnlichen 3 kWp PV-Anlage aus dem KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 verglichen. Wegen der höheren Effizienz der für das Garderoben- und Clubgebäude vorgesehenen Module sind die Umweltkennwerte der geplanten PV-Anlage tiefer als jene der Vergleichsanlage. Die Bereitstellung der multi-Si PV-

Module hat einen Anteil von 62 % an der Gesamtumweltbelastung der geplanten PV-Anlage. Die Wechselrichter, die elektrische Installation und die dachintegrierte Unterkonstruktion tragen weitere 21 %, 11 % bzw. 6 % zur Gesamtumweltbelastung bei.

Tab. Z. 1: Umweltkennwerte der geplanten PV-Anlage des Garderoben- und Clubgebäudes in Zürich Höngg und einer integrierten Schrägdachanlage mit PV-Modulen aus multikristallinem Silizium aus dem KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016, bezogen auf 1 Kilowattpeak (kWp) Maximalleistung.

PV-Anlage	Max. Leistung	Bezug	UBP'13	Primärenergie		Treibhausgas-emissionen
	kWp		UBP	erneuerbar kWh Öl-eq	nicht erneuerbar (Graue Energie) kWh Öl-eq	kg CO <sub>2</sub> -eq
GCGH, multi-Si, integriert	60	kWp	2'610'000	727	5'810	1'610
<i>Schrägdach, multi-Si, integriert (KBOB)</i>	3	kWp	2'740'000	703	6'110	1'680

Die Umweltkennwerte von Batteriesystemen mit heutigen, zukünftigen und second-life Lithium-Ionen Batterien sind in Tab. Z. 2 aufgeführt. Das Batteriesystem mit heute verfügbaren LiNCM Batterien verursacht gemäss allen betrachteten Indikatoren, mit Ausnahme des erneuerbaren Primärenergiebedarfs, deutlich höhere Umweltbelastungen als Batteriesysteme mit zukünftigen und second-life Batterien. Die Herstellung der LiNCM Batterien hat einen Anteil von 83 % an der Gesamtumweltbelastung des heutigen Speichersystems. Wegen ihrer deutlich höheren Energiedichte, der Verwendung von Sekundärkupfer für die Anode und dem Bezug von Solarstrom für die Herstellung von Batteriezellen haben die hier modellierten zukünftigen Lithium-Ionen Batterien eine um rund 75 % reduzierte Umweltbelastung. Die Umweltauswirkungen des Speichersystems mit wiederaufbereiteten LiNCM Batterien sind gemäss den betrachteten Indikatoren rund 60 % tiefer als jene des Batteriesystems mit heute verfügbaren Lithium-Ionen Batterien. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass nur ein Siebtel der Herstellungsaufwände der LiNCM Batterien der Zweitnutzung im stationären Speichersystem angerechnet wird und die Aufbereitungsaufwendungen nur wenig zur Umweltbelastung beitragen.

Tab. Z. 2: Umweltkennwerte von Batteriesystemen mit heutigen, zukünftigen und second-life LiNCM Batterien, bezogen auf 1 Kilowattstunde (kWh) Speicherkapazität.

Batteriesysteme	Energiedichte	Bezug	UBP'13	Primärenergie		Treibhausgas-emissionen
	Wh/kg		UBP	erneuerbar kWh Öl-eq	nicht erneuerbar (Graue Energie) kWh Öl-eq	kg CO <sub>2</sub> -eq
Heutige LiNCM-Batterie	105	kWh	594'000	44.2	896	185
Zukünftige LiNCM-Batterie	210	kWh	142'000	64.9	227	49.4
Second-Life LiNCM-Batterie	84	kWh	231'000	25.8	375	80.6

Die Datenqualität der Sachbilanzen für die PV-Anlage und für das Speichersystem mit heute verfügbaren Batterien wird als gut beurteilt. Abzuklären bleibt jedoch, wie repräsentativ die bilanzierte LiNCM Batterie für das im Garderoben- und Clubgebäude in Zürich Höngg zu installierende Batteriesystem ist. Insbesondere die Energiedichte ist ein zentraler Parameter für die Umweltauswirkungen pro Kilowattstunde Speicherkapazität.

Die Sachbilanzen von Batteriesystemen mit zukünftigen und mit second-life Lithium-Ionen Batterien basieren auf Annahmen zu Kenngrössen, die einen grossen Einfluss auf die Resultate haben. Beispielsweise weist die Energiedichte von zukünftigen Lithium-Ionen Batterien eine grosse Unsicherheit auf und der Preis von gebrauchten Batterien aus Elektrolern der Post wird sich wahrscheinlich in den nächsten Jahren erhöhen. Diese Entwicklungen sollten verfolgt und ihr Einfluss auf die Umweltauswirkungen der bilanzierten Batteriesysteme abgeschätzt werden.

Neben den in dieser Studie analysierten Lithium-Ionen Batterien werden auch andere Batterie-konzepte intensiv erforscht, die in Zukunft besonders vorteilhafte Eigenschaften wie beispielsweise eine hohe Energiedichte, hohe Betriebssicherheit oder tiefe Kosten aufweisen könnten. Zu diesen Technologien gehören unter anderem Salzwasserbatterien, Feststoffbatterien (meist lithiumbasiert), Lithium-Metall Batterien, Lithium-Schwefel Batterien, Lithium-Luft Batterien und Redox-Fluss Batterien. Die Umweltauswirkungen dieser Batteriekonzepte konnten im Rahmen der vorliegenden Studie nicht untersucht werden.

# 1 Einleitung

Das Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, AHB, plant derzeit die Erstellung eines Garderoben- und Clubgebäudes in Zürich Höngg (GCGH). Das Gebäude soll mit einer Photovoltaikanlage (PV-Anlage) und möglicherweise mit einem Batteriespeicher ausgerüstet werden. Für den Batteriespeicher stehen verschiedene Typen und Speicherkapazitäten zur Diskussion. Der Umweltfussabdruck der für das Garderoben- und Clubgebäude vorgesehenen Solaranlage wird mit einer Ökobilanz ermittelt. Zusätzlich werden die Umweltauswirkungen von heutigen, zukünftigen und wiederaufbereiteten (second-life) Lithium-Ionen Batterien quantifiziert und miteinander verglichen.

Im vorliegenden Bericht werden der Untersuchungsumfang beschrieben (Kapitel 2), die Sachbilanzen der PV-Anlage und der Batteriespeicher dokumentiert (Kapitel 3) und die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung diskutiert (Kapitel 4). Schliesslich wird in Kapitel 5 die Qualität der verwendeten Daten beurteilt, gefolgt von einem kurzen Ausblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen der Batterietechnologie in Kapitel 6.



## 2 Untersuchungsumfang

### 2.1 Bezugsgrösse

Als Bezugsgrössen werden 1 kWp Maximalleistung der Photovoltaikanlage bzw. 1 kWh Speicherkapazität der Batterie gewählt.

### 2.2 Systemumfang

Die Ökobilanz der PV-Anlage umfasst die Herstellung der PV-Module, der dachintegrierten Unterkonstruktion, der elektrischen Installation und der Wechselrichter sowie den Transport dieser Komponenten zum Garderoben- und Clubgebäude in Zürich Höngg und den Stromverbrauch für die Montage.

In der Ökobilanz der Batteriesysteme werden die Herstellung bzw. Aufbereitung (im Fall der second-life Batterien) der Lithium-Ionen Batterien inklusive der Produktion des Batteriemanagementsystems, des Kühlsystems, der Batteriezellen und des Batteriegehäuses berücksichtigt. Die Herstellung der Elektronik für die Steuerung der Batterien, der Verkabelung und des Systemgehäuses sowie der Transport aller Komponenten zum Installationsort sind ebenfalls in der Ökobilanz enthalten.

Für PV-Batterie-Systeme sind zwei Arten weit verbreitet, das Wechselstromsystem (AC-System) und das Gleichstromsystem (DC-System). Beim Gleichstromsystem wird die Batterie über einen Hybridwechselrichter mit der PV-Anlage verbunden und kann so direkt mit Gleichstrom ab PV-Anlage geladen werden. Die Vorteile dieser Variante sind ein hoher Wirkungsgrad und tiefere Kosten bei einer gemeinsamen Installation der PV-Anlage und der Batterie. Alternativ kann der von der PV-Anlage erzeugte Gleichstrom zuerst über einen PV-Wechselrichter in Wechselstrom umgewandelt und anschliessend über einen separaten Batterie-Wechselrichter wieder zu Gleichstrom umgeformt werden, um die Batterie zu laden. Dieses sogenannte Wechselstromsystem hat Vorteile in Bezug auf seine Flexibilität und kann auch zu einem späteren Zeitpunkt bei bestehenden Solaranlagen nachgerüstet werden (Swissolar 2016, EnergieSchweiz 2018). In der vorliegenden Ökobilanz gehen wir davon aus, dass das PV-Batterie-System des Garderoben- und Clubgebäudes in Zürich Höngg als Gleichstromsystem ausgelegt wird. Der Wechselrichter wird deshalb bei der PV-Anlage berücksichtigt, ist aber in der Ökobilanz der untersuchten Batteriespeicher nicht enthalten.

### 2.3 Datengrundlage

Als Grundlage für die Bilanzierung der PV-Anlage des Garderoben- und Clubgebäudes wird die Projektbeschreibung von Stettler (2018) verwendet.

Für die Herstellung von Lithium-Ionen Batterien wurden von Ellingsen et al. (2014) detaillierte Sachbilanzen veröffentlicht, die auf Primärdaten eines norwegischen Batterieherstellers basieren. Diese Sachbilanzen werden für die Ökobilanz der heute verfügbaren Batteriesysteme verwendet. Für die Bilanzierung von zukünftigen Lithium-Ionen Batterien werden die Sachbilanzen aus Ellingsen et al. (2014) mithilfe von Informationen aus verschiedenen Literaturquellen in relevanten Bereichen angepasst. Die Sachbilanz der Herstellung von second-life Batterien basiert weitgehend auf Daten zum Speichersystem, das mit aussortierten Akkumulatoren aus den elektrischen Zustellfahrzeugen der Post entwickelt wurde (Sattler et al. 2017). Zusätzlich werden Informationen aus anderen Studien verwendet.

Die Sachbilanzen der PV-Anlage und der Batteriesysteme werden mit Hintergrunddaten des KBOB Ökobilanzdatenbestands DQRv2:2016 verknüpft (KBOB et al. 2016). Dieser Datenbestand basiert auf demecoinvent Datenbestand v2.2 (ecoinvent Centre 2010) und enthält umfangreiche Aktualisierungen, unter anderem in den Bereichen der Energie- und Materialbereitstellung. Die Verwendung des KBOB Ökobilanzdatenbestands DQRv2:2016 gewährleistet zudem die

methodische Kontinuität mit früheren Versionen des ecoinvent Datenbestands und wird auch von den Schweizer Bundesämtern verwendet. Die Analysen werden mit SimaPro v8.4.0 durchgeführt (PRé Consultants 2017).

## **2.4 Bewertungsmethoden**

Die Umweltauswirkungen der PV-Anlage und der Batteriesysteme werden mit den folgenden Indikatoren bewertet:

- Gesamtumweltbelastung in Umweltbelastungspunkten (UBP) nach der Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Frischknecht & Büsser Knöpfel 2013),
- Kumulierter Primärenergiebedarf (erneuerbar und nicht erneuerbar) in kWh Öl-eq (Frischknecht et al. 2015a),
- Treibhausgasemissionen in kg CO<sub>2</sub>-eq nach IPCC (2013, Tab. 8.A.1).

# 3 Sachbilanz

## 3.1 Übersicht

In den folgenden Unterkapiteln werden die Sachbilanzen der PV-Anlage (Unterkapitel 3.2) und der drei untersuchten Lithium-Ionen Batterien (Unterkapitel 3.3) sowie die zugrundeliegenden Annahmen und Datenquellen beschrieben.

## 3.2 PV-Anlage

Die geplante PV-Anlage des Garderoben- und Clubgebäudes in Zürich Höngg besteht aus 230 multikristallinen Silizium (multi-Si) PV-Modulen mit einer spezifischen Maximalleistung von  $161 \text{ Wp/m}^2$  (Stettler 2018). Es wird angenommen, dass die multi-Si PV-Module Standardmasse haben (Breite 0.98 m, Länge 1.65 m) und gerahmt sind.<sup>1</sup> Die PV-Anlage ist in das Dach des Garderoben- und Clubgebäudes integriert und hat eine Maximalleistung von 60 kWp (Stettler 2018).

Die Sachbilanzen der multi-Si PV-Module, der dachintegrierten Unterkonstruktion, der elektrischen Installation und der Wechselrichter basieren auf Frischknecht et al. (2015b). Es wird angenommen, dass 1 % der gelieferten PV-Module mangelhaft ist und dass weitere 2 % der Module während dem Betrieb der PV-Anlage Schaden nehmen. Der Ersatz dieser defekten PV-Module wird in der Sachbilanz der PV-Anlage berücksichtigt (Technical Secretariat of the PEF Pilot "Photovoltaic Electricity Generation" 2016). Für die elektrische Installation und die Wechselrichter sind Sachbilanzen für geringere Leistungen (3.0 kWp bzw. 2.5 kWp) verfügbar. Der Bedarf dieser Komponenten wird entsprechend der Maximalleistung der PV-Anlage skaliert. Die Lebensdauer des Wechselrichters wird auf 15 Jahre angesetzt, sodass dieser während der 30-jährigen Betriebsphase der PV-Anlage einmal ersetzt werden muss. Der Strombedarf für die Montage des PV-Systems beträgt rund  $0.077 \text{ kWh/kWp}$  (Frischknecht et al. 2015b) und wird durch den Schweizer Egalstrommix gedeckt. Es wird angenommen, dass die multi-Si PV-Module per Lastwagen von einem Regionallager in Europa über eine Distanz von 500 km in die Schweiz transportiert werden. Die Transportdistanzen der übrigen Komponenten der PV-Anlage zum Garderoben- und Clubgebäude wird mit generischen Angaben aus Frischknecht et al. (2007) geschätzt.

Die Sachbilanz der Erstellung der integrierten 60 kWp PV-Anlage mit multi-Si Modulen wird in Tab. 3.1 gezeigt.

---

<sup>1</sup> Persönliche Mitteilung Yves Stettler, Basler & Hofmann AG, 17. Januar 2018.

Tab. 3.1: Sachbilanz der Erstellung der geplanten 60 kWp PV-Anlage des Garderoben- und Clubgebäudes in Zürich Höngg.

	Name	Location	Infrastructure Process	Unit	60kWp flat roof installation, GCGH, multi-Si, on roof		Uncertainty Type	Standard Deviation 95%	General Comment
					CH	1 unit			
product	60kWp flat roof installation, GCGH, multi-Si, on roof	CH		1 unit	1				
technosphere	photovoltaic panel, multi-Si, at regional storage	RER		1 m2	3.83E+2	1	3.01	(2.2.2.2.1.1, BU:3); 230 multi-Si PV modules of 1.62 m2 with a maximum power output of 161 Wp/m2; Replacements and rejects are included (3%); E-Mail Yves Stettler, Basler & Hofmann, 17.01.2018; PEFCR PV electricity	
	slanted-roof construction, integrated, on roof	RER		1 m2	3.72E+2	1	3.01	(2.2.2.2.1.1, BU:3); 230 multi-Si PV modules of 1.62 m2; E-Mail Yves Stettler, Basler & Hofmann, 17.01.2018	
	electric installation, photovoltaic plant, at plant	CH		1 unit	2.00E+1	1	3.10	(4.3.2.2.3.1, BU:3); Electric installation of a 3 kWp PV plant scaled to 60 kWp; Frischknecht et al. (2015); LCI and LCA of PV systems	
	inverter, 2500W, at plant	RER		1 unit	4.80E+1	1	3.10	(4.3.2.2.3.1, BU:3); Inverter of a 2.5 kWp PV plant scaled to 60 kWp; 1 replacement over the lifetime; Frischknecht et al. (2015); LCI and LCA of PV systems	
	transport, van <3.5t	CH		0 tkm	3.41E+2	1	2.09	(4.5.na.na.na, BU:2); Transport of all components except PV modules from regional storage to the place of installation; Assumption: 100 km;	
	transport, lorry >16t, fleet average	RER		0 tkm	2.15E+3	1	2.09	(4.5.na.na.na, BU:2); Transport of PV modules from regional storage (Europe) to the place of installation; Assumption: 500 km;	
	electricity, low voltage, at grid	CH		0 kWh	4.60E+0	1	1.22	(4.3.2.2.1.1, BU:1.05); Electricity demand for erection of a 3 kWp PV plant (0.23 kWh) scaled to 60 kWp; Frischknecht et al. (2015); LCI and LCA of PV systems	
emission air, unspecified	Heat, waste	-	-	MJ	1.66E+1	1	1.22	(4.3.2.2.1.1, BU:1.05); ;	

### 3.3 Lithium-Ionen Batterien

#### 3.3.1 Heutige Lithium-Ionen Batterien

Lithium-Ionen Batterien zeichnen sich durch eine vergleichsweise hohe Energiedichte, einen relativ hohen Wirkungsgrad und eine lange Lebensdauer aus (Swissolar 2016) und werden darum häufig für stationäre und mobile Anwendungen eingesetzt. Dabei gibt es eine Vielzahl verschiedener Lithium-Ionen Batterien, die sich beispielsweise in der Zusammensetzung der Elektroden oder des Elektrolyten unterscheiden. So können durch Änderungen in der Kathodenchemie wichtige Eigenschaften wie Energie- und Leistungsdichte, Lebensdauer, Sicherheit und Kosten beeinflusst werden (Helms et al. 2016, de Haan & Zah 2013). Für stationäre Batteriespeicher werden derzeit hauptsächlich Lithium-Eisenphosphat (LiFePO<sub>4</sub>) Batterien eingesetzt, die eine hohe Lebensdauer und Betriebssicherheit aufweisen (EnergieSchweiz 2018).

Für heutige Lithium-Ionen Batterien werden die umfangreichen und transparent dokumentierten Sachbilanzen von Lithium-Ionen Batterien mit einer Kathode aus Nickel Cobalt Mangan Oxid (NCM) aus Ellingsen et al. (2014) verwendet. Diese Daten werden verwendet, da zur Herstellung von Lithium-Eisenphosphat Batterien keine Primärdaten verfügbar sind und der Anteil der Kathode an den gesamten Umweltauswirkungen von Lithium-Ionen Batterien gering ist (Messmer & Frischknecht 2015). LiNCM Batterien werden häufig in Elektrofahrzeugen eingesetzt, da sie sich durch eine sehr hohe Energiedichte auszeichnen. Im Vergleich zu LiFePO<sub>4</sub> Batterien haben LiNCM Batterien aber eine etwas geringere Lebensdauer und Sicherheit (Helms et al. 2016, de Haan & Zah 2013).

Die bilanzierte LiNCM Batterie hat ein Gewicht von 253 kg und eine Speicherkapazität von 26.6 kWh. Die Energiedichte dieser Batterie beträgt somit 105 Wh/kg. Die Batteriezellen machen 60 % des Batteriegewichts aus und bestehen aus einer Li(Ni<sub>0.33</sub>Co<sub>0.33</sub>Mn<sub>0.33</sub>)O<sub>2</sub>-Kathode und einer graphitbasierten Anode. Der Separator der Batteriezelle besteht aus porösem Polyolefin-Film und trennt die Anode von der Kathode. Als Elektrolyt wird Lithium-Hexafluorophosphat verwendet. Zusätzlich werden ein Batteriegehäuse, ein Batteriemanagementsystem und ein Kühlsystem benötigt (Ellingsen et al. 2014). Die Sachbilanzen der Herstellung von LiNCM Batterien sind in Stolz et al. (2016a, Anhang A) aufgeführt.

Für stationäre Batteriesysteme werden die einzelnen Batterien in ein Gehäuse verpackt und mit Kabeln mit einer Steuereinheit verbunden. Der Bedarf dieser Komponenten wird basierend auf Angaben aus Messmer und Frischknecht (2015) bestimmt. Für eine Batterie mit einer Speicherkapazität von 10 kWh werden 88 kg Stahl für das Gehäuse, 0.73 m Kabel und 8 kg

Elektronik benötigt. Da das Batteriesystem modular aufgebaut ist und je nach benötigter Batteriekapazität mehr oder weniger Batteriemodule angeschlossen werden können, unterscheidet sich der Bedarf der hier beschriebenen Komponenten für Batteriesysteme mit ähnlicher Kapazität nicht (Messmer & Frischknecht 2015).

Der Transport der Komponenten des Batteriesystems wird mit Standarddistanzen basierend auf Frischknecht et al. (2007) abgeschätzt. Für die Bereitstellung der Batterien wird ein Lastwagentransport über eine Distanz von 200 km angenommen. Die Sachbilanz des Speichersystems mit heute verfügbaren Lithium-Ionen Batterien ist in Tab. 3.2 aufgeführt.

Tab. 3.2: Sachbilanz der Herstellung eines Speichersystems mit heutigen LiNCM Batterien.

	Name	Location	InfrastructureProcess	Unit	battery system, LiNCM, current, at plant	UncertaintyType	StandardDeviation95%	GeneralComment
	Location				CH			
	InfrastructureProcess				0 kWh			
product	Unit							
	battery system, LiNCM, current, at plant	CH	0	kWh	1			
technosphere	battery, rechargeable, prismatic, LiNCM, at plant	NO	0	kg	9.51E+0	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); Energy density: 105 Wh/kg; Ellingsen et al. 2014
	electronics for control units	RER	0	kg	8.00E-1	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); ; Messmer & Frischknecht 2015: LCA of PV-battery systems
	cable, three-conductor cable, at plant	GLO	0	m	7.30E-2	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); ; Messmer & Frischknecht 2015: LCA of PV-battery systems
	steel, low-alloyed, at plant	RER	0	kg	8.80E+0	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); ; Messmer & Frischknecht 2015: LCA of PV-battery systems
	sheet rolling, steel	RER	0	kg	8.80E+0	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); ; Messmer & Frischknecht 2015: LCA of PV-battery systems
	transport, freight, rail	RER	0	tkm	5.81E+0	1	2.09	(4,5,na,na,na,na,BU:2); Standard distances based on ecoinvent v2.0; Frischknecht et al. 2007
	transport, lorry >16t, fleet average	RER	0	tkm	2.43E+0	1	2.09	(4,5,na,na,na,na,BU:2); Asumption for transport of used batteries: 200 km; Standard distances based on ecoinvent v2.0 for other materials; Frischknecht et al. 2007

Die Speicherkapazität von Lithium-Ionen Batterien nimmt durch die Nutzung und jährliche Alterung stetig ab. Die Lebensdauer von Lithium-Ionen Batterien wird meist als Anzahl vollständige Ladezyklen oder Jahre bis zum Erreichen von 80 % der ursprünglichen Batteriekapazität angegeben. Die Angaben zur Anzahl Ladezyklen reichen typischerweise von 2'000 bis 10'000 Vollzyklen (EASE 2016, Swissolar 2016). Die grosse Schwankungsbreite ist wahrscheinlich auf unterschiedliche Entladungstiefen (Depth of Discharge, DOD) zurück zu führen. Im Durchschnitt kann für heutige Lithium-Ionen Batterien von einer Zyklenlebensdauer von 5'000 Vollzyklen ausgegangen werden (EASE / EERA 2017a, de Haan & Zah 2013). Die kalendarische Lebensdauer beträgt bis zu 20 Jahre und ist abhängig von der Temperatur und dem Ladezustand (EASE 2016, Swissolar 2016).

In der Ökobilanz von heutigen Lithium-Ionen Batterien für stationäre Anwendungen gehen wir davon aus, dass die Batterien bis zum Ende ihrer Lebensdauer für denselben Nutzungszweck verwendet werden. Die Herstellungsaufwände der Batterie werden somit vollständig der Nutzung als stationärer Energiespeicher für das Garderoben- und Clubgebäude angerechnet. Würde die Batterie vorzeitig ersetzt und an einem anderen Ort für eine neue Anwendung installiert werden, müssten die Umweltauswirkungen der Batterieherstellung auf die beiden Nutzungszwecke aufgeteilt werden (siehe Sachbilanz von second-life Batterien in Abschnitt 3.3.3).

### 3.3.2 Zukünftige Lithium-Ionen Batterien

Die Lithium-Ionen Batterietechnologie wird laufend weiter entwickelt, sodass sich die Umweltauswirkungen von zukünftigen Lithium-Ionen Batterien deutlich von den heute verfügbaren Batterien unterscheiden können. Einerseits wird an neuen Materialien für die Elektroden und den Elektrolyten geforscht, um beispielsweise die Energiedichte und die Sicherheit zu erhöhen und die Herstellungskosten zu senken. Andererseits werden die Herstellungsprozesse optimiert und die Produktionskapazitäten erhöht, wodurch beispielsweise der Energieverbrauch gesenkt oder durch erneuerbare Energiequellen ersetzt wird. Einzelne dieser möglichen Entwicklungen werden in der Ökobilanz einer zukünftigen Lithium-Ionen Batterie berücksichtigt.

Als Basis werden die Sachbilanzen für die Herstellung von heutigen LiNCM Batterien aus Ellingsen et al. (2014) verwendet. Eine kurze Analyse der Gesamtumweltbelastung, der Treibhausgasemissionen und des Primärenergiebedarfs dieser Batterie ergibt, dass die Strombereitstellung für die Herstellung der Batteriezellen und das in den Anoden enthaltene Kupfer für die Umweltauswirkungen besonders relevant sind. Für die Herstellung von zukünftigen Lithium-Ionen Batterien beschränken wir uns deshalb auf Optimierungen dieser beiden Prozesse.

Es wird angenommen, dass der Stromverbrauch für die Herstellung von Batteriezellen mittelfristig von 22.7 kWh/kg auf 15.0 kWh/kg reduziert wird (Cox & Bauer 2018). Der heutige Strommix wird in Südostasien, der wichtigsten Produktionsregion für Lithium-Ionen Batteriezellen, zu rund zwei Dritteln in fossilen Kraftwerken und zu einem Drittel in Kernkraftwerken erzeugt. Für eine umwelteffiziente zukünftige Herstellung von Batteriezellen wird deshalb angenommen, dass der Strombedarf durch eine grossflächige, freistehende PV-Anlage basierend auf multikristallinem Silizium erzeugt wird. Die zu erwartenden Effizienzsteigerungen von PV-Modulen werden mit einem Ertrag pro Kilowattpeak angenähert, der rund ein Fünftel höher liegt als er in den asiatischen Produktionsorten zu erwarten ist.<sup>2</sup>

Für die Herstellung von zukünftigen Anoden wird angenommen, dass ausschliesslich Sekundärkupfer eingesetzt wird. Rezykliertes Kupfer weist die tiefsten Umweltauswirkungen auf. In Europa verkaufte Primärkupfer verursacht deutlich höhere Umweltbelastungen, während die Umweltbelastungen von Primärkupfer aus europäischer Produktion nur leicht höher sind als diejenigen von Sekundärkupfer (KBOB et al. 2016).

Veränderungen in der Chemie der Anode (beispielsweise soll in Zukunft vermehrt Silizium zum Graphit hinzugegeben werden, um die Kapazität zu erhöhen; de Haan & Zah 2013, Romare & Dahllöf 2017) werden hier nicht berücksichtigt. Bei den Kathoden wird in Zukunft voraussichtlich mehr Nickel im Vergleich zu Cobalt und Mangan eingesetzt werden (Entwicklung von  $\text{Ni}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}$  zu  $\text{Ni}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}$  oder  $\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}$ ), um die Energiedichte zu erhöhen und die Herstellungskosten zu reduzieren (Romare & Dahllöf 2017). Diese Veränderungen in der Kathodenchemie werden ebenfalls nicht berücksichtigt, da die Kathode einen geringen Anteil an den gesamten Umweltauswirkungen von Lithium-Ionen Batterien hat.

Die Energiedichte von zukünftigen Lithium-Ionen Batterien ist ein zentraler Parameter, kann aber nur mit beträchtlicher Unsicherheit abgeschätzt werden. Die Angaben in der Literatur gehen entsprechend weit auseinander. Basierend auf verschiedenen Studien (Swissolar 2016, Cox & Bauer 2018, de Haan & Zah 2013, Helms et al. 2016) kann für die nächsten 15-20 Jahre mit einer Verdoppelung der Energiedichte von Lithium-Ionen Batterien gerechnet werden. Für die Ökobilanz von zukünftigen Lithium-Ionen Batterien wird demnach eine Energiedichte von 210 Wh/kg angenommen.

Das Gehäuse, die Verkabelung und die Steuereinheit werden analog zum Batteriesystem mit heutigen Lithium-Ionen Batterien modelliert (siehe Abschnitt 3.3.1). Wegen der deutlich höheren Energiedichte wird angenommen, dass Batterien mit der doppelten Speicherkapazität (20 kWh anstelle von 10 kWh) im selben Gehäuse und mit derselben Menge an Kabeln und Elektronik installiert werden können. Der Bedarf dieser Komponenten wird deshalb für das Speichersystem mit zukünftigen Lithium-Ionen Batterien halbiert.

Der Transport der Komponenten des Batteriesystems wird mit Standarddistanzen basierend auf Frischknecht et al. (2007) abgeschätzt. Für die Bereitstellung der Batterien wird ein Lastwagentransport über eine Distanz von 200 km angenommen. Die Sachbilanzen der zukünftigen Anoden, Zellen und Batterien sowie des Speichersystems mit zukünftigen Lithium-Ionen Batterien sind in Tab. 3.3 bis Tab. 3.6 aufgeführt. Die Sachbilanzen der übrigen Komponenten von zukünftigen Lithium-Ionen Batterien sind unverändert gegenüber den Sachbilanzen in Stolz et al. (2016a).

---

<sup>2</sup> [http://viewer.webservice-energy.org/project\\_iea/](http://viewer.webservice-energy.org/project_iea/) (abgerufen am 16. Februar 2018).



Tab. 3.5: Sachbilanz der Herstellung von zukünftigen LiNCM Batterien.

	Name	Location	InfrastructureProcess	Unit	battery, rechargeable, prismatic, LiNCM, future, at plant	UncertaintyType	StandardDeviation95%	GeneralComment	
	Location				NO				
	InfrastructureProcess				0				
	Unit				kg				
product	battery, rechargeable, prismatic, LiNCM, future, at plant	NO	0	kg	1				
technosphere	single cell, battery, LiNCM, future, at plant	RAS	0	kg	6.00E-1	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	battery-management-system, at plant	RAS	0	kg	3.70E-2	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	battery-cooling-system, passive, at plant	RAS	0	kg	4.10E-2	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	electricity, medium voltage, at grid	NO	0	kWh	4.00E-4	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	steel, low-alloyed, at plant	RER	0	kg	1.15E-1	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	nylon 6, at plant	RER	0	kg	7.79E-4	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	nylon 66, at plant	RER	0	kg	5.36E-2	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	steel product manufacturing, average metal working	RER	0	kg	1.15E-1	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	injection moulding	RER	0	kg	8.22E-2	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	aluminium, production mix, at plant	RER	0	kg	1.14E-1	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	anodising, aluminium sheet	RER	0	m2	4.98E-3	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	sheet rolling, aluminium	RER	0	kg	1.13E-1	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	copper, primary, at refinery	GLO	0	kg	3.90E-3	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	copper, secondary, at refinery	RER	0	kg	6.91E-4	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer, ABS, at plant	RER	0	kg	6.43E-3	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	copper product manufacturing, average metal working	RER	0	kg	4.56E-3	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	aluminium product manufacturing, average metal working	RER	0	kg	1.88E-3	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	synthetic rubber, at plant	RER	0	kg	3.52E-3	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	polypropylene, granulate, at plant	RER	0	kg	2.13E-2	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	butyl acrylate, at plant	RER	0	kg	3.94E-5	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	transport, freight, rail	RER	0	tkm	1.27E-1	1	2.12	(1,4,1,5,3,5,BU:2); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	transport, lorry >32t, EURO3	RER	0	tkm	2.24E-1	1	2.12	(1,4,1,5,3,5,BU:2); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	transport, lorry >16t, fleet average	RER	0	tkm	4.80E-2	1	2.12	(1,4,1,5,3,5,BU:2); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	transport, transoceanic freight ship	OCE	0	tkm	6.44E+0	1	2.12	(1,4,1,5,3,5,BU:2); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	facilities precious metal refinery	SE	1	unit	2.26E-8	1	3.12	(1,4,1,5,3,5,BU:3); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	aluminium casting, plant	RER	1	unit	1.76E-11	1	3.12	(1,4,1,5,3,5,BU:3); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	plastics processing factory	RER	1	unit	5.99E-11	1	3.12	(1,4,1,5,3,5,BU:3); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	metal working factory	RER	1	unit	6.12E-11	1	3.12	(1,4,1,5,3,5,BU:3); ; Ellingsen, 2014 supporting information	
	emission air, high population density	Heat, waste	-	-	MJ	1.40E-3	1	1.34	(1,4,1,5,3,5,BU:1.05); ; Ellingsen, 2014 supporting information

Tab. 3.6: Sachbilanz der Herstellung eines Speichersystems mit zukünftigen LiNCM Batterien.

	Name	Location	InfrastructureProcess	Unit	battery system, LiNCM, future, at plant	UncertaintyType	StandardDeviation95%	GeneralComment
	Location				CH			
	InfrastructureProcess				0			
	Unit				kWh			
product	battery system, LiNCM, future, at plant	CH	0	kWh	1			
technosphere	battery, rechargeable, prismatic, LiNCM, future, at plant	NO	0	kg	4.76E+0	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); Energy density: 210 Wh/kg; Swissolar 2016, Cox & Bauer 2018, de Haan & Zah 2013, Helms et al. 2016
	electronics for control units	RER	0	kg	4.00E-1	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); Lower demand due to higher energy density of batteries; Messmer & Frischknecht 2015: LCA of PV-battery systems
	cable, three-conductor cable, at plant	GLO	0	m	3.65E-2	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); Lower demand due to higher energy density of batteries; Messmer & Frischknecht 2015: LCA of PV-battery systems
	steel, low-alloyed, at plant	RER	0	kg	4.40E+0	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); Lower demand due to higher energy density of batteries; Messmer & Frischknecht 2015: LCA of PV-battery systems
	sheet rolling, steel	RER	0	kg	4.40E+0	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); Lower demand due to higher energy density of batteries; Messmer & Frischknecht 2015: LCA of PV-battery systems
	transport, freight, rail	RER	0	tkm	2.90E+0	1	2.09	(4,5,na,na,na,na,BU:2); Standard distances based on ecoinvent v2.0; Frischknecht et al. 2007
	transport, lorry >16t, fleet average	RER	0	tkm	1.21E+0	1	2.09	(4,5,na,na,na,na,BU:2); Assumption for transport of used batteries: 200 km; Standard distances based on ecoinvent v2.0 for other materials; Frischknecht et al. 2007

Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Lebensdauer von Lithium-Ionen Batterien in Zukunft ungefähr verdoppeln wird. Zukünftige Lithium-Ionen Batterien werden 5'000 bis 20'000 Vollzyklen absolvieren können bis sie noch maximal 80 % der ursprünglichen Kapazität erreichen (Swissolar 2016). Die durchschnittliche Lebensdauer von zukünftigen Lithium-Ionen Batterien wird damit bei rund 10'000 Ladezyklen liegen (EASE / EERA 2017a). Die kalendarische Lebensdauer wird in Zukunft ebenfalls zunehmen und bis zu 25 Jahre betragen (Swissolar 2016, EASE / EERA 2017b).



Analog zum Speichersystem mit heutigen Lithium-Ionen Batterien wird angenommen, dass das zukünftige Batteriesystem bis zum Ende seiner Lebensdauer für denselben Nutzungszweck verwendet wird. Die Herstellungsaufwände der Batterie werden somit vollständig der Nutzung als stationärer Energiespeicher angerechnet.

### 3.3.3 Second-life Lithium-Ionen Batterien

Stationäre Speichersysteme mit wiederaufbereiteten Lithium-Ionen Batterien sind eine Alternative zum Recycling von Batterien nach ihrer Erstnutzung in Elektrofahrzeugen. Die Anforderungen an die Energiedichte von Batterien sind für mobile Anwendungen deutlich höher als für stationäre Stromspeicher, sodass die Batterien von Elektrofahrzeugen meist beim Erreichen von 70-80 % der ursprünglichen Kapazität ersetzt werden. Diese Batterien eignen sich teilweise für eine Zweitnutzung in stationären Speichersystemen (Schaufenster Elektromobilität 2016, Neubauer et al. 2015, Reid & Julve 2016). Die logistischen, technischen und ökonomischen Herausforderungen der Aufbereitung von gebrauchten Batterien für die Zweitnutzung wurden in verschiedenen Studien untersucht, in der Praxis wurden aber erst wenige Pilotanlagen installiert. Beispielsweise entwickelten Sattler et al. (2017) ein Speichersystem mit gebrauchten Batterien aus Elektrorollern der Post; weitere Anlagen mit einem Speichersystem aus second-life Batterien werden in den Studien von Schaufenster Elektromobilität (2016) und Reid und Julve (2016) genannt.

Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass die gebrauchten Batterien aus den Elektrofahrzeugen ausgebaut, zur Anlage eines Herstellers von second-life Batterien transportiert und dann in kleinere Einheiten (meist Module) zerlegt werden. Diese werden anschliessend auf äussere Schäden überprüft, elektrisch getestet und nach Typ, Alter oder Restkapazität (State of Health, SOH) sortiert. Ähnliche Batterien werden zu einem Batteriesystem der gewünschten Grösse zusammengesetzt, in ein Gehäuse eingebaut und mit einem neuen Batteriemanagementsystem (BMS) versehen (Schaufenster Elektromobilität 2016, Neubauer et al. 2015, Reid & Julve 2016). Dieser Prozess ist aufwendig und führt meist zu einem signifikanten Anteil an nicht verwertbaren Batterien, die dem stofflichen Recycling zugeführt werden müssen. Durch die Standardisierung von Batteriepacks, ein angepasstes Design zur Erleichterung der Wiederaufbereitung oder die Möglichkeit zur Nutzung von Informationen aus dem Batteriemanagementsystem könnte die Aufbereitung von gebrauchten Batterien in Zukunft vereinfacht werden (Schaufenster Elektromobilität 2016).

Sattler et al. (2017) wählten einen anderen Ansatz für eine effizientere Herstellung eines second-life Batteriesystems. In einem Pilotprojekt nutzten sie gebrauchte Lithium-Ionen Batterien aus Zustellfahrzeugen der Post, um ein Speichersystem zu entwickeln (BFE 2017). Durch die Verwendung eines einzigen Batterietyps reduziert sich der Sortieraufwand deutlich. Auch das Testen der Batterien wurde vereinfacht, indem ein optimiertes Batteriemanagementsystem zur separaten Bewirtschaftung einzelner Zellen entwickelt wurde (Sattler et al. 2017). Die vorliegende Ökobilanz von second-life Batterien basiert weitgehend auf Angaben zum Speichersystem mit gebrauchten Batterien aus Elektrorollern der Post, das vom Ökozentrum und weiteren Unternehmen entwickelt wurde, und repräsentiert somit einen vergleichsweise einfachen Aufbereitungsprozess.<sup>3</sup>

Die Batterien von Zustellfahrzeugen der Post werden ersetzt, wenn sie noch maximal rund 80 % ihrer ursprünglichen Kapazität erreichen. Die gebrauchten Batterien werden dann vom Ökozentrum zu einem Preis von CHF 50.- pro Stück übernommen. Dieser Preis wird in Zukunft wahrscheinlich zunehmen; vorstellbar ist eine Verdoppelung auf CHF 100.- pro Batterie.<sup>3</sup> Da die gebrauchten Batterien nach ihrer Erstnutzung weiterhin einen ökonomischen Wert haben, werden die Herstellungsaufwände der Batterien auf die beiden Nutzungsphasen alloziert. Für die ökonomische Allokation werden der aktuelle Preis pro Batterie (CHF 50.-) und der Neupreis einer Elektrorollerbatterie (CHF 300.-) verwendet. Gemäss dem Verhältnis des Restwerts zum Gesamtwert der Batterie für beide Nutzungsphasen wird der Zweitnutzung ein Siebtel (CHF 50.- dividiert durch CHF 350.-) der Herstellungsaufwände einer neuen Batterie angerechnet. Die Batterie wird mit den Sachbilanzen für die Herstellung einer heutigen LiNCM Batterie basierend auf Ellingsen et al. (2014) modelliert (siehe Abschnitt 3.3.1).

<sup>3</sup> Persönliche Mitteilung Michael Sattler, Ökozentrum, 24. Januar 2018.

Die Batterien haben eine Kapazität von je 300 Wh und werden zum Testen einmal vollständig geladen.<sup>3</sup> Dieser Strombedarf wird durch den unspezifischen Schweizer Strommix gedeckt. Jede Batterie wird mit einem Elektronikprint versehen, um sie einzeln bewirtschaften zu können. Der Bedarf an Leiterplatten beträgt 70 g pro Batterie.<sup>3</sup> Das Gehäuse, die Verkabelung und die Steuereinheit werden analog zum Batteriesystem mit heutigen Lithium-Ionen Batterien modelliert (siehe Abschnitt 3.3.1). Da das Batteriesystem modular aufgebaut ist und je nach benötigter Batteriekapazität mehr oder weniger Batteriemodule angeschlossen werden können, wird der Bedarf der zusätzlichen Komponenten identisch zum heutigen Batteriesystem angenommen (Messmer & Frischknecht 2015).

Der Transport der Komponenten des Batteriesystems wird mit Standarddistanzen basierend auf Frischknecht et al. (2007) abgeschätzt. Für den Transport der gebrauchten Batterien wird ein Lastwagentransport über eine Distanz von 200 km angenommen. Die Sachbilanz des Speichersystems mit wiederaufbereiteten Lithium-Ionen Batterien ist in Tab. 3.7 aufgeführt.

Tab. 3.7: Sachbilanz der Herstellung eines Speichersystems mit wiederaufbereiteten LiNCM Batterien.

	Name	Location	InfrastructureProcess	Unit	battery system, LiNCM, second-life, at plant	UncertaintyType	StandardDeviation95%	GeneralComment
	Location				CH			
	Unit				0 kWh			
product	battery system, LiNCM, second-life, at plant	CH	0	kWh	1			
technosphere	battery, rechargeable, prismatic, LiNCM, at plant	NO	0	kg	1.70E+0	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); Economic allocation: Price of a new battery: 300 CHF; Price of a used battery: 50 CHF; Personal communication Michael Sattler, Ökozentrum, 24.01.2018
	electricity, medium voltage, at grid	CH	0	kWh	1.00E+0	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); Charging of each second-life battery to its maximum capacity (84 Wh/kg); Personal communication Michael Sattler, Ökozentrum, 24.01.2018
	printed wiring board, through-hole mounted, unspec., Pb free, at plant	GLO	0	kg	2.92E-1	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); Additional electronics per 240 Wh second-life battery: 70 g; Personal communication Michael Sattler, Ökozentrum, 24.01.2018
	electronics for control units	RER	0	kg	8.00E-1	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); ; Messmer & Frischknecht 2015: LCA of PV-battery systems
	cable, three-conductor cable, at plant	GLO	0	m	7.30E-2	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); ; Messmer & Frischknecht 2015: LCA of PV-battery systems
	steel, low-alloyed, at plant	RER	0	kg	8.80E+0	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); ; Messmer & Frischknecht 2015: LCA of PV-battery systems
	sheet rolling, steel	RER	0	kg	8.80E+0	1	1.34	(3,4,1,3,3,5,BU:1.05); ; Messmer & Frischknecht 2015: LCA of PV-battery systems
	transport, freight, rail	RER	0	tkm	5.98E+0	1	2.09	(4,5,na,na,na,na,BU:2); Standard distances based on ecoinvent v2.0; Frischknecht et al. 2007
	transport, lorry >16t, fleet average	RER	0	tkm	2.93E+0	1	2.09	(4,5,na,na,na,na,BU:2); Assumption for transport of used batteries: 200 km; Standard distances based on ecoinvent v2.0 for other materials; Frischknecht et al. 2007
	emission air, high population density	Heat, waste	-	-	MJ	3.60E+0	1	1.34

Die Lebensdauer und die Anzahl Ladezyklen von wiederaufbereiteten Batterien wurden erst wenig erforscht, was wahrscheinlich auf die geringe Anzahl an Pilotanlagen mit second-life Batterien zurückzuführen ist. Für das Speichersystem mit gebrauchten Batterien aus Elektrorollern der Post werden derzeit Zyklenversuche an der Empa in Dübendorf durchgeführt. Eine Schätzung zur Lebensdauer dieses Batteriesystems wird erst in einigen Monaten möglich sein.<sup>4</sup> Die Studie von Schaufenster Elektromobilität (2016) geht davon aus, dass das Lebensende von second-life Batterien bei rund 40 % der ursprünglichen Speicherkapazität erreicht ist. Das australische Unternehmen Relectrify, das an der Entwicklung eines Speichersystems mit gebrauchten Batterien aus Elektrofahrzeugen arbeitet, geht von einer Nutzung der second-life Batterie bis zu einer Restkapazität von 50 % aus und schätzt, dass diese Batterien rund 2'000 Ladezyklen absolvieren können. Diese Annahmen müssen jedoch erst validiert werden.<sup>5</sup>

<sup>4</sup> Persönliche Mitteilung Marcel Held, Empa Dübendorf, 1. Februar 2018.

<sup>5</sup> Persönliche Mitteilung Valentin Muenzel, Relectrify, 30. Januar 2018.

## 4 Wirkungsabschätzung

### 4.1 Übersicht

Die Umweltauswirkungen der geplanten PV-Anlage des Garderoben- und Clubgebäudes in Zürich Höngg und der untersuchten Batteriesysteme werden in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt und diskutiert. In Unterkapitel 4.2 werden die Gesamtumweltbelastung, der Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen der PV-Anlage präsentiert. Die Umweltkennwerte der Speichersysteme mit heutigen, zukünftigen und second-life Lithium-Ionen Batterien werden in Unterkapitel 4.3 beschrieben.

### 4.2 PV-Anlage

Die Umweltkennwerte der geplanten 60 kWp PV-Anlage des Garderoben- und Clubgebäudes in Zürich Höngg werden auf die funktionelle Einheit von einem Kilowattpeak normiert und mit den Umweltkennwerten einer ähnlichen 3 kWp PV-Anlage aus dem KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 verglichen. Zusätzlich sind die Umweltkennwerte weiterer PV-Anlagen mit verschiedenen Modultypen (monokristallines Silizium (mono-Si), Cadmium-Tellurid (CdTe) und Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIS)) und Installationsarten (integriert, montiert) aufgelistet. Diese basieren ebenfalls auf dem KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 (KBOB et al. 2016).

Die Vergleichsanlage ist in ein Schrägdach integriert und besteht aus PV-Modulen basierend auf multikristallinem Silizium (KBOB et al. 2016). Die spezifische Maximalleistung der multi-Si PV-Module aus dem KBOB Ökobilanzdatenbestand beträgt  $147 \text{ Wp/m}^2$  (Stolz et al. 2016b) und ist damit knapp 10 % tiefer als die Effizienz der vorgesehenen Module für die PV-Anlage des Garderoben- und Clubgebäudes. Im Gegensatz zu den multi-Si Modulen der geplanten PV-Anlage sind die Module der dachintegrierten 3 kWp PV-Anlage aus dem KBOB Ökobilanzdatenbestand nicht gerahmt.

Die unterschiedliche Moduleffizienz der beiden PV-Anlagen ist in den in Tab. 4.1 aufgeführten Umweltkennwerten deutlich sichtbar. Die geplante PV-Anlage des Garderoben- und Clubgebäudes verursacht gemäss den Indikatoren Gesamtumweltbelastung, nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf und Treibhausgasemissionen rund 5 % tiefere Umweltbelastungen als die Vergleichsanlage. Der erneuerbare Primärenergiebedarf ist hingegen leicht höher im Vergleich zur 3 kWp PV-Anlage aus dem KBOB Ökobilanzdatenbestand.

Die Gesamtumweltbelastung der geplanten PV-Anlage des Garderoben- und Clubgebäudes in Zürich Höngg wird zu 62 % durch die Bereitstellung der multi-Si PV-Module verursacht. Die Wechselrichter, die elektrische Installation und die dachintegrierte Unterkonstruktion tragen weitere 21 %, 11 % bzw. 6 % zur Gesamtumweltbelastung bei. Die Beiträge des Transports aller Komponenten zum Installationsort sowie des Strombedarfs für die Montage der PV-Anlage sind gering. Für die Indikatoren Primärenergiebedarf (gesamt) und Treibhausgasemissionen sind die Anteile der PV-Module an den gesamten Umweltbelastungen mit 74 % bzw. 79 % höher, während die Beiträge der elektrischen Installation und, in geringerem Ausmass, der übrigen Komponenten der PV-Anlage geringer sind.

Tab. 4.1: Umweltkennwerte der geplanten PV-Anlage des Garderoben- und Clubgebäudes in Zürich Höngg und einer integrierten Schrägdachanlage mit PV-Modulen aus multikristallinem Silizium aus dem KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016, bezogen auf 1 Kilowattpeak (kWp) Maximalleistung. Die Umweltkennwerte weiterer PV-Anlagen mit verschiedenen Modultypen und Installationsarten sind zur Information aufgelistet.

PV-Anlage	Max. Leistung	Bezug	UBP'13	Primärenergie		Treibhausgas-emissionen
	kWp			erneuerbar	nicht erneuerbar (Graue Energie)	
	kWp		UBP	kWh Öl-eq	kWh Öl-eq	kg CO <sub>2</sub> -eq
GCGH, multi-Si, integriert	60	kWp	2'610'000	727	5'810	1'610
<i>Schrägdach, multi-Si, integriert (KBOB)</i>	3	kWp	2'740'000	703	6'110	1'680
<i>Schrägdach, multi-Si, montiert (KBOB)</i>	3	kWp	2'910'000	819	6'500	1'790
<i>Schrägdach, mono-Si, integriert (KBOB)</i>	3	kWp	3'610'000	1'040	9'130	2'720
<i>Schrägdach, mono-Si, montiert (KBOB)</i>	3	kWp	3'780'000	1'150	9'500	2'830
<i>Schrägdach, CdTe, integriert (KBOB)</i>	3	kWp	1'610'000	252	3'240	768
<i>Schrägdach, CIS, montiert (KBOB)</i>	3	kWp	5'880'000	625	5'470	1'240

Zur Berechnung der Umweltkennwerte pro Kilowattstunde Strom werden die in Tab. 4.1 gezeigten Umweltauswirkungen der Herstellung der geplanten PV-Anlage des Garderoben- und Clubgebäudes durch die über die Lebensdauer erzeugte Strommenge dividiert. Der spezifische Ertrag der PV-Module nimmt dabei linear mit einer durchschnittlichen Degradationsrate von 0.7 % pro Jahr ab. Über die Lebensdauer der PV-Module von 30 Jahren ergibt sich damit eine durchschnittliche Reduktion des jährlichen Ertrags von 10.5 % (Technical Secretariat of the PEF Pilot "Photovoltaic Electricity Generation" 2016).

Die geplante dachintegrierte PV-Anlage des Garderoben- und Clubgebäudes in Zürich Höngg produziert einerseits Strom und schützt das Gebäude andererseits vor Witterungseinflüssen. Die Umweltauswirkungen der PV-Anlage werden im Allgemeinen vollständig auf die Stromerzeugungsfunktion alloziert, während die Schutzfunktion als belastungsfrei angenommen wird.<sup>6</sup>

### 4.3 Lithium-Ionen Batterien

Die Umweltkennwerte von Batteriesystemen mit heutigen, zukünftigen und second-life Lithium-Ionen Batterien sind in Tab. 4.2 aufgeführt. Das Batteriesystem mit heute verfügbaren LiNCM Batterien verursacht gemäss allen betrachteten Indikatoren, mit Ausnahme des erneuerbaren Primärenergiebedarfs, deutlich höhere Umweltbelastungen als Batteriesysteme mit zukünftigen und second-life Batterien. Die Herstellung der LiNCM Batterien hat einen Anteil von 83 % an der Gesamtumweltbelastung des heutigen Speichersystems. Davon entfallen 44 % auf die Anode, 12 % auf die Kathode und 14 % auf den Strombedarf für die Zellenherstellung. Die Elektronik und das Stahlgehäuse für das Batteriesystem tragen 10 % bzw. 7 % zur Gesamtumweltbelastung bei. Diese Aufteilung der Umweltauswirkungen auf die einzelnen Komponenten des heutigen Batteriesystems ist für die Indikatoren Primärenergiebedarf gesamt und Treibhausgasemissionen sehr ähnlich wie für die Gesamtumweltbelastung. Bei der Herstellung der LiNCM Batterien, die 80 % zum Primärenergiebedarf und 78 % zu den Treibhausgasemissionen beiträgt, überwiegen jedoch die Umweltbelastungen des Stroms für die Zellenherstellung. Die Anode und die Kathode haben Anteile von unter 10 % am Primärenergiebedarf und an den Treibhausgasemissionen des Batteriesystems mit heute verfügbaren Lithium-Ionen Batterien.

Wegen ihrer deutlich höheren Energiedichte, der Verwendung von Sekundärkupfer für die Anode und dem Bezug von Solarstrom für die Herstellung von Batteriezellen haben die hier modellierten zukünftigen Lithium-Ionen Batterien eine um rund drei Viertel reduzierte Umweltbelastung. Der für die Herstellung von Batteriezellen eingesetzte Solarstrom zeigt sich in einem gegenüber heutigen Batteriesystemen erhöhten erneuerbaren Primärenergiebedarf. Die Gesamtumwelt-

<sup>6</sup> Die Erstellung eines konventionellen Dachs (zum Beispiel basierend auf Eternit, Ton- oder Betonziegeln) verursacht meist deutlich geringere Umweltbelastungen als die Erstellung einer PV-Anlage. Alternative Bilanzierungsansätze wären die ökonomische Allokation der Umweltauswirkungen basierend auf dem Preis pro Quadratmeter Dachfläche oder das Verrechnen einer Gutschrift für vermiedene Materialaufwände eines konventionellen Dachs. Bei der Bilanzierung von Gebäuden ist keine Allokation nötig, da die Umweltauswirkungen pro Quadratmeter Energiebezugsfläche und Jahr berechnet werden.

belastung wird zu 65 % durch die Herstellung der zukünftigen LiNCM Batterien, zu 21 % durch die Elektronik und zu 14 % durch das Stahlgehäuse verursacht. Die Herstellung der Kathode und der Anode haben einen Anteil von 26 % bzw. 12 % an der Gesamtumweltbelastung des zukünftigen Batteriesystems; das Batteriemanagementsystem trägt weitere 10 % bei. Der Strombedarf für die Zellenherstellung hat hingegen einen geringen Anteil (2 %) an der Gesamtumweltbelastung. Für die Indikatoren Primärenergiebedarf (gesamt) und Treibhausgasemissionen haben die genannten Komponenten ähnliche Anteile. Zusätzlich ist für den gesamten Primärenergiebedarf die Strombereitstellung für die Herstellung der Batteriezellen relevant (18 %).

Die Umweltauswirkungen des Speichersystems mit wiederaufbereiteten LiNCM Batterien sind gemäss den betrachteten Indikatoren rund 60 % tiefer als jene des Batteriesystems mit heute verfügbaren Lithium-Ionen Batterien. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass nur ein Siebtel der Herstellungsaufwände der LiNCM Batterien der Zweitnutzung im stationären Speichersystem angerechnet wird. Die Batterieherstellung hat einen Anteil von 38 % an der Gesamtumweltbelastung des second-life Batteriesystems. Die zusätzlich benötigten Leiterplatten zur separaten Bewirtschaftung einzelner Batterien tragen 21 % zur Gesamtumweltbelastung bei. Weiter sind die Elektronik zur Steuerung des Batteriesystems (26 %) und das Stahlgehäuse (15 %) relevant. Der Primärenergiebedarf (gesamt) des Batteriesystems mit wiederaufbereiteten Lithium-Ionen Batterien wird ebenfalls hauptsächlich durch die Batterieherstellung (34 %), die Leiterplatten (23 %), die Elektronik (25 %) und das Stahlgehäuse (18 %) verursacht. Für die Treibhausgasemissionen sind die Beiträge dieser Komponenten zu den gesamten Emissionen sehr ähnlich.

Tab. 4.2: Umweltkennwerte von Batteriesystemen mit heutigen, zukünftigen und second-life LiNCM Batterien, bezogen auf 1 Kilowattstunde (kWh) Speicherkapazität.

Batteriesysteme	Energiedichte	Bezug	UBP'13	Primärenergie		Treibhausgasemissionen
	Wh/kg			erneuerbar	nicht erneuerbar (Graue Energie)	
			UBP	kWh Öl-eq	kWh Öl-eq	kg CO <sub>2</sub> -eq
Heutige LiNCM-Batterie	105	kWh	594'000	44.2	896	185
Zukünftige LiNCM-Batterie	210	kWh	142'000	64.9	227	49.4
Second-Life LiNCM-Batterie	84	kWh	231'000	25.8	375	80.6

Falls sich die Energiedichte des für das Garderoben- und Clubgebäude vorgesehenen Batteriesystems von der Energiedichte der bilanzierten Systeme unterscheidet, sollten die Umweltkennwerte auf der Basis von einem Kilogramm Batterie umgerechnet werden. Dazu werden die Umweltkennwerte pro Kilowattstunde Speicherkapazität mit der in Tab. 4.2 gezeigten Energiedichte multipliziert und durch die Energiedichte des Batteriesystems des Garderoben- und Clubgebäudes dividiert. Die angegebene Energiedichte bezieht sich auf den gesamten Batteriepack ohne das Systemgehäuse, die Verkabelung und die Elektronik.

## 5 Datenqualität

Die Qualität der Datengrundlage für die Sachbilanz der geplanten PV-Anlage wird insgesamt als gut beurteilt. Zwar ist die genaue Ausführung der PV-Anlage des Garderoben- und Clubgebäudes in Zürich Höngg noch unsicher, aber mit dem Modultyp, dem vorgesehenen Wirkungsgrad der PV-Module und der Installationsart konnten relevante Einflussgrössen spezifisch abgebildet werden. Die Sachbilanzen für PV-Module basierend auf multikristallinem Silizium sind aktuell und belastbar. Hingegen besteht eine grössere Unsicherheit beim Bedarf an Wechselrichtern und elektrischer Installation, da einerseits deren Ausführung im Garderoben- und Clubgebäude noch nicht festgelegt wurde, andererseits aber auch die Sachbilanzen nicht mehr ganz aktuell sind und für PV-Anlagen mit einer geringeren Maximalleistung erstellt wurden. Wegen des geringeren Anteils dieser Komponenten an den Umweltauswirkungen der geplanten PV-Anlage wird diese Annäherung als vertretbar betrachtet.

Die für die Bilanzierung von Speichersystemen mit heute verfügbaren Lithium-Ionen Batterien verwendeten Daten sind aktuell und transparent dokumentiert und werden deshalb als vertrauenswürdig eingestuft. Die Materialaufwände für das Stahlgehäuse, die Elektronik und die Verkabelung des Batteriesystems basieren auf Schätzungen und sind darum mit einer höheren Unsicherheit behaftet. Der Anteil dieser Komponenten an den gesamten Umweltauswirkungen des Batteriesystems ist jedoch relativ gering. Insgesamt wird die Datenqualität des bilanzierten Speichersystems mit heute verfügbaren Batterien als gut eingestuft. Abzuklären bleibt jedoch, wie repräsentativ die bilanzierte LiNCM Batterie für das im Garderoben- und Clubgebäude in Zürich Höngg zu installierende Batteriesystem ist. Lithium-Ionen Batterien unterscheiden sich unter anderem in Bezug auf die Kathode, mit der verschiedene Eigenschaften wie beispielsweise die Energiedichte beeinflusst werden können. Insbesondere die Energiedichte ist ein zentraler Parameter für die Umweltauswirkungen pro Kilowattstunde Speicherkapazität.

Die Sachbilanzen von Batteriesystemen mit zukünftigen Lithium-Ionen Batterien weisen eine inhärent höhere Unsicherheit auf, da verschiedene Annahmen getroffen werden mussten. Die Prognosen zur Entwicklung der Energiedichte von Lithium-Ionen Batterien gehen weit auseinander. Für das bilanzierte Speichersystem mit zukünftigen Batterien haben wir uns mit der Annahme einer Verdoppelung der Energiedichte für ein mittleres Szenario entschieden. Zudem wurden in den Sachbilanzen des Speichersystems mit zukünftigen Batterien ausgewählte Prozesse mit einem grossen Einfluss auf die gesamten Umweltauswirkungen von Lithium-Ionen Batterien angepasst. Auf diese Weise kann Herstellern das Potenzial zur Reduktion der Umweltauswirkungen der Batterieproduktion aufgezeigt werden.

Die Datenqualität der Sachbilanzen für Speichersysteme mit wiederaufbereiteten Batterien wird als genügend beurteilt. Insgesamt ist die Datenlage sehr dünn, weil erst wenige Pilotanlagen mit second-life Batterien erstellt wurden. Die hier verwendeten Daten des Ökozentrums für das Speichersystem mit gebrauchten Batterien aus Elektrorollern der Post stellen eine gute Grundlage zur Abschätzung der Aufbereitungsaufwände von gebrauchten Batterien dar. Allerdings ist der bilanzierte Prozess im Vergleich zu anderen vorgeschlagenen Wiederaufbereitungskonzepten relativ einfach, womit die Übertragbarkeit der Resultate auf andere Speichersysteme mit second-life Batterien, für die bis jetzt keine Daten verfügbar sind, kritisch hinterfragt werden muss.

Die Herstellung der Lithium-Ionen Batterien verursacht einen relevanten Anteil der Umweltauswirkungen von Speichersystemen mit wiederaufbereiteten Batterien. Da die gesamten Herstellungsaufwände ökonomisch auf die mobile Erstnutzung und die stationäre Zweitnutzung alloziert werden, stellt der Preis der gebrauchten Batterien im Vergleich zum Neupreis der Batterien eine zentrale Einflussgrösse für die Umweltauswirkungen von second-life Batteriesystemen dar. Das Ökozentrum geht davon aus, dass der Preis der gebrauchten Elektrorollerbatterien in Zukunft ansteigen wird. Damit würden sich auch die Umweltbelastungen des Speichersystems mit wiederaufbereiteten Batterien erhöhen.

Schliesslich haben die Anzahl Ladezyklen und die Lebensdauer der Batterien einen starken Einfluss auf die Umweltauswirkungen pro Kilowattstunde Strom, der vom Batteriesystem

bezogen wird. Diese Parameter sind jedoch stark abhängig vom jeweiligen Nutzungsverhalten. Entsprechend gibt es grosse Unterschiede in den Angaben verschiedener Quellen zur Anzahl Ladezyklen und zur Lebensdauer von heutigen Lithium-Ionen Batterien. Für zukünftige Batterien ist die Unsicherheit wiederum etwas höher. Die Anzahl Ladezyklen und die Lebensdauer von second-life Batterien werden erst noch untersucht. Wir empfehlen deshalb, den Einfluss verschiedener Annahmen zur Anzahl Ladezyklen und zur Lebensdauer der bilanzierten Batterien auf die Umweltauswirkungen pro Kilowattstunde Strom in einer Sensitivitätsanalyse abzuschätzen.

## 6 Ausblick

Lithium-Ionen Batterien werden heutzutage verbreitet und für eine Vielzahl verschiedener Anwendungen eingesetzt. Die Entwicklung neuer Materialien und Herstellungsprozesse führt zu einer stetigen Verbesserung der Eigenschaften von Lithium-Ionen Batterien (Fraunhofer ISI 2015). Daneben werden jedoch auch andere Batteriekonzepte intensiv erforscht, die in Zukunft besonders vorteilhafte Eigenschaften wie beispielsweise eine hohe Energiedichte, hohe Betriebssicherheit oder tiefe Kosten aufweisen könnten. Zu diesen Technologien gehören unter anderem Salzwasserbatterien<sup>7</sup>, Feststoffbatterien (meist lithiumbasiert), Lithium-Metall Batterien, Lithium-Schwefel Batterien, Lithium-Luft Batterien und Redox-Fluss Batterien (EASE / EERA 2017a, de Haan & Zah 2013, Air Resources Board 2017). Die Umweltauswirkungen dieser Batteriekonzepte konnten im Rahmen der vorliegenden Studie nicht untersucht werden.

---

<sup>7</sup> <https://www.tagesanzeiger.ch/31038511> (abgerufen am 24. Januar 2018).



# Literaturverzeichnis

- Air Resources Board (2017) California's Advanced Clean Cars Midterm Review. Summary Report for the Technical Analysis. California Environmental Protection Agency, Air Resources Board.
- BFE (2017) Ein zweites Leben für Postroller-Batterien. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- Cox B. and Bauer C. (2018) Environmental assessment of current and future passenger vehicles in Switzerland. Paul Scherrer Institut PSI, commissioned by the Swiss Federal Office for Energy SFOE, Villigen.
- de Haan P. and Zah R. (2013) Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz. vdf Hochschulverlag AG, Zürich.
- EASE (2016) Lithium-Ion Battery. European Association for Storage of Energy, Brussels.
- EASE / EERA (2017a) European Energy Storage Technology Roadmap. 2017 Update. European Association for Storage of Energy and European Energy Research Alliance, Brussels.
- EASE / EERA (2017b) European Energy Storage Technology Roadmap towards 2030. Technical Annex. European Association for Storage of Energy and European Energy Research Alliance, Brussels.
- ecoinvent Centre (2010) ecoinvent data v2.2, ecoinvent reports No. 1-25. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland, retrieved from: [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org).
- Ellingsen L. A.-W., Majeau-Bettez G., Singh B., Kumar Srivastava A., Valøen L. O. and Hammer Strømman A. (2014) Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. *In: Journal of Industrial Ecology*, **18**(1), pp. 113-124, DOI: 10.1111/jiec.12072.
- EnergieSchweiz (2018) Stationäre Batteriespeicher in Gebäuden (Dokument zur Vernehmlassung). EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- Fraunhofer ISI (2015) Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.
- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Dones R., Heck T., Hellweg S., Hischier R., Nemecek T., Rebitzer G. and Spielmann M. (2007) Overview and Methodology. ecoinvent report No. 1, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, retrieved from: [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org).
- Frischknecht R. and Büsser Knöpfel S. (2013) Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz. Umwelt-Wissen Nr. 1330. Bundesamt für Umwelt, Bern, retrieved from: <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01750/index.html?lang=de>.
- Frischknecht R., Wyss F., Buesser S., Lützkendorf T. and Balouktsi M. (2015a) Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. *In: Int J LCA*, **20**(7), pp. 957-969, DOI: 10.1007/s11367-015-0897-4.
- Frischknecht R., Itten R., Sinha P., de Wild Scholten M., Zhang J., Fthenakis V., Kim H. C., Raugei M. and Stucki M. (2015b) Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems. International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12.
- Helms H., Julius J., Claudia K., Giegrich J., Liebich A., Vogt R. and Lambrecht U. (2016) Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Umweltbundesamt.
- IPCC (2013) The IPCC fifth Assessment Report - Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Working Group I, IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland.
- KBOB, eco-bau and IPB (2016) KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016; Grundlage für die KBOB-Empfehlung 2009/1:2016: Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2016.

Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik, retrieved from: [www.lc-inventories.ch](http://www.lc-inventories.ch).

- Messmer A. and Frischknecht R. (2015) Ökobilanz von PV-Batterie-Systemen. treeze Ltd., Uster.
- Neubauer J., Smith K., Wood E. and Pesaran A. (2015) Identifying and Overcoming Critical Barriers to Widespread Second Use of PEV Batteries. National Renewable Energy Laboratory NREL, Golden, CO.
- PRé Consultants (2017) SimaPro 8.4.0, Amersfoort, NL.
- Reid G. and Julve J. (2016) Second Life Batteries As Flexible Storage For Renewable Energies. Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (BEE), Berlin.
- Romare M. and Dahllöf L. (2017) The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries. IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm.
- Sattler M., Hausammann B. and Held M. (2017) Stromspeichersystem mit Second-Life Akkumulatoren (SL-Speicher). Jahresbericht vom 26. Juni 2017. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- Schaufenster Elektromobilität (2016) Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen. Analyse von Nachnutzungsanwendungen, ökonomischen und ökologischen Potenzialen. Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW), Frankfurt am Main.
- Stettler Y. (2018) Garderoben- und Clubgebäude, Zürich Höngg. Projektbeschreibung Photovoltaik Vorprojekt. Basler & Hofmann AG, Zürich.
- Stolz P., Messmer A. and Frischknecht R. (2016a) Life Cycle Inventories of Road and Non-Road Transport Services. treeze Ltd., Uster CH.
- Stolz P., Frischknecht R., Wyss F. and de Wild Scholten M. (2016b) PEF screening report of electricity from photovoltaic panels in the context of the EU Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) Pilots, version 2.0. treeze Ltd. commissioned by the Technical Secretariat of the PEF Pilot "Photovoltaic Electricity Generation", Uster, Switzerland.
- Swissolar (2016) PV-Anlagen mit Batterien. Schweizerischer Fachverband für Sonnenenergie, Swissolar, Zürich.
- Technical Secretariat of the PEF Pilot "Photovoltaic Electricity Generation" (2016) Product Environmental Footprint Category Rules: Production of Photovoltaic Modules used in Photovoltaic Power Systems for Electricity Generation (NACE/CPA class 27.90 "Manufacturing of other electrical equipment").

## A Anhang: Umweltkennwerte von Strom ab PV-Batterie-System

*[Umweltkennwerte pro kWh Strom-Eigenverbrauch ab PV-Batterie-System (Direktbezug ab PV-Anlage und Bezug ab Batterie) zu ergänzen basierend auf den Berechnungen des AHB. Zum Vergleich auch die Umweltkennwerte der CH-Strommixe gemäss KBOB-Empfehlung aufführen.]*