

## Ergänzendes Material zum großen Stromspeicher-Quartett (Auflage 2019)

### Teil 1: Erläuterungen zu den Kenngrößen

- **Speicherkapazität  $E$ :** Die Energiemenge in Wh (Wattstunden), die dem vollgeladenen Speicher mit der Entladeleistung  $P$ , welche auf der Karte angegeben wurde, entnommen werden kann. Eine größere Speicherkapazität gewinnt im Spiel über eine kleinere.
- **Entladeleistung  $P$ :** Die Leistung mit der der Speicher entladen wird in W (Watt). Eine höhere Entladeleistung gewinnt den Stich.
- Kleinstmögliche **Entladezeit:** Die Entladezeit ist die Zeit, die mindestens benötigt wird, um den vollgeladenen Speicher zu entladen. Es ist ein Maß für die Leistungsfähigkeit, welches aus  $\frac{\text{Speicherkapazität } (E)}{\text{Entladeleistung } (P)}$  gebildet wird. Die kleinere Entladezeit gewinnt.
- **Energiedichten und Leistungsdichten**
  - **Volumetrische Energiedichte  $e_v$ :** Die Größe wird aus  $\frac{\text{Speicherkapazität } (E)}{\text{Bauvolumen } (V)}$  gebildet und in Wh/m<sup>3</sup> (Wattstunden pro Kubikmeter) angegeben.
  - **Gravimetrische Energiedichte  $e_m$ :** Die Größe wird aus  $\frac{\text{Speicherkapazität } (E)}{\text{Gewicht } (m)}$  gebildet und in Wh/kg (Wattstunden pro Kilogramm) angegeben.
  - **Volumetrische Leistungsdichte  $p_v$ :** Gebildet wird die Größe aus  $\frac{\text{Entladeleistung } (P)}{\text{Bauvolumen } (V)}$  und sie wird in W/m<sup>3</sup> (Watt pro Kubikmeter) angegeben.
  - **Gravimetrische Energiedichte  $p_m$ :** Die Größe bildet sich aus  $\frac{\text{Entladeleistung } (P)}{\text{Gewicht } (m)}$  und wird in W/kg (Watt pro Kilogramm) angegeben.
  - Bei dem Gewicht ( $m$ ) und dem Bauvolumen ( $V$ ) wurde mit Ausnahme von Systemen mit Generator und Gleichstromanwendungen der zugehörige Stromrichter berücksichtigt.
  - Eine höhere Energie- bzw. Leistungsdichte ist zum Gewinnen erstrebenswert.
- Kalendarische **Lebensdauer:** Die kalendarische Lebensdauer ist die Zeit, die das Speichersystem ohne Belastung mindestens nutzbar ist in a (Jahren). Das Speichersystem, welches am längsten überlebt, gewinnt.
- Max. **Zyklenzahl:** Die Anzahl der maximal zulässigen äquivalenten Vollzyklen. Hier von will der Spieler möglichst viele haben, um zu gewinnen.
- **Anschaffungskosten**
  - Anschaffungskosten auf die Speicherkapazität  $E$  bezogen: Die Kosten werden aus  $\frac{\text{Anschaffungskosten}}{\text{Speicherkapazität } (E)}$  in EUR/kWh gebildet.
  - Anschaffungskosten auf Entladeleistung  $P$  bezogen: Die Kosten werden aus  $\frac{\text{Anschaffungskosten}}{\text{Entladeleistung } (P)}$  in EUR/kW gebildet.
  - "Geiz ist geil!"
- Min. **Durchspeicherkosten:** Die Kosten in EUR/kWh um eine Kilowattstunde aus dem Speicher auszuspeichern, welche aus  $\frac{\text{Anschaffungskosten}}{\text{Speicherkapazität} * \text{max.Zyklenzahl}}$  berechnet werden. Die Kapitalkosten, die Betriebskosten und die Kosten zur Deckung der Speicherverluste werden vernachlässigt und ferner wird unterstellt, dass die maximale Zyklenzahl vor bzw. genau mit Ablauf der kalendarischen Lebensdauer erreicht wird. Auch hier gilt, dass geringere Kosten höhere ausstechen.

- **Wälzwirkungsgrad:** Der Anteil der eingespeicherten Energie welcher während eines direkt anschließenden Entladevorgangs wieder entnommen werden kann. Er charakterisiert die Lade- und Entladeverluste und es gilt, desto höher der Wert desto besser.
- **Selbstentladung:** Die Selbstenladeverluste in Bezug auf die Speicherkapazität in %/d (Prozent pro Tag). Die kleinere Selbstentladung ist immer besser.
- **Max. Reaktionszeit:** Die maximale Reaktionszeit ist die Zeit, die der Speicher mit der Nennleistung lädt oder entlädt. Es gibt drei Kategorien: <1s, <2 min, <15 min und eine schnellere Reaktionszeit schlägt im Spiel eine langsamere.

## Teil 2: Erläuterungen/Quellenangaben zu den einzelnen Karten

Zu jeder Karte gibt es zunächst die produktspezifischen Quellenangaben, die immer direkt angegeben sind. Unbekannte Angaben wurden technologiespezifisch ergänzt und dies jeweils durch einen hochgestellten Index (<sup>a</sup> bis <sup>h</sup>) auf der Karte vermerkt. Die Bedeutung der Indizes ist in der nachfolgenden Aufzählung zu jeder Karte angeführt. Die dafür verwendeten Quellen wurden mit [i] bis [viii] abgekürzt und finden sich am Ende der Sammlung.

### Übersicht

<i>A: Superkondensatoren</i> .....	4
Karte A1: Supercap-Rekuperationsspeicher für AutoTram Extra Grand .....	4
Karte A2: Stercom PowerStore Pulsleistungsspeicher für PowerSplash-Achterbahn .....	4
Karte A3: 4 MW/18 MWs-Kondensatorspeicher zur Netzstabilisierung, La Palma .....	4
Karte A4: Pufferspeicher für Fahrradstandlicht LUMOTEC IQ Cyo T, Fa. Busch & Müller .....	5
<i>B: Weitere Feldenergiespeicher</i> .....	5
Karte B1: 48 GJ LIQHY-SMES, Karlsruher Institut für Technologie .....	5
Karte B2: 10 MW/20 MJ SMES USV, Fa. Chubu Electric Power .....	6
Karte B3: USV einer Spannungsversorgung für Pitch-Stelleinrichtung von Windenergieanlagen .....	6
Karte B4: Stercom PowerStore Pulsleistungsspeicher für HITec Einstein-Elevator .....	7
<i>C: Schwungradspeicher</i> .....	7
Karte C1: Gyrodrive HP MK4, Fa. GKN .....	7
Karte C2: Schwungradspeicher im USV-System No-Break KS 5, Fa. NTC .....	8
Karte C3: 20 MW-Schwungradspeichersystem Hazle Township/Pennsylvania .....	8
Karte C4: GünTII 3500, Leibniz Universität Hannover .....	9
<i>D: Lithium-Ionen-Akkumulatoren I</i> .....	9
Karte D1: Samsung Akku EB-BG900 für Galaxy S5 .....	9
Karte D2: Tesla Powerwall 2 13,5 kWh Solarbatterie .....	10
Karte D3: Vorladespeicher für öffentliche Versorgungsinfrastruktur .....	10

Karte D4: Traktionsbatterie VW e-up!.....	10
<b>E: Lithium-Ionen-Akkumulatoren II .....</b>	<b>11</b>
Karte E1: Spitzenlastspeicher für industrielle Verbraucher .....	11
Karte E2: Batteriespeicherkraftwerk Schwerin .....	11
Karte E3: Hybridgroßspeicher .....	11
Karte E4: Stromspeicher Herrenhausen .....	11
<b>F: Blei-Säure-Akkumulatoren.....</b>	<b>12</b>
Karte F1: SolStore 16.2 Pb Solarbatterie, Fa. IBC Solar .....	12
Karte F2: Varta Silver Dynamic 610 402 092 Starterbatterie .....	12
Karte F3: EBU 1000, Fa. Belectric .....	13
Karte F4: Hoppecke OPzV 9 sun power VR L 1125 .....	13
<b>G: Weitere Akkumulatoren.....</b>	<b>14</b>
Karte G1: NiMH-Traktionsbatterie Toyota Prius IV .....	14
Karte G2: ZEBRA-Batterie Typ Z5-557.ML3X-38, Fa. FZ Sonick .....	14
Karte G3: 800 kW/4,8 MWh Natrium-Schwefel-Speichersystem, Fa. NGK.....	15
Karte G4: Natrium-Schwefel-Traktionsbatterie Horlacher Sport I.....	15
<b>H: Tertiäre galvan. Systeme .....</b>	<b>16</b>
Karte H1: Redox-Flow-Batterie Typ Z20-5, Fa. ViZn Energy .....	16
Karte H2: Redox-Flow-Batterie, Typ CellCube FB 200-400.....	16
Karte H3: Redox-Flow-Batterie, Typ ZBM 3, Fa. Redflow.....	17
Karte H4: 500 MW/133 GWh Wind-Wasserstoff-System .....	17
<b>I: Luftenergiespeicher .....</b>	<b>18</b>
Karte I1: Kraftwerk Huntorf.....	18
Karte I2: Druckluftspeicherkraftwerk Staßfurt, ADELE-Konzept .....	18
Karte I3: LTA-CAES®.....	19
Karte I4: LAES Bury .....	19
<b>J: Lageenergiespeicher .....</b>	<b>19</b>
Karte J1: Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal .....	19
Karte J2: Naturstromspeicher Gaildorf.....	20
Karte J3: STENSEA-Konzept .....	20
Karte J4: ARES rail based energy storage system.....	21
<b>Quellenverzeichnis.....</b>	<b>22</b>

## A: Superkondensatoren

### Karte A1: Supercap-Rekuperationsspeicher für AutoTram Extra Grand

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Datenblatt zum AutoTram Extra Grand
  - [2] Datenblatt zum Kondensator, Typ BCAP3000 P270 K04/05
  - [3] Preis über Mouser Electronics (Stand September 2016)
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Das Systemvolumen besteht aus den Abmaßen eines Einzelkondensators aus [2] multipliziert mit 480 Kondensatoren laut [1] sowie technologiespezifischen Werten für die Leistungselektronik nach [v].
  - b Die Kosten bestehen aus dem Einzelpreis der Kondensatoren aus [3] (45,55 €) multipliziert mit der Anzahl aus [1] sowie den Kosten der Leistungselektronik, die technologiespezifisch mit spezifischen Kosten von 150 €/kW auf Basis von [ii] berechnet wurden.
  - c Der Wälzwirkungsgrad war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt sowie um den Wirkungsgrad der Leistungselektronik (97 %) korrigiert.
  - d Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis der Angabe zu Karte A2 technologiespezifisch ergänzt.
  - e Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im Dezember 2018):

[http://www.ivi.fraunhofer.de/content/dam/ivi/de/dokumente/datenblatt/DB\\_Autotram\\_deu.pdf](http://www.ivi.fraunhofer.de/content/dam/ivi/de/dokumente/datenblatt/DB_Autotram_deu.pdf)

[2] url (abgerufen im Dezember 2018):

[http://www.maxwell.com/images/documents/K2Series\\_DS\\_1015370\\_5\\_20141104.pdf](http://www.maxwell.com/images/documents/K2Series_DS_1015370_5_20141104.pdf)

[3] url (abgerufen im Dezember 2018): <http://www.mouser.de/ProductDetail/Maxwell-Technologies/BCAP3000-P270-K05/?qs=TvYXSR6pz%2F1WUj0IwfQPeA%3D%3D>

### Karte A2: Stercom PowerStore Pulsleistungsspeicher für PowerSplash-Achterbahn

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Herstellerangaben (persönliche Kommunikation)
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Herstellerangabe für Selbstentladung, die ebenfalls als technologiespezifische Größe für die restlichen Kondensatoren übernommen wurde, falls die Angaben nicht produktscharf ermittelt werden konnten.
  - b Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.

### Karte A3: 4 MW/18 MWs-Kondensatorspeicher zur Netzstabilisierung, La Palma

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Herstellerangaben (persönliche Kommunikation)
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Die Lebensdauer war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.
  - b Die max. Zyklenzahl war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.
  - c Der Wälzwirkungsgrad war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt sowie um den Wirkungsgrad der Leistungselektronik (97 %) korrigiert.

- d Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis der Angabe zu Karte A2 technologiespezifisch ergänzt.

#### Karte A4: Pufferspeicher für Fahrradstandlicht LUMOTEC IQ Cyo T, Fa. Busch & Müller

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Datenblatt: Tokin, Super Capacitors Vol. 14, S. 20/21
  - [2] Herstellerangaben (persönliche Kommunikation)
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Der max. Zyklenzahl (hier  $N_{\text{zykl}}$ ) wurde aus der Lebensdauer (hier  $t_a$  in a) und der kleinstmöglicher Entladezeit (hier  $t_k$  in h) über folgende Beziehung berechnet:
 
$$N_{\text{zykl}} = \frac{t_a \cdot 365 \cdot 24}{2 \cdot t_k}$$
  - b Der Wälzwirkungsgrad war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt sowie um den Wirkungsgrad der Leistungselektronik (97 %) korrigiert.
  - c Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis der Angabe zu Karte A2 technologiespezifisch ergänzt.
  - d Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im Dezember 2018):

[https://www.tokin.com/english/product/pdf\\_dl/supercapacitors.pdf](https://www.tokin.com/english/product/pdf_dl/supercapacitors.pdf)

### **B: Weitere Feldenergiespeicher**

#### Karte B1: 48 GJ LIQHY-SMES, Karlsruher Institut für Technologie

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Sander et al. (2013) LIQHYSMES—A 48 GJ Toroidal MgB<sub>2</sub>-SMES for Buffering Minute and Second Fluctuations, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 23, No.3
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Das Volumen war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iii] technologiespezifisch ergänzt.
  - b Die Masse war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher über die technologiespezifische Dichte mit 600 kg/m<sup>3</sup> aus dem Volumen abgeschätzt.
  - c Die Lebensdauer war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [ii] technologiespezifisch ergänzt.
  - d Die max. Zyklenzahl war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.
  - e Der Wälzwirkungsgrad war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt sowie um den Wirkungsgrad der Leistungselektronik (97 %) korrigiert.
  - f Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im Dezember 2018): <https://ieeexplore.ieee.org/document/6384697>

### Karte B2: 10 MW/20 MJ SMES USV, Fa. Chubu Electric Power

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Katagiri et al. (2009). Field Test Result of 10MVA/20MJ SMES for Load Fluctuation Compensation, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 19, No.3
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Die nutzbare Energie liegt laut [1] abweichend von der Gesamtenergie nur bei 10 MJ (2,8 kWh).
  - b Das Volumen war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iii] technologiespezifisch ergänzt.
  - c Die Masse war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher über die technologiespezifische Dichte mit  $600 \text{ kg/m}^3$  aus dem Volumen abgeschätzt.
  - d Die Lebensdauer war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [ii] technologiespezifisch ergänzt.
  - e Die max. Zyklenzahl war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.
  - f Die Kosten waren nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurden daher über spezifische Kosten von 240 €/kW auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.
  - g Der Wälzwirkungsgrad war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt sowie um den Wirkungsgrad der Leistungselektronik (97 %) korrigiert.
  - h Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im Dezember 2018): <https://ieeexplore.ieee.org/document/5109559>

### Karte B3: USV einer Spannungsversorgung für Pitch-Stelleinrichtung von Windenergieanlagen

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Datenblatt zum Kondensator ESHSR-3000C0-002R7A5T-NES
  - [2] Datenblatt zum Kondensator und Preis (Stand September 2016)
  - [3] Beispielsystem
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Für die angenommen 140 Stück multipliziert mit der Einzelenergie von 3,03 Wh [1].
  - b Für das Volumen des Speichersystems wurde das Volumen der Leistungselektronik berücksichtigt, welches technologiespezifisch mit einer volumetrischen Leistungsdichte von  $500 \text{ kW/m}^3$  auf Basis von [v] berechnet wurde.
  - c Für die Masse des Speichersystems wurde die Masse der Leistungselektronik berücksichtigt, die technologiespezifisch mit einer gravimetrischer Leistungsdichte von  $500 \text{ W/kg}$  auf Basis von [vii] berechnet wurde.
  - d Die max. Zyklenzahl berechnet sich aus Angaben aus [1].
  - e Die Kosten bestehen aus dem Einzelpreis der Kondensatoren aus [2] (45,05 €) multipliziert mit einer angenommenen Anzahl von 140 Stück sowie den Kosten der Leistungselektronik, die technologiespezifisch mit spezifischen Kosten von 150 €/kW auf Basis von [ii] berechnet wurden.
  - f Der Wälzwirkungsgrad war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt sowie um den Wirkungsgrad der Leistungselektronik (97 %) korrigiert.

- g Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis der Angabe zu Karte A2 technologiespezifisch ergänzt.
- h Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im Dezember 2018): [http://www.nesscap.com/product/edlc\\_large2.jsp](http://www.nesscap.com/product/edlc_large2.jsp)

[2] url (abgerufen im September 2016): <https://www.texim-europe.com/product/ESHSR-3000C0-002R7A5T-NES>

[3] Lee, J (2012), Ultracapacitor Energy Storage, *Wind Systems Magazine*, url (abgerufen im März 2017): <http://www.windsystemsmag.com/article/detail/333/ultracapacitor-energy-storage>

#### Karte B4: Stercom PowerStore Pulsleistungsspeicher für HITec Einstein-Elevator

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Hersteller- und Betreiberangaben (persönliche Kommunikation)
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Die Lebensdauer war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.
  - b Die max. Zyklenzahl war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.
  - c Der Wälzwirkungsgrad war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt sowie um den Wirkungsgrad der Leistungselektronik (97 %) korrigiert.
  - d Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis der Angabe zu Karte A2 technologiespezifisch ergänzt.
  - e Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.

### **C: Schwungradspeicher**

#### Karte C1: Gyrodrive HP MK4, Fa. GKN

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Schwungrad: Broschüre der Firma GKN
  - [2] Projektübersicht
  - [3] Artikel zu dem Projekt
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Für das Volumen des Speichersystems wurde das Volumen der Leistungselektronik berücksichtigt, welches technologiespezifisch mit einer volumetrischen Leistungsdichte von  $1500 \text{ kW/m}^3$  auf Basis von [vi] berechnet wurde.
  - b Für die Masse des Speichersystems wurde die Masse der Leistungselektronik berücksichtigt, die technologiespezifisch mit einer gravimetrischer Leistungsdichte von  $1 \text{ kW/kg}$  auf Basis von [vi] berechnet wurde.
  - c Die Anschaffungskosten beinhalten die Einsparung von 5300 Liter/Jahr, einen Dieselpreis von 1,30 € (Stand August 2016) [3], eine Amortisationszeit von 5 Jahren [2], sowie die Kosten der Leistungselektronik, die technologiespezifisch mit spezifischen Kosten von  $200 \text{ €/kW}$  auf Basis von [ii] berechnet wurden.
  - d Der Wälzwirkungsgrad wurde um den Wirkungsgrad der Leistungselektronik (97 %) korrigiert.

- e Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.
- f Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im Januar 2019):

[http://products.gknlandsystems.info/fileadmin/user\\_upload/update\\_Agritechnica/DS\\_GKN\\_Hybrid\\_Gyrodrive\\_DE\\_1115.pdf](http://products.gknlandsystems.info/fileadmin/user_upload/update_Agritechnica/DS_GKN_Hybrid_Gyrodrive_DE_1115.pdf)

[2] url (abgerufen März 2019): <https://qtr.ukri.org/projects?ref=101307>

[3] url (abgerufen März 2019): <http://www.engineersjournal.ie/2015/05/05/gyrodrive-hybrid-technology-bus/>

### Karte C2: Schwungradspeicher im USV-System No-Break KS 5, Fa. NTC

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Herstellerangaben (persönliche Kommunikation)
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Für das Volumen des Speichersystems wurde das Volumen der Leistungselektronik berücksichtigt, welches technologiespezifisch mit einer volumetrischen Leistungsdichte von  $1500 \text{ kW/m}^3$  auf Basis von [vi] berechnet wurde.
  - b Für die Masse des Speichersystems wurde die Masse der Leistungselektronik berücksichtigt, die technologiespezifisch mit einer gravimetrischer Leistungsdichte von  $1 \text{ kW/kg}$  auf Basis von [vi] berechnet wurde.
  - c Die max. Zyklenzahl war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.
  - d Die Anschaffungskosten wurden mit  $2/3$  der Gesamtkosten der Diesel/Schwungrad-USV geschätzt.
  - e Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.
  - f Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.

### Karte C3: 20 MW-Schwungradspeichersystem Hazle Township/Pennsylvania

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Präsentation zum Projekt Schwungradspeichersystem Hazle Township
  - [2] Pressemeldung zum Projekt
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Das Volumen des Speichersystems wurde technologiespezifisch mit einer volumetrischen Leistungsdichte von  $6 \text{ kW/m}^3$  auf Basis von [v] berechnet.
  - b Die Masse des Speichersystems wurde technologiespezifisch mit einer gravimetrischer Leistungsdichte von  $20 \text{ W/kg}$  auf Basis von [v] berechnet.
  - c Die Anschaffungskosten wurden auf Basis von [2] geschätzt und beinhalten die Kosten der Leistungselektronik, die technologiespezifisch mit spezifischen Kosten von  $150 \text{ €/kW}$  auf Basis von [ii] berechnet wurden.
  - d Der Wälzwirkungsgrad war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt sowie um den Wirkungsgrad der Leistungselektronik (97 %) korrigiert.
  - e Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.

- f Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im Januar 2019):

[http://www.sandia.gov/ess/docs/pr\\_conferences/2014/Thursday/Session7/02\\_Areseneaux\\_Jim\\_20MW\\_Flywheel\\_Energy\\_Storage\\_Plant\\_140918.pdf](http://www.sandia.gov/ess/docs/pr_conferences/2014/Thursday/Session7/02_Areseneaux_Jim_20MW_Flywheel_Energy_Storage_Plant_140918.pdf)

[2] url (abgerufen im Januar 2019):

<https://www.heise.de/tr/artikel/Schwungvoll-gespeichert-1176011.html>

#### Karte C4: GünTII 3500, Leibniz Universität Hannover

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Konstrukteurs-Angaben (persönliche Kommunikation)
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Für das Volumen des Speichersystems wurde das Volumen der Leistungselektronik berücksichtigt, welches technologiespezifisch mit einer volumetrischen Leistungsdichte von 500 kW/m<sup>3</sup> auf Basis von [v] berechnet wurde.
  - b Für die Masse des Speichersystems wurde die Masse der Leistungselektronik berücksichtigt, die technologiespezifisch mit einer gravimetrischer Leistungsdichte von 250 W/kg berechnet wurde.
  - c Die Lebensdauer war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.
  - d Die max. Zyklenzahl war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.
  - e Die Projektkosten für den Prototypen setzen sich unter anderem zusammen aus den Materialkosten, Fertigungskosten und Personalkosten und wurden um die Kosten der Leistungselektronik ergänzt, die technologiespezifisch mit spezifischen Kosten von 200 €/kW auf Basis von [ii] berechnet werden.
  - f Der Wälzwirkungsgrad war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt sowie um den Wirkungsgrad der Leistungselektronik (97 %) korrigiert.
  - g Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.
  - h Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.

## **D: Lithium-Ionen-Akkumulatoren I**

#### Karte D1: Samsung Akku EB-BG900 für Galaxy S5

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Technische Daten zu EB-BG900BBEGWW
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Für das Volumen des Speichersystems wurde das Volumen der Leistungselektronik berücksichtigt, welches technologiespezifisch mit einer volumetrischen Leistungsdichte von 1500 kW/m<sup>3</sup> auf Basis von [vi] berechnet wurde.
  - b Für die Masse des Speichersystems wurde die Masse der Leistungselektronik berücksichtigt, die technologiespezifisch mit einer gravimetrischer Leistungsdichte von 1 kW/kg auf Basis von [vi] berechnet wurde.

- c Die Lebensdauer war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
- d Die max. Zyklenzahl war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
- e Der Wälzwirkungsgrad war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
- f Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
- g Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im März 2019, Preis Stand April 2016):

<https://www.samsung.com/de/mobile-accessories/battery-bg900b-galaxy-s5/>

#### Karte D2: Tesla Powerwall 2 13,5 kWh Solarbatterie

- Produktspezifische Quellen:  
 [1] Herstellerinformation
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Die max. Zyklenzahl war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
  - b Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
  - c Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im März 2019):

[https://www.tesla.com/de\\_DE/powerwall](https://www.tesla.com/de_DE/powerwall)

#### Karte D3: Vorladespeicher für öffentliche Versorgungsinfrastruktur

- Produktspezifische Quellen:  
 [1] Herstellerangaben (persönliche Kommunikation)

#### Karte D4: Traktionsbatterie VW e-up!

- Produktspezifische Quellen:  
 [1] Produktbroschüre Der neue e-up!  
 [2] Produktbroschüre Der neue e-up!, Technik und Preise, Gültig für das Modelljahr 2016  
 [3] Persönliche Kommunikation
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Für das Volumen des Speichersystems wurde das Volumen der Leistungselektronik berücksichtigt, welches technologiespezifisch mit einer volumetrischen Leistungsdichte von 1500 kW/m<sup>3</sup> auf Basis von [vi] berechnet wurde.
  - b Für die Masse des Speichersystems wurde die Masse der Leistungselektronik berücksichtigt, die technologiespezifisch mit einer gravimetrischer Leistungsdichte von 1 kW/kg auf Basis von [vi] berechnet wurde.
  - c Die Lebensdauer war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
  - d Die Kosten bestehen aus dem Listenpreis der Batterie aus [3] (15.000 €) sowie den Kosten der Leistungselektronik, die technologiespezifisch mit spezifischen Kosten von 200 €/kW auf Basis von [ii] berechnet werden.

- e Der Wälzwirkungsgrad war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
- a Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt sowie um den Wirkungsgrad der Leistungselektronik (97 %) korrigiert.
- f Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.

[1,2] url (abgerufen im März 2017):

<https://www.volkswagen.de/de/models/e-up.html>

[3] telefonische Auskunft VW-Händler durchgeführt im November 2016

## E: Lithium-Ionen-Akkumulatoren II

### Karte E1: Spitzenlastspeicher für industrielle Verbraucher

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Herstellerangaben (persönliche Kommunikation)

### Karte E2: Batteriespeicherkraftwerk Schwerin

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Herstellerangaben (persönliche Kommunikation)
  - [2] Faktenblatt WEMAG Batteriespeicherkraftwerk Schwerin 1 und Schwerin 2
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Die volumetrische Leistungs- und Energiedichte war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [v] technologiespezifisch (Gesamtsystem Container) ergänzt.
  - b Die gravimetrische Leistungs- und Energiedichte war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [v] technologiespezifisch (Gesamtsystem Container) ergänzt.
  - c Die Lebensdauer war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
  - d Die Projektkosten setzten sich unter anderem aus den Materialkosten, Fertigungskosten, Personalkosten und den Fördergeldern zusammen.
  - e Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
  - f Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.

[2] url (abgerufen im März 2019):

<https://www.wemag.com/sites/default/files/20170714%20Faktenblatt%20WEMAG%20Batteriespeicher.pdf>

### Karte E3: Hybridgroßspeicher

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Herstellerangaben (persönliche Kommunikation)

### Karte E4: Stromspeicher Herrenhausen

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Herstellerangaben
  - [2] Zeitungsartikel

- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Die volumetrische und gravimetrische Leistungs- und Energiedichte war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von dem Batteriespeicherkraftwerk Schwerin (E2) abgeschätzt.
  - b Die Lebensdauer war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
  - c Die max. Zyklenzahl war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von dem Batteriespeicherkraftwerk Schwerin (E2) abgeschätzt.
  - d Der Wälzwirkungsgrad war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von dem Batteriespeicherkraftwerk Schwerin (E2) abgeschätzt.
  - e Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
  - f Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im April 2019):

<https://www.enercity.de/infothek/downloads/broschueren/anlagen/kraftwerk-herrenhausen.pdf>

[2] url (abgerufen im April 2019):

<http://www.haz.de/Hannover/Aus-der-Stadt/Uebersicht/Die-Elektro-Zukunft-beginnt-in-Hannover-mit-einem-neuartigem-Batteriespeicher>

## F: Blei-Säure-Akkumulatoren

### Karte F1: SolStore 16.2 Pb Solarbatterie, Fa. IBC Solar

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Datenblatt: IBC SolStore Batteriespeicher 16.2 Pb
  - [2] Weitere Kennzahlen zum Speicher
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im März 2019):

<https://shop.ibc-solar.de/download/EloSheet.php?sheet=c2hlZXRfbm89NzQwMDEwMDAwOSZzaGVldF9raW5kPUIuc3RhbnGxhdGlvbnNhbmmlaXR1bmc2hZXRfbGFuZ3VhZ2U9REUmc2hZXRfdHlwZT1wZGYmc2hZXRfdXNlcj1mcGldFByb2R1Y3Rz&sheetname=Installationsanleitung&sheettype=pdf>

[2] url (abgerufen im Januar 2019, Preis von 2016):

<https://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/stromspeicher/ibc-solstore>

### Karte F2: Varta Silver Dynamic 610 402 092 Starterbatterie

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Herstellerangaben (Persönliche Kommunikation)
  - [2] Datenblatt: Varta Silver Dynamic 610 402 092
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Die Speicherkapazität ergibt sich bei 20-stündiger Entladung.
  - b Die entsprechende Entladeleistung ergibt sich bei der Bestimmung der 20-stündigen Kapazität.

[1] Email-Kommunikation mit der technischen Leitung von Johnson Controls Power Solutions  
 [2] url (abgerufen im Januar 2019):  
<https://www.varta-automotive.com/en-gb/products/varta-silver-dynamic/610-402-092>

### Karte F3: EBU 1000, Fa. Belectric

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Broschüre, Energy Buffer Unit EBU 1000, Rev. 2015-05-07\_EN
  - [2] BELECTRIC GmbH, Batteriegroßspeicher BELECTRIC EBU präqualifiziert, Pressemitteilung, 7. Mai 2015
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Die Lebensdauer war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
  - b Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
  - c Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im März 2017):  
[http://www.belectric.com/fileadmin/MASTER/pdf/brochures/BEL\\_SKW\\_EBU-1000\\_2015-05-07\\_www.pdf](http://www.belectric.com/fileadmin/MASTER/pdf/brochures/BEL_SKW_EBU-1000_2015-05-07_www.pdf)  
 [2] url (abgerufen im Januar 2019): <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/opvius-gmbh-kitzingen/Batteriegrossspeicher-BELECTRIC-EBU-praequalifiziert/boxid/738183>

### Karte F4: Hoppecke OPzV 9 sun|power VR L 1125

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Typ sun | power VR L 1125, Broschüre, Hoppecke sun | power VR L – OpzV, Rev. 05/2015 DE
  - [2] Preis über Batterievertreib
- Erläuterungen Fußnoten:
  - b Die Speicherkapazität ergibt sich bei einer 10-stündigen Entladung. Zur Berechnung wurde die elektrische Ladung  $C_{10}$  laut [1] von 1023 Ah mit einer Nennspannung (hier  $U_n$ ) von 2V multipliziert:
 
$$E = C_{10} * U_n$$
  - c Die entsprechende Entladeleistung ergibt sich aus der 10-stündigen Kapazität und der kleinstmöglichen Entladezeit (hier  $t_k$  in h):
 
$$P = \frac{E}{t_k}$$
  - d Für das Volumen des Speichersystems wurde das Volumen der Leistungselektronik berücksichtigt, welches technologiespezifisch mit einer volumetrischen Leistungsdichte von 500 kW/m<sup>3</sup> auf Basis von [vii] berechnet wurde.
  - e Für die Masse des Speichersystems wurde die Masse der Leistungselektronik berücksichtigt, die technologiespezifisch mit einer gravimetrischen Leistungsdichte von 500 W/kg auf Basis von [vii] berechnet wurde.
  - f Die Lebensdauer war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
  - g Die Kosten beinhalten die Kosten der Leistungselektronik, die technologiespezifisch mit spezifischen Kosten von 200€/kW auf Basis von [ii] berechnet wurden.

- h Der Wälzwirkungsgrad war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt sowie um den Wirkungsgrad der Leistungselektronik (97 %) korrigiert.
- i Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
- j Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im Januar 2019):

[http://www.ffi-solar.com/products/pdf/batteries\\_Hoppecke\\_sun.power\\_VRL\\_de.pdf](http://www.ffi-solar.com/products/pdf/batteries_Hoppecke_sun.power_VRL_de.pdf)

[2] url (abgerufen im Januar 2019): <https://greenakku.de/Batterien/OPzV-Batterien/Hoppecke-OPzV-9-sunpower-VR-L-1125::502.html>

## G: Weitere Akkumulatoren

### Karte G1: NiMH-Traktionsbatterie Toyota Prius IV

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Broschüre, Prius, Preise und Fakten, Artikel-Nr.: M10055a, Juli 2014
  - [2] Homepage Toyota Prius
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Für das Volumen des Speichersystems wurde das Volumen der Leistungselektronik berücksichtigt, welches technologiespezifisch mit einer volumetrischen Leistungsdichte von 1500 kW/m<sup>3</sup> auf Basis von [vi] berechnet wurde.
  - b Für die Masse des Speichersystems wurde die Masse der Leistungselektronik berücksichtigt, die technologiespezifisch mit einer gravimetrischer Leistungsdichte von 1 kW/kg auf Basis von [vi] berechnet wurde.
  - c Die Kosten beinhalten die Kosten der Leistungselektronik, die technologiespezifisch mit spezifischen Kosten von 200€/kW auf Basis von [ii] berechnet wurden.
  - d Der Wälzwirkungsgrad war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [viii] technologiespezifisch ergänzt.
  - e Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [viii] technologiespezifisch ergänzt.
  - f Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [viii] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im Januar 2019): <https://docplayer.org/5685981-Prius-preise-und-fakten.html>

[2] url (abgerufen im Januar 2019): <https://www.toyota.de/automobile/prius/index.json>

### Karte G2: ZEBRA-Batterie Typ Z5-557.ML3X-38, Fa. FZ Sonick

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Broschüre, Technical data ZEBRA SoNick® Battery Type Z5
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Für das Volumen des Speichersystems wurde das Volumen der Leistungselektronik berücksichtigt, welches technologiespezifisch mit einer volumetrischen Leistungsdichte von 1500 kW/m<sup>3</sup> auf Basis von [vi] berechnet wurde.

- b Für die Masse des Speichersystems wurde die Masse der Leistungselektronik berücksichtigt, die technologiespezifisch mit einer gravimetrischer Leistungsdichte von 1 kW/kg auf Basis von [vi] berechnet wurde.
- c Die Lebensdauer war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [viii] technologiespezifisch ergänzt
- d Die Anschaffungskosten waren nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurden auf Basis von [viii] technologiespezifisch mit energiebezogenen Investitionskosten von 575€/kWh und leistungsbezogenen Investitionskosten von 175€/kW geschätzt sowie um die Kosten der Leistungselektronik ergänzt, die technologiespezifisch mit spezifischen Kosten von 200€/kW auf Basis von [ii] berechnet wurden.
- e Der Wälzwirkungsgrad war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [viii] technologiespezifisch ergänzt.
- f Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [viii] technologiespezifisch ergänzt.
- g Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch (Akkumulatoren) ergänzt.

[1] url (abgerufen im Januar 2019):

[http://www.lcenergy.com.au/pdfs/Zebra\\_SoNick\\_Battery\\_Type\\_Z5.pdf](http://www.lcenergy.com.au/pdfs/Zebra_SoNick_Battery_Type_Z5.pdf)

#### Karte G3: 800 kW/4,8 MWh Natrium-Schwefel-Speichersystem, Fa. NGK

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Datenblatt
  - [2] Firmenpräsentation
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Die Anschaffungskosten waren nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurden auf Basis von [viii] technologiespezifisch mit energiebezogenen Investitionskosten von 294€/kWh und leistungsbezogenen Investitionskosten von 160€/kW geschätzt.
  - b Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
  - c Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im Januar 2019): <https://www.ngk.co.jp/nas/specs/>

[2] url (abgerufen im März 2017):

[http://www.eei.org/about/meetings/meeting\\_documents/abe.pdf](http://www.eei.org/about/meetings/meeting_documents/abe.pdf)

#### Karte G4: Natrium-Schwefel-Traktionsbatterie Horlacher Sport I

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Batterien für Elektrostraßenfahrzeuge - Webseite
  - [2] Herstellerangaben (persönliche Kommunikation)
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Für das Volumen des Speichersystems wurde das Volumen der Leistungselektronik berücksichtigt, welches technologiespezifisch mit einer volumetrischen Leistungsdichte von 1500 kW/m<sup>3</sup> auf Basis von [vi] berechnet wurde.
  - b Für die Masse des Speichersystems wurde die Masse der Leistungselektronik berücksichtigt, die technologiespezifisch mit einer gravimetrischer Leistungsdichte von 1 kW/kg auf Basis von [vi] berechnet wurde.

- c Die Lebensdauer war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [viii] technologiespezifisch ergänzt.
- d Die max. Zyklenzahl war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von Lebensdauer war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
- e Die Kosten beinhalten die Kosten der Leistungselektronik, die technologiespezifisch mit spezifischen Kosten von 200€/kW auf Basis von [ii] berechnet wurden.
- f Der Wälzwirkungsgrad war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
- g Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
- h Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im Januar 2019):

<http://www.elweb.info/data/evtechnik/allgemein/fbatteri.htm>

## H: Tertiäre galvan. Systeme

### Karte H1: Redox-Flow-Batterie Typ Z20-5, Fa. ViZn Energy

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Datenblatt: ViZn Z20 Datasheet englisch, Version 01, Nov 2015
  - [2] Artikel zum Produkt mit Preisangabe
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Für das Volumen des Speichersystems wurde das Volumen der Leistungselektronik berücksichtigt, welches technologiespezifisch mit einer volumetrischen Leistungsdichte von 500 kW/m<sup>3</sup> auf Basis von [vii] berechnet wurde.
  - b Für die Masse des Speichersystems wurde die Masse der Leistungselektronik berücksichtigt, die technologiespezifisch mit einer gravimetrischer Leistungsdichte von 500 W/kg auf Basis von [vii] berechnet wurde.
  - c Die Kosten beinhalten die Kosten der Leistungselektronik, die technologiespezifisch mit spezifischen Kosten von 150 €/kW auf Basis von [ii] berechnet wurden.
  - d Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im Januar 2019): <https://www.viznenergy.com/products-z20/>

[2] url (abgerufen im Januar 2019): <http://www.greentechmedia.com/articles/read/vizn-targets-200-per-kilowatt-hour-for-high-power-flow-batteries>

### Karte H2: Redox-Flow-Batterie, Typ CellCube FB 200-400

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Datenblatt Gildemeister
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Die max. Zyklenzahl war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [v] technologiespezifisch ergänzt.
  - b Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im März 2017): <http://energy.gildemeister.com/de/speichern/cellcube-fb-200#Technische-Daten>

### Karte H3: Redox-Flow-Batterie, Typ ZBM 3, Fa. Redflow

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Datenblatt Redflow
  - [2] Preis aus Projektbericht
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Für das Volumen des Speichersystems wurde das Volumen der Leistungselektronik berücksichtigt, welches technologiespezifisch mit einer volumetrischen Leistungsdichte von 500 kW/m<sup>3</sup> auf Basis von [vii] berechnet wurde.
  - b Für die Masse des Speichersystems wurde die Masse der Leistungselektronik berücksichtigt, die technologiespezifisch mit einer gravimetrischer Leistungsdichte von 500 W/kg auf Basis von [vii] berechnet wurde.
  - c Die Kosten beinhalten die Kosten der Leistungselektronik, die technologiespezifisch mit spezifischen Kosten von 200€/kW auf Basis von [ii] berechnet wurden.
  - d Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url(abgerufen im März 2017): [http://redflow.com/wp-content/uploads/2015/06/Redflow-ZBM-3-Datasheet\\_02.pdf](http://redflow.com/wp-content/uploads/2015/06/Redflow-ZBM-3-Datasheet_02.pdf)

[2] url (abgerufen im Januar 2019): <http://www.energy-storage.news/news/redflow-halves-zbm-battery-costs-to-below-grid-price>

### Karte H4: 500 MW/133 GWh Wind-Wasserstoff-System

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Stolzenburg (2014). Integration von Wind-Wasserstoff-Systemen in das Energiesystem. Abschlussbericht.
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Die Energie ergibt sich aus einer Arbeitsgasmenge von 4000 t H<sub>2</sub> mit einer Energiedichte von 33,33 kWh/kg.
  - b Für die Masse wurde Masse des Arbeitsgases sowie des Kissengases berücksichtigt.
  - c Die max. Zyklenzahl (hier  $N_{\text{zykl}}$ ) wurde aus Lebensdauer (hier  $t_a$  in a) und kleinstmöglicher Entladezeit (hier  $t_k$  in h) über folgende Beziehung berechnet:
 
$$N_{\text{zykl}} = \frac{t_a \cdot 365 \cdot 24}{2 \cdot t_k}$$
  - d Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch (Annahme einer Rückverstromung in Gasturbinen) ergänzt.

[1] url (abgerufen im Januar 2019): <https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20140402-abschlussbericht-zur-integration-von-wind-wasserstoff-systemen-in-das-energiesystem-ist-veroeffentlicht/abschlussbericht-integration-von-wind-wasserstoff-systemen-in-das-energiesystem.pdf>

## I: Luftenergiespeicher

### Karte I1: Kraftwerk Huntorf

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Hübner (KBB, Hannover) (2007). Speichertechnologien / Adiabates Druckluftspeicher-Kraftwerk. Innovationstag Energie / Cottbus
  - [2] Angaben des Projektplaner zum Preis (persönliche Kommunikation)
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Die Masse des Gases wurde aus dem Volumen des gesamten Gases unter Verwendung des idealen Gasgesetzes approximiert ( $T=49,9^{\circ}\text{C}$ ,  $p_{\text{max}}=72$  bar).
  - b Die max. Zyklenzahl (hier  $N_{\text{zykl}}$ ) wurde aus Lebensdauer (hier  $t_a$  in a) und kleinstmöglicher Entladezeit (hier  $t_k$  in h) über folgende Beziehung berechnet:
 
$$N_{\text{zykl}} = \frac{t_a \cdot 365 \cdot 24}{2 \cdot t_k}$$
  - c Die Durchspeicherkosten enthalten die Energiekosten für das Erdgas. Es wurde angenommen das je  $\text{kWh}_{\text{el}}$   $1,6 \text{ kWh}_{\text{th}}$  in Form von Erdgas erforderlich sind. (Gaspreis 3ct/kWh)
  - d Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.
  - e Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [iv] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im Januar 2019): <https://docplayer.org/19158255-Speichertechnologien-adiabates-druckluftspeicher-kraftwerk.html>

### Karte I2: Druckluftspeicherkraftwerk Staßfurt, ADELE-Konzept

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] The Adele Project. P. A. Lombardi, Fraunhofer Institute For Factory Operation And Automation Iff Magdeburg. Vortrag: Regional workshop (Germany and Poland). Research and Innovation activities about energy storage integration in the electricity networks: ongoing activities at national level and future needs. München. 9. und 10. März 2016.
  - [2] Status der Entwicklung des adiabaten Druckluftspeichers ADELE. P. Moser, RWE Power AG. Vortrag: Leopoldina-Symposium. Halle. 6. Februar 2014.
  - [3] Metastudie „Energiespeicher“, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheit- und Energietechnik UMSICHT. 31.10.2014
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Das notwendige Volumen des Gases wurde auf Basis des Kavernenvolumens des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf (siehe Karte I1) unter Korrektur des Wirkungsgrads, der Speicherkapazität und des Druckniveaus abgeschätzt.
  - b Die Masse des Gases wurde aus dem Volumen des gesamten Gases unter Verwendung des idealen Gasgesetzes approximiert ( $T=49,9^{\circ}\text{C}$ ,  $p_{\text{max}}=70$  bar).
  - c Die max. Zyklenzahl (hier  $N_{\text{zykl}}$ ) wurde aus Lebensdauer (hier  $t_a$  in a) und kleinstmöglicher Entladezeit (hier  $t_k$  in h) über folgende Beziehung berechnet:
 
$$N_{\text{zykl}} = \frac{t_a \cdot 365 \cdot 24}{2 \cdot t_k}$$
  - d Die Kosten wurden basierend auf [3] geschätzt.
  - e Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
  - f Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [j] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im März 2017): <http://www.gridpl.usstorage.eu/workshops/7-workshop-8-germany-poland>

[2] url (abgerufen im Januar 2019):

[https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Politikberatung/pdf/Peter Moser - Druckluftspeicher.pdf](https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Politikberatung/pdf/Peter_Moser_-_Druckluftspeicher.pdf)

[3] url (abgerufen April 2019):

<https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/pressemitteilungen/2015/Metastudie-Energiespeicher-Kurzfassung-web.pdf>

### Karte I3: 29 MW/234 MWh LTA-CAES®, Frauenhofer UMSICHT

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Herstellerangaben (persönliche Kommunikation)
- Erläuterungen Fußnoten:
  - Die Masse des Gases wurde aus dem Volumen des gesamten Gases unter Verwendung des idealen Gasgesetzes approximiert ( $T=35^{\circ}\text{C}$ ,  $p_{\text{max}}=145\text{ bar}$ ).
  - a Die max. Zyklenzahl (hier  $N_{\text{zykl}}$ ) wurde aus Lebensdauer (hier  $t_a$  in a) und kleinstmöglicher Entladezeit (hier  $t_k$  in h) über folgende Beziehung berechnet:
 
$$N_{\text{zykl}} = \frac{t_a \cdot 365 \cdot 24}{2 \cdot t_k}$$
  - b Die Kosten wurden basierend auf [3] geschätzt.
  - c Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
  - d Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.

### Karte I4: Flüssigluftenergiespeicher, Demonstrationsanlage, Pilsworth/Bury, UK

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Firmenpräsentation: Stuart Nelmes. Liquid Air Energy Storage (LAES)
- Erläuterungen Fußnoten:
  - Die Masse des Gases wurde aus dem Volumen des Arbeitsgases unter Verwendung des idealen Gasgesetzes approximiert (Dichte von flüssiger Luft von  $870\text{ kg/m}^3$ ).
  - Die max. Zyklenzahl (hier  $N_{\text{zykl}}$ ) wurde aus Lebensdauer (hier  $t_a$  in a) und kleinstmöglicher Entladezeit (hier  $t_k$  in h) über folgende Beziehung berechnet:
 
$$N_{\text{zykl}} = \frac{t_a \cdot 365 \cdot 24}{2 \cdot t_k}$$
  - Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
  - Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen April 2019):

[https://warwick.ac.uk/fac/sci/eng/research/grouplist/electricalpower/images/newsn\\_events/hies2017/presentations/hies2017\\_highview.pdf](https://warwick.ac.uk/fac/sci/eng/research/grouplist/electricalpower/images/newsn_events/hies2017/presentations/hies2017_highview.pdf)

## **J: Lageenergiespeicher**

### Karte J1: Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal

- Produktspezifische Quellen:

- [1] Auflistung in der DOE Global Energy Storage Database
- [2] Goldisthal – das größte Pumpspeicherkraftwerk Deutschlands. Information zum Pumpspeicherkraftwerk vom Eigentümer Vattenfall
- [3] Wikipediaeintrag Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal

- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Die Masse des Gases wurde aus dem Volumen unter Verwendung der Dichte von Wasser (rund 1000 kg/m<sup>3</sup>) approximiert.
  - b Die Lebensdauer war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
  - c Die max. Zyklenzahl (hier  $N_{\text{zykl}}$ ) wurde aus Lebensdauer (hier  $t_a$  in a) und kleinstmöglicher Entladezeit (hier  $t_k$  in h) über folgende Beziehung berechnet:
 
$$N_{\text{zykl}} = \frac{t_a \cdot 365 \cdot 24}{2 \cdot t_k}$$
  - d Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.
  - e Die max. Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [j] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im Januar 2019): <http://www.energystorageexchange.org/projects/505>

[2] url (abgerufen im Januar 2019): <http://kraftwerke.vattenfall.de/goldisthal>

[3] url (abgerufen im März 2019): [https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherwerk\\_Goldisthal](https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherwerk_Goldisthal)

#### Karte J2: Naturstromspeicher Gaildorf

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Broschüre Naturstromspeicher. Stand September 2016.
  - [2] Angaben der Projektleitung (persönliche Kommunikation)
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Die Masse des Gases wurde aus dem Volumen unter Verwendung der Dichte von Wasser (rund 1000 kg/m<sup>3</sup>) approximiert.
  - b Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde auf Grund des geschlossenen Oberbeckens zu Null abgeschätzt.

[1] url (abgerufen im Januar 2019): [http://www.naturspeicher.de/we-dokumente/pdf/de/Broschuere\\_Naturstrom\\_DE.pdf?m=1458203996](http://www.naturspeicher.de/we-dokumente/pdf/de/Broschuere_Naturstrom_DE.pdf?m=1458203996)

#### Karte J3: STENSEA-Konzept

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] STENSEA, Stored Energy in the Sea. The Feasibility of an Underwater Pumped Hydro Storage System. A. Garg. Hochtief Solutions AG. Vortrag: 7. International Renewable Energy Storage Conference (IRES). Berlin. 12-14 November 2012.
  - [2] STENSEA, Stored Energy in the Sea. C. Lay. Hochtief AG, A. Garg. Hochtief Solutions AG. Poster: 7. International Renewable Energy Storage Conference (IRES). Berlin. 12-14 November 2012.
  - [3] Herstellerangaben (persönliche Kommunikation)
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Die max. Zyklenzahl (hier  $N_{\text{zykl}}$ ) wurde aus Lebensdauer (hier  $t_a$  in a) und kleinstmöglicher Entladezeit (hier  $t_k$  in h) über folgende Beziehung berechnet:
 
$$N_{\text{zykl}} = \frac{t_a \cdot 365 \cdot 24}{2 \cdot t_k}$$
  - b Die Selbstentladung war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt

- c Die Reaktionszeit war nicht produktspezifisch zu ermitteln und wurde daher auf Basis von [i] technologiespezifisch ergänzt.

[1] url (abgerufen im Januar 2019): <https://docplayer.net/8559477-Stensea-stored-energy-in-sea-the-feasibility-of-an-underwater-pumped-hydro-storage-system-dr-andreas-garg-christoph-lay-robert-fullmann.html>

[2] url (abgerufen im Januar 2019):  
[https://www.researchgate.net/publication/272318141\\_STENSEA\\_-\\_Stored\\_energy\\_in\\_the\\_Sea](https://www.researchgate.net/publication/272318141_STENSEA_-_Stored_energy_in_the_Sea)

[3] Email-Kommunikation im Juli 2018

#### Karte J4: ARES rail based energy storage system

- Produktspezifische Quellen:
  - [1] Broschüre: Advanced Rail Energy Storage. Ares, the power of gravity.
  - [2] Angaben der Projektleitung zum Preis (persönliche Kommunikation)
- Erläuterungen Fußnoten:
  - a Das Volumen wurde aus der Masse unter Verwendung der Dichte von Beton (nach DIN 1045 rund 2000 kg/m<sup>3</sup>) abgeschätzt.
  - b Die max. Zyklenzahl (hier  $N_{\text{zykl}}$ ) wurde aus Lebensdauer (hier  $t_a$  in a) und kleinstmöglicher Entladezeit (hier  $t_k$  in h) über folgende Beziehung berechnet:

$$N_{\text{zykl}} = \frac{t_a \cdot 365 \cdot 24}{2 \cdot t_k}$$

[1] url (abgerufen im Januar 2019):  
[http://s3.amazonaws.com/siteninja/multitenant/assets/21125/files/original/All\\_About\\_ARES\\_-\\_070616.pdf](http://s3.amazonaws.com/siteninja/multitenant/assets/21125/files/original/All_About_ARES_-_070616.pdf)

## Quellenverzeichnis

[i] Elsner et al. Energiespeicher Technologiesteckbrief zur Analyse „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050“. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. acatech. 2015.  
url (abgerufen Dezember 2018): [https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user\\_upload/Publikationen/pdf/ESYS\\_Technologiesteckbrief\\_Energiespeicher.pdf](https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/pdf/ESYS_Technologiesteckbrief_Energiespeicher.pdf)

[ii] Fuchs et al. Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität. Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien. Studie. ISEA, RWTH Aachen. 2012.  
url (abgerufen Dezember 2018): [http://www.sefep.eu/activities/projects-studies/Ueberblick\\_Speichertechnologien\\_SEFEP\\_deutsch.pdf](http://www.sefep.eu/activities/projects-studies/Ueberblick_Speichertechnologien_SEFEP_deutsch.pdf)

[iii] Schoenung. Characteristics and Technologies for Long- vs. Short-Term Energy Storage. A Study by the DOE Energy Storage Systems Program SAND2001-0765. 2001.  
url (abgerufen Dezember 2018): <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2001/010765.pdf>

[iv] Wietschel et al. Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung. Technologienbericht. ISI-Schriftenreihe Innovationspotentiale. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Fraunhofer Verlag. 2010.

[v] Wietschel et al. Energietechnologien der Zukunft. Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Springer Vieweg Wiesbaden. 2015.

[vi] Schulz. Die Bedeutung der Leistungsdichte in der modernen Leistungselektronik.  
url (abgerufen Januar 2019): <https://www.all-electronics.de/die-bedeutung-der-leistungsdichte-in-der-modernen-leistungselektronik/>

[vii] Leistungsdichte von Frequenzumrichtern. VDE. 2007.  
url (angerufen März 2017):  
[https://www.vde.com/de/fg/ETG/Archiv/Publikationen/Rundbriefe/2007-oeffentlich/mi-1/Technik-Trends/2006-exklusiv/PublishingImages/MCMS/Bild\\_41\\_Mertens3.gif](https://www.vde.com/de/fg/ETG/Archiv/Publikationen/Rundbriefe/2007-oeffentlich/mi-1/Technik-Trends/2006-exklusiv/PublishingImages/MCMS/Bild_41_Mertens3.gif)

[viii] Sauer et al. Marktanreizprogramm für dezentrale Speicher insbesondere für PV-Strom. Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe. RWTH Aachen. 2013.