



BETRIEBSABHÄNGIGE KOSTENBERECHNUNG VON ENERGIESPEICHERN

13. Symposium Energieinnovation

12.-14.02.2014, Graz/Austria

Maik Naumann,

Cong Nam Truong, Ralph Ch. Karl, Andreas Jossen

14.02.2014

Motivation

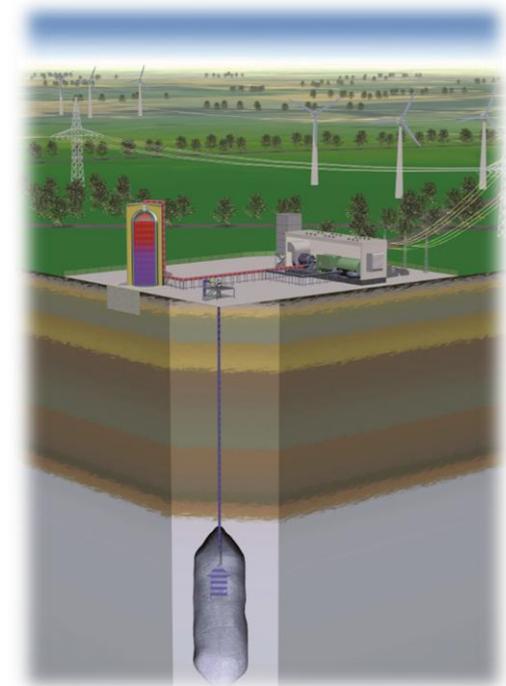


[1]



[2]

Kostenvergleich in
 $P_N \left[\frac{\text{€}}{\text{kW}} \right]$ bzw. $E_N \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right]$
sinnvoll?



[3]



[5]

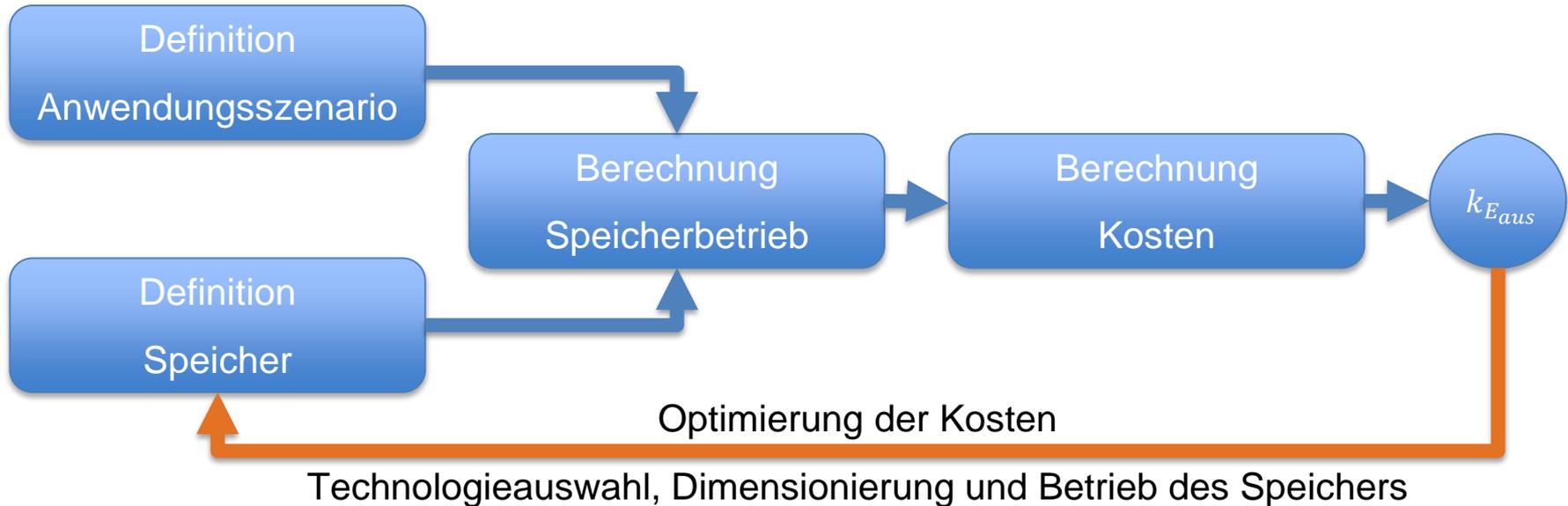


[4]

Gliederung

1. Motivation
2. Vollkostenrechnung für Energiespeicher
3. Anwendung des Rechenmodells
4. Zusammenfassung

2.1 Ansatz des Modells



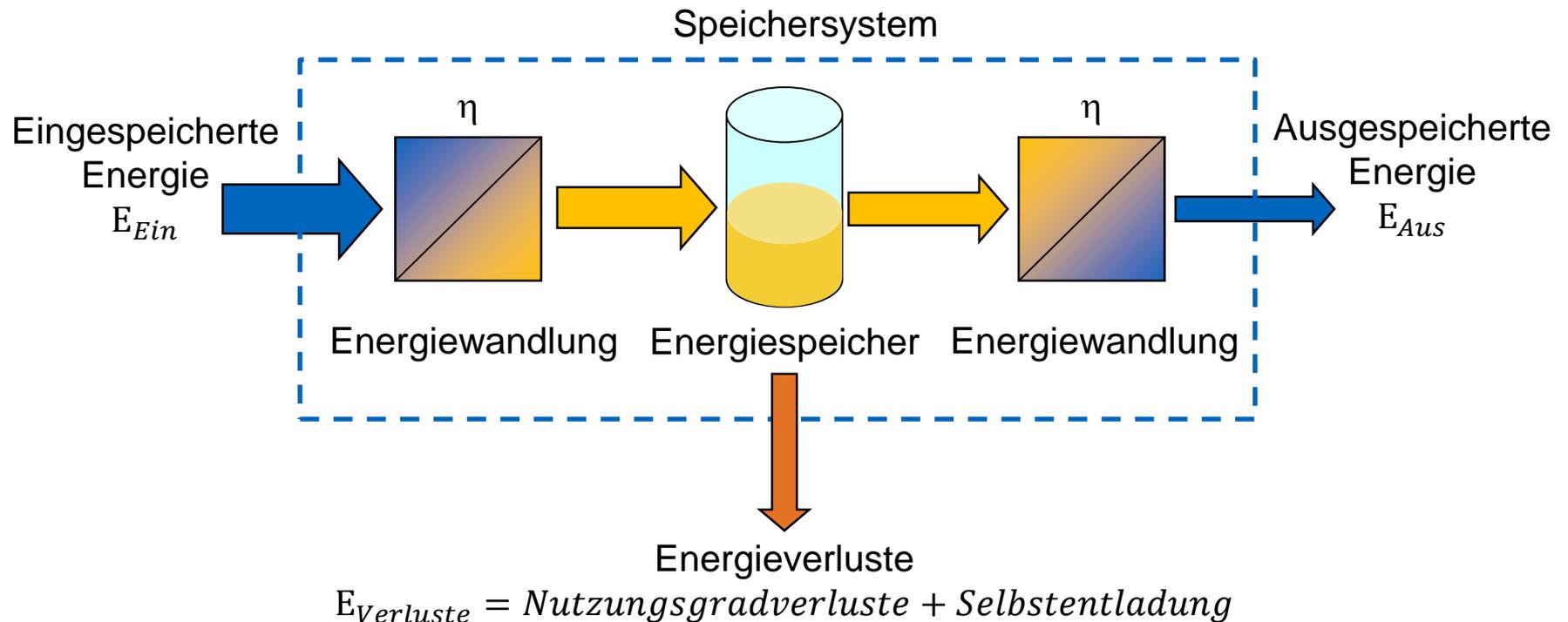
Definition Zielgröße:

Vollkosten der
ausgespeicherten
Energie

$$k_{E_{aus}} = \frac{k_{VK,AF}}{E_{aus}} = \frac{(K_0 + K_{Ersatz} - K_{Restwert}) \cdot AF + K_{Betrieb}}{E_{aus}} \quad \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right]$$

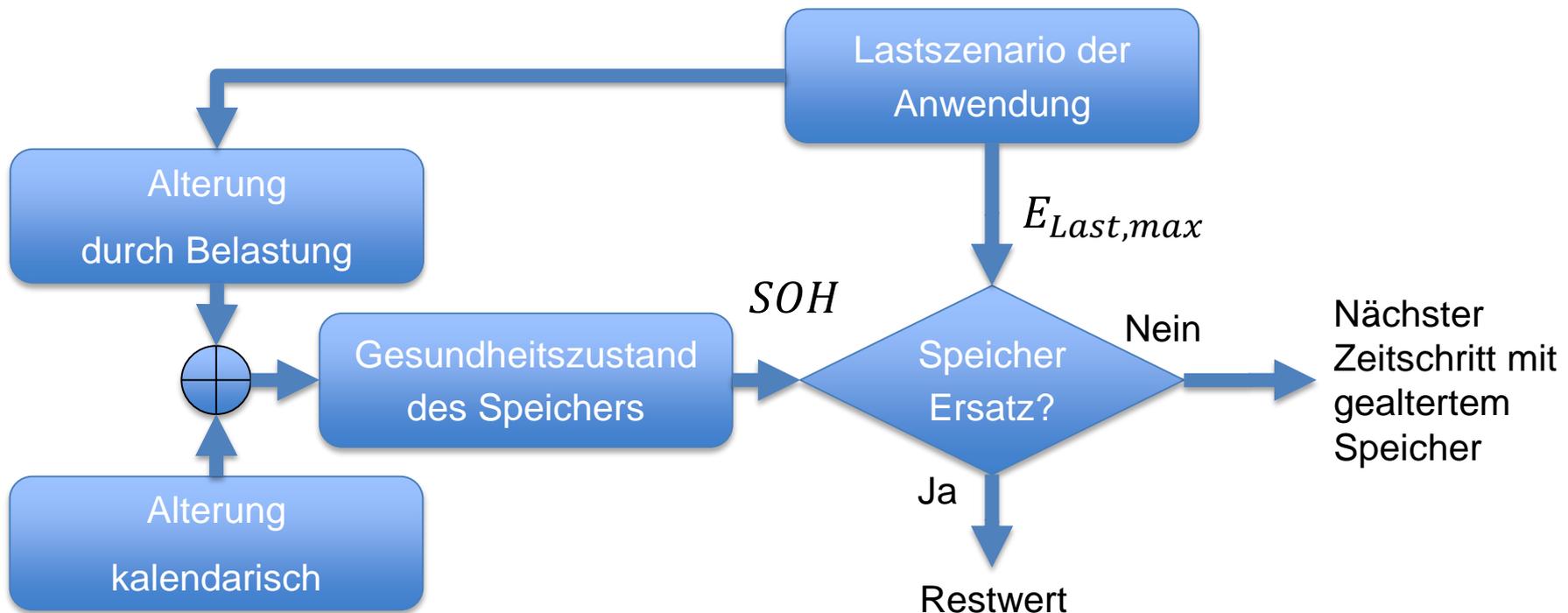
2.2 Beschreibung des mathematischen Modells

Berechnung des Energieumsatzes: Abstraktes Speichermodell



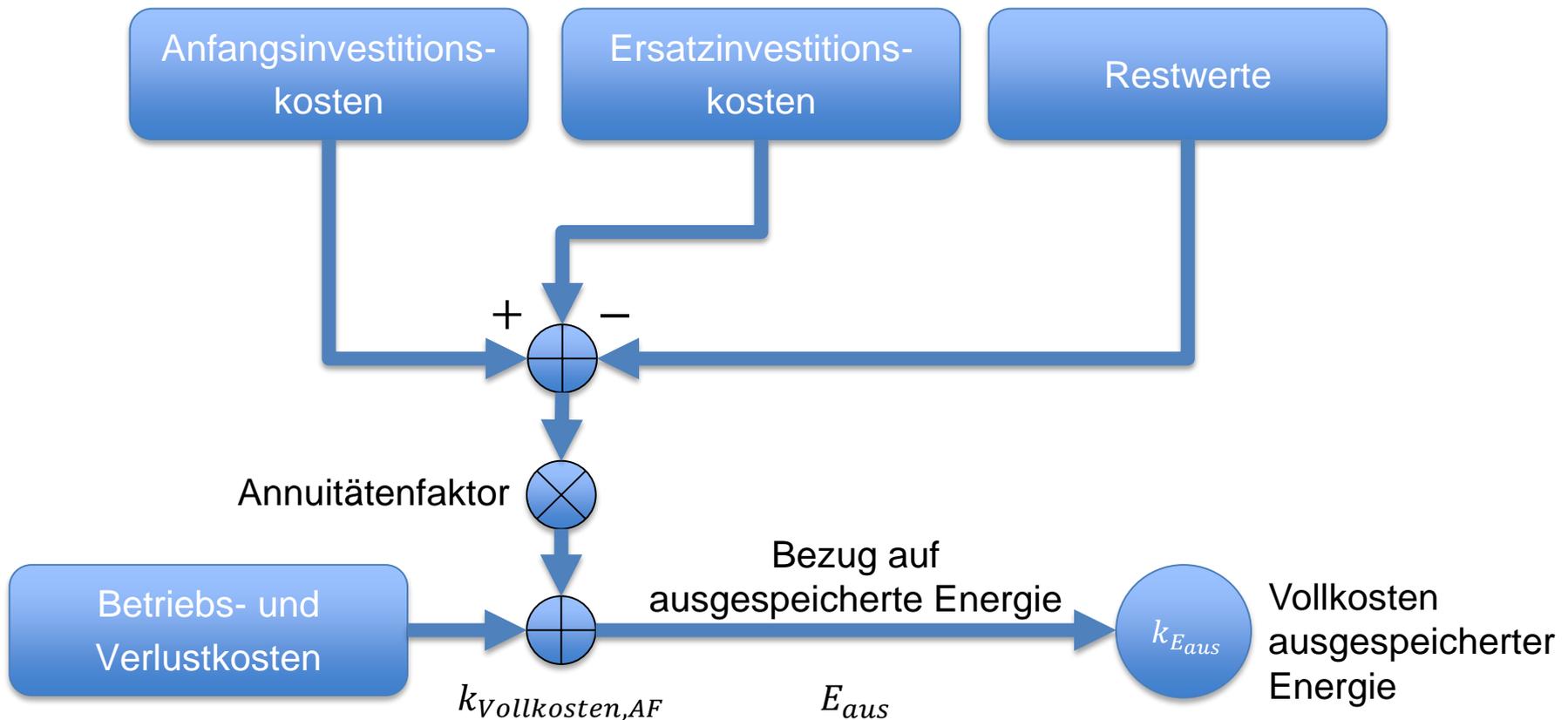
2.2 Beschreibung des mathematischen Modells

Berechnung der Alterung: Ereignisorientiertes Modell



2.2 Beschreibung des mathematischen Modells

Berechnung der Kosten für Zielgröße:

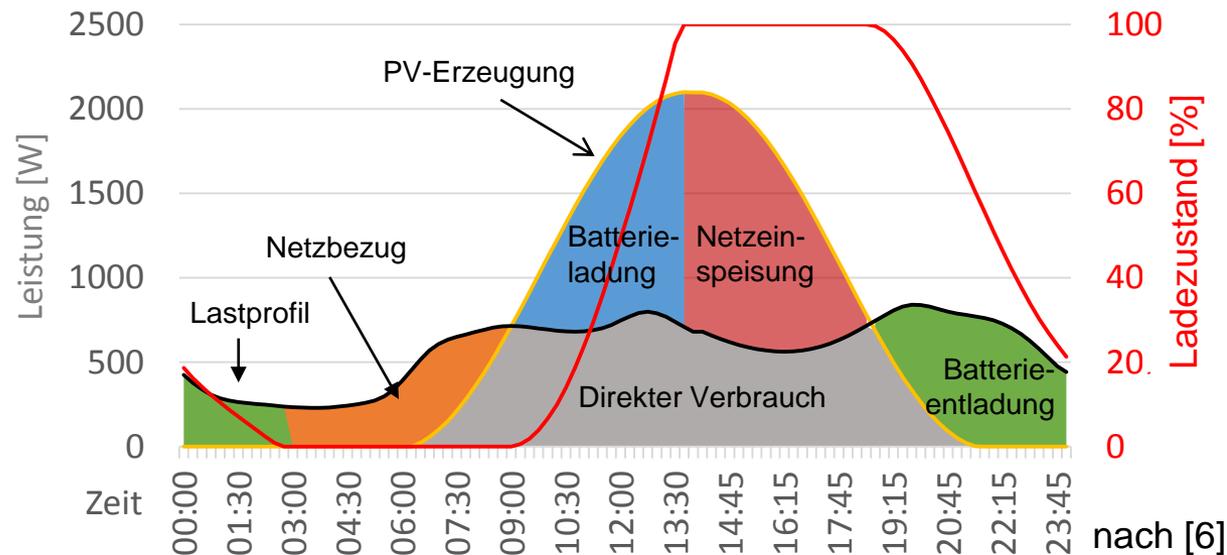


Gliederung

1. Motivation
2. Vollkostenrechnung für Energiespeicher
3. **Anwendung des Rechenmodells**
4. Zusammenfassung

3.1 Beispielhaftes Anwendungsszenario

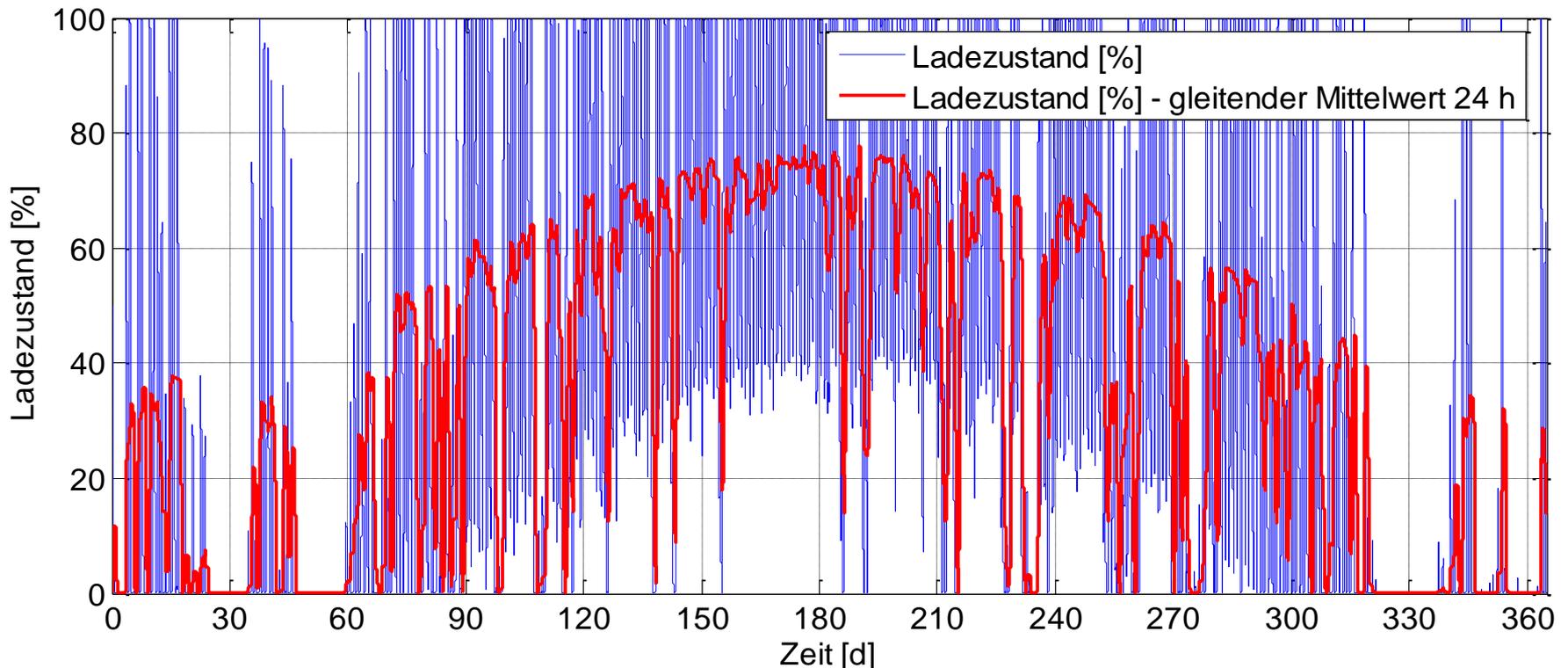
Batteriespeicher im Haushalt mit Photovoltaik-Anlage:



- Photovoltaik-Einspeisung: 4,0 kWp
- Verbrauch: 3500 kWh/Jahr
- Mindestgröße Batteriespeicher: 5,0 kWh
- Betriebsstrategie: Maximaler Eigenverbrauch

3.1 Beispielhaftes Anwendungsszenario

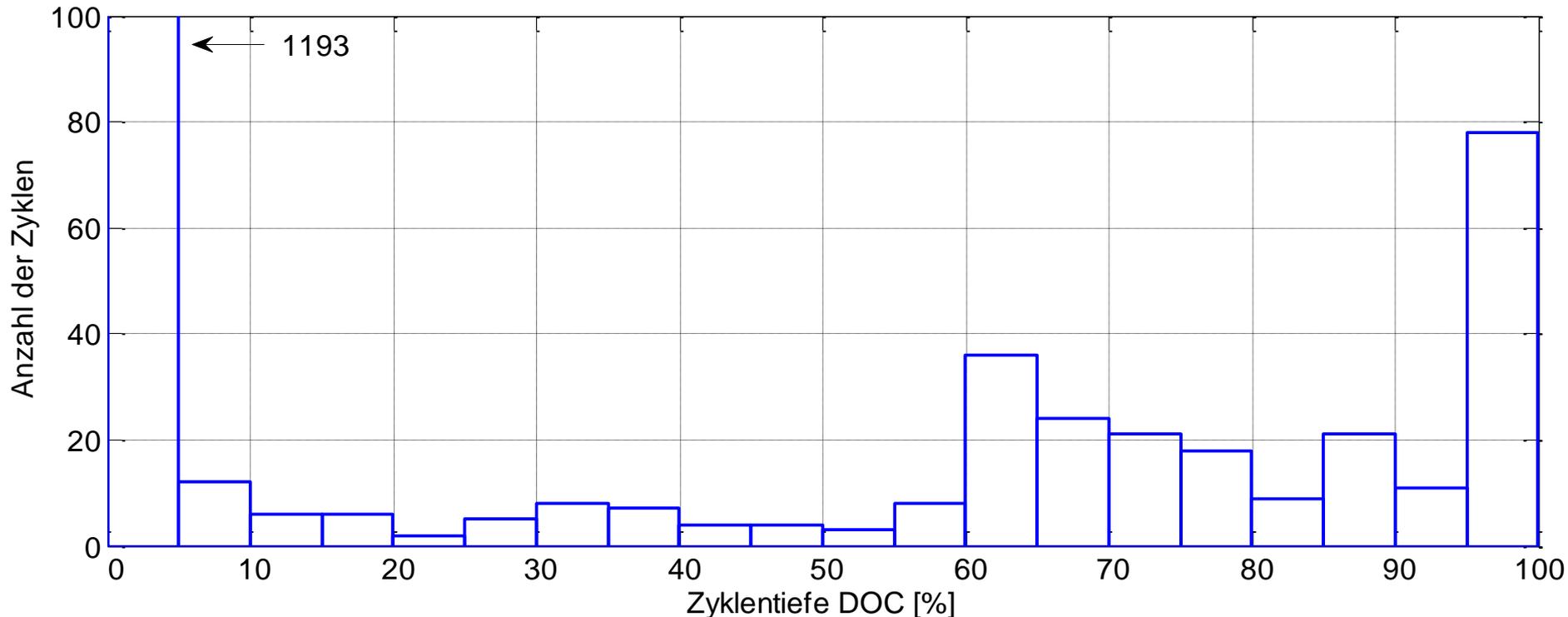
Ladezustandsprofil des Speichers:



- Standardlastprofil H0 Bayern (nach [7])
- Jahrgang einer vermessenen PV-Anlage in München

3.1 Beispielhaftes Anwendungsszenario

Histogramm des Ladezustandsprofils des Speichers als Lastszenario:



- Auswertung des Ladezustandsprofils mit Zyklenzählalgorithmus (nach [8])
- Lastszenario über 1 Jahr, zyklisch für 20 Jahre Nutzungsdauer wiederholt

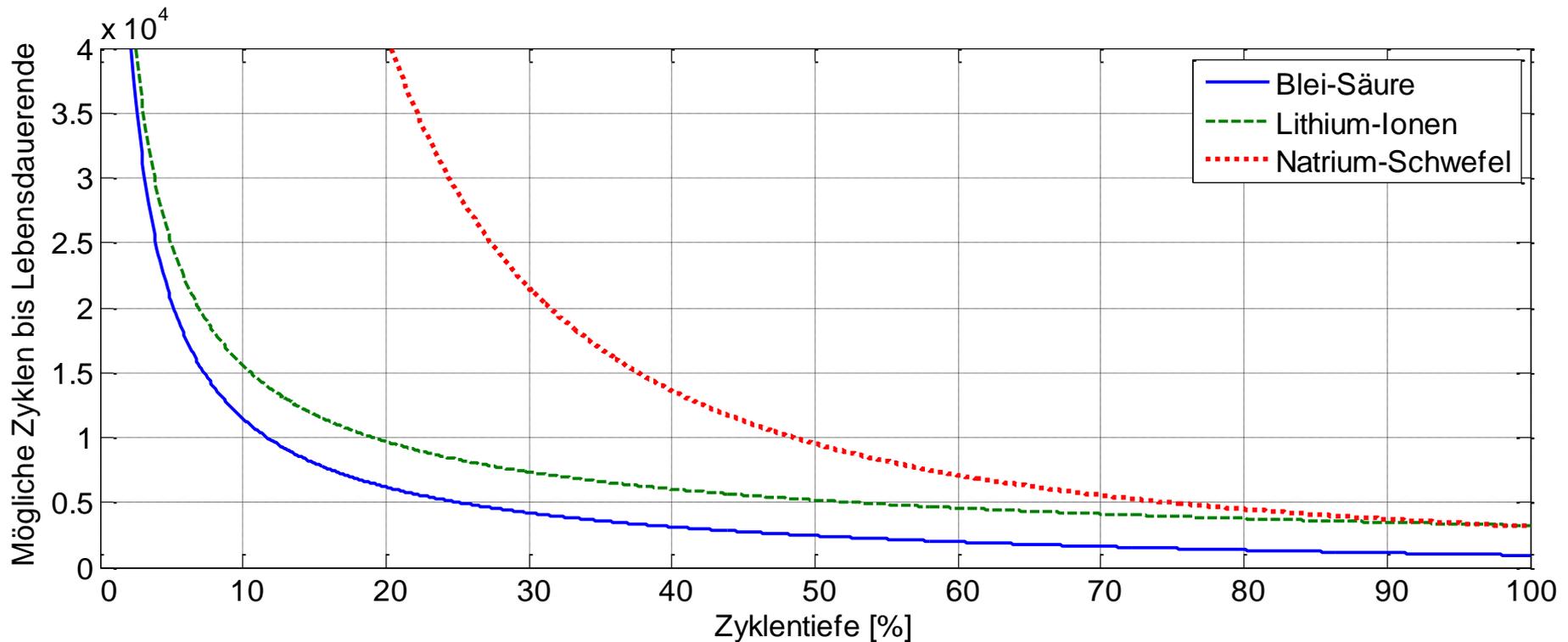
3.2 Speicherkennzahlen nach Technologie

Speicher	Blei-Säure	Lithium-Ionen	Natrium-Schwefel
Größe			
Gesamtnutzungsgrad η [%]	72,5	85,0	71,5
Selbstentladungsrate δ [%/Jahr]	91,25	60,00	3650,00
Kalendarische Lebensdauer $t_{EOL,Kalendarisch}$ [Jahre]	7,5	12,5	17,5
Spezifische Investitionskosten Leistung k_p [€/kW]	175	175	175
Spezifische Investitionskosten Energieinhalt k_E [€/kWh]	175	550	600

(nach [9])

3.2 Speicherkennzahlen nach Technologie

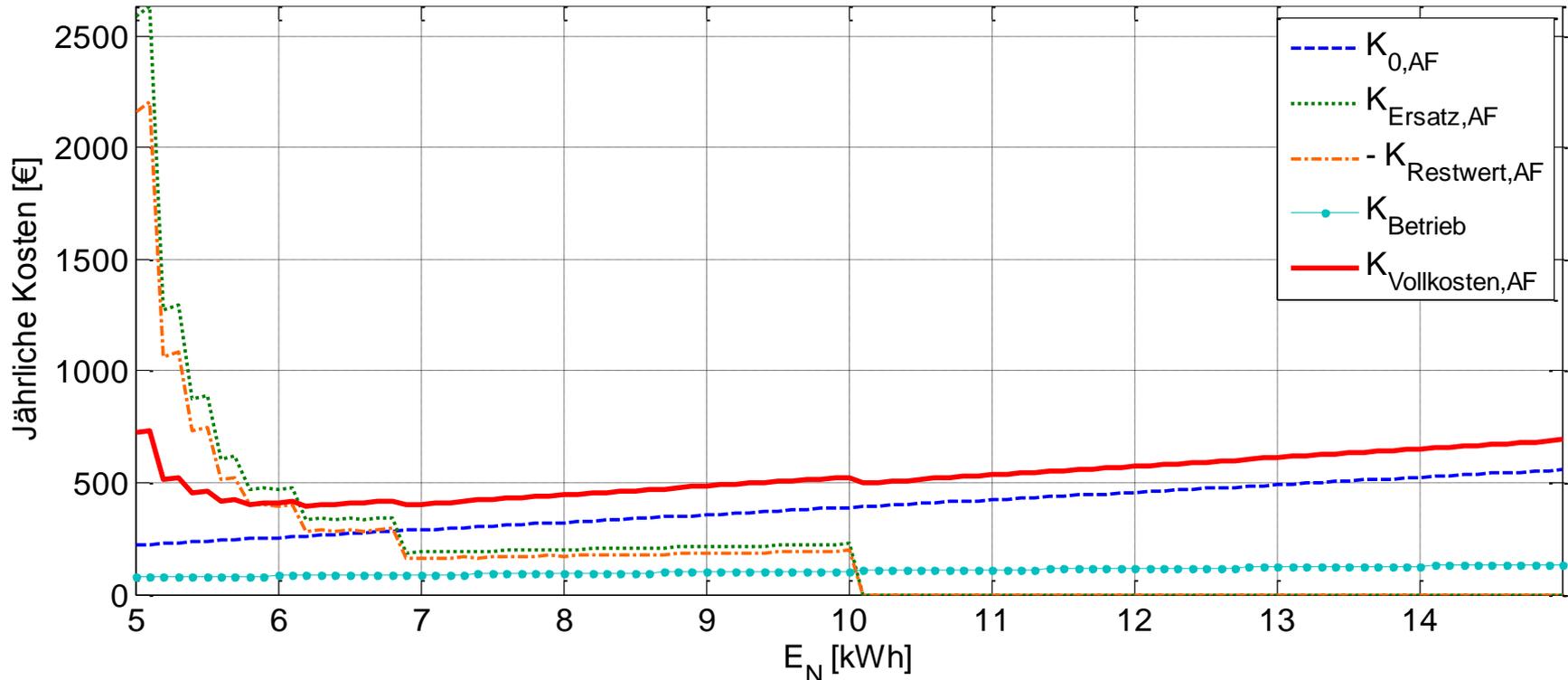
Wöhler-Kurven der Zyklenfestigkeit der Speicher:



(nach [10] für Blei-Säure, [11] für Lithium-Ionen, und [12] für Natrium-Schwefel)

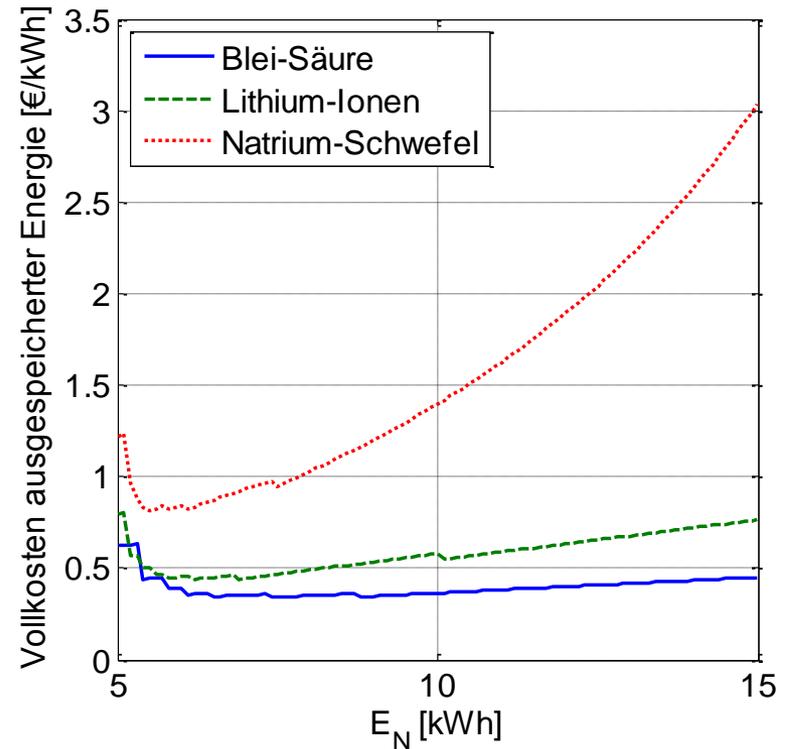
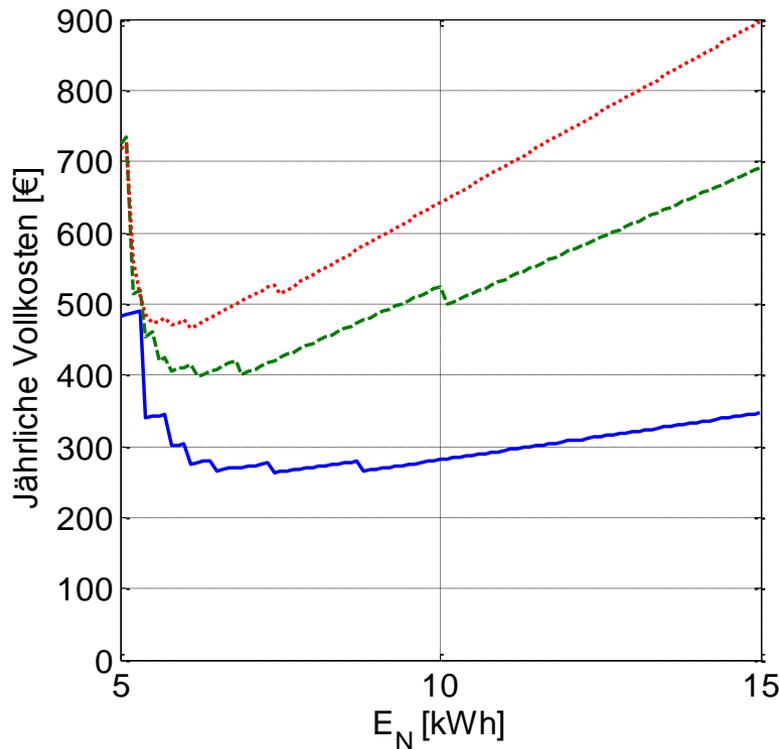
3.3 Analyse der Bestandteile der Vollkosten

Jährliche Kosten eines Lithium-Ionen-Speichers:



→ Kostengünstige Speichergröße mit 6,2 kWh, jährliche Vollkosten von 396,87 €

3.4 Bezug Vollkosten auf ausgespeicherte Energie



Vergleich

Bleibatterie

Lithium-Ionen-Batterie

Vollkosten: 262,35 € (7,4 kWh)

396,87 € (6,2 kWh)

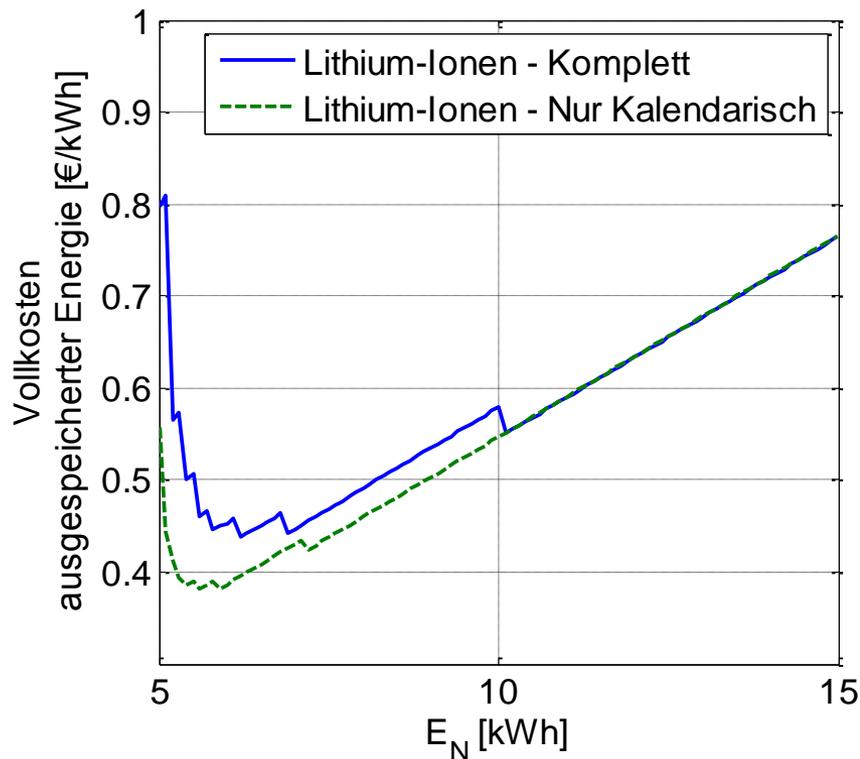
Vollkosten E_{aus} : 0,34 €/kWh

0,44 €/kWh

+ 51,26 %

+ 29,41 %

3.5 Einfluss der belastungsabhängigen Alterung



→ Berücksichtigung der
belastungsabhängigen Alterung relevant

Speicher Größe	Lithium-Ionen		
	Nur kalend.	Komplett	Δ [%]
Alterung			
Günstigste Speichergr. [kWh]	5,6	6,2	10,71
Jährliche Vollkosten [€]	346,44	396,87	14,56
Vollkosten ausgesp. Energie $\left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}}\right]$	0,38	0,44	15,79

Gliederung

1. Motivation
2. Vollkostenrechnung für Energiespeicher
3. Anwendung des Rechenmodells
4. Zusammenfassung

4 Zusammenfassung

- Anwendungsszenarien mit unterschiedlicher Belastung
- Alterung von Dimensionierung und Betriebsweise abhängig

→ Mathematisches Modell für Kostenvergleich von Speichern

→ Wichtige Einflussgrößen auf Vollkosten:

- Ausgespeicherte Energie
- Belastungsabhängige Alterung



Vielen Dank
für
die Aufmerksamkeit!

Quellen

- [1] <http://www.dena.de/themen/energiesysteme.html>, Abrufdatum 05.02.2014
- [2] <http://varta-storage.de/>, Abrufdatum 05.02.2014
- [3] <http://www.rwe.com/web/cms/de/364260/rwe-power-ag/innovationen/stromspeicher/>, Abrufdatum 05.02.2014
- [4] <http://www.rosseta.de/>, Abrufdatum 05.02.2014
- [5] <http://www.lessy.eu/>, Abrufdatum 30.01.2014
- [6] Braun, M.; Büdenbender, K.; Magnor, D.; Jossen, A.: Photovoltaic self-consumption in Germany - Using Lithium-ion storage to increase self-consumed photovoltaic energy. EU PVSEC (September/2009), S. 3121-3127
- [7] E.ON Mitte AG: Standardlastprofile 2012, http://www.eon-mitte.com/de/netz/veroeffentlichungen/strom/_standardlastprofil_verfahren/standardlastprofile_2012, Abrufdatum: 28.01.2014
- [8] Dambrowski, J.; Pichlmaier, S.; Jossen, A.: *Mathematical methods for classification of state-of-charge time series for cycle lifetime prediction*, Advanced Automotive Battery Conference Europe 2012, Mainz, 2012
- [9] Fuchs, G.; Lunz, B.; Leuthold, M.; Sauer, DU.: *Technology Overview on Electricity Storage*, Smart Energy for Europe Platform GmbH (SEFEP), Berlin, 2012
- [10] Hoppecke Batterien GmbH & Co. KG.: Datenblatt sun.systemizer home, http://www.hoppecke.de/content/download/1696/12936/file/sun.systemizer-home_de0613.pdf, Abrufdatum: 28.01.2014
- [11] Rosenkranz, A.C.; Köhler, U.; Liska, J.L.: *Modern Battery Systems for Plug-In Hybrid Electric Vehicles*, 23rd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS-23), Anaheim, 2007
- [12] Lu, N.; Weimar, MR.; Makarov, YV.; Ma, J.; Viswanathan, VV.: *The Wide-Area Energy Storage and Management System – Battery Storage Evaluation*, PNNL Report, 2009

Ausblick

Ausbau des Modellierungsgrades:

- Integration von realistischen Annahmen der Entwicklungen des Strompreises, der Ersatzinvestitionen oder des Zinses
- Berechnung mit kleineren Zeitschritten
- Nutzung von Leistungs-Zeit-Reihen statt statischem Lastszenario
- Genauere Berücksichtigung der Alterung

Ziel: Werkzeug für Berechnung und Optimierung der
Wirtschaftlichkeit von Speichersystemen

2.2 Beschreibung des mathematischen Modells

Berechnung des Energieumsatzes:

Eingespeicherte
Energie

$$E_{ein} = \sum_{i=1}^m n_{Last}(Zyklentiefe_i) \cdot Zyklentiefe_i \cdot E_{Last,max} \quad \left[\frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}} \right]$$

Verlustenergie

$$E_{Verluste} = E_{ein} \cdot (1 - \text{Nutzungsgrad}) + E_{Verbleibend} \cdot \text{Selbstentladerate} \quad \left[\frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}} \right]$$

Ausgespeicherte
Energie

$$E_{aus} = E_{ein} - E_{Verluste} \quad \left[\frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}} \right]$$

2.2 Beschreibung des mathematischen Modells

Berechnung der belastungsabhängigen Alterung:

Alterung durch
Belastung

$$A_{Belastung} = \sum_{i=1}^m \frac{n_{Belastung}(DOC_i)}{n_{EOL}(DOC_i)} \quad \left[\frac{\%}{\text{Jahr}} \right]$$

Alterung
kalendarisch

$$A_{Kalendarisch} = \frac{1}{t_{EOL,Kalendarisch}} \quad \left[\frac{\%}{\text{Jahr}} \right]$$

Gesamte Alterung

$$A_{Gesamt} = A_{Kalendarisch} + A_{Belastung} \quad \left[\frac{\%}{\text{Jahr}} \right]$$

Gesundheitszustand

$$SOH = 1 - (A_{Gesamt} \cdot (1 - SOH_{EOL})) \quad [\%]$$

2.2 Beschreibung des mathematischen Modells

Berechnung der Kosten für Zielgröße:

Anfangsinvestitionskosten $K_0 = K_{System} + K_{Speicher} = k_p \cdot P_N + k_e \cdot E_N$ [€]

Betriebskosten $K_{Betrieb} = \text{Spez. Betriebskosten} \cdot K_0 + K_{Verluste}$ [€/Jahr]

Verlustkosten $K_{Verluste} = E_{Verluste} \cdot \text{Strompreis}$ [€/Jahr]

Ersatzinvestitionskosten $K_{Ersatz} = \sum_{l=1}^m K_{Speicher} \cdot (1 + \text{Zinssatz})^{-t_{l,Ersatz}}$ [€]

Restwerte $L_{Restwert} = \sum_{l=1}^m K_{Speicher} \cdot \frac{SOH_{t_{l,Ersatz}} - SOH_{EOL}}{1 - SOH_{EOL}}$ [€]

Gesamter Restwert $K_{Restwert} = \sum_{l=1}^m L_{Restwert,l} \cdot (1 + \text{Zinssatz})^{-t_{l,Ersatz}}$ [€]

3.4 Einflusses der belastungsabhängigen Alterung

Speicher Größe	Blei-Säure			Lithium-Ionen			Natrium-Schwefel		
	Nur kalend.	Komplett	Δ [%]	Nur kalend.	Komplett	Δ [%]	Nur kalend.	Komplett	Δ [%]
Alterung									
Günstigste Speichergr. [kWh]	6,0	7,4	23,33	5,6	6,2	10,71	5,4	5,5	1,85
Jährliche Vollkosten [€]	225,53	262,35	16,33	346,44	396,87	14,56	434,32	472,01	8,68
Vollkosten ausesp. Energie [$\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$]	0,29	0,34	17,24	0,38	0,44	15,79	0,75	0,82	9,33