

# BETRIEBSABHÄNGIGE KOSTENBERECHNUNG VON ENERGIESPEICHERN

**Maik Naumann\*, Cong Nam Truong\*, Ralph Ch. Karl, Andreas Jossen**

Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik, Arcisstr. 21 , 80333 München  
+49 (0) 89 / 289 – 26967, maik.naumann@tum.de, www.ees.ei.tum.de

**Kurzfassung:** Für die zukünftig erhöhte und vermehrte Nutzung von Energiespeichern in Stromnetzen existieren kaum Alternativen. Ein ökonomischer Vergleich von Energiespeichern lässt sich aufgrund großer technischer Unterschiede vor allem in Bezug auf das Verschleißverhalten nur dann sinnvoll durchführen, wenn man diese in ausreichendem Detaillierungsgrad berücksichtigt. In diesem Beitrag soll dazu ein Modell vorgestellt werden, welches die Kosten über dem gesamten Betriebszeitraum als sogenannte Vollkosten für verschiedene Speicher abbilden kann. Anhand der relevanten Speicherkosten, der spezifischen Speicherparameter sowie dem Einfluss des betriebsabhängigen Verschleißes und damit der Betriebszeit werden die Vollkosten, bezogen auf die umgesetzte Energiemenge, ermittelt. Mit detaillierten Eingangsparametern ist somit ein aussagekräftiger Kostenvergleich verschiedener Speichertechnologien möglich.

**Keywords:** Energiespeicher, Kostenmodell, Vollkostenrechnung, betriebsabhängige Alterung

## 1 Einleitung

Im Zuge des fortschreitenden Ausbaus der Erneuerbaren Energien wird mittelfristig der höhere Einsatz von Speichern im Stromnetz als wichtige Flexibilitätsoption erwartet [1]. Neben Langzeitspeichern gibt es zunehmend den Bedarf für Kurzzeitspeicher. Verschiedene Technologien wie zum Beispiel Pumpspeicherkraftwerke, Batterien, Druckluft- und Schwungmassenspeicher konkurrieren im prognostizierten Ausbau miteinander. Um einen sinnvollen Vergleich zwischen den unterschiedlichen Technologien zu ermöglichen, sind die verschiedenen technischen Kriterien sowie die summierten Vollkosten über den gesamten Lebenszyklus der Systeme zu berücksichtigen.

Für den Vergleich der Speichertechnologien werden heutzutage meist die Investitionskosten des Speichers auf den Energieinhalt bzw. auf die installierte Leistung bezogen. Die Kostenangaben in €/kWh für die nutzbare Energie und €/kW für die maximale Leistung des Speichers berücksichtigen dabei nicht wie der Speicher eingesetzt und betrieben wird. In [2] ist eine sog. Vollkostenbewertung dargestellt, wobei der Betrieb mit unterschiedlichen Zyklenzahlen zum Vergleich kommt, jedoch die genaue Form der Belastung des Speichers keinen Einfluss hat. Die vom jeweiligen Anwendungsszenario abhängige Belastung des Speichers hat jedoch einen erheblichen Einfluss auf den Verschleiß und damit auf die Lebensdauer zu Folge, was in der Kostenrechnung Beachtung finden muss. Diese Alterungsbetrachtung ist vor allem für elektrochemische Speicher entscheidend, kann jedoch auch auf bei anderen Speichertypen nicht vernachlässigt werden.

In diesem Beitrag wird zunächst ein mathematisches Modell vorgestellt, mit dem technologieunabhängig die tatsächlichen Kosten eines Speichers je nach Anwendungsszenario bzw. der spezifischen Belastung darstellbar sind. Ein wichtiger Bestandteil ist die Berücksichtigung der belastungsabhängigen Alterung des Speichers, womit die Lebensdauer und somit der Betriebszeitraum bestimmt wird. Des Weiteren gehen relevante Einflüsse wie zum Beispiel die Nutzungsgradverluste oder die Selbstentladung in die Kostenrechnung ein. Neben der methodischen Beschreibung des Modells, werden in diesem Beitrag von ausgewählten Speichern die Zusammensetzung der Vollkosten in einem exemplarischen Anwendungsszenario untersucht und verglichen. Zuletzt wird aufgezeigt, welchen Einfluss die Berücksichtigung der belastungsabhängigen Alterung sowie weitere Bestandteilen des Modells auf die Kosten haben.

## 2 Vollkostenrechnung für Energiespeicher

Für die Auswahl und Auslegung von Energiespeichern müssen neben den technischen Eigenschaften ebenso die wirtschaftlichen Aspekte berücksichtigt werden. Je nach Anwendungsfall, Auslegung und Betriebsweise haben die unterschiedlichen Merkmale verschiedene Auswirkungen auf die Speichereigenschaften und deren Verschlechterung über der Nutzungsdauer. Damit ergeben sich für jede Speicherart unterschiedliche Kosten in Abhängigkeit des jeweiligen Anwendungsszenarios. Zusätzlich sind bei gleicher eingespeicherter Energie die Energieverluste für jeden Energiespeicher unterschiedlich groß. Somit ist ein Vergleich nur sinnvoll, wenn man die Energiemenge betrachtet, die entnommen bzw. ausgespeichert werden kann. Im Folgenden wird dazu in diesem Kapitel ein Berechnungsansatz vorgestellt, welcher den detaillierten Vergleich der Vollkosten von Energiespeichern je nach Anwendungsszenario ermöglicht. Dieser stützt sich dabei auf die Methode der Vollkostenrechnung nach [3].

### 2.1 Beschreibung des mathematischen Modells

Die Zielgröße der Rechenmethode ist der Preis der nutzbaren (=ausgespeicherte) Energie pro Jahr. Sie wird als Vollkosten der ausgespeicherten Energie bezeichnet und bezieht sich auf die gesamte Energie die dem Speicher während eines Jahres entnommen wird. Die Ermittlung dieser Zielgröße ist in folgender Abbildung 1 dargestellt, wobei die innerhalb der einzelnen Blöcke verwendeten Definitionen der Größen und Formeln in den anschließenden Abschnitten aufgezeigt werden.

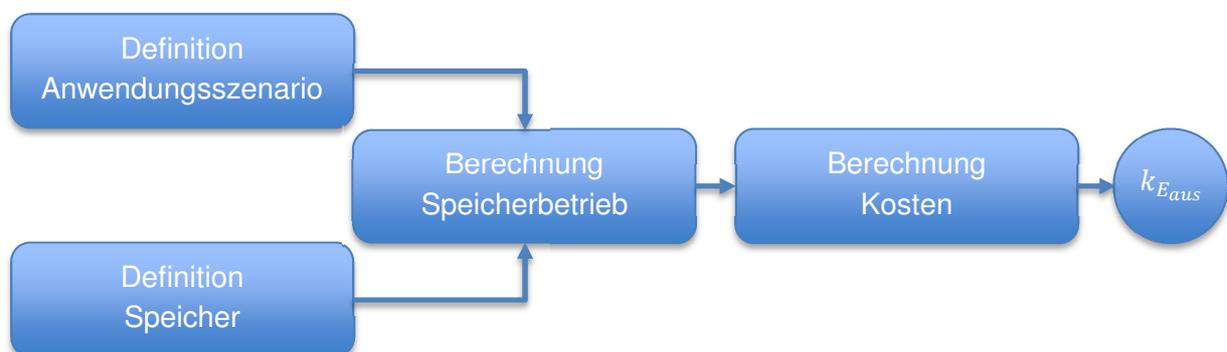


Abbildung 1: Aufbau des Modells



### 2.1.2 Definition Speicher

Ein Speichersystem ist hierbei mit dem Nennenergieinhalt  $E_N$  [kWh] und der Nennleistung  $P_N$  [kW] in seinen Dimensionen beschrieben. Der Gesamtnutzungsgrad  $\eta$  und die Selbstentladungsrate  $\delta$  [%/Jahr] werden dabei als konstant über die Auslastung des Systems und des Lastzeitraums vereinfacht. Die kalendarische Alterung  $t_{EOL, Kalendarisch}$  [Jahre] gibt an, nach wie vielen Jahren der Speicher das Lebensdauerende erreicht hat. Dabei ist für Batteriespeicher meistens das Lebensdauerende mit dem Zeitpunkt definiert, an dem der Quotient des verbleibenden Energieinhalts  $E_{Verbleibend}$  zu dem ursprünglichen Nennenergieinhalt  $E_N$  des Speichers nur noch 80% beträgt. Dieser Quotient wird als Gesundheitszustand oder *SOH* (engl. State of health) bezeichnet (siehe Formel (5)). Als  $SOH_{EOL}$  (EOL, engl. End of life) wird der *SOH* bezeichnet, bei dem der Speicher nach Definition das Lebensdauerende erreicht hat. In diesem Modell wird ein  $SOH_{EOL} = 80\%$  verwendet.

$$\text{Definierter Gesundheitszustand} \quad SOH = \frac{E_{Verbleibend}}{E_N} \quad [\%] \quad (5)$$

Als wichtigste betriebsabhängige Größe des Speichers wird die Zyklenlebensdauer  $n_{EOL}(DOC)$  definiert, welche die Anzahl der Zyklen beschreibt, die bis zum Lebensdauerende nutzbar sind. Bei unterschiedlichen Zyklientiefen variiert diese Speicherlebensdauer. Der *SOH* verringert sich dabei über mit Nutzung des Speichers über der Zeit.

Zur Bestimmung der Investitionskosten dienen die spezifischen Investitionskosten für Leistung  $k_P$  [€/kW] und Energieinhalt  $k_E$  [€/kWh]. Als weitere Komponente fließen die spezifischen Betriebskosten  $\beta$  [%/Jahr] ein, die pauschal weitere Kosten wie zum Beispiel die Wartung des Speichersystems darstellen. Diese werden als Kostenfaktor auf die Investitionskosten des Gesamtsystems bezogen.

### 2.1.3 Berechnung Speicherbetrieb

Mit der Definition des Anwendungsszenarios und des Speichers, können mit den folgenden Größen die für die Kostenberechnung benötigten Eingangswerte bestimmt werden:

$$\text{Eingespeicherte Energie} \quad E_{ein} = \sum_{i=1}^m n_{Last}(DOC_i) \cdot DOC_i \cdot E_{Last,max} \quad \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}} \right] \quad (6)$$

$$\text{Verlustenergie} \quad E_{Verluste} = E_{ein} \cdot (1 - \eta) + \delta \cdot E_{Verbleibend} \quad \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}} \right] \quad (7)$$

$$\text{Ausgespeicherte Energie} \quad E_{aus} = E_{ein} - E_{Verluste} \quad \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}} \right] \quad (8)$$

$$\text{Alterung durch Belastung} \quad A_{Belastung} = \sum_{i=1}^m \frac{n_{Belastung}(DOC_i)}{n_{EOL}(DOC_i)} \quad \left[ \frac{\%}{\text{Jahr}} \right] \quad (9)$$

$$\text{Alterung kalendarisch pro Jahr} \quad A_{Kalendarisch} = \frac{1}{t_{EOL, Kalendarisch}} \quad \left[ \frac{\%}{\text{Jahr}} \right] \quad (10)$$

$$\text{Gesamte Alterung} \quad A_{Gesamt} = A_{Kalendarisch} + A_{Belastung} \quad \left[ \frac{\%}{\text{Jahr}} \right] \quad (11)$$

Berechneter Gesundheitszustand  $SOH = 1 - (A_{Gesamt} \cdot (1 - SOH_{EOL}))$  [%] (12)

Als eine von zwei wichtigen Größen wird die ausgespeicherte Energie  $E_{aus}$  für die Berechnung der Zielgröße  $k_{E_{aus}}$  benötigt. Diese bestimmt sich als eingespeicherte Energie des Lastszenarios  $E_{ein}$  abzüglich der Verlustenergie  $E_{verluste}$ .  $E_{ein}$  berechnet sich als Summe über die Produkte der Anzahl der einzelnen Zyklentiefen  $n_{Last}(DOC_i)$  mit der maximal einzuspeichernden Energie  $E_{Last,max}$  bezogen auf die jeweilige Zyklentiefe  $DOC_i$ . Die Verluste bestehen aus Nutzungsgradverlusten und der Selbstentladung des Speichers. Die Nutzungsgradverluste hängen von der eingespeicherten Energie ab. Die Selbstentladung ergibt sich mit der Selbstentladungsrate  $\delta$  die auf den verbleibenden Nennenergieinhalt  $E_{verbleibend}$  des Speichers bezogen wird.

Die zweite Eingangsgröße für die Kostenrechnung ist die betriebsabhängige Lebensdauer des Speichers. Diese fließt in die Berechnung der Ersatzinvestitionen und der Restwerte ein. Die Lebensdauer des Speichers wird in diesem Modell als simple Superposition der reinen zeitlichen Alterung, der sog. kalendarischen Alterung  $A_{Kalendarisch}$ , und der Alterung  $A_{Belastung}$ , welche durch den Betrieb des Speichers erfolgt, angewandt. Die beiden Alterungsformen werden dabei als linear unabhängig angenommen. Zur Berechnung der Lebensdauer des Energiespeichers kommt ein ereignisorientiertes Alterungsmodell zum Einsatz. Die Lebensdauer ist hierbei über der Anzahl der Ereignisse definiert, die geschehen dürfen bis der Speicher nicht mehr nutzbar ist. Die Auswirkungen der Ereignisse werden dabei als unabhängig von der Reihenfolge und des Zeitpunkts des Auftretens angenommen. In diesem Modell sind als alterungsrelevante Ereignisse der Energieumsatz des Lastszenarios sowie die kalendarische Lebensdauer definiert. Beide zusammen ergeben die gesamte Alterung  $A_{Gesamt}$ .

Da die Zyklen- und kalendarische Lebensdauer für Batteriespeicher in Datenblättern oft als die Lebensdauer bis zum einem  $SOH = 80\%$  definiert ist, muss die Alterung  $A_{Gesamt}$  zur Berechnung des Gesundheitszustands mit Formel (12) auf den  $SOH_{EOL} = 80\%$  bezogen werden. Da für stationäre Batteriespeicher die Begrenzung der Lebensdauer bis zu einem  $SOH = 80\%$  nicht ganz schlüssig erscheint, wird ein Speicher erst ersetzt, wenn durch die Alterung der  $SOH$  soweit gesunken ist, dass der Energieinhalt nicht mehr ausreicht um die maximal einzuspeichernden Energie  $E_{Last,max}$  aufzunehmen.

Die kalendarische Alterung ist dabei die Inverse der kalendarischen Lebensdauer. Angenommen der Speicher hat eine kalendarische Lebensdauer von 10 Jahren, würde der Speicher jedes Jahr um 10% altern und mit Formel (12) nach 10 Jahren einen  $SOH = 80\%$  erreichen.

Die Ermittlung der Alterung durch Belastung ist in Formel (9) dargestellt. Die Anzahl der Zyklen des Lastszenarios wird dabei auf die Anzahl der möglichen Zyklen bis zum Lebensdauerende des Speichers bezogen. Falls zum Beispiel in einem Jahr 200 Vollzyklen auftreten und der Speicher eine Zyklenlebensdauer von 1000 Vollzyklen besitzt, ergibt sich mit dieser Formel eine Alterung von 20%. Dabei wird jeweils die Anzahl jeder auftretenden

Zyklentiefe des Lastszenarios durch die bei dieser Zyklentiefe möglichen Zyklenanzahl des Speichers, der sog. Zyklenlebensdauer, dividiert.

Die Zyklentiefe des Lastszenarios bezieht sich hier auf die maximale Energie der Last  $E_{Last,max}$ . Damit ist nicht gewährleistet, dass der Energieumsatz eines Zyklus des Lastszenarios dem der Zyklentiefe des Speichers entspricht. Somit muss die Zyklenlebensdauer je nach Zyklentiefe der Last  $DOC_i$  als Funktion der jeweiligen Energie des Zyklus bestimmt werden. Die Funktion der Zyklenlebensdauer des Speichers ist dabei aus den möglichen Zyklen bis zum Lebensdauerende je nach Zyklentiefe beschrieben. Dabei kommt ein Curve-Fitting-Algorithmus zur Anwendung, da im Allgemeinen eine lineare Funktion nicht den Verlauf der Zyklenlebensdauer über der Zyklentiefe wiedergeben kann. Das Ergebnis der Funktion kann dabei in Analogie zu dem Prinzip der Wöhler-Kurve aus der Mechanik gesehen werden. Die resultierenden Wöhler-Kurven ausgewählter Energiespeichern sind in Abbildung 3 dargestellt.

### 2.1.4 Berechnung Kosten

Im letzten Block der Berechnung der Kosten ergibt sich die Zielgröße  $k_{Eaus}$  mit Hilfe der folgenden Teilrechnungen:

$$\text{Anfangsinvestitionskosten} \quad K_0 = K_{System} + K_{Speicher} = k_p \cdot P_N + k_e \cdot E_N \quad [€] \quad (13)$$

$$\text{Betriebskosten} \quad K_{Betrieb} = \beta \cdot K_0 + K_{Verluste} \quad \left[ \frac{€}{\text{Jahr}} \right] \quad (14)$$

$$\text{Verlustkosten} \quad K_{Verluste} = E_{Verluste} \cdot p \quad \left[ \frac{€}{\text{Jahr}} \right] \quad (15)$$

$$\text{Ersatzinvestitionskosten} \quad K_{Ersatz} = \sum_{l=1}^m K_{Speicher} \cdot (1+q)^{-t_{l,Ersatz}} \quad [€] \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{Restwerte} \quad L_{Restwert} &= \\ &= \sum_{l=1}^m K_{Speicher} \cdot \frac{SOH_{t_{l,Ersatz}} - SOH_{EOL}}{1 - SOH_{EOL}} \quad [€] \quad (17) \end{aligned}$$

$$\text{Gesamter Restwert} \quad K_{Restwert} = \sum_{l=1}^m L_{Restwert,l} \cdot (1+q)^{-t_{l,Ersatz}} \quad [€] \quad (18)$$

$$\text{Annuitätenfaktor} \quad AF = \frac{(1+q)^d \cdot q}{(1+q)^d - 1} \quad [-] \quad (19)$$

$$\text{Jährliche Vollkosten} \quad k_{VK,AF} = (K_0 + K_{Ersatz} - K_{Restwert}) \cdot AF + K_{Betrieb} \quad \left[ \frac{€}{\text{Jahr}} \right] \quad (20)$$

Die Anfangsinvestitionskosten  $K_0$  berechnen sich über die Speichersystemdimensionen und den spezifischen Investitionskosten der Leistung und Energie. In den Betriebskosten pro Jahr werden die spezifischen Betriebskosten  $\beta$  bezogen auf die Anfangsinvestitionskosten zu den Kosten der Verlustenergie addiert. Dabei sind die Verlustkosten als einzukaufende Energie in Form des Produkts der Verlustenergie mit dem Strompreis angenommen, da diese Energie dem System zusätzlich zu zuführen ist.

Mit der im Abschnitt "Berechnung Speicherbetrieb" bestimmten Lebensdauer des Speichers können in diesem Block die nötigen summierten Ersatzinvestitionen  $K_{Ersatz}$  berechnet werden, falls der Speicher vor Ende der Nutzungsdauer zu ersetzen ist. Dabei wird jeweils zu dem Zeitpunkt des Lebensdauerendes  $t_{l,EOL}$  eines Speichers  $l$  die nötige Neuinvestition des Speichers  $K_{Speicher}$  mit der Lebensdauer auf den Anfangszeitpunkt der Nutzungsdauer zurückverzinst.

Da die Speicher weder am Ende der Nutzungsdauer noch zum Zeitpunkt einer Ersatzinvestition zwingend das Lebensdauerende mit einem  $SOH_{EOL} = 80\%$  erreicht haben, wird der Restwert eines Speicher bezogen auf die ursprünglichen Investitionskosten  $K_{Speicher}$  anhand des jeweiligen verbleibenden  $SOH$  bezogen auf den  $SOH_{EOL}$  mit Formel (17) berechnet. Anhand Formel (18) wird dann analog zu der Berechnung der Ersatzkosten, der Restwert ausgehend vom Zeitpunkt des Speicherersatzes  $t_{l,Ersatz}$  zurück zum Startzeitpunkt der Nutzungsdauer verzinst.

Die jährlichen Vollkosten  $k_{VK,AF}$  in Formel (20) setzen sich als Summe der jährlichen Darlehenskosten und den Betriebskosten zusammen. Dabei ist das Darlehen die Summe der Investitionskosten  $K_0$  und den Ersatzkosten  $K_{Ersatz}$  abzüglich des gesamten Restwerts  $K_{Restwert}$ . Mit dem Annuitätenfaktor  $AF$  nach Formel (19) teilt sich das Darlehen zusammen mit den Zinskosten zu gleichen Annuitäten, zu verstehen als jährliche Raten und damit Kosten, auf die Nutzungsdauer auf.

## 2.2 Vereinfachende Annahmen für die Anwendung des Modells

Aus ökonomischer Sicht werden für die späteren Beispiele folgende Vereinfachungen getroffen, die jedoch die Funktionalität nicht einschränken. Der Zinssatz sowie der Strompreis für die Kosten der Verlustenergie sind als konstant angenommen. Weiterhin kommt keine Degression der Kosten zum Ersatz des Speichers zur Geltung. Als Einschränkung gilt außerdem die bisherige Rechnung in Jahresschritten, da damit zum Beispiel der Speicherersatz nur zu Beginn eines Jahres erfolgen kann und nicht zum Zeitpunkt des Lebensdauerendes. Dass die Betriebskosten des Speichers nur auf die Investitionskosten bezogen werden, berücksichtigt nicht die eventuell höheren Wartungskosten bei höherer Belastung eines Speichersystems. Die aus Sicht der Kostenrechnung korrekte Vorgehensweise der Restwertberechnung des Speichers bei Ersatz setzt voraus, dass der ausgetauschte Speicher auch diesen Restwert am Markt erzielen kann. Dies ist aus praktischer Sicht nicht gewährleistet.

Von technischen Seite gelten die genannten Annahmen des ereignisorientierten Modells der Speicheralterung. Weiterhin ist der Nutzungsgrad als unabhängig von der Belastung angenommen, was für die Leistungselektronik im Allgemeinen nicht gilt. Ähnliches gilt für die Selbstentladung, die nur auf den Nennenergieinhalt bezogen wird, aber nicht die Belastung des Speichers berücksichtigt.

## 3 Anwendung des Rechenmodells auf verschiedene Technologien

In diesem Abschnitt ist die Funktionalität des Modells anhand eines beispielhaften Lastszenarios für verschiedene Speichertechnologien beschrieben. Dazu werden zunächst

ein exemplarisches Lastszenario und die Kennzahlen für beispielhafte Speicher beschrieben, welche dann zur Auswertung des Modells dienen. Es folgt eine Auswertung der einzelnen Bestandteile der Vollkosten und die Analyse des Bezugs der Vollkosten auf die ausgespeicherte Energie des Speichers. Zuletzt wird dann der Einfluss der Modellierung der belastungsabhängigen Alterung in verschiedenen Varianten aufgezeigt.

### 3.1 Beschreibung des exemplarischen Lastszenarios

Zur Erstellung eines Lastszenarios das in der folgenden Kostenrechnung zur Verwendung kommt, wurde ein Speichersystem in einem Einfamilienhaushalt mit einer Photovoltaikanlage (PV-Anlage) gewählt. Dabei hat der Haushalt einen Jahresverbrauch von 3500 kWh, die PV-Anlage eine Peakleistung von 4 kW. Mit auf die Systemgrößen skalierten Eingangsprofilen einer über ein Jahr vermessenen PV-Anlage in München und einem Standardlastprofil H0 für Bayern (nach [4]) wird ein Lastprofil für einen Speicher mit einer Kapazität von 5 kWh generiert. Das Lastprofil als zeitlicher Verlauf des Ladezustands des Speichers wird mit einem Zyklenzählalgorithmus (nach [5]) ausgewertet um die Häufigkeit der einzelnen Zyklentiefen zu erhalten. Dieses Histogramm gezeigt in Abbildung 2 mit einer Schrittweite von 1% der Zyklentiefe dient als beispielhaftes Lastszenario für die weitere Kostenrechnung. Für die Zyklentiefe kleiner 1% wurden 1193 Zyklen gezählt. Dabei gilt das Lastszenario jeweils für ein Jahr und wird zyklisch über die festgelegte Nutzungsdauer von 20 Jahren des Speichersystems wiederholt.

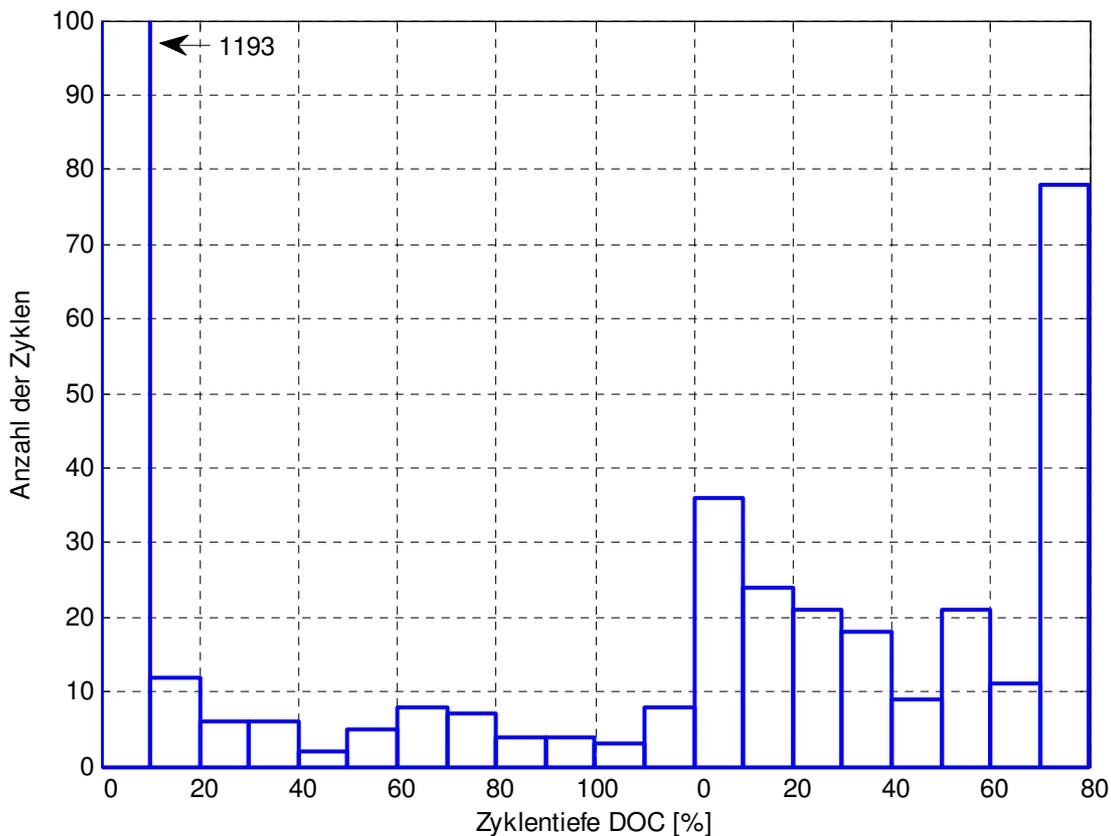


Abbildung 2: Histogramm der Zyklentiefen DOC des Lastprofils

### 3.2 Vorstellung der Speicherkennzahlen je Technologie

Zur Darstellung der Funktionalität werden die drei Batterietechnologien Blei-Säure, Lithium-Ionen und Natrium-Schwefel verglichen. Diese drei Technologien sind in folgender

Tabelle 1 anhand der für das Modell relevanten Größen dargestellt. Dabei steht nicht die genaue Höhe der einzelnen Werte im Fokus, sondern in welcher Form sich die Unterschiede zwischen den Speichern in den einzelnen Größen auf die Kostenrechnung auswirken.

Tabelle 1: Kennzahlen für Speichertechnologien (nach [6])

Größe \ Speicher	Blei-Säure	Lithium-Ionen	Natrium-Schwefel
<b>Gesamtnutzungsgrad <math>\eta</math> [%]</b>	72,50	85,00	71,50
<b>Selbstentladungsrate <math>\delta</math> [%/ Jahr]</b>	91,25	60,00	3650,00
<b>Kalendarische Lebensdauer <math>t_{EOL, Kalendarisch}</math> [Jahre]</b>	7,5	12,5	17,5
<b>Spezifische Investitionskosten Leistung <math>k_p</math> [€]</b>	175	175	175
<b>Spezifische Investitionskosten Energieinhalt <math>k_E</math> [€]</b>	175	550	600
<b>Spezifische Betriebskosten <math>\beta</math> [%/Jahr]</b>	1	1	1

Die Zyklenlebensdauer oder Zyklenfestigkeit, die bei Batteriespeichern in der Regel von der Zyklentiefe der Belastung abhängig ist, wird für die Speicher in der folgenden Abbildung 3 als sogenannte Wöhler-Kurven dargestellt. Dabei gibt ein Punkt in der Wöhler-Kurve eines Speichers die Anzahl der möglichen Zyklen der jeweiligen Zyklentiefe wieder, die auftreten dürfen bis das definierte Lebensdauerende mit einem  $SOH_{EOL} = 80\%$  erreicht wird. Der Speicher ist darüber hinaus mit dem sich ergebenden  $SOH$  aber weiterhin nutzbar. In dem hier vorgestellten Modell wird die Alterung durch Belastung (siehe Formel (9)) unterhalb des  $SOH_{EOL} = 80\%$  als weiterhin konstant angenommen. Dabei wird vernachlässigt, dass Batteriespeicher im Allgemeinen nicht im gesamten  $SOH$ -Bereich gleich schnell bei gleicher Belastung altern.

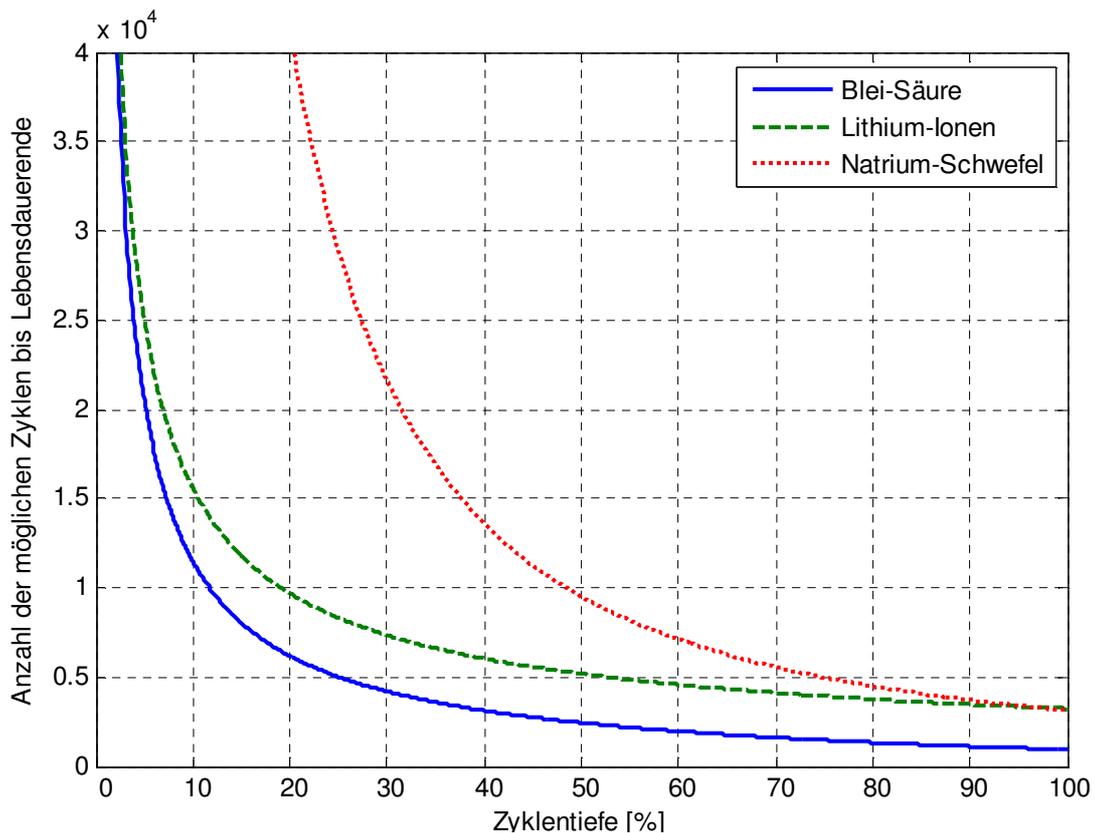


Abbildung 3: Wöhler-Kurven der Speichertechnologien (nach [7] für Lithium-Ionen, [8] für Blei-Säure und [9] für Natrium-Schwefel)

### 3.3 Analyse der einzelnen Bestandteile der Vollkosten

Anhand von Abbildung 4 ist die Entwicklung der einzelnen Bestandteile der Vollkosten über der Variation der Größe eines Lithium-Ionen-Speichers aufgezeigt. Dabei wird das oben beschriebene Lastszenario mit den in der Tabelle 1 gezeigten Kennzahlen des Speichers auf das Rechenmodell angewendet. Die einzelnen Kosten bis auf die Betriebskosten sind dabei mit dem Annuitätenfaktor zum Vergleich auf ein Jahr bezogen. Die Restwerte stellen im eigentlichen Sinne keine Kosten dar, sondern sind Erlöse und werden hier zur besseren Darstellung negiert aufgetragen.

Die Investitionskosten steigen mit der Speichergöße, wobei die Kosten für die Leistungselektronik konstant in die Rechnung eingehen. Grund dafür ist, dass für alle Speichergößen das gleiche Lastszenario angewandt wird und damit die Leistungselektronik nicht größer zu dimensionieren ist. Die Betriebskosten, als Summe der spezifischen Betriebskosten und den Verlustkosten, zeigen sich nahezu unabhängig von der Speichergöße.

Größeren Einfluss auf die Vollkosten haben die Kosten für den Ersatz der Speicher und der jeweilige Restwert. Je größer die Dimensionierung des Speichers desto langsamer altert der Speicher, was mit einem langsameren Kapazitätsrückgang gleichzusetzen ist. Da für jede Speichergöße und jedes Jahr der Nutzungsdauer das gleiche Lastszenario durch den Speicher zu tragen ist, müssen kleinere Speicher öfter ersetzt werden als größere. Dies zeigt sich in der Kurve der Ersatzkosten, wobei ab einer Speichergöße von 10 kWh der Speicher über der Nutzungsdauer nicht mehr zu ersetzen. Zwar erreicht dieses System mit einer

kalendrischen Lebensdauer von 12,5 Jahren das Lebensdauerende bezogen auf den  $SOH_{EOL} = 80\%$  eigentlich nach dieser Zeit. Da jedoch die verbleibende Restkapazität zu diesem Zeitpunkt noch ausreicht das Lastszenario zu bedienen, muss der Speicher nicht ersetzt werden. Nicht berücksichtigt ist dabei, ob sich das Alterungsverhalten des Speichers mit  $SOH < 80\%$  ändert. Im Normalfall beschleunigt sich die Alterung mit abnehmenden  $SOH$ .

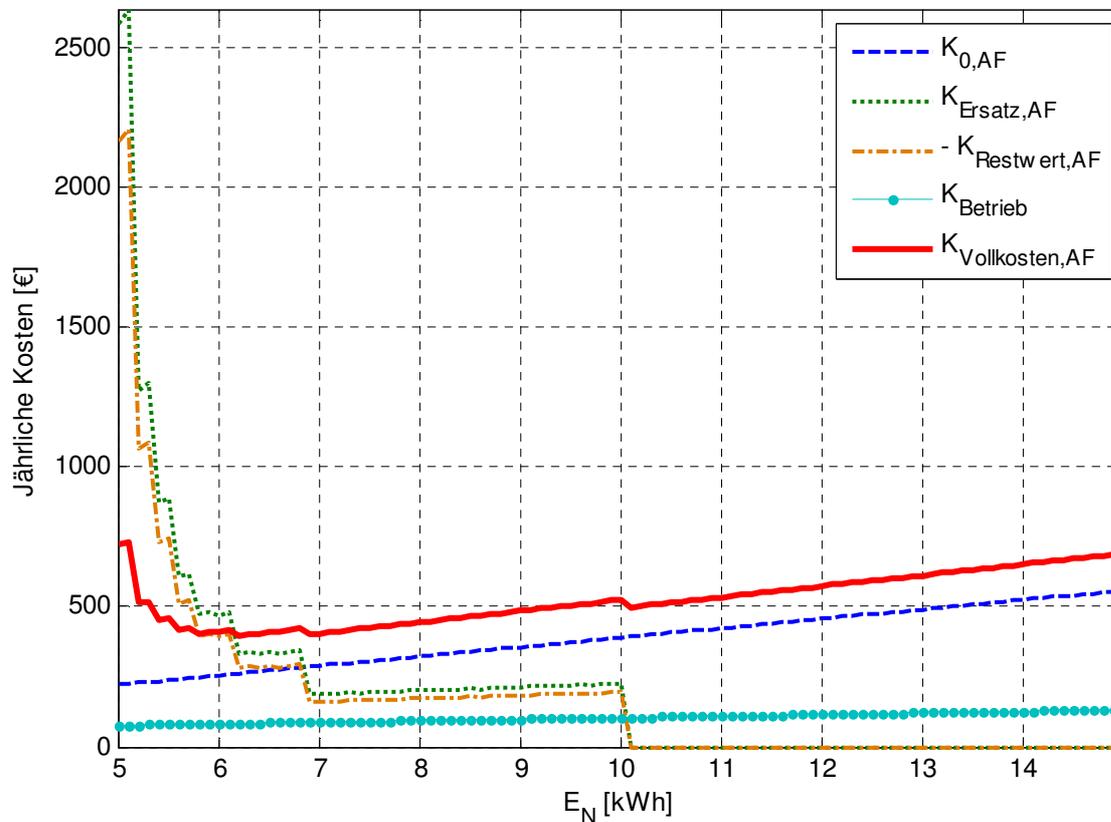


Abbildung 4: Entwicklung der Bestandteile der Vollkosten je nach Speichergröße für ein Lithium-Ionen System

Als wichtiger Korrekturfaktor für die zu häufigen Ersatzinvestitionen bei zu kleinen Speichern, stellt sich die Berücksichtigung des Restwerts dar. Dies betrifft vor allem Speichergrößen die bereits nach kurzer Lebenszeit auszutauschen sind, da das Lastszenario nicht mehr erfüllt werden kann. Dabei geht der  $SOH$  durch Alterung nur um wenige Prozentpunkte zurück, womit sich ein noch vergleichsweise hoher Restwert ergibt. Bei größeren Systemen die über die gesamte Nutzungsdauer nicht ersetzt werden und durch die Alterung zum Teil unter die Grenze von 80% des Nennenergiegehalts fallen, ergeben sich kleinere bzw. keine Restwerte mehr.

Als kostengünstige Speichergröße ergibt sich für den Lithium-Ionen-Speicher 6,2 kWh mit jährlichen Vollkosten von 396,87 €. Es zeigt sich aber auch, dass die Sensitivität der Speichergröße auf die Vollkosten ab dieser Speichergröße relativ klein ist. Kleinere Speicher zeigen sich auf Grund der häufigen Ersatzinvestitionen teurer. Die kleinste Speicherauslegung mit 5 kWh verursacht dabei jährliche Vollkosten von 724,46 € und ist damit um 83,30 % teurer als der günstigste.

### 3.4 Analyse des Bezugs der Vollkosten auf ausgespeicherte Energie

Bei Betrachtung der jährlichen Vollkosten eines Speichers allein wie in Abbildung 4 ist die Betrachtung der ausgespeicherten Energie irrelevant, da die Kosten der Verluste, als Differenz zwischen eingespeicherter und ausspeicherbarer Energie, bereits in den Betriebskosten berücksichtigt werden. Jedoch zeigt sich beim Vergleich verschiedener Speicher die Relevanz des Bezugs der Vollkosten auf die ausgespeicherte Energiemenge. In Abbildung 5 sind links die jährlichen Vollkosten über der Variation der Größe der Batteriespeicher Blei-Säure, Lithium-Ionen und Natrium-Schwefel aufgetragen. In dem Diagramm rechts sind die gleichen jährlichen Vollkosten jeweils auf die ausgespeicherte Energiemenge der Speicher bezogen.

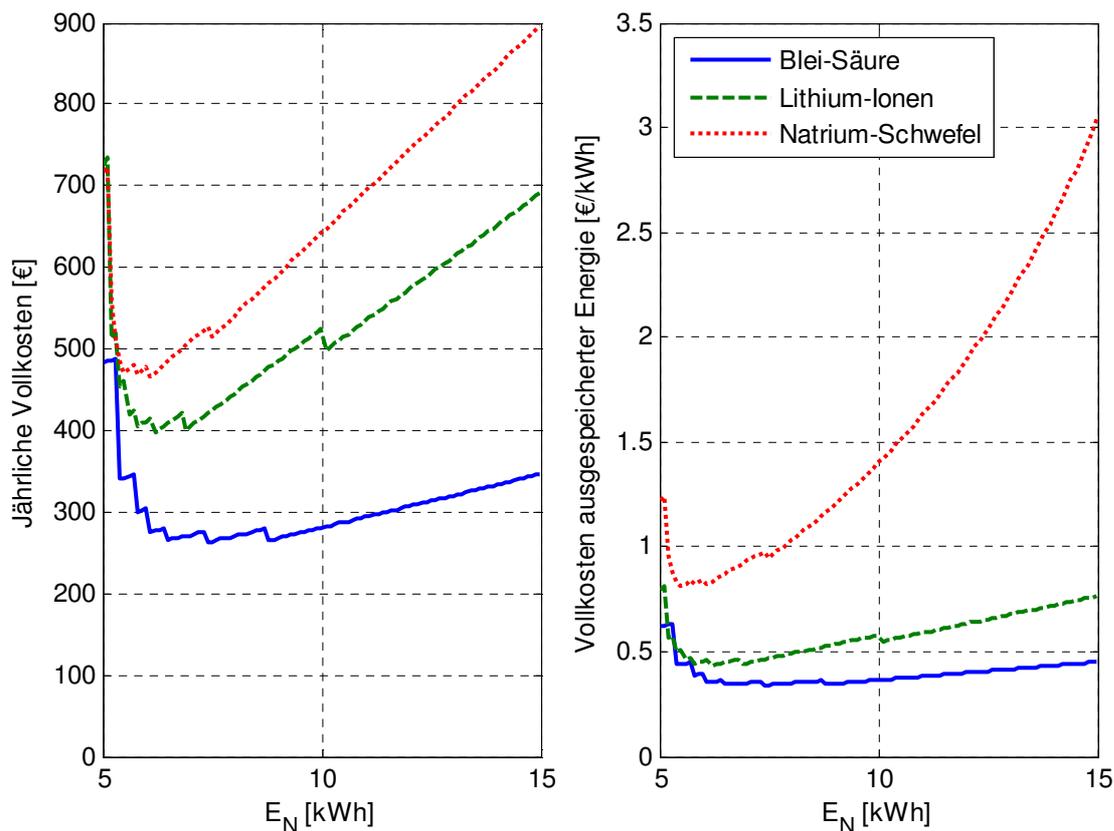


Abbildung 5: Vergleich der jährlichen Vollkosten (links) und die Vollkosten der ausgespeicherten Energie (rechts)

Es zeigt sich, dass bei Vernachlässigung der ausgespeicherten Energiemenge der günstigste Blei-Säure-Speicher bei einer Speichergröße von 7,4 kWh 262,35 € kostet. Der günstigste Lithium-Ionen-Speicher bei einer Speichergröße von 6,2 kWh ist mit Vollkosten in Höhe von 396,87 € um circa 51,26 % deutlich teurer als der Blei-Säure-Speicher. Dieses Ergebnis ändert sich deutlich, wenn man berücksichtigt, dass der Blei-Säure-Speicher jährlich nur 771 kWh im Vergleich zu 907 kWh des Lithium-Ionen-Speicher auf Grund höherer Nutzungsgrad- und Selbstentladungsverluste ausspeichert. Es ergeben sich für die Vollkosten der ausgespeicherten Energie für den Blei-Säure-Speicher 0,34 €/kWh und den Lithium-Ionen-Speicher 0,44 €/kWh. Der Lithium-Ionen-Speicher zeigt sich bei Betrachtung dieser Größe nur noch circa 29,41 % teurer, als das Blei-Säure-System. Der Natrium-Schwefel-Speicher ist allein durch zu hohe Investitionskosten und größeren Verlustkosten in diesem Lastszenario deutlich teurer als die anderen beiden Speichertypen. Das günstigste

Speichersystem mit jährlichen Vollkosten in Höhe von 472,01 € ist dabei 5,5 kWh groß. Es ergeben sich für die jährlichen Vollkosten der ausgespeicherten Energie 0,82 €/kWh.

### 3.5 Analyse des Einflusses der Modellierung der belastungsabhängigen Alterung

In diesem Unterabschnitt soll verdeutlicht werden, welchen Einfluss die Modellierung der belastungsabhängigen Alterung hat. Zunächst ist das detaillierte Ergebnis des Modells mit der Einschränkung zu vergleichen, wonach nur die kalendarische Alterung zur Geltung kommt. Zuletzt wird der Vergleich bei Vernachlässigung der Zyklfestigkeit der Speicher je nach Zykltiefe gezogen.

#### 3.5.1 Berücksichtigung der belastungsabhängigen Alterung

Als wichtiger Bestandteil des Rechenmodells zeichnet sich die Berücksichtigung der belastungsabhängigen Alterung aus. Wenn man diese vernachlässigt und nur die kalendarische Alterung den nutzbaren Energieinhalt über der Nutzungsdauer verkleinert, stellen sich die Kosten deutlich anders dar. In Tabelle 2 sind jeweils für die drei Speichertechnologien für die jeweils günstigste Speichergröße die jährlichen Vollkosten und die Vollkosten der ausgespeicherter Energie aufgetragen. Dabei geben jeweils die rechten Spalten einer Speichertechnologie die Kosten bei Berücksichtigung der kalendarischen und belastungsabhängigen Alterung wieder. Die linken Spalten zeigen die Kosten bei Vernachlässigung der belastungsabhängigen Alterung. Zum Vergleich ist jeweils für eine Speichertechnologie die prozentuale Veränderung der Größen von linker zu rechter Spalte in angegeben. Man sieht nicht nur, dass alle Speicher jeweils in den Vollkosten bei nur kalendarischer Alterung deutlich günstiger erscheinen. Relevant ist ebenso die Feststellung, dass die Speicher bei Vernachlässigung der belastungsunabhängigen Alterung kleiner zu dimensionieren sind. In der Realität würde somit nicht die kostenoptimale Speichergröße ausgewählt werden.

Tabelle 2: Vergleich der Kosten bei Berücksichtigung der Alterung nur kalendarisch oder komplett

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

### 3.5.2 Berücksichtigung der Zyklentiefe des Lastszenarios

Ein weiterer Vorteil des Rechenmodells ist die Alterungsberechnung anhand der gezeigten Wöhler-Kurven in Abbildung 3, die für den Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Speicher unterschiedliche Auswirkungen je nach Zyklentiefe der einzelnen Belastungen im Lastszenario aufzeigen. Wenn man die jeweiligen Zyklentiefen des Lastszenarios vernachlässigt und alle Zyklen mit der jeweiligen Zyklentiefe über den jeweiligen Energieumsatz aufsummiert, lassen sich daraus die äquivalenten Vollzyklen mit dem Bezug des gesamten Energieumsatzes des Lastszenarios auf die maximal einzuspeichernde Energie  $E_{Last,max}$  berechnen. Für die Belastung der Speicher mit Vollzyklen ergeben sich aus den Wöhler-Kurven folgende Zyklenlebensdauern: Blei-Säure 447, Lithium-Ionen 3231 und Natrium-Schwefel 3142.

Die Einschränkung kommt im Modell so zur Anwendung, dass die Zyklenlebensdauer jeweils auf das Verhältnis der Speichergröße zu der maximalen einzuspeichernden Energie von 5 kWh bezogen werden. Somit altert ein größerer Speicher mit der gleichen Belastung langsamer, als ein kleinerer Speicher. Anhand dieser Einschränkung sind die Vollkosten erneut für den jeweils günstigsten Speicher in folgender Tabelle 3 zum Vergleich dargestellt.

Tabelle 3: Vergleich der Kosten bei Vernachlässigung der Zyklentiefe des Lastszenarios

Speicher Größe	Blei-Säure			Lithium-Ionen			Natrium-Schwefel		
	Nur Voll- zyklen	Komplett	$\Delta$ [%]	Nur Voll- zyklen	Komplett	$\Delta$ [%]	Nur Voll- zyklen	Komplett	$\Delta$ [%]
<b>Alterung</b>									
<b>Günstigste Speichergr. [kWh]</b>	8,3	7,4	-10,84	6,4	6,2	-3,13	5,5	5,5	0,00
<b>Jährliche Vollkosten [€]</b>	256,16	262,35	2,42	374,60	396,87	5,95	475,63	472,01	-0,76
<b>Vollkosten ausgesp. Energie [<math>\frac{€}{kWh}</math>]</b>	0,33	0,34	3,03	0,41	0,44	7,32	0,82	0,82	0,00

Die Werte für den Natrium-Schwefel-Speicher zeigen kaum Änderungen, da der Einfluss der kalendarischen Alterung bei diesem Speicher dominiert. Bei dem Lithium-Ionen-Speicher hat die Einschränkung kaum Auswirkung auf die günstige Speichergröße. Die Begründung liegt in der hohen Zyklenlebensdauer auch bei Vollzyklen des Lithium-Ionen-Systems. Die jährlichen Vollkosten und die Vollkosten ausgespeicherter Energie zeigen sich jedoch bei der Berücksichtigung der Wöhler-Kurven mit 5,95 % und 7,32 % teurer, als wenn nur die

äquivalenten Vollzyklen betrachtet werden. Bei dem Blei-Säure-Speicher hingegen zeigt sich der Unterschied in der Größe des günstigsten Speichers deutlich. Grund dafür ist die geringe Zyklenfestigkeit im Vergleich zu dem Lithium-Ionen-Speicher. Es wird deutlich, dass der Einfluss der Zyklenlebensdauer je nach Zyklientiefe in Form einer Wöhler-Kurve auf die Speichergröße und die Vollkosten nicht vernachlässigt werden kann.

#### **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Es wurde gezeigt, dass das Modell mit der Berücksichtigung der Vollkosten der ausgespeicherten Energie und der belastungsabhängigen Alterung wichtige Einflussgrößen auf die Vollkosten genauer darstellen kann. Da ein Vergleich von Speichern pauschal nicht möglich ist und jedes Anwendungsszenario eine andere Speicherbelastung aufzeigt, wird der Nutzen dieses Modells deutlich: Mit der Berücksichtigung der jeweiligen Eigenschaften und der belastungsabhängigen Alterung können verschiedene Speicher anhand des Modells miteinander verglichen werden und die Zusammensetzung der Kosten zur Darstellung kommen.

Wie im vorangegangenen Text an verschiedenen Stellen gezeigt wurde, lässt sich das Modell in seinem Modellierungsgrad ausbauen. Dazu lassen sich realistische Annahmen der Entwicklungen des Strompreises, der Ersatzinvestitionen oder des Zinses integrieren. Weiterhin sollte das Modell in kleineren Zeitschritten arbeiten um die Auswirkungen der belastungsabhängigen Alterung von Speichern genauer aufzulösen. Dabei bietet es sich auch an, nicht mehr mit einem Lastszenario in Form eines Histogramms zu arbeiten, sondern synthetische Lastprofile in Form von Leistungs-Zeitreihen zu verwenden. Ebenso kann das Modell zum Vergleich weiterer Speichertypen erweitert werden. Eine wichtige Ergänzung wäre ebenso den Einfluss der Temperatur und des mittleren Ladezustands des Speichers auf die kalendarische Alterung zu berücksichtigen.

Mit der Basis der detaillierteren Kostenmodellierung kann darauf aufbauend die Funktionalität zur Berechnung und Optimierung der Wirtschaftlichkeit des Speichersystems hinzugefügt werden. Das erweiterte Modell lässt sich dann zur erlösorientierten Dimensionierung von Speichern je nach Betriebsweise nutzen. Ein weiterer Anwendungsfall wäre es die Betriebsweise des Speichers je nach Anwendungsszenario auszulegen. In einem zukünftig offenen und transparenten Strommarkt könnte dann der wirtschaftlich optimierte Betrieb des Speichers modelliert werden. Beispielhafte Anwendungen wären die netzdienliche und zugleich für den Besitzer wirtschaftliche Integration von Heimenergiespeichern oder Anwendungsfälle wie Vehicle-To-Grid.

## Literaturverzeichnis

- [1] VDE - ETG-Task Force Energiespeicherung: *Energiespeicher für die Energiewende*, Frankfurt a.M., 2012
- [2] Kondziella, H.; Brod, K.; Bruckner, T.; Olbert, S.; Mes, F., *Stromspeicher für die „Energiewende“ – eine aktorsbasierte Analyse der zusätzlichen Speicherkosten*, In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 37 (12), S. 249-260, 2013
- [3] VDI: *VDI-Richtlinie 2067 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Grundlagen und Kostenberechnung*, Verein deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, 2012
- [4] E.ON Mitte AG: *Standardlastprofile 2012*, [http://www.eon-mitte.com/de/netz/veroeffentlichungen/strom /standardlastprofil\\_verfahren/standardlastprofile\\_2012](http://www.eon-mitte.com/de/netz/veroeffentlichungen/strom /standardlastprofil_verfahren/standardlastprofile_2012), Abrufdatum: 28.01.2014
- [5] 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
- [6] Fuchs, G.; Lunz, B.; Leuthold, M.; Sauer, DU.: *Technology Overview on Electricity Storage*, Smart Energy for Europe Platform GmbH (SEFEP), Berlin, 2012
- [7] 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
- [8] Hoppecke Batterien GmbH & Co. KG. Datenblatt sun.systemizer home, [http://www.hoppecke.de/content/download/1696/12936/file/sun.systemizer-home\\_de0613.pdf](http://www.hoppecke.de/content/download/1696/12936/file/sun.systemizer-home_de0613.pdf), Abrufdatum: 28.01.2014
- [9] Lu, N.; Weimar, MR.; Makarov, YV.; Ma, J.; Viswanathan, VV.: *The Wide-Area Energy Storage and Management System – Battery Storage Evaluation*, PNNL Report, 2009