

# Mehrziel-Speicherbetriebsstrategie für industrielle Microgrids

## Multi-Objective Storage Operating Strategy for Industrial Microgrids

M. Sc. Thorsten Vogt, Dr.-Ing. Norbert Fröhleke und Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker  
Universität Paderborn, Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik, 33095 Paderborn, Deutschland

Dr.-Ing. Stefan Kempen  
AEG Power Solutions GmbH, 59581 Warstein-Belecke, Deutschland

### Kurzfassung

Industrieunternehmen sind oftmals durch einen hohen Bedarf an elektrischer und thermischer Energie gekennzeichnet. Aus diesem Grund bedingt der Anschluss an das elektrische Versorgungsnetz in Deutschland vielfach einer registrierenden Leistungsmessung. Anders als bei Kleinverbrauchern, wird dabei auch die in Anspruch genommene Spitzenleistung bei der Kostenabrechnung des Versorgungsunternehmens berücksichtigt. Insbesondere wenn Energiespeicher zum Einsatz kommen, kann auf den Leistungsverlauf bezüglich dieser Besonderheit gezielt Einfluss genommen werden. In dieser Veröffentlichung wird eine Speicherbetriebsstrategie beschrieben, welche die speziellen Anforderungen an ein solches „industrielles Microgrid“ berücksichtigt und eine hohe Gesamtkostenersparnis ermöglicht. Die dazu verwendete Lösungsmethodik basiert auf der Theorie der modellprädiktiven Regelung und bietet ein hohes Maß an Flexibilität und Erweiterungsmöglichkeiten.

### Abstract

Industrial companies are often characterized by high consumption of electrical and thermal energy. In Germany, for such large-scale consumers a special electrical power measurement is mandatory for the connection to the supply grid. Depending on this measurement, the energy expense report of such consumers also includes the costs for the maximum power beside the energy, which is different to the billing of small consumers. In particular, when energy storages are used the power shape can be influenced with respect to these specific feature. This paper presents storage operating strategy, which is designed with respect to these special features of "industrial microgrids" to provide a high reduction of the total supply costs of the company. The used methodology is based on the theory of Model Predictive Control and offers a high degree of flexibility and expandability.

## 1 Einleitung

Die Integration erneuerbarer Energien birgt sowohl technische als auch wirtschaftliche Herausforderungen. In einem industriellen Microgrid wird die Versorgung der verschiedenen Verbraucher eines Unternehmens neben dem Netzanschluss durch lokale Erzeuger und Speicher realisiert. Die Grundidee ist, durch lokale Koordination der verschiedenen Komponenten den Gesamtnutzen des Systems zu maximieren. Dabei ist das vorrangige Ziel, die Versorgungskosten für den Betreiber zu minimieren. Ein solches System ist allerdings auch in der Lage, beispielsweise durch Reaktion auf die Netzfrequenz, einen Beitrag zur Stabilisierung des Netzes zu leisten und die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Somit kann ein Microgrid sowohl zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit als auch zur technischen Unterstützung der Integration erneuerbarer Energien beitragen.

Da die elektrischen Erzeuger in einem solchen System, z.B. PV-Anlagen, Windkraftanlagen oder BHKWs, nicht beliebig steuerbar sind, werden Speicher eingesetzt, um Freiheitsgrade zur Beeinflussung des Leistungsverlaufs

am Netzanschlusspunkt zu schaffen. Elektrische Energiespeicher wie z.B. Blei- und Lithium-Akkumulatoren, Schwungmassenspeicher, aber auch neuere Speichertechnologien wie z.B. Redox-Flow-Akkumulatoren können dabei zum Einsatz kommen. Dem Einsatz von Speichern stehen typischerweise die hohen Anschaffungskosten des Speichersystems entgegen. Daher ist es notwendig, den Speicher bestmöglich auszunutzen, um einen finanziellen Vorteil zu erreichen. Dies kann nur mit entsprechenden Betriebsführungsstrategien erreicht werden.

Industrieunternehmen verfügen aufgrund des hohen elektrischen Energiebedarfs oftmals über eine registrierende Leistungsmessung (ab einem Bezug von 100 MWh pro Jahr). Dabei wird nicht nur die elektrische Energie, sondern auch die maximal entnommene elektrische Leistung abgerechnet (Aufteilung in Arbeits- und Leistungskosten). Geht man weiterhin davon aus, dass die Vergütung der ins Versorgungsnetz eingespeisten elektrischen Energie deutlich geringer ist als die Kosten der aus dem Versorgungsnetz bezogenen elektrischen Energie, so ergeben sich zunächst zwei Möglichkeiten der Kosteneinsparung durch den Energiespeichereinsatz. Zum einen die Spitzenleistungsreduk-

tion (auch Peak Shaving) und zum anderen die Eigenverbrauchssteigerung. Beide Begriffe werden in der Literatur in unterschiedlichem Kontext verwendet (z.B. in [1] im Kontext der PV-Einspeisung). Im Folgenden werden diese Kosteneinsparungsmöglichkeiten anhand der entsprechenden Speicherbetriebsstrategien bezogen auf die Anwendung in industriellen Microgrids beschrieben.

## 2 Speicherbetriebsstrategien

Zur Betrachtung der Speicherbetriebsstrategien ist es sinnvoll, das Microgrid zunächst zu abstrahieren (Abbildung 1). Hierbei werden die einzelnen Komponenten zu Gruppen zusammengefasst (Lasten, Erzeuger und Speicher) und die im Folgenden betrachteten (virtuellen) Leistungsverläufe zugeordnet.

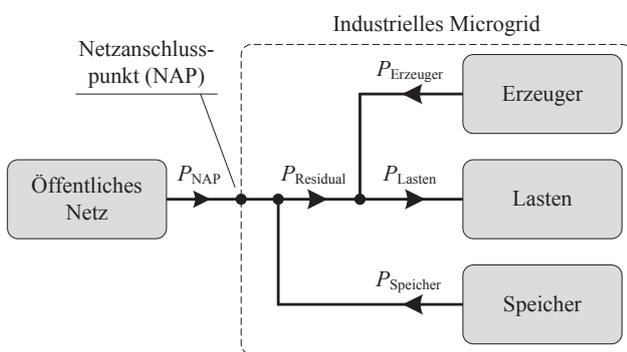


Abbildung 1 Blockdiagramm eines ind. Microgrids

Zur Entwicklung von Speicherbetriebsstrategien ist im Wesentlichen die Residualleistung  $P_{Residual}$  zu betrachten. Da die Kostenabrechnung des Netzbetreibers auf Mittelwerten im 15 Minuten Raster der Leistung am Netzanlasspunkt  $P_{NAP}$  basiert, ist auch diese zeitdiskrete Mittelwertbetrachtung der Residualleistung zweckmäßig.

### 2.1 Separate Zielsetzung

Soll entweder die Spitzenleistungsreduktion *oder* die Eigenverbrauchssteigerung erzielt werden, ergeben sich relativ einfache Regeln für die Speicherbetriebsführung. Für die Spitzenleistungsreduktion muss jedoch zuvor eine Leistungsschwelle  $P_T$  definiert werden, die angibt, bis zu welchem Wert die Leistung am NAP reduziert werden soll. Bei der Ermittlung dieser Schwelle müssen neben dem zu erwartenden Residualleistungsverlauf auch Speicherparameter wie Nennleistung, verfügbarer Energieinhalt, Wirkungsgrad berücksichtigt werden. Dazu wird in [2] ein mögliches Vorgehen gezeigt. Abhängig von der Wahl der Leistungsschwelle können zwei Situationen auftreten, die zu einem ungewollten Überschreiten der Schwelle führen. Zum einen kann die geforderte Leistung zur Einhaltung der Schwelle die Maximalleistung des Speichers überschreiten. Zum anderen kann die Entladegrenze des Speichers während der Entladung erreicht werden. Gerade der zweite Fall kann dazu führen, dass sich die Maximalleistung am NAP nicht verändert und somit der Speicher keinerlei Beitrag zur Kostenreduktion erbringt. Daher ist eine adäqua-

te Wahl der Leistungsschwelle  $P_T$  besonders wichtig. Ist diese Schwelle bestimmt, wird der Speicher oberhalb der Schwelle entladen und unterhalb der Schwelle wieder geladen. In Abbildung 2 wird an einem beispielhaften Residualleistungsverlauf der Verlauf der Leistung am NAP und der Verlauf des Speicherenergieinhaltes für die Speicherbetriebsstrategie zur Spitzenleistungsreduktion gezeigt.

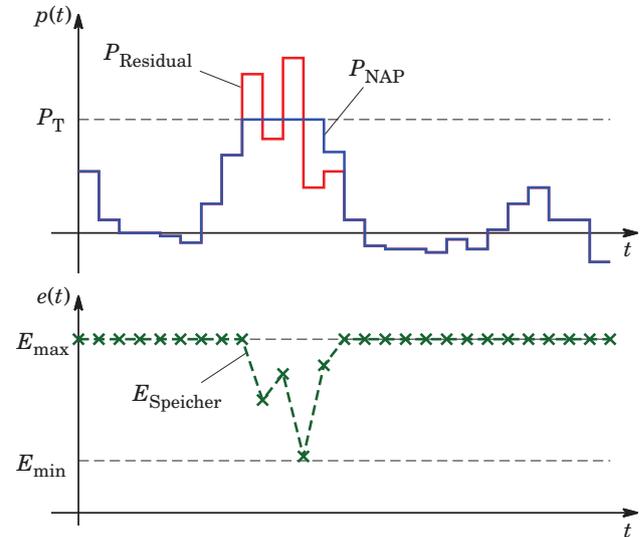


Abbildung 2 Beispiel zur Spitzenleistungsreduktion

Zur Eigenverbrauchssteigerung wird der Speicher wiederum immer dann geladen, wenn die Residualleistung negativ ist und immer dann entladen, wenn die Residualleistung positiv ist. Dabei ist lediglich darauf zu achten, dass der Ladegrad des Speichers die Systembegrenzungen ( $E_{min}$  und  $E_{max}$ ) einhält. Abbildung 3 zeigt für den gleichen Residualleistungsverlauf die entsprechenden Ergebnisse einer Speicherbetriebsstrategie zur Eigenverbrauchssteigerung.

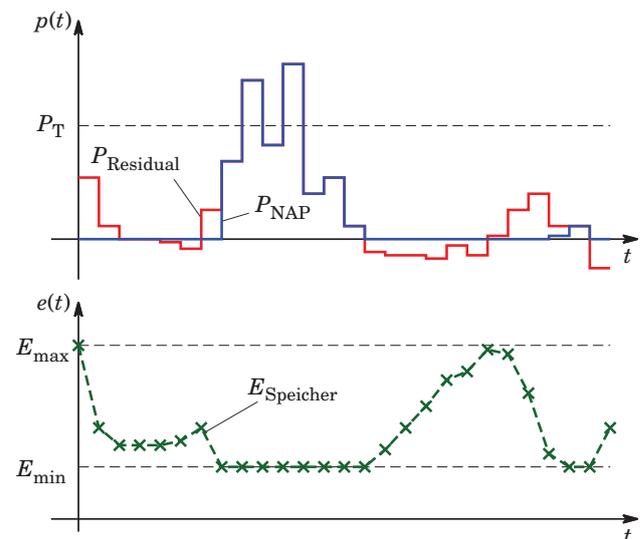


Abbildung 3 Beispiel zur Eigenverbrauchssteigerung

Die Festlegung der Entladegrenze  $E_{min}$  ist ein Bestandteil der Speicherauslegung und abhängig von der Zyklfestigkeit des Speichers. Die Auslegung selbst liegt jedoch nicht im Fokus dieser Veröffentlichung und daher wird im Fol-

genden davon ausgegangen, dass sowohl  $E_{\min}$  also auch  $P_T$  bereits bestimmt sind.

## 2.2 Kombinierte Zielsetzung

Zur Erreichung von Eigenverbrauchssteigerung und Spitzenleistungsreduktion können die Regeln der separaten Zielsetzung nicht einfach kombiniert werden. Dies wird bei der Betrachtung des Speicherladegradverlaufs deutlich. Bei einer rein auf Eigenverbrauchssteigerung ausgelegten Betriebsstrategie wird der Speicher, sobald die Residualleistung positiv wird, bis zur Speicherendladegrenze entladen. Treten im weiteren Verlauf Spitzenleistungen auf, kann der Speicher nicht mehr reagieren. Bei einer rein auf Spitzenleistungsreduktion ausgelegten Betriebsstrategie wird der Speicher vollständig geladen, sobald die Residualleistung den Schwellwert  $P_T$  unterschreitet. Wird die Residualleistung im weiteren Verlauf negativ, kann der Speicher keine weitere Energie aufnehmen. Somit bleibt eine mögliche Eigenverbrauchssteigerung aus.

Für spezielle Residualleistungsverläufe kann der Speicher bei negativer Residualleistung geladen und bei Leistungen oberhalb der Speicherendladegrenze entladen werden. Dies birgt jedoch verschiedene Nachteile, wie z.B. die Verhinderung einer Nachladung zwischen zwei Leistungsspitzen wie sie in Abbildung 2 gezeigt wird. Für Leistungsprofile, bei denen die Spitzenleistungen selten auftreten, entfallen weiterhin viele Entladephasen, welche für eine Eigenverbrauchssteigerung notwendig wären und somit werden die Potentiale des Speichers kaum ausgenutzt.

Aus diesen Gründen wurde eine grundlegend andere Methodik betrachtet, welche auf der Theorie der modellprädiktiven Regelung basiert, wie sie im Allgemeinen z.B. in [3] umfassend erklärt wird. Die Grundbestandteile dieser Methodik werden in Abbildung 4 für den Anwendungsfall im industriellen Microgrid gezeigt.

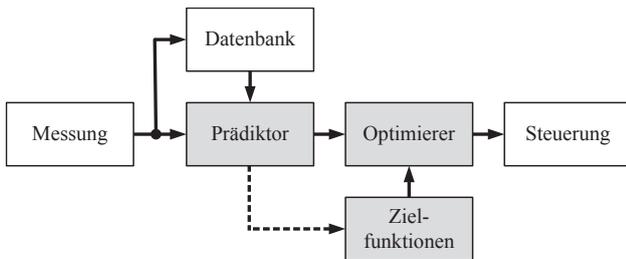


Abbildung 4 Bestandteile der Betriebsführung

Um die Betriebsführung zu konfigurieren, müssen zunächst Zielfunktionen vorgegeben werden. Diese Zielfunktionen beinhalten letztlich alle komponentenspezifischen Informationen, die bei der Betriebsführung betrachtet werden sollen. Hierzu sind Informationen über die Kostenabrechnung aus dem Versorgungsvertrag, der Selbstentladung und des leistungsabhängigen Wirkungsgrads unterschiedlicher Speicher, aber auch Informationen bezüglich eines Lastmanagements denkbar.

Im Folgenden wird eine einfache Konfiguration genutzt, welche einen Speicher und den Netzanschlusspunkt beinhaltet. Weiterhin seien die Ziele die Eigenverbrauchssteigerung, kombiniert mit der Spitzenleistungsreduktion, je-

doch ohne Betrachtung von Wirkungsgraden oder anderen Zusatzinformationen. Unter diesen Voraussetzungen ist es möglich, die Zielfunktion  $f(\mathbf{p}(k))$  zum Zeitpunkt  $k$  wie folgt aufzustellen

$$f(\mathbf{p}(k)) = f_{\text{NAP}}(P_{\text{NAP}}(k)) + f_{\text{Sp}}(P_{\text{Speicher}}(k)) \quad (1)$$

mit

$$\mathbf{p}(k) = \begin{bmatrix} P_{\text{NAP}}(k) \\ P_{\text{Speicher}}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Dieser Term erlaubt es, die Leistungsaufteilung zwischen den Komponenten zu bewerten. Dabei ist ein hoher Funktionswert mit größeren Nachteilen verbunden als ein geringerer Funktionswert. Die Unterfunktionen werden wie folgt definiert, für den Netzanschlusspunkt

$$f_{\text{NAP}}(p_1) = \begin{cases} a_2 \cdot p_1 + P_M \cdot (a_2 - a_1) & \text{für } p_1 > P_M \\ a_1 \cdot p_1 & \text{für } P_M \geq p_1 > 0 \\ a_0 \cdot p_1 & \text{für } p_1 \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

bei der  $a_0$  der Einspeisevergütung der Leistung  $p$  über eine Viertelstunde und  $a_1$  den Bezugskosten der Leistung  $p$  über eine Viertelstunde repräsentiert.  $P_M$  entspricht dem maximalen Viertelstunden-Leistungsmittelwert, der bereits in der Abrechnungsperiode aufgetreten ist, und  $a_2$  repräsentiert die Zusatzkosten einer Überschreitung dieser Leistung, zusätzlich zu den entsprechenden Energiebezugskosten. Für den Speicher folgt

$$f_{\text{Sp}}(p_2) = \begin{cases} c_1 \cdot p_2 & \text{für } p_2 > 0 \\ c_0 \cdot p_2 & \text{für } p_2 \leq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Die Faktoren  $c_1$  und  $c_2$  können nicht so anschaulich beschrieben werden wie die Faktoren der vorherigen Funktion des Netzanschlusspunkts. Wichtig ist hierbei vor allem, dass gilt  $a_2 > c_1 > a_1$  und  $c_0 > a_0$ , denn nur so wird der Speicher entsprechend der o.g. Zielsetzungen genutzt.

Ein weiteres wichtiges Element der Betriebsführung ist die Prädiktion der Residualleistung. Sie wird eingesetzt, um den Residualleistungsverlauf über einen gewissen Zeithorizont zu extrapolieren. Dies wird in jedem Berechnungszeitpunkt erneut durchgeführt, was für das Prinzip des gleitenden Horizonts notwendig ist. Die Prädiktion kann beispielsweise mit künstlichen Neuronen Netzen bewerkstelligt werden, worauf jedoch in dieser Veröffentlichung nicht näher eingegangen wird.

Auf Grundlage der Prädiktion und der Zielfunktionen ermittelt schließlich ein Optimierungsverfahren den Verlauf der Leistungsaufteilung zwischen Speicher- und NAP, der über den gesamten Prädiktionshorizont zur geringsten Summe der Zielfunktionswerte führt. Dabei wird nur der erste Wert an die Komponenten als Stellgröße weitergegeben, der Rest des Verlaufs wird verworfen und im nächsten Berechnungsschritt neu berechnet. So können die Informationen über den zukünftigen Verlauf einbezogen werden, was dazu führt, dass nicht zwangsläufig die Aufteilung gewählt wird, welche den geringsten Zielfunktionswert bis

zum nächsten Berechnungszeitpunkt aufweist. Das dynamische Optimierungsproblem kann nun wie folgt beschrieben werden

$$\min_{\mathbf{p}(\cdot)} J(\mathbf{p}) = \sum_{k=0}^{K-1} f(\mathbf{p}(k)) \quad (5)$$

$$\text{u. B. v. } P_{\text{Speicher}}(k) + P_{\text{NAP}}(k) = P_{\text{Residual}}(k) \quad (6)$$

$$P_{\text{NAP}}(k) \in [P_{\text{NAP,min}}, P_{\text{NAP,max}}] \quad (7)$$

$$P_{\text{Speicher}}(k) \in [P_{\text{Speicher,min}}, P_{\text{Speicher,max}}] \quad (8)$$

$$E_{\text{Speicher}}(k+1) = f(\mathbf{p}(k), E_{\text{Speicher}}(k)) \quad (9)$$

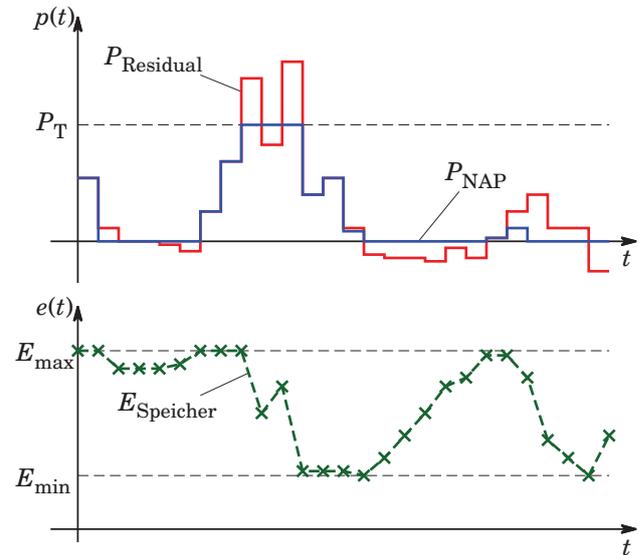
$$E_{\text{Speicher}}(k) \in [E_{\text{min}}, E_{\text{max}}] \quad (10)$$

wobei  $k = 0$  immer den momentanen Berechnungszeitpunkt und  $K$  die Anzahl der Prädiktionsschritte angibt. Die prädizierte Leistung  $P_{\text{Residual}}$  selbst taucht nur in der ersten Nebenbedingung in Gleichung (6) auf, welche durch Abbildung 1 verdeutlicht wird. Die Optimierung kann nun bezüglich der Leistungsaufteilung an jedem Berechnungszeitpunkt des Prädiktionshorizonts mit geeigneten Verfahren zur globalen Optimierung durchgeführt werden. Dabei entstehen pro Berechnungszeitpunkt zwei Optimierungsvariablen, welche jedoch über die erste Nebenbedingung direkt miteinander verknüpft sind. Somit sind letztlich  $K$  Variablen bei der Optimierung zu betrachten.

Es besteht ebenfalls eine zeitliche Abhängigkeit der Variablen über den Energieinhalt des Speichers, welcher ebenfalls in entsprechenden Systemgrenzen gehalten werden muss. Dies wird in den Nebenbedingungen in Gleichung (9) und (10) formuliert. Zur Berechnung von Gleichung (9) wird ein Modell des Speichers benötigt, welches dazu benutzt wird, den Energieinhalt des Speichers mit dem berechneten Speicherleistungsverlauf über den Prädiktionshorizont zu berechnen. Um die Optimierung zu beschleunigen, wurde eine heuristische Vorooptimierung genutzt, welche die gleichen Zielfunktionen und Nebenbedingungen verwendet, jedoch die Anzahl der Optimierungsvariablen auf zwei reduziert. Das Verfahren wertet den prädizierten Leistungsverlauf aus und vergleicht Energiemengen. Basierend auf der Prädikation werden dann die Faktoren  $c_1$  und  $c_2$  aus Gleichung (4) so angepasst, dass sich bei prädizierten Residualleistungen oberhalb von  $P_M$  eine Spitzenleistungsreduktionsstrategie und bei prädizierten Residualleistungen unerhalb von 0 eine Eigenverbrauchssteigerungsstrategie einstellt.

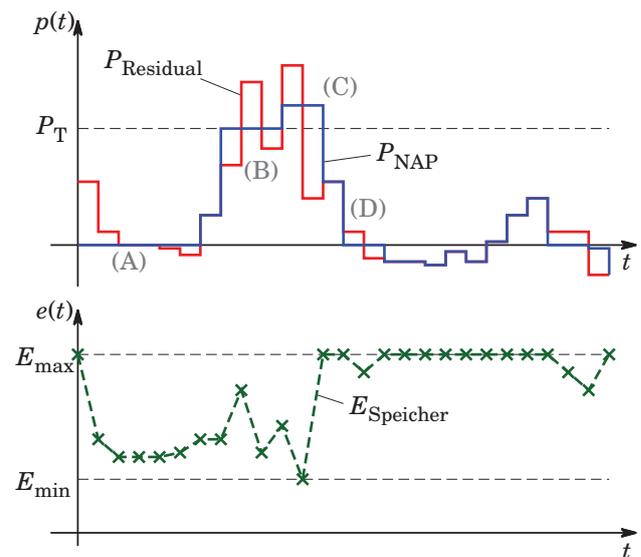
Eine Besonderheit der Optimierung bei diesem Anwendungsfall ist, dass die maximal erzielbaren Ergebnisse bereits vorab feststehen. Diese können mit den separat betrachteten Betriebsführungen ermittelt werden, welche jeweils die höchst mögliche Eigenverbrauchssteigerungen und Spitzenleistungsreduktion für den gegebenen Residualleistungsverlauf, den Speicherparametern und der Leistungsschwelle  $P_T$  aufzeigen. Erreicht die kombinierte Betriebsführung in beiden Zielen die gleichen Werte, kann davon ausgegangen werden, dass das bestmögliche Ergebnis vorliegt. Für eine ideale Prädikation wurde dies bereits mit der Vorooptimierung geschafft. Im Folgenden wird das Prinzip an einem beispielhaften Residualleistungsver-

lauf gezeigt, welcher der Speicherbetriebsführung mit unterschiedlicher Prädiktionsgüte und einem jeweiligen Prädiktionshorizont von fünf Schritten bereitgestellt wurde. Bewertet wird das Ergebnis durch den Vergleich mit separaten Betriebsführungen. Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der kombinierten Zielsetzung bei idealer Prädiktion: dabei wurden sowohl 100% der möglichen Spitzenleistungsreduktion als auch 100% der möglichen Eigenverbrauchssteigerung (bezogen auf die Ergebnisse der separaten Betriebsführungen) erreicht.



**Abbildung 5** Beispiel zur kombinierten Zielsetzung (mit idealer Prädiktion)

Abbildung 6 zeigt das Ergebnis der kombinierten Zielsetzung bei stark fehlerhafter Prädiktion, um mögliche Probleme bei der Betriebsführung aufzuzeigen. Dabei wurden lediglich 63,18% der möglichen Spitzenleistungsreduktion und 44,4% der möglichen Eigenverbrauchssteigerung erreicht.



**Abbildung 6** Beispiel zur kombinierten Zielsetzung (mit stark fehlerhafter Prädiktion)

Die problematischen Stellen sind in Abbildung 6 markiert. An der Stelle (A) wurde eine zu hohe Rückspeisung prädiziert, somit kann der Speicher nicht vollständig geladen werden. Treten im Folgenden Spitzenleistungen auf, muss der Speicher vorher aus dem Netz geladen werden.

Dies wird bei diesem Beispiel an der Stelle (B) auch prädiziert, jedoch zu spät. Daher war es nicht mehr möglich, den Speicher vor den Spitzenleistungen voll zu laden und im folgenden kann die Leistungsschwelle  $P_T$  nicht mehr gehalten werden.

An der Stelle (C) werden fälschlicherweise weiterhin Spitzenleistungen prädiziert. Dies führt dazu, dass der Speicher wieder aus dem Netz nachgeladen wird, was nicht notwendig wäre und im Folgenden die Möglichkeiten zur Eigenverbrauchssteigerung negativ beeinträchtigt.

Zuletzt wird an der Stelle (D) gezeigt, dass die Prädiktion eine zu geringe Rückspeisung prädiziert (zu gering oder aber einen Schritt zu spät). Wäre in beiden Intervallen vor der Rückspeisung der Speicher entladen worden, wäre eine höhere Eigenverbrauchssteigerung möglich gewesen.

Diese Beispiele zeigen, dass eine hohe Güte der Prädiktion wichtig ist, um die Kostenreduktion zu maximieren.

### 3 Mögliche Erweiterungen

Zusätzlich zu den genannten Zielen (Spitzenleistungsreduktion und Eigenverbrauchssteigerung) wurden bereits weitere Ziele der Optimierung hinzugefügt. Im Rahmen dieser Veröffentlichung soll dazu ein kurzer Einblick gegeben werden. Zum einen kann die vorgestellte Betriebsführung für Hybridspeicher erweitert werden. Da bei einem solchen System die Gesamtspeicherleistung auf die unterschiedlichen Speicher aufgeteilt wird, ergibt sich ein weiterer Freiheitsgrad. Dabei können die Speichereigenschaften wie Wirkungsgrad und Selbstentladung betrachtet werden, um sinnvolle Leistungsverteilungen zu finden. Die Informationen können durch Erweiterung von Gleichung (5) mit einer weiteren Unterfunktion der Betriebsführung wie folgt nutzbar gemacht werden

$$J(\mathbf{p}) = \sum_{k=0}^{K-1} f_1(\mathbf{p}(k))f_2(\mathbf{p}(k)). \quad (11)$$

Die Unterfunktion  $f_2(\mathbf{p}(k))$  ist dann minimal, wenn die geringsten Gesamtverluste des Speichersystems auftreten.

Auch die Einbindung von aktuellen Energiepreisen kann direkt Berücksichtigung finden. Dazu bietet es sich an, die Parameter  $a_0$ ,  $a_1$  und  $a_2$  entsprechend anzupassen. Somit ist auch die Integration in ein übergeordnetes Smart Grid ohne grundlegende Änderungen möglich. Gerade hierbei ist auch die Betrachtung des Wärmebedarfs vielversprechend, um die Gesamtenergieversorgungskosten des Unternehmens zu reduzieren.

### 4 Ergebnisse

Die vorgestellte Methode wurde auf reale Messwerte aus dem Zeitraum eines Jahres angewandt. Der Residualleistungsverlauf, dem diese Messwerte zugrunde liegen, wird

in Abbildung 7 gezeigt. Die Messwerte stammen von einem Standort eines Industrieunternehmens, an dem unter anderem ein Blockheizkraftwerk und eine Photovoltaikanlage installiert sind.

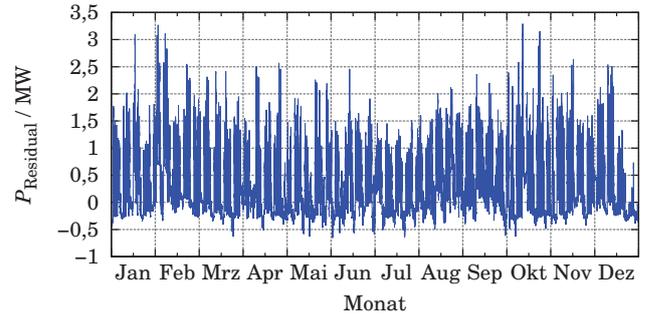


Abbildung 7 Residualleistung basierend auf Messdaten

Um eine bessere Vorstellung des Leistungsverlaufs zu bekommen, wurden stochastische Leistungsprofile (SLP) nach [4] erstellt, welche die Tagesleistungsmuster zeigen. Abbildung 8 stellt das SLP der Residualleistung dar (also die Ausgangssituation), und Abbildung 9 zeigt das SLP der Leistung am Netzanschlusspunkt (also das Ergebnis).

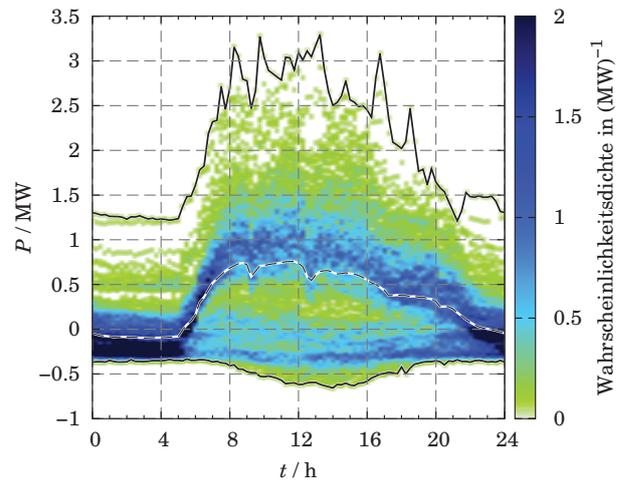


Abbildung 8 SLP vor Speichereingriff ( $P_{Residual}$ )

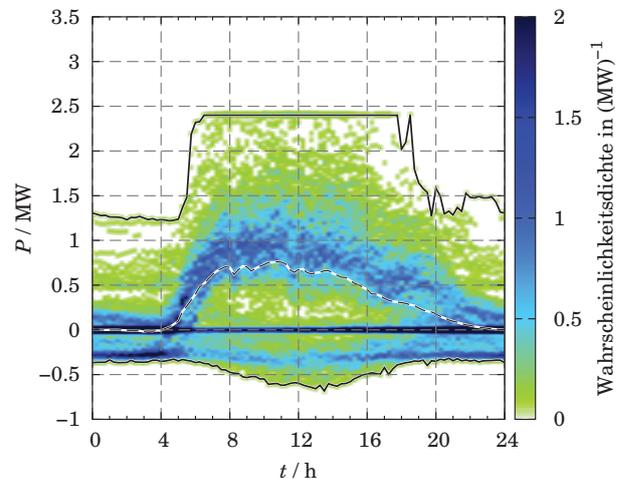
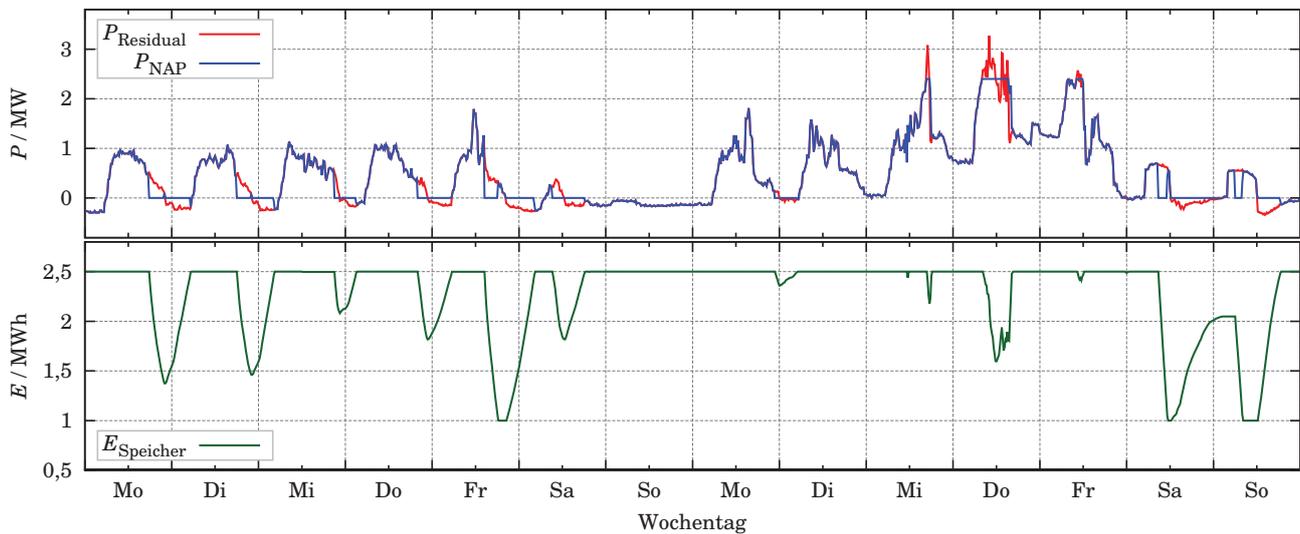


Abbildung 9 SLP nach Speichereingriff ( $P_{NAP}$ )



**Abbildung 10** Ausschnitt der Ergebnisse über zwei Wochen mit  $E_{\max} = 2,5 \text{ MWh}$ ,  $E_{\min} = 1 \text{ MWh}$  und  $P_T = 2,4 \text{ MW}$

Zusätzlich zur Wahrscheinlichkeitsdichte sind in den Diagrammen ebenfalls die höchsten und geringsten gemessenen Leistungen und der Erwartungswert eingetragen.

Im Vergleich der beiden Abbildungen lässt sich die Spitzenleistungsreduktion gut erkennen. Da in diesen Diagrammen die Daten des gesamten betrachteten Zeitraums eingehen, ist direkt erkennbar, dass die Leistungsgrenze von  $2,4 \text{ MW}$  im gesamten Zeitraum eingehalten wurde. Die Spitzenleistungsreduktion wurde also, verglichen mit einer reinen Spitzenleistungsreduktionsstrategie, zu  $100\%$  erreicht. Die Eigenverbrauchssteigerung ist besonders an den unterschiedlichen Wahrscheinlichkeitsdichten für negative Leistungen im Bereich zwischen  $t = 0 \text{ h}$  bis  $t = 6 \text{ h}$  und  $t = 20 \text{ h}$  bis  $t = 24 \text{ h}$  zu erkennen.

Abbildung 10 zeigt einen Zwei-Wochen-Ausschnitt der Ergebnisse, in dem sowohl Speicherzyklen zur Eigenverbrauchssteigerung als auch zur Spitzenleistungsreduktion erkennbar sind. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass der Speicher für die Eigenverbrauchssteigerung nicht voll ausgenutzt wird. Dies wird daran deutlich, dass es zu Einspeisezeiträumen kommt, ohne dass der Speicher vorher vollständig entladen war, obwohl dies möglich gewesen wäre. Dies erklärt sich durch die nicht ideale Prädiktion und durch Sicherheitsaufschläge, die letztlich aber auch erst durch die nicht ideale Prädiktion notwendig werden. Die Eigenverbrauchssteigerung liegt dadurch, verglichen mit einer Betriebsstrategie zur reinen Eigenverbrauchssteigerung, bei  $81,54\%$ .

## 5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, sowohl Spitzenleistungsreduktion als auch Eigenverbrauchssteigerung in der Speicherbetriebsstrategie eines industriellen Microgrids simultan zu berücksichtigen. Bei idealer Prädiktion können die beiden Ziele sogar so kombiniert werden, dass in beiderlei Hinsicht keinerlei Nachteile gegenüber separaten Betriebsstrategien in Kauf zu nehmen sind. Bei nicht idealer Prädiktion kann dies nicht vorausgesetzt werden,

wobei vor allem der Grad der Eigenverbrauchssteigerung abnimmt. Das vorgestellte Fallbeispiel mit Verwendung von realen Messdaten und nicht idealer Prädiktion zeigt, dass es durchaus möglich ist, trotz erheblicher Eigenverbrauchssteigerung den gleichen Grad an Spitzenleistungsreduktion zu erreichen, wie es eine nur auf Spitzenleistungsreduktion ausgelegte Betriebsstrategie erreicht hätte. Dies erhöht die Wirtschaftlichkeit des Speichereinsatzes.

## Förderhinweis

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Spitzenclusters "Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe" (it's OWL) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## 6 Literatur

- [1] Moseley, P., Garche, J.: Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing, *Elsevier Verlag*, 2015, S. 43
- [2] Vogt, T., Fröhleke, N., Böcker, J., Kempen, S.: Design Considerations on Peak Power Clipping Thresholds in Microgrids, *6<sup>th</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)*, 2014
- [3] Dittmar, R., Pfeiffer, B.-M.: *Modellbasierte prädiktive Regelung*, Oldenbourg Verlag, 2004, S. 38ff
- [4] Vogt, T., Keuck, L., Fröhleke, N., Böcker, J., Kempen, S.: Analysis of Industrial Microgrid Power Curves Based on the Theory of Stochastic Variables for Control System Development and Component Sizing, *International Conference on Advances in Green Energy (ICAGE)*, 2014