

Modellierung von volatilen erneuerbaren Energieerzeugern und Energiespeichern in Siemens Plant Simulation

Modelling of Volatile Renewable Energy Sources and Energy Storages in Siemens Plant Simulation

Johannes Stoldt, Bastian Prell, Andreas Schlegel, Matthias Putz, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz (Germany),
johannes.stoldt@iwu.fraunhofer.de, bastian.prell@iwu.fraunhofer.de,
andreas.schlegel@iwu.fraunhofer.de, matthias.putz@iwu.fraunhofer.de

Abstract: The realisation of the European Union's environmental aims results in an ever-greater reliance on volatile renewable energy sources. This translates into increasingly complex interactions on the energy markets, where industry companies must consider self-provisioning of energy, volatile prices and time-dependent energy availability for their operations. Simulation is the tool of choice to investigate the intricate interrelations between production and energy consumption. It needs to be readied for new questions related to the above developments. This paper presents an extension to the eniBRIC class library for Siemens Plant Simulation that allows for modelling volatile renewable energy sources as well as energy storages. To support their utilisation, a so-called Energy Supply Manager with brokering capabilities was developed. Its functionality has been tested successfully in a small example model.

1 Einleitung und Motivation

Bis 2030 will die Europäische Union (EU) Treibhausgasemissionen um 40 % verglichen mit dem Stand von 1990 reduzieren, den Anteil der Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen auf 27 % steigern sowie die Energieeffizienz um mindestens 27 % erhöhen (Europäische Kommission 2016). Die EU-Mitgliedsstaaten stehen dazu in der Pflicht, Maßnahmen umzusetzen, mit denen sich diese Ziele erreichen lassen. Mit dem Ziel eines Versorgungsanteils von 50 % des Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Quellen bis 2030 nimmt Deutschland eine Sonderrolle innerhalb der EU ein (Statista 2016). Daraus resultiert ein immer komplexeres Spannungsfeld für die Interaktion von Energieverbrauchern, -netzbetreibern und -erzeugern. Eine Leitfrage dabei ist: Zu welchen zeitlich bestimmten Konditionen und Umfängen können Anbieter und Nachfrager Energie über Versorgungsnetze, Marktplätze sowie dezentrale Speicher und Energiequellen bereitstellen bzw. beziehen?

Der vorliegende Beitrag stellt ausgehend von dieser Fragestellung ein Konzept zur Modellierung von volatilen erneuerbaren Energiequellen und Energiespeichern sowie eine Implementation ebendieser Elemente vor. Hiermit soll es möglich werden, die vorangehend aufgeworfene Frage mittels Simulation, speziell in der Software Siemens Plant Simulation, zu untersuchen. Hinleitend dazu wird im Folgenden zunächst der Stand von Wissenschaft und Technik dargestellt. Im Weiteren wird das Modellierungskonzept in Abschnitt 3 vorgestellt. Abschnitt 4 fasst die entwickelten Erweiterungen für die Klassenbibliothek eniBRIC überblicksweise zusammen. Deren funktionale Überprüfung wird in Abschnitt 5 thematisiert.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Motiviert durch die eingangs beschriebenen Entwicklungen, aber auch durch die damit einhergehende Inflation der Energiekosten, setzen Produktionsunternehmen zunehmend auf den Betrieb eigener dezentraler Energiequellen. Dabei stellen die Flexibilisierung von Produktionsprozessen zum Zwecke einer angebotsorientierten Energiebedarfsgestaltung sowie die Einbindung von Energiespeichern besonders wichtige Entwicklungsfelder dar (vgl. Beier et al. 2015; Ghadimi et al. 2015; Graßl 2015; Liebl et al. 2015; Schultz et al. 2015). Somit wird eine noch engere Verknüpfung der Material- und Energieflussbetrachtungen aus Sicht des Fabrikmanagements zunehmend unabdingbar. Die integrierte Betrachtung dieser Flusssysteme in der Betriebsphase, aber auch während der Gestaltung von Produktionssystemen ist eine logische Konsequenz. Mathematisch-analytische Methoden stoßen dabei infolge der komplexen Wirkzusammenhänge jedoch an ihre Grenzen, wohingegen Simulation besser geeignet ist (VDI 3633, Blatt 1, 2014).

Die unmittelbare Modellierung des Verhaltens von erneuerbaren Energiequellen und Energiespeichern war bislang in Softwarelösungen zur Materialflusssimulation nicht möglich. Folglich haben sich bisherige Untersuchungen zum Umgang mit volatilen Energieangeboten bevorzugt auf die Abbildung von Energieangeboten bzw. -preisen in Form von vordefinierten Zeitreihen beschränkt, wobei die Verbrauchsseite abhängig von der Produktion simuliert wurde (z. B. Schultz et al. 2015; Putz et al. 2016). Der Betrieb von Speichern wurde hingegen zumeist mit ebenso vordefinierten Angebots- und Lastprofilen untersucht, sodass keine Wirkzusammenhänge mit der eigentlichen Produktion betrachtet wurden (z. B. Lehmann et al. 2016). Erste Ansätze zur Integration von dezentralen Energiequellen oder -speichern wurden bisweilen nur vereinzelt vorgestellt (Ghadimi et al. 2015; Beier et al. 2016).

3 Modellierung von Energieflusssystemelementen

Ziel des im Weiteren vorgestellten Konzeptes ist es, eine durchgängige Lösung zur Modellierung von konventionellen sowie volatilen erneuerbaren, lokalen Energiequellen, Energiespeichern und Energieverbrauchern zu realisieren. Letztere Termini orientieren sich am praxisüblichen Sprachgebrauch, auch wenn es sich physikalisch korrekt um Energiewandler handelt. Die Lösung baut auf der vom Fraunhofer IWU entwickelten Klassenbibliothek eniBRIC für Siemens Plant Simulation auf (Stoldt et al. 2016) auf. Abbildung 1 zeigt die zugrundeliegenden, vereinfachten Komponentenmodelle für konventionelle Energiequellen und -verbraucher, wetterabhängige Erzeuger, inputabhängige Erzeuger und Energiespeicher.

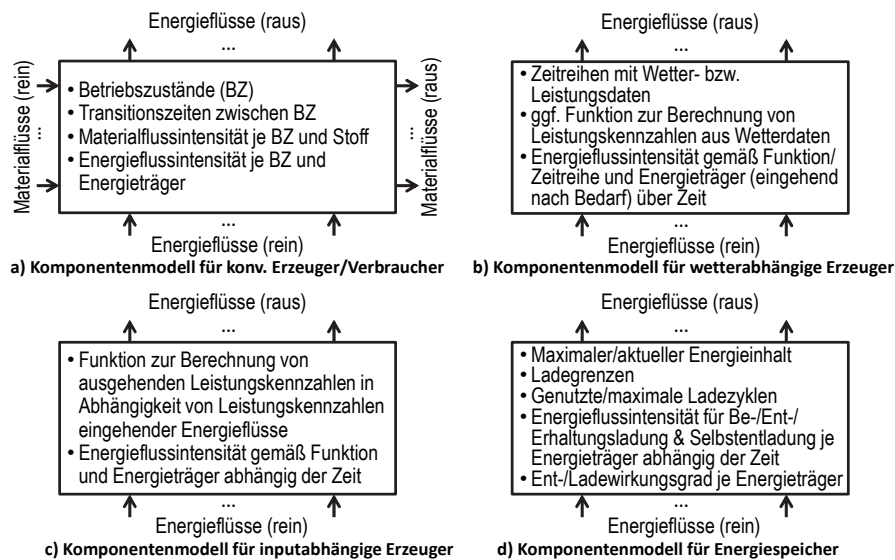


Abbildung 1: Komponentenmodelle zur Betrachtung von Energietechnologien (in Anlehnung an Stoldt et al. 2015)

Das erste Komponentenmodell (Abb. 1a) stellt die ursprünglich in eniBRIC implementierte Funktionalität nach Stoldt et al. (2016) dar, welche zunächst erläutert werden soll. Diese ist als in sich geschlossener Simulationsbaustein ausgeführt, welcher in die vom Anwender verwendeten Materialflussbausteine zu integrieren ist. Somit bildet der eniBRIC-Grundbaustein einzig die in der Vertikalen dargestellten Energieflüsse ab; Materialflussfähigkeiten sind vom zu erweiternden Baustein zu erfüllen. Die Kopplung von Material- und Energiefluss erfolgt über Schnittstellen, mit denen der eniBRIC-Grundbaustein über Materialein- und -austritte sowie Störungen informiert wird (vgl. Stoldt et al. 2016). Die Abbildung des Energieverbrauchs bzw. der Energieabgabe erfolgt unter Nutzung von betriebszustands-abhängigen Durchschnittswerten. Eine Besonderheit des eniBRIC-Grundbausteins ist, dass er die Verbindung von Erzeugern und Verbrauchern modellieren kann. Dazu kann er auch als Energiequelle (ohne Materialflussfunktionalitäten) eingesetzt werden, von der Verbraucher-Instanzen anschließend Energie beziehen.

Im Unterschied zu konventionellen Energieerzeugern in Unternehmen, wie etwa Blockheizkraftwerken, haben volatile erneuerbare Energiequellen im Allgemeinen eine wetterabhängige Leistung. Die genaue Abgabemenge kann dabei zwar mit geeigneten Modellen analytisch oder simulationsgestützt mit und ohne Zeitbezug prognostiziert werden, wird aber infolge nicht vorherzusehender Einflüsse nie exakt sein (Böen, Wolken, usw.). Für den Zweck der um energetische Betrachtungen erweiterten Materialflusssimulation kann jedoch auf Grundlage von Zeitreihen eine beliebig genaue Abbildung erfolgen (Abb. 1b). Dabei besteht die zentrale Anforderung, dass innerhalb der Simulation eine flexible Parametrierung gleichwohl die Modellierung mittels zuvor prognostizierter aber auch mittels in der Simulation aus Wetterdaten berechneter Abgabeleistungen ermöglicht wird. Letzteres erfordert die Spezifikation einer geeigneten Berechnungsvorschrift und etwaiger Parameter.

Inputabhängige Erzeuger (Abb. 1c) stellen eine Sonderform der voran beschriebenen Erzeuger dar, bei denen der Input nicht als Zeitreihe vorweggenommen werden kann, sondern sich aus der momentanen Einspeisung anderer Quellen, d. h. Simulationsdaten, ergibt. Beispiele dafür sind Wärmetauscher oder Energierückgewinnungsanlagen, die einen Energiestrom aufnehmen um einen anderen abgeben zu können. Hierfür bedarf es der Festlegung einer Übertragungsfunktion, mittels welcher sich eine Abgabekapazität aus einem anliegenden Eingangsstrom ermitteln lässt. Diese ist ggf. durch entsprechende Parameter zu justieren.

Energiespeicher (Abb. 1d) stellen ein Mittel zur Schaffung von Diskontinuität in der Erzeugung und im Verbrauch von Energie dar. Sie sind u. a. gekennzeichnet durch eine maximale Kapazität, Ent-/Ladewirkungsgrade, Selbstentladung und Zyklusfestigkeit sowie Ladegrenzen und Ladestromrestriktionen. Dabei kann die Vereinfachung getroffen werden, dass stets ein lineares Speicherverhalten unterstellt wird. Dies trifft für eine Vielzahl von Speichern, insbesondere elektrochemische Speicher im typischen Betriebsbereich, zu und vereinfacht die Modellierung. Eine weitere Differenzierung nach Speichertechnologien erscheint im vorliegenden Zielfokus nicht zweckmäßig.

4 Erweiterung der Klassenbibliothek eniBRIC

Unter Rückgriff auf die zuvor vorgestellten Komponentenmodelle wurde die Klassenbibliothek eniBRIC erweitert. Die folgenden Ausführungen detaillieren die zusätzlich entwickelten Simulationsbausteine und deren Funktionen.

4.1 Energy Supply Manager

Die eniBRIC-Klassenbibliothek war in der Vergangenheit an eine starre 1:n-Verknüpfung von Erzeugern zu Verbrauchern je betrachtetem Energieträger gebunden (Abb. 2a). So konnten zwar beispielsweise mehrere Verbraucher von einem Stromerzeuger oder mehrere Gruppen von Verbrauchern von mehreren Erzeugern bedient werden, jedoch konnten komplexere Einspeisekonstellationen in lokale Netze nicht modelliert werden. Dies ist für die Untersuchung des Einflusses von volatilen Energiequellen und Energiespeichern jedoch unerlässlich. Daher wurde der sogenannte Energy Supply Manager (ESM) entwickelt. Dessen Aufgabe ist vergleichbar mit der eines Verteilnetzes: Leistung aufnehmen, bereitstellen und nach Bedarf abgeben.

Abbildung 2b zeigt beispielhaft ein mit dem der ESM modelliertes Versorgungssystem. Kennlich gemacht sind dabei die neu entwickelten Module. Ersichtlich wird weiterhin, dass Steuerungslogik, welche das Systemverhalten beeinflusst, nicht einzig im ESM liegt. Dies folgt dem Ansatz, dass Untersuchungen mit eniBRIC sehr flexibel und nicht auf wenige Steuerungsstrategien (z. B. Lastspitzennivellierung) beschränkt sein sollen. Folglich bietet der ESM Schnittstellen, mittels welcher der Nutzer Ent-/Ladeanforderungen für die Speicher initiieren kann. Die interne Logik des ESM setzt diese unter Beachtung des Ladezustands und der Verfügbarkeit von Energie um. Zugleich verteilt er Bedarfe auf andere Erzeuger um, sobald einer sein Leistungsangebot verändert (z. B. infolge von Volatilität). Dies folgt einer zuvor definierten Priorisierung und unter der Annahme, dass etwaiger Mangelbedarf stets durch einen Erzeuger gedeckt ist. Dies ist im Produktionskontext zu erwarten.

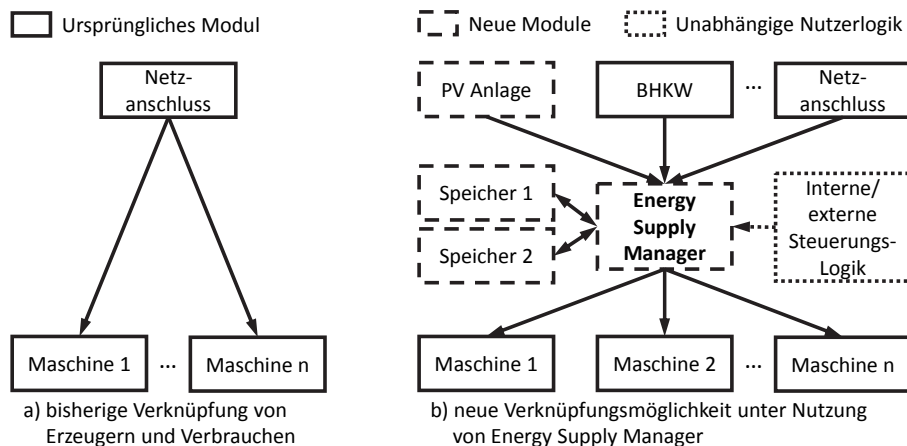


Abbildung 2: Vergleich bisheriger und erweiterter Implementation von eniBRIC

Der ESM stellt für jede Änderung der Leistung eines Elements und somit zu jedem Zeitpunkt sicher, dass die abgegebene Leistung ihm durch einspeisende Elemente bereitgestellt wird. Der ESM bestätigt, entsprechend dieser getroffenen Annahme, zunächst allen anfragenden Verbrauchern die Versorgung. In einem zweiten Schritt, jedoch zum gleichen Zeitpunkt, fordert er die zugesagte Leistung von den mit ihm verbundenen leistungsbereitstellenden Elementen ein. Hierfür wird zuvor ermittelt, welchen Beitrag die angeschlossenen Speicher nach ihren Lade- bzw. Entladestrategien beisteuern sollen bzw. können (vgl. Abschnitt 4.3). Anzumerken ist, dass diese sowohl als Quelle als auch als Verbraucher wirken können, je nachdem, ob Speicher geladen oder entladen werden.

Ist der Leistungsbedarf nach der Berücksichtigung der Speicher ermittelt, gilt es die Erzeuger einzubeziehen. Hierfür wird für jeden Erzeuger, entsprechend der Prioritätenreihenfolge, ermittelt welche Leistung dieser dem ESM bereitstellen kann, die noch zu verteilende Leistung entsprechend verringert und der Erzeuger belastet. Im Normalfall sollte ein Netzanschluss (als typischer „Erzeuger“, der stets zur Garantie störungsfreier Versorgung in Produktionsunternehmen verfügbar ist) somit zuletzt abgefragt werden und den dann noch übrigen Leistungsbedarf vollständig decken. Der Energiefluss erfolgt somit wie in Abbildung 3 illustriert. Von den Erzeugern auf der linken Seite zu den Verbrauchern auf der rechten, während Speicher sowohl Energie aufnehmen als auch abgeben können.

Die zuvor beschriebene Bilanzierung, um abgegebene und aufgenommene Leistung auszugleichen, wird durch eine Maklarmethode realisiert. Gegenüber Erzeugern und Verbrauchern imitiert der ESM, wie in Abbildung 3 angedeutet, gewöhnliche Verbraucher bzw. Erzeuger. Dazu werden bereits zuvor existierende Schnittstellen genutzt. Dies wird durch die Integration von Pseudo-Instanzen des eniBRIC-Grundbausteins (ein Erzeuger, beliebig viele Verbraucher) erreicht. Diese implementieren die ursprüngliche Schnittstelle zur Verbraucher-Erzeuger-Kommunikation, untersetzen diese jedoch mit neuer Funktionalität. Zur Kommunikation zwischen Speicher und ESM wurden zudem neue Schnittstellen implementiert, um die Be-/Entladung von Speichern durch den ESM zu veranlassen, ihm das Erreichen von Ladegrenzen anzuzeigen und eine externe Speichersteuerung anzubinden.

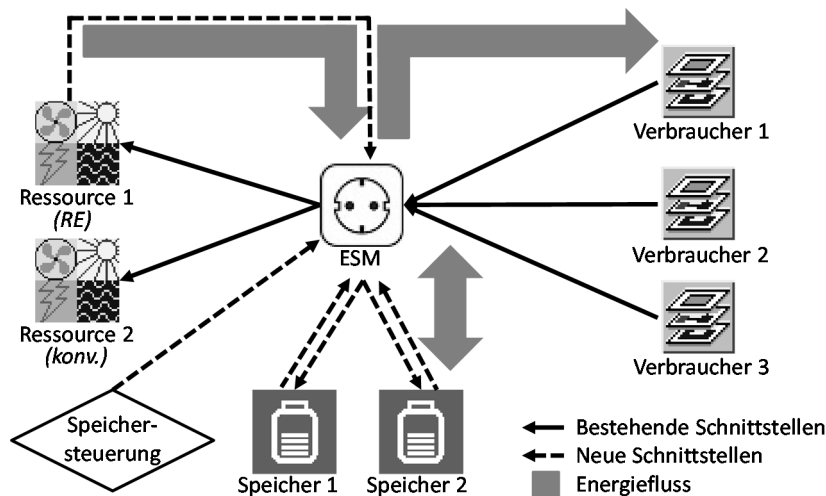


Abbildung 3: Energieflussschema durch den ESM

4.2 Volatile erneuerbare Energieerzeuger

Die Herausforderung bei der Modellierung erneuerbarer Energieerzeugung liegt in ihrem volatilen Charakter begründet. Wie in Abschnitt 3 erläutert, kann die veränderliche Abgabeleistung eines solchen Erzeugers über eine Funktion und eine Zeitreihe von Eingangswerten abgebildet bzw. ggf. auch erst während der Laufzeit errechnet werden. Entsprechend waren in der Implementierung zwei zentrale Probleme zu lösen: die möglichst flexible Parametrierung des Zusammenhangs aus Zeitreihe(n) und möglicher Abgabeleistung sowie die Abbildung des veränderlichen Profils unter Nutzung der existierenden Schnittstellen von eniBRIC.

Der Ausgangspunkt zur Bewältigung des erstgenannten Problems liegt in der Annahme, dass die Abgabeleistung als stückweise Funktion von t dargestellt werden kann. Im Trivialfall kann dies gleichbedeutend mit der Zeitreihe eines aufgezeichneten Leistungsverlaufs einer realen Anlage sein. Andere beliebig komplexe analytische Formeln, welche auch von mehreren Zeitreihen und weiteren konstanten Parametern abhängen dürfen, sind ebenso denkbar, unter der Bedingung, dass alle Werte zu allen Zeitpunkten der Reihe definiert werden können. Um unter Beachtung dieser Bedingungen eine flexible Parametrierung zu ermöglichen, wurde ein Parser entwickelt, der eine als Zeichenkette definierte Formel in ausführbaren Code überführt. Entsprechende statisch oder in Zeitreihen vorliegende Parameter sind dafür zunächst in vordefinierten Tabellenstrukturen festzulegen. Der Code kann dann zu Beginn der Simulation oder im Verlauf ebendieser zur Bestimmung der rechnerisch bestimmten Abgabeleistung genutzt werden.

Wie sich die Abbildung zeitlich flexibler Verbrauchsprofile realisieren lässt, wurde bereits in Stoldt et al. (2016) und Stoldt et al. (2017) gezeigt. Zugleich ermöglicht es die Objektorientierung in Siemens Plant Simulation, Funktionalität anderer Elemente durch Vererbung für neue zu übernehmen. So lassen sich beispielsweise weitere Funktionen ergänzen oder spezifische Änderungen vornehmen. Diesem Paradigma der Programmierung wurde gefolgt und auf die von Stoldt et al. (2016) vorgestellten Erzeuger aufgebaut. Diese beinhalten bereits die Funktionalität in unterschiedliche

produktive Betriebszustände mit verschiedenen maximalen Leistungsabgabewerten zu operieren und zwischen diesen geschaltet zu werden.

Für die Implementierung erneuerbarer Energiequellen wurde eine Kind-Klasse von der ursprünglichen Erzeuger-Klasse, welche allein aus einem eniBRIC-Grundbaustein besteht, abgeleitet. Diese wurde ergänzt um die erläuterten Funktionalitäten zur Parametrierung und Berechnung der maximalen Abgabeleistung sowie zur Anpassung ebendieser während der Laufzeit. Letzteres wird durch die Einführung von zwei Betriebszuständen für den Normalbetrieb realisiert, deren Parametrierung dynamisch angepasst wird, bevor zwischen diesen hin und her geschaltet wird. Auf diese Weise kann die ursprüngliche Zustandswechsellogik von eniBRIC beibehalten werden. Lediglich die Ergänzung einer Schnittstelle zur Meldung eines veränderten Angebots an den ESM (Abb. 3, links oben) war notwendig.

Während der Simulation sind Ereignisse zu erzeugen, welche die Funktion zur Anpassung der maximalen Abgabeleistung aufrufen, sobald dies entsprechend der Zeitreihen notwendig ist. Dies wird mit Hilfe der in Siemens Plant Simulation bereitgestellten Klasse „Trigger“ realisiert. Diese ermöglicht es, zu definierten Zeitpunkten Ereignisse und somit Schaltvorgänge im Erzeuger auszulösen.

Im Unterschied zu den wetterabhängigen Erzeugern kann für inputabhängige Erzeuger (Abb. 1b und 1c) der Verlauf der maximalen Abgabeleistung nicht auf Grundlage einer Zeitreihe vorweggenommen werden. Vielmehr muss stets eine Neuberechnung durchgeführt werden, wenn sich die aufgenommene Leistung verändert. Die Grundlagen dazu existieren bereits in der Klasse für erneuerbare Energieerzeuger, speziell die Parametrierung und Berechnung der Abgabeleistung sowie die Funktionalität zur dynamischen Leistungsabgabe mittels zweier Betriebszustände. Da die Logik von eniBRIC bisweilen jedoch davon ausgeht, dass die tatsächliche Abgabe eines Erzeugers (bis zur maximal möglichen) dem Bedarf der jeweiligen Verbraucher folgt, sind noch zusätzliche Erweiterungen notwendig. Mit diesen wäre dann ein Verbrauch abzubilden, welcher dem Angebot folgt, wobei die Änderung des Inputs zugleich in eine Anpassung der Angebotsleistung zu übersetzen ist. Dies wird Bestandteil zukünftiger Entwicklungen.

4.3 Energiespeicher

In Abbildung 1d ist die von Stoldt et al. (2015) vorgeschlagene Energiespeicherkomponente inklusive ihrer Charakteristika dargestellt. Im Zuge der Implementierung sind diese zunächst auf Folgende reduziert worden: Der maximale Energieinhalt (auch „Kapazität“), die obere und untere Ladegrenzen unterhalb dieses sowie die maximal Lade- bzw. Entladeleistung wurden für eine erste Umsetzung als kritisch angesehen. Hinzu kommen Wirkungsgrade für das Speichern – im Sinne des Einlagerns – sowie für das Bereitstellen (Auslagern) der Energie. Erhaltungsladung und Selbstentladung werden derzeit nicht berücksichtigt. Diese vorgestellten charakteristischen Werte wurden als Variablen in der entwickelten Speicher-Klasse ausgeführt. Sie dienen dem Nutzer zur Parametrierung, sodass sich konkrete Speicher für den jeweiligen Anwendungsfall modellieren lassen.

Das implementierte Speichermodell nutzt die in Siemens Plant Simulation verfügbaren Fluidelemente. Während der Initialisierung der Simulation wird in jeder Instanz der Speicher-Klasse eine Instanz der Standard-Klasse Tank angelegt, dessen Aufnahmevermögen dem charakteristischen Wert der Speicherkapazität entspricht.

Über die Stromintensität der Zuleitung und Ableitung wird die jeweils bezogene oder abgegebene Leistung modelliert und jeweils entsprechend bei Änderungen aktualisiert. Da Speicher – zumindest in ihrer simulationsseitigen Abbildung – entweder laden oder entladen (im Grenzfall mit Leistung 0) ist der Tank auch zu jedem Zeitpunkt entweder mit der Zuleitung *oder* mit der Ableitung verbunden. Die Tank-Klasse birgt die Möglichkeit Methoden aufzurufen, sobald definierbare Ladeschwellen erreicht werden. Dies wird genutzt, um ein Stoppen des Ladens für die obere bzw. zum Stoppen des Entladens für die untere Ladegrenze zu erwirken.

Die Speicher-Klasse verfügt, wie in Abbildung 3 gezeigt über Schnittstellen zum Informationsaustausch mit dem ESM. Konkret handelt es sich um eine Schnittstelle zur Festlegung des Ladezustands des Speichers (vom ESM zum Speicher) und eine zur Rückmeldung eines veränderten Ladestatus (vom Speicher zum ESM). Der ESM verfügt wiederum über eine Schnittstelle mittels derer festgelegt wird, mit welcher Leistung einzelne oder alle Speicher laden bzw. entladen werden sollten.

Erstgenannte Schnittstelle wird vom ESM angesteuert, um eine Instanz der Speicher-Klasse während der Laufzeit und unter Angabe der gewünschten Ent-/Ladeleistung in einen ladenden oder entladenden Zustand zu versetzen bzw. den Ladestrom zu verändern. Dabei erfolgt eine Plausibilisierung der Leistungsangabe in der Logik der Speicher-Klasse, sodass die charakteristischen Leistungsgrenzen sowie Ladegrenzen nicht verletzt werden. Eine Leistungsminderung, etwa infolge eines zu geringen Bedarfs der Verbraucher, unterhalb dieser ist zulässig.

Nach jeder Verwendung o. g. Schnittstelle oder bei Erreichen von Ladegrenzen melden Speicher-Instanzen dem ESM, welcher Leistungsbeitrag tatsächlich geliefert wird. Auf diese Weise werden nicht realisierbare Anforderungen (z. B. oberhalb der Leistungsgrenze bzw. außerhalb der Ladegrenzen) direkt beantwortet, sodass die ESM-Maklerfunktion in ihren Berechnungen zur Leistungsverteilung konsistent bleibt. Zugleich wird dem ESM damit das Ende von Ent-/Ladevorgängen angezeigt.

Soll-Ladezustände werden dem ESM unter Angabe der betroffenen Speicher und der vorzeichenbehafteten Ladeleistung (negativ = Entladung und vice versa) übermittelt. Die ESM-Maklerfunktion versucht dies prioritär, d. h. noch vor Einbezug der Erzeuger, umzusetzen. Ist der Bedarf aller relevanten Verbraucher unterhalb der Soll-Abgabeladeleistung, so reduziert der ESM automatisch die Anforderung. Für die Verteilung der Speicher untereinander wird ein Prioritätsansatz genutzt, sodass die Soll-Leistung des Speichers mit der höchsten Priorität zunächst ausgeschöpft wird, bevor ein zweiter entladen wird.

Wann welcher Speicher geladen und entladen werden soll, ist die Frage, die in diesem Beitrag mit der Betriebsstrategie gleichgesetzt wird. Verschiedenste Zielstellungen kommen hierfür in Frage: Neben der bereits genannten Lastspitzennivellierung kommen die Maximierung des Eigenverbrauchs oder gar Kostenaspekte für dynamisch monetär bewertete Energiebereitstellung in Frage. Mit der vorgestellten Implementierung wurde die Basis geschaffen, unterschiedliche Algorithmen für unterschiedliche Zielstellungen zu erproben. Die Entwicklung parametrierbarer Logikbausteine zur Realisierung üblicher Strategien ist ein zukünftiges Entwicklungsziel.

5 Funktionale Überprüfung

Da dieser Beitrag eine Erweiterung eines Simulationswerkzeugs beschreibt, konnte kein Nachweis zur realitätstreuen Abbildung des Verhaltens eines spezifischen Systems geführt werden. Stattdessen wurde die Korrektheit implementierter Funktionalität mithilfe eines Minimalbeispiels untersucht. Rabe et al. (2008) folgend wurde die Überprüfung der neuen Elemente stets begleitend zur Implementierung vorgenommen und – sobald möglich – in das erwähnte Beispielmodell übernommen.

Diese Testumgebung umfasst zwei Verbraucher, zwei Speicher und drei Quellen, eine davon als erneuerbarer Erzeuger ausgeführt. Letztgenannte hatte die höchste Priorität, vor einer konventionellen Quelle mit geringer Leistung. Da diese vereint nicht den maximalen Bedarf der Verbraucher abzudecken vermögen, wurde der dritte, ebenfalls konventionelle Erzeuger zum Ausgleich notwendig. Dieser ist mit ausreichend hoher maximaler Leistungsabgabe versehen, was der Annahme folgt, dass stets eine Quelle mit genügend Leistung bereitsteht, den Bedarf zu sättigen.

Die genannten Elemente wurden über den ESM miteinander verknüpft. Die Funktionsweise des ESM wurde geprüft, indem Erzeuger und Verbraucher im Versuchslauf in verschiedenen Betriebszustandskombinationen betrieben wurden und die Summenbilanz anschließend ausgewertet wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass zu jedem Zeitpunkt die Leistungssumme der Verbraucher durch die Erzeuger bereitgestellt wurde. Speicher fungierten in diesen Experimenten erwartungsgemäß als Energiequellen oder -senken.

Mit den Betriebszustandskombinationen wurden alle Kommunikationsrichtungen erfasst, sodass gleichwohl Änderungen auf der Verbraucher- und der Erzeugerseite, aber auch bei den Speichern durch die ESM-Maklerfunktion zu verarbeiten waren. Teilfunktionalitäten, wie etwa die Beendigung von Ladegrenzen bei Erreichung einer Ladegrenze des Speichers, wurden mit diesem Vorgehen implizit überprüft. Während der Programmierung sind diese jedoch bereits entwicklungsbegleitend intensiv überprüft worden. Insgesamt konnte festgestellt werden, dass Speicher, erneuerbare Quellen, sowie ihr Zusammenspiel mit Hilfe des ESMs wie erwartet und beschrieben wirken. Die Implementation wird somit als verifiziert betrachtet.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde eine Erweiterung der Klassenbibliothek eniBRIC für Siemens Plant Simulation vorgestellt. Während eniBRIC bereits den Einbezug von Energiebetrachtung ermöglichte, können mit der Erweiterung zudem erneuerbare Energiequellen und Energiespeicher simuliert werden. Generischen Ansätzen folgend, lassen sich die Elemente anhand charakteristischer Größen parametrieren. Um bestehende Logik weiterverwenden und zugleich die komplexeren Zusammenhänge infolge der Einbindung dieser neuen Elemente bewältigen zu können, wurde mit dem ESM ein Element zur Modellierung des Verteilnetzes geschaffen. Die Implementation in sich wurde erfolgreich verifiziert und ist kompatibel mit Modellen, die ältere Versionen der Klassenbibliothek nutzen.

Zukünftige Arbeiten sollen drei Schwerpunkten folgen: Zunächst können auf Grundlage der wetterabhängigen Erzeuger auch inputabhängige Erzeuger entwickelt werden. Auch die Entwicklung von Bibliotheken von Logikbausteinen zur

Speichersteuerung sowie von vorparametrierten Speicher- und Erzeuger-Klassen erscheint lohnenswert.

Literatur

- Beier, J.; Neef, B.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Integrating on-site Renewable Electricity Generation into a Manufacturing System with Intermittent Battery Storage from Electric Vehicles. *Procedia CIRP* 48 (2016), S. 483–488.
- Beier, J.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Increasing Energy Flexibility of Manufacturing Systems through Flexible Compressed Air Generation. *Procedia CIRP* 37 (2015), S. 18–23.
- Europäische Kommission: Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030. In: Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030. http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030/index_de.htm. Letzter Zugriff am 10.10.2016.
- Ghadimi, P.; Kara, S.; Kornfeld, B.: Renewable energy integration into factories: Real-time control of on-site energy systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64 (2015) 1, S. 443–446.
- Graßl, M.: Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion. München: Utz 2015.
- Lehmann, C.; Weeber, M.; Böhner, J.; Steinhilper, R.: Techno-economical Analysis of Photovoltaic-battery Storage Systems for Peak-shaving Applications and Self-consumption Optimization in Existing Production Plants. *Procedia CIRP* 48 (2016), S. 313–318.
- Liebl, C.; Popp, R.; Zäh, M.F.: Energieflexibilität von Produktionsanlagen–Energieflexibilitäts-Kennfelder zur Abschätzung der Energieflexibilitäts-Potentiale unterschiedlicher Anlagen. *wt Werkstattstechnik online* 105 (2015) 3, S. 136–140.
- Putz, M.; Götz, U.; Stoldt, J.; Franz, E.: Target systems and Decision-Making to Increase Production Sustainability. *Procedia CIRP* 48 (2016), S. 34–39.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.
- Schultz, C.; Sellmaier, P.; Reinhart, G.: An Approach for Energy-oriented Production Control Using Energy Flexibility. *Procedia CIRP* 29 (2015), S. 197–202.
- Statista: Ziele des Erneuerbare-Energien-Gesetzes im Stromsektor in Deutschland bis 2050. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/217056/umfrage/ziele-des-erneuerbare-energien-gesetzes/>. Letzter Zugriff am 20.01.2016.
- Stoldt, J.; Cherkaskyy, M.; Franz, E.; Putz, M.; Oertwig, N.; Uhlmann, E.: Modellierung von Energietechnologien zum nachhaltigen Reengineering von Produktionsunternehmen. In: Müller, E. (Hrsg.): Planung und Betrieb von Produktionssystemen im digitalen Zeitalter: VPP2015 - Vernetzt planen und produzieren: Tagungsband, Chemnitz, 23. Oktober 2015. Chemnitz: Inst. für Betriebswiss. und Fabrikssysteme 2015, S. 81–90.
- Stoldt, J.; Fanghänel, C.; Lange, H.R.; Schlegel, A.; Woldt, T.; Putz, M.: Simulation Study on Flexibilities in the Material and Energy Flows of an Open-pit Mine. Erscheint in: *Simulation Notes Europe* 27 (2017) 4.
- Stoldt, J.; Schlegel, A.; Putz, M.: Enhanced integration of energy-related considerations in discrete event simulation for manufacturing applications. *Journal of Simulation* 10 (2016) 2, S. 113–122.
- VDI 3633, Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen. Berlin: Beuth 2014.