

Implementierung eines Smart Grids in ein betriebsunabhängiges Simulationsmodell

Julian Stromberger^{1*}, Johannes Dettelbacher¹, Alexander Buchele¹

¹Kompetenzzentrum Industrielle Energieeffizienz, Hochschule Ansbach, Residenzstraße 8, 91522, Ansbach; *j.stromberger@hs-ansbach.de

Abstract. Diese Studie beschreibt die Entwicklung eines betriebsunabhängigen Simulationsmodells für elektrifizierte Druckgießereien, die ihren Energiebedarf mit Hilfe eines Smart Grid Systems decken. Das Modell verwendet reale Wetter- und Börsenstrompreissdaten für den Simulationszeitraum. Mit Hilfe des Modells können die Stromkosten für eine Produktion zu einem bestimmten Zeitpunkt (Tages- und Jahreszeit) sowie die Wirtschaftlichkeit verschiedener PV-Anlagen- und Stromspeichervarianten ermittelt und verglichen werden. Zudem ermöglicht es die Untersuchung des Anteils der verschiedenen Energieträger für die jeweilige Konfiguration. Dies kann mit Hilfe des Modells für Standorte in ganz Deutschland durchgeführt werden. Darüber hinaus werden in dieser Arbeit beispielhafte Simulationsstudien vorgestellt, die den breiten Anwendungsbereich des Modells aufzeigen. Aus den Ergebnissen kann ein erster Überblick über Einsparungs- und Optimierungsmöglichkeiten gewonnen werden. Perspektivisch stellt das Modell eine Grundlage dar, um mittels simulationsgestützter Optimierung optimale Anlagenlayouts und Produktionszeitpunkte zu ermitteln.

Einleitung

Vor dem Hintergrund der Klimaziele und der europäischen Lieferkettenrichtlinie gewinnt eine möglichst emissionsarme Produktion gerade für energieintensive Unternehmen zunehmend an Bedeutung. Gleichzeitig steht für die Unternehmen immer auch ein möglichst kostengünstiger Energiebezug im Fokus. Diese Aspekte stehen jedoch nicht zwangsläufig in Konkurrenz zueinander, denn aufgrund der Volatilität der erneuerbaren Energien kann emissionsfreier Strom teilweise sehr günstig bezogen werden, wodurch CO₂- und kostenarmer Strombezug miteinander vereinbar sind. Darüber hinaus können produzierende Unternehmen mit entsprechenden Gewerbeflächen auch selbst erneuerba-

ren Strom erzeugen, was allerdings zunächst mit hohen Investitionskosten verbunden ist. Die Nutzung dieser Potenziale setzt zudem eine gewisse logistische Flexibilität voraus, die oft nicht trivial umzusetzen ist. Um entsprechende Anpassungen in Unternehmen testen und die wirtschaftlichen Auswirkungen untersuchen zu können, ohne in den realen Betrieb eingreifen zu müssen, was immer mit wirtschaftlichen Risiken verbunden ist, wird in der vorliegenden Studie die Entwicklung eines Simulationsmodells für diesen Einsatzzweck näher beleuchtet. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieses als Erweiterung in ein Betriebsmodell für Gussbetriebe implementiert. Um Aussagen für unterschiedliche Betriebsgrößen treffen zu können und eine mögliche Übertragbarkeit auf andere Branchen zu ermöglichen, ist es betriebsunabhängig und auf Flexibilität ausgerichtet.

1 Anwendungsfeld

Die deutsche Gießereiindustrie gehört mit einem Jahresbedarf von durchschnittlich 12,6 TWh (Jahre 2010 bis 2021) zu den energieintensiven Wirtschaftszweigen. Davon wird auch im Jahr 2021 noch mehr als die Hälfte durch fossile Energieträger gedeckt [1]. Um die entstehenden Emissionen zu reduzieren, ist eine Substitution dieser fossilen Energieträger unumgänglich. Der wichtigste Ansatz hierfür ist die Elektrifizierung des Schmelzprozesses. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme hängt jedoch stark von der Zusammensetzung des bezogenen Strommixes ab. Darüber hinaus führt diese Umstellung zu einer Änderung des Betriebsablaufs [2]. In dieser Studie wird ein Simulationsmodell eines derart umgestellten Betriebes untersucht. Ziel des Modells ist es, unter Verwendung eines Smart Grid Systems, das Wetterdaten, Stromspeicher und Strombörsenpreise berücksichtigt, die aus einer Produktion resultierenden Energiekosten für beliebige Konfigurationen eines

solchen Betriebs zu ermitteln. Das Smart Grid System ist in dieser Anwendung auf den jeweiligen Betrieb beschränkt. Aufgabe des Systems ist es, den Strombedarf in der Produktion zu überwachen und entsprechend dem ebenfalls erfassten, aktuell verfügbaren Stromangebot möglichst kostengünstig zu decken.

2 Bisherige Arbeiten

Das in dieser Studie entwickelte Simulationsmodell baut auf Vorarbeiten auf, in denen ein betriebsunabhängiges Modell für einen konventionellen Druckgussbetrieb [3] sowie ein spezifisches Modell für einen elektrifizierten Betrieb [2] entwickelt wurden. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Umsetzung eines Smart Grid Ansatzes mit Hilfe von Echtzeitdaten sowie den aus der Produktion resultierenden variablen Stromkosten. Die Kostenoptimierung in der produzierenden Industrie durch den Einsatz von flexiblen Energiepreisen und Smart Grids ist ein in der Literatur viel behandeltes Thema. Für einen Überblick können Literaturanalysen wie z.B. [4] herangezogen werden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die jeweiligen inhaltlichen Schwerpunkte einiger in diesem Bereich publizierten Studien im Vergleich zur vorliegenden Arbeit. In der vorliegenden Studie werden erstmals reale Wetterdaten zur Ermittlung der Eigenstromerzeugung herangezogen.

Inhalt	[5]	[6]	[7]	[8]	Diese Studie
Simulationsstudie	*	*	*	*	*
Felxible Energiepreise	*		*	*	*
Eigenstromerzeugung				*	*
Stromspeicher				*	*
Reale Wetterdaten					*

Tabelle 1: Vergleich der inhaltlichen Schwerpunkte verschiedener Studien.

3 Simulationsmodell

Das vorliegende Simulationsmodell basiert grundlegend auf den Erhaltungssätzen der Energie und Masse und ist in der Programmierumgebung MATLAB/Simulink realisiert. Das Modell ist objektorientiert aufgebaut und kann vor dem Start einer Simulation

über eine Konfigurationsdatei individuell parametrisiert werden. Die Simulation arbeitet mit realen Start- und Endzeitpunkten, zu denen Wetter- und Börsenstrompreisdaten abgerufen werden. Das Modell ist in drei Teilmodelle unterteilt. Das Zusammenspiel der Teilmodelle innerhalb eines Simulationsschrittes ist in Abbildung 1 dargestellt. Ein Simulationsschritt in der Simulation entspricht jeweils einer Sekunde der simulierten Betriebszeit.

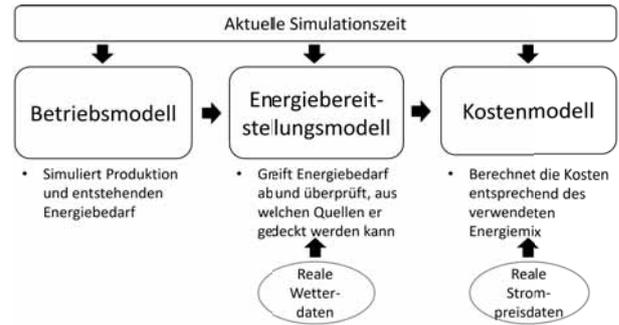


Abbildung 1: Ablauf des Simulationsmodells in jedem Simulationsschritt.

Die Kombination eines detaillierten Simulationsmodells einer Druckgießerei mit realen Wetterdaten und Strompreisen ermöglicht Aussagen über die Energiekosten und den Energiemix in verschiedenen Simulationsvarianten. Damit kann das Modell strategische Entscheidungen unterstützen und bewerten. Im Folgenden werden die einzelnen Teilmodelle näher erläutert.

3.1 Betriebsmodell

Das Modell basiert auf den Prinzipien der Energie- und Massenerhaltung und bildet den gesamten Produktionsprozess vom Schmelzen bis zum Gießen objektorientiert ab. Dabei werden Energie- und Materialflüsse gekoppelt betrachtet, während ein Steuermodul den Gesamtprozess regelt. Die Energieflüsse werden kontinuierlich simuliert, die Materialflüsse diskret. So werden die Berechnungen im Energiemodell auf Basis der inneren Energie des verarbeiteten Metalls durchgeführt. Dies ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Auf der Grundlage dieser Berechnung ermittelt das Modell die aktuelle Temperatur und löst die Differentialgleichungen für die Masse des flüssigen und festen Metalls. Im diskreten Teil des Modells wird in jedem Simulationsschritt geprüft, ob bestimmte Ereignisse eingetreten sind. Gegebenenfalls werden dementsprechend Prozesse ausgelöst.

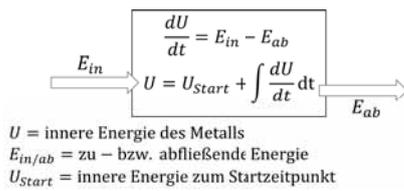


Abbildung 2: Innere Energie des verarbeiteten Metalls.

Das Modell besteht abhängig vom simulierten Betrieb aus verschiedenen Simulationsobjekten, deren Eigenschaften im Laufe der Simulation entsprechend der Simulationsparameter verändert werden.

3.2 Energiebereitstellungsmodell

In der Simulation wird nur der für den Betrieb der Schmelzöfen benötigte Strom berücksichtigt. Dieser wird in jedem Simulationsschritt durch Addition der von jedem Schmelzofen benötigten Energie, sowie der auftretenden Wärmeverluste, bestimmt. Die somit für den Betrieb benötigte elektrische Energie kann im Simulationsmodell auf drei Arten bereitgestellt werden:

1. elektrische Energie aus der PV-Anlage
2. elektrische Energie aus dem Batteriespeicher
3. elektrische Energie vom Spotmarkt

Die Reihenfolge der Nutzung dieser Energiequellen ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt:

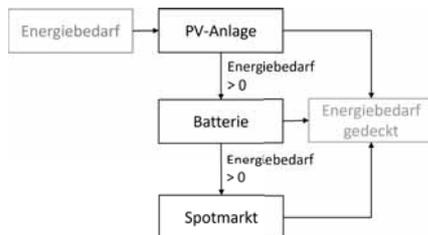


Abbildung 3: Reihenfolge des Strombezuges.

Die verschiedenen Quellen werden im Folgenden näher erläutert.

Elektrische Energie aus PV-Anlage. Abhängig von den spezifischen Anlagendaten und dem hinterlegten Betriebsstandort wird der Ertrag der PV-Anlage mit Hilfe der Wetterdaten aus dem Projekt duett [9] berechnet, das seit Anfang 2024 stündliche Daten in einer örtlichen Auflösung von 2x2 km für ganz Deutschland anbietet.

Batteriespeicher. Der Stromspeicher wird geladen, wenn mehr PV-Strom produziert wird, als der Betrieb aktuell benötigt, oder entladen, wenn mehr Strom benötigt wird, als aktuell produziert wird. Die Stromspeicherung ist mit einem gewissen Wirkungsgrad verbunden.

Spotmarkt. Kann der Energiebedarf nicht aus dem aktuell erzeugten Strom und dem Speicher gedeckt werden, wird die Differenz am Spotmarkt der European Power Exchange (EPEX SPOT) zugekauft.

3.3 Kostenmodell

Die Ausgaben für PV-Anlage und Batteriespeicher werden über lineare Abschreibungen für Anschaffungs- und Betriebskosten berechnet. Der zugekaufte Strom vom Spotmarkt geht entsprechend des aktuellen Preises im Zeitschritt und der benötigten Menge in die Gesamtkosten ein. Entsprechend setzen sich die Kosten P für die benötigte Energie in jedem Simulationsschritt aus fixen und variablen Kosten nach Formel 1 zusammen:

$$P = \frac{P_{Anschaffung} + P_{Betrieb}}{T} + P_{Spot} \quad (1)$$

$P_{Anschaffung}$	= Anschaffungskosten
$P_{Betrieb}$	= erwartete Betriebskosten
T	= erwartete Lebensdauer
P_{Spot}	= Stromkosten des Börsenstroms

4 Simulationsstudie

Um das Potential des Modells zu untersuchen, werden der jeweilige Strommix und die daraus resultierenden Stromkosten einer Produktion mit vier Gießeinheiten und identischem Produktionsplan unter Variation von Batteriespeicherkapazität (4.1), max. Leistung der PV-Anlage (4.2) und des geographischen Standortes (4.3) untersucht. Die durchgeführten Simulationen betrachten jeweils einen identischen Betriebstag (24h). Die Referenzkonfiguration für alle Studien stellt ein Betrieb mit einer 1 MW_p PV-Anlage und 320 kWh Speicherkapazität in Nürnberg dar. Ziel dieser Simulationsstudien ist es, die Einsatzmöglichkeiten des entwickelten Modells zu zeigen.

4.1 Variation der Speicherkapazität

Die erste Teilstudie untersucht den Einfluss der Speicherkapazität. Diese wird in vier Abstufungen zwischen

0 und 640 kWh variiert. Abbildung 4 zeigt den jeweils resultierenden Energiemix und die damit zusammenhängenden Kosten.

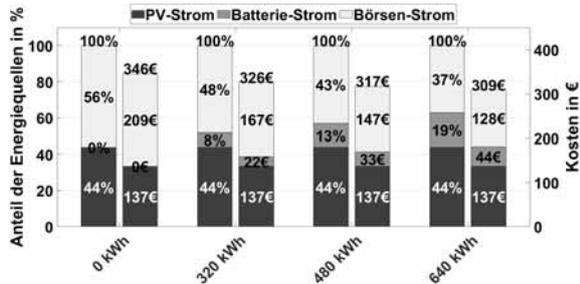


Abbildung 4: Strommix und -kosten für verschiedene Speicherkapazitäten.

In der durchgeführten Studie sinken die Gesamtkosten mit zunehmender Speicherkapazität, da ein größeres Speichervolumen mit geringeren Zusatzkosten verbunden ist, als der Strombezug am Spotmarkt. Das Ausmaß dieses Effekts hängt von den Investitionskosten des Speichers, sowie den Spotmarktpreisen im betrachteten Zeitraum, ab. Dementsprechend können Studien dieser Art im Falle einer bestehenden PV-Anlage eine Entscheidungshilfe für die optimale Dimensionierung einer Neu- oder Ersatzinvestition in einen Batteriespeicher darstellen.

4.2 Variation der PV-Anlage

Diese Simulationsstudie untersucht den Einfluss der PV-Anlagengröße. Diese wird in vier Abstufungen zwischen 100 kWp und 2 MWp variiert. Abbildung 5 zeigt den jeweils resultierenden Energiemix und die damit zusammenhängenden Kosten.

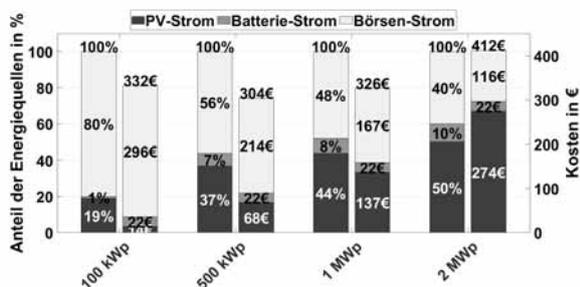


Abbildung 5: Strommix und -kosten für verschiedene PV-Anlagengrößen.

Obwohl die Konfiguration mit der größten PV-Anlage den meisten PV-Strom produziert, kann mit einer kleineren PV-Anlage (500 kWp) kostengünstiger produziert werden. Dies ist auf die begrenzte Speicherkapazität und die Produktion während der Nachtstunden zurückzuführen.

4.3 Variation des Standortes

Abschließend wird der Standort der Fabrik zwischen Bremen (BRE), Leipzig (LPZ), Frankfurt am Main (FRA) und Nürnberg (NBG) variiert. Simuliert wird mit der optimalen Konfiguration aus Simulationsstudie 4.2, also einer 500 kWp PV-Anlage und 320 kWh Speicherkapazität. Abbildung 6 zeigt den jeweils resultierenden Energiemix und die damit zusammenhängenden Kosten.

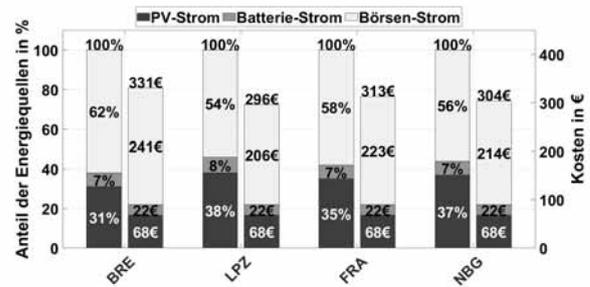


Abbildung 6: Strommix und -kosten für verschiedene Produktionsstandorte.

Die Studie zeigt, dass sich der Energiemix und die Energiekosten für ansonsten identische Betriebe an verschiedenen Standorten zum Teil signifikant unterscheiden können. Dies ist auf die unterschiedliche Sonneneinstrahlung und den daraus resultierenden unterschiedlichen PV-Ertrag zurückzuführen. Daraus lässt sich ableiten, dass optimale Anlagenkonfigurationen vom Standort des Betriebes abhängen, der daher im Simulationsmodell zu berücksichtigen ist. Die Unterstützung bei der Standortwahl ist ein weiteres potenzielles Anwendungsgebiet für solche Modelle. Für eine fundierte Aussage zur Standortwahl muss jedoch ein längerer Zeitraum simuliert werden.

5 Diskussion

Die wesentlichen Vorteile des hier beschriebenen Modells liegen vor allem in seinem flexiblen Aufbau und

in der Einbeziehung von realen Daten. Durch die flexible Modellgestaltung ist das Modell für eine Vielzahl von Anwendungen geeignet. Da das Modell mit realen Daten für Wetter und Strompreise simuliert, können auch zeit- und standortspezifische Einflussfaktoren in der Simulation berücksichtigt werden. Die vorgestellten Teststudien zeigen bereits exemplarisch die Einsatzfähigkeit des Modells für unterschiedlichste Anwendungen. So kann beispielsweise mit Hilfe des Modells für eine bestehende PV-Anlage ein optimal dimensionierter Speicher ermittelt werden und umgekehrt. Auch eine optimale Auslegung beider Komponenten lässt sich durchführen. Darüber hinaus berücksichtigt das Modell die spezifischen Wetterdaten, weshalb es sich flexibel für unterschiedliche Standorte anwenden lässt. Das Modell kann als Hilfestellung für die strategische Investitionsplanung, die Wirtschaftlichkeitsbewertung von Änderungen im Produktionsplan oder auch die Standortwahl genutzt werden. Da auch die spezifischen Anschaffungskosten im Modell variiert werden können, kann es auch zur Ermittlung derjenigen Grenzkosten, ab denen sich eine Investition lohnt, verwendet werden.

Da ein Simulationsmodell jedoch immer ein vereinfachtes Abbild der Realität darstellt, ist die Validierung anhand realer Daten eine wichtige Komponente, um die Aussagekraft eines Modells zu bestätigen. Aufgrund des Mangels an bereits elektrifizierten Gussbetrieben kann dies für das vorliegende Modell derzeit nicht erfolgen. Die aktuelle Validierung basiert daher auf Energiebilanzen und dem Vergleich mit einem bereits validierten Modell einer konventionellen Druckgießerei [3].

6 Ausblick

Perspektivisch soll das hier beschriebene Modell genutzt werden, um mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen möglichst optimale Anlagenkonfigurationen und Produktionszeitpunkte für spezifische Betriebe zu ermitteln. Zudem kann das Modell aufgrund des flexiblen Aufbaus in viele Richtungen erweitert werden. Neben dem Einsatz in der operativen Produktionsplanung, soll insbesondere ein Einsatz in der strategischen Betriebsauslegung in weiteren Arbeiten näher untersucht werden. Darüber hinaus kann das Smart Grid Modell mit geringem Aufwand auch auf andere industrielle Anwendungsbereiche übertragen werden. Dazu ist lediglich ein Lastprofil des neuen Anwendungsfalles notwendig.

Literatur

- [1] Statistisches Bundesamt. *Statistischer Bericht - Umwelt-ökonomische Gesamtrechnungen (UGR) - Energiegesamtrechnung - 2010 bis 2021*. 2023. Abgerufen am 13. Mai 2024 von <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/energiefluesse-emissionen/Publikationen/Downloads/statistischer-bericht-ugr-energiegesamtrechnung-5850014217005.html>.
- [2] Dettelbacher J, Schlüter W, Buchele A. *Simulative Analyse der nachhaltigen Transformation von Gussbetrieben*. In: Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger, editors. *Simulation in Produktion und Logistik 2023*. Ilmenau, 2023. <https://doi.org/10.22032/DBT.57476>
- [3] Schlüter W, Henninger M, Buswell A, Schmidt J. Schwachstellenanalyse und Prozessverbesserung in Nichteisen-Schmelz- und Druckgussbetrieben durch bidirektionale Kopplung eines Materialflussmodells mit einem Energiemodell. In: Wenzel und Peter, editors *Simulation in Produktion und Logistik 2017*, Kassel, 2017.
- [4] Hiller T, Mayerhoff J, Nyhuis P. Energy Costs in Production Planning and Control: A Categorical Literature Review and Comparative Analysis. *Journal of Production Systems and Logistics 2021*. Hannover 2021. <https://doi.org/10.15488/11126>
- [5] Ewering C, Siebert R, Wortmann F, Youssef A. Process control with volatile electricity prices. *2014 5th International Renewable Energy Congress (IREC)*; Hammamet, Tunisia, 2014, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/IREC.2014.6827005>
- [6] Schultz C, Braun S, Braunreuther S, Reinhart G. Integration of Load Management into an Energy-oriented Production Control. *Procedia Manufacturing*. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.017>
- [7] Willeke S, Prinzhorn H, Stonis M, Nyhuis P. Preconditions for applying an energy price-oriented sequencing rule. *Prod. Eng. Res. Devel.* 12, 73–81 2018. <https://doi.org/10.1007/s11740-017-0782-z>
- [8] Roesch M, Linder C, Zimmermann R, Rudolf A, Hohmann A, Reinhart G. Smart Grid for Industry Using Multi-Agent Reinforcement Learning. *Applied Sciences*. 2020; 10(19):6900. <https://doi.org/10.3390/app10196900>
- [9] Deutscher Wetterdienst. 2024. Verfügbar unter: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/hourly/duett/radiation_global/recent/