

Prozess zur modellbasierten Analyse und Optimierung elektrischer Energiesysteme

Veronika Barta*, Carolin Vogel*, Marcel Eggemann*,

Stephanie Uhrig, Simon Schramm

Hochschule München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lothstr. 64, D - 80335 München, +49 89 1265-3416, barta@hm.edu & timeless@ee.hm.edu, www.hm.edu

Kurzfassung:

Die steigende Komplexität elektrischer Energiesysteme sowie sich ändernde Rahmenbedingungen erfordern neue Ansätze der Systemanalyse, um Ziele wie die Reduzierung der CO₂-Emissionen zu erreichen. In diesem Paper wird ein vorläufiger Prozess zur modellbasierten Analyse und Optimierung von elektrischen Energiesystemen vorgestellt, der sich derzeit noch in der Entwicklung befindet und in Details noch weiter ausgearbeitet wird. Im Unterschied zu anderen Analyseansätzen wird dabei die gesamte bereits vorhandene Infrastruktur des Systems berücksichtigt. Der Prozess ist in drei Schwerpunkte gegliedert: die Datenerfassung, die Modellierung und Simulation des Systems und die Bewertung der Simulationsergebnisse. Dabei wird Wert gelegt auf die Übertragbarkeit der einzelnen Teilschritte und damit des gesamten Prozesses auf unterschiedliche Energiesysteme. Der Prozess verfolgt einen partizipativen Ansatz, das heißt er basiert auf einer engen Absprache mit dem jeweiligen Systembetreiber und dessen Zielsetzungen.

Keywords: Energiesysteme, Analyse, Optimierung, Modellierung

1 Kontext und Zielsetzung

Kaum ein Energiesystem, sei es ein kleiner Industriebetrieb oder eine ganze Gemeinde, wird energetisch gesehen in seinem Optimum betrieben oder dahingehend ausgebaut. Gründe dafür sind, dass jedes Energiesystem durch seine lokalen Gegebenheiten, entsprechend seiner bestehenden Infrastruktur, seiner Systemkomponenten sowie Interaktionen mit benachbarten Systemen individuelle Eigenschaften aufweist. Systembetreiber, die das energetische Verhalten ihres komplexen Systems hinsichtlich des Verbrauchs und der Erzeugung optimieren möchten, benötigen oft Expertenwissen und Detailanalysen, um Verbesserungspotenziale zu identifizieren.

Mit Analysen von Energiesystemen setzen sich bereits mehrere Projekte auseinander. Das Projekt RE³ASON [1] untersucht städtische Energiesysteme, wohingegen das europäische Projekt iTesla [2] [3] ein gesamtes, länderübergreifendes Synchronnetz modelliert. Andere Projekte betrachten einzelne Technologien, wie beispielsweise die Optimierung des reinen Energieverbrauchs von Gebäuden mit Solarfassaden durch intelligentes Energiemanagement [3]. Die Ansätze reichen von eigens programmierten Tools [1] über diverse bestehende Programme, wie zum Beispiel TRNSYS, ein modular aufgebautes, transientes Simulationsprogramm [4] oder HOMER Pro ® zur Optimierung von Microgrids [5]. Es gibt Programme, die einzelne Aspekte eines Energiesystems betrachten, wie beispielsweise eine reine Photovoltaik-Modellierung, aber nicht unter Berücksichtigung der gesamten,

bestehenden Infrastruktur. Viele Energie-Simulationstools basieren auf integrierten, geschlossenen Modellbibliotheken, die nicht nach spezifischen Vorstellungen angepasst werden können [6]. Dies schränkt die Möglichkeiten der individuellen Anpassungen ein. Unter anderem T. Rabuzin [6] beklagt sich über häufig fehlende Dokumentationen und eine mangelnde Transparenz der Berechnungsroutinen.

Der vorgestellte Prozess soll helfen, eine übertragbare Methodik zur Analyse zu finden und die Vielfalt der Optimierungsmöglichkeiten zu bewerten. Die Bewertung erfolgt unter Einbeziehung der Präferenzen des Systembetreibers. Dabei werden die individuellen Gegebenheiten des Energiesystems wie beispielsweise die bestehende Infrastruktur oder vorhandene Ausbaupotentiale bei der Integration neuer Technologien berücksichtigt. Die Übertragbarkeit des Prozesses hilft Ressourcen und Aufwand zu sparen, indem nicht jede Optimierungsaufgabe separat, sondern unter Berücksichtigung gewonnener Erkenntnisse durchgeführt wird. Die Entwicklung eines geeigneten modellbasierten Prozesses ist Teil des Projektes TIMELESS.

2 Methodisches Vorgehen

Anhand eines Referenzsystems soll der Prozess zur modellbasierten Analyse von elektrischen Energiesystemen erarbeitet werden. Das Referenzsystem soll hinsichtlich verschiedener Zielsetzungen optimiert werden, die aus den individuellen Präferenzen des Systembetreibers abgeleitet werden. Mit Hinblick auf die Erarbeitung eines umfassenden Prozesses wurde die Bio-Bäckerei Gürtner als Referenzsystem gewählt. Bei der Bio-Bäckerei handelt es sich um ein Energiesystem, das über alle Komponenten eines gängigen Energiesystems verfügt. Dazu gehören Verbraucher, Erzeuger sowie Flexibilitäten, beispielsweise zeitlich flexible Lasten oder Speicher.

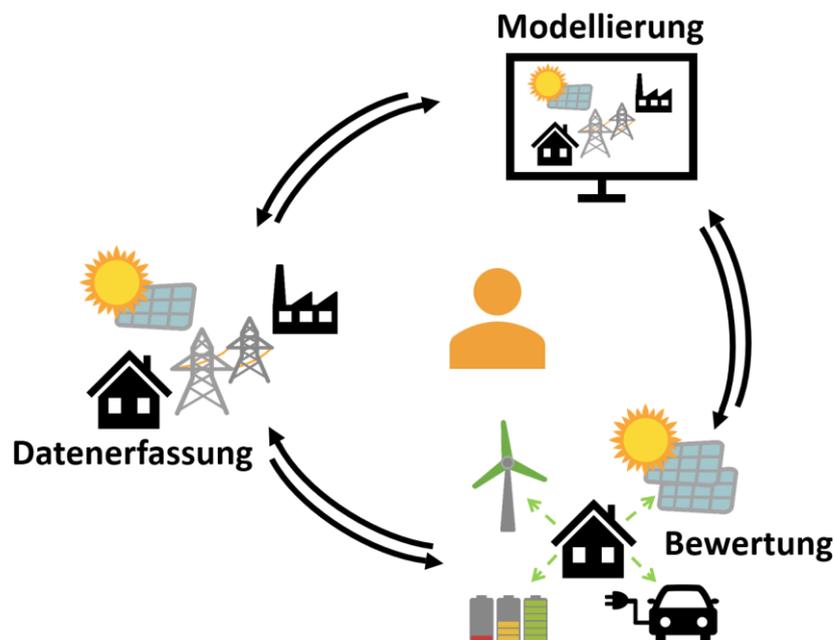


Abbildung 1: Methodisches Vorgehen zur Entwicklung eines übertragbaren Analyseprozesses.

Die Entwicklung des Prozesses erfolgt in einzelnen Arbeitsschritten, die sich aus dem zeitlichen Ablauf der Analyse, von der Ist-Zustandserfassung bis hin zur Optimierung, ergeben. Die folgenden drei Arbeitsschritten entstehen (vgl. Abbildung 1):

1. Erfassung aller für die Analyse notwendigen Daten,
2. Modellierung und Simulation des Systems auf Grundlage dieser Daten und
3. Bewertung der Simulationsergebnisse zur Identifikation von Optimierungspotentialen.

Um einen übertragbaren Prozess zu erhalten, der individuell auf jegliche Energiesysteme angewendet werden kann, werden die anhand des Referenzsystems entwickelten Schritte abstrahiert und allgemeingültig dokumentiert. Neben der Ausarbeitung der drei genannten Teilprozesse liegt ein Augenmerk auf den gegenseitigen Abhängigkeiten dieser. Es wird untersucht, welche Schnittstellen zwischen den Arbeitspaketen notwendig sind, um den Analyseprozess übertragbar zu gestalten.

3 Ergebnisse

3.1 Ablauf der Prozessgenerierung

Um Abhängigkeiten der einzelnen Arbeitspakete voneinander zu identifizieren, erfolgt die folgende Betrachtung entgegen dem eigentlichen zeitlichen Ablauf: Ausgehend von der Systembewertung anhand möglicher Zielfunktionen über die Modellierung bis hin zur Datenerfassung. Dabei werden Bedingungen und Schnittstellen, die die Arbeitspakete an einander stellen, ausgearbeitet.

3.1.1 Bewertung anhand der Zielfunktionen

Die Zielfunktionen ergeben sich aus den individuellen Zielen des Kunden und lassen sich in technische, energetische und ökonomische Zielfunktionen einteilen. Technische Zielfunktionen sind beispielsweise Anforderungen an die Netzqualität und eine optimale Auslastung der Infrastruktur. Energetische Zielfunktionen betreffen in jedem Energiesystem die Betrachtung von Erzeugungsleistung und Lasten über einen definierten Zeitraum sowie daraus resultierende Größen wie den Eigenverbrauch, CO₂-Ausstoß oder den angestrebten Autarkiegrad. Ökonomische Ziele berücksichtigen unter anderem laufende Kosten, Investitionskosten oder den Flächenbedarf betrachteter Ausbauoptionen, der die zu Verfügung stehenden Ausbauflächen nicht überschreiten darf.

Da es in einem komplexen System selten ein absolutes Optimum hinsichtlich mehrerer Ziele einstellt, werden die Abhängigkeiten als Zielfunktionen dargestellt. Die Zielfunktionen sind in einer mathematischen Vorschrift definiert, sodass sie unabhängig von der genutzten Modellierungsumgebung gültig sind. Dies ermöglicht eine Implementierung unabhängig von einer bestimmten Modellierungs-Plattform. Die zur Berechnung der Zielfunktionen notwendigen Eingangsdaten sind durch die jeweilige Zielfunktion festgelegt, und können aus Zeitreihen über den betrachteten Zeitraum abgeleitet werden. Es gibt sowohl mit- als auch gegenläufige Zielfunktionen. Sie können von der Änderung bestimmter Eingangsgrößen in gleicher Richtung beeinflusst werden oder sich genau gegensätzlich verhalten.

Die Gegenüberstellung der mit- beziehungsweise gegenläufigen Zielfunktionen kann dem Kunden die Gewichtung der einzelnen Zielfunktionen gegebenenfalls erleichtern. Betrachtet

man die Zusammenhänge der einzelnen Funktionen zu Beginn eines Analyseprozesses, können beispielsweise miteinander zu vereinbarende Zielfunktionen in den Fokus der Analyse gelegt oder einzelne Zielfunktionen von der Betrachtung ausgeschlossen werden. Abbildung 2 veranschaulicht beispielhaft die Zusammenhänge der Zielfunktionen der Bio-Bäckerei. Hier sind mitläufige Funktionen mit einem '+' gekennzeichnet, gegenläufige mit einem '-'. Für die mit '0' gekennzeichnete Funktionenpaare konnten keine eindeutigen Zusammenhänge identifiziert werden.

	Laufende Kosten [€]	Kosten Strombezug [€]	Kosten eigene Erzeugung [€]	Investitionskosten [€]	CO ₂ Emissionen [kg]	Autarkie [%]	Eigenverbrauchsanteil [%]	Eigene Erzeugung [kWh]	Strombezug [kWh]
Laufende Kosten [€]		+	+	0	+	+	0	+	+
Kosten Strombezug [€]	+		0	0	+	+	+	+	+
Kosten eigene Erzeugung [€]	+	0		-	-	-	0	-	0
Investitionskosten [€]	0	0	-		-	-	0	-	0
CO ₂ Emissionen [kg]	+	+	-	-		+	+	+	+
Autarkie [%]	+	+	-	-	+		0	+	+
Eigenverbrauchsanteil [%]	0	+	0	0	+	0		-	+
Eigene Erzeugung [kWh]	+	+	-	-	+	+	-		-
Strombezug [kWh]	+	+	0	0	+	+	+	-	

Abbildung 2: Beispieldarstellung mit- und gegenläufiger Zielfunktionen.

Zunächst wird der Schwerpunkt auf die technischen Ziele gesetzt, so dass Leitungsparameter und Grenzwerte, wie Maximalströme, in der Modellierung berücksichtigt werden können. Durch die entsprechende Parametrierung der Simulation können diese Ziele direkt berechnet werden. Im nächsten Schritt werden die energetischen Zielfunktionen betrachtet und die dafür benötigten Eingangsdaten bestimmt. Diese Größen sind unter anderem Knotenspannungen, Leistungsverläufe und Energien. Die Berechnung der Zielfunktionen erfolgt somit abgekoppelt von dem Modell des Energiesystems und den Simulationen. Die ökonomischen Ziele benötigen neben den energetischen Größen weitere externe Eingangsparameter, die teilweise kundenspezifisch sind, wie zum Beispiel der Stromtarif, und teilweise allgemeingültig, wie der Flächenbedarf pro Watt-Erzeugungsleistung.

3.1.2 Modellierung und Parametrierung

Um die Übertragbarkeit des Prozesses sicherzustellen, werden Modelle für einzelne Komponenten eines Energiesystems entwickelt und validiert. Ziel ist es, eine Modell-Bibliothek der möglichen Komponenten zu schaffen, die als Grundlage für weitere Energiesystem-Modelle dienen kann. Ausgehend vom Modell des IST-Zustands, werden abhängig von den Kundenzielen die entwickelten Szenarien modelliert und berechnet. Dazu müssen Modelle des IST-Zustands vor der Simulation neu parametrieren werden, wie beispielsweise beim Ausbau

einer Bestandsanlage, oder neue Modelle müssen eingebunden werden, wie zum Beispiel beim Neubau einer Erzeugungsanlage.

Im Mittelpunkt der Modellierung steht das Infrastrukturmodell, welches die vorhandene Infrastruktur des Energiesystems widerspiegelt. Es besteht grundsätzlich aus Leitungsblöcken, sowie den angeschlossenen Komponenten. Daher gehört zum Infrastrukturmodell eine abstrahierte Darstellung der Elektroinstallation mit Kenngrößen, wie beispielsweise die Länge und die Leitungsbeläge jeder Leitung. Um das Modell flexibel auf andere Energiesysteme anpassen zu können, werden die Schnittstellen zwischen dem Leitungsmodell und der angeschlossenen Komponente festgelegt. Für diese Komponenten sind die Ausgangsgrößen bereits durch die Zielfunktionen festgelegt. Die Modellierung der Komponente kann jedoch abhängig von der Datengrundlage variieren. Es besteht die Möglichkeit, beispielsweise eine Photovoltaikanlage als eigenes Erzeugermodell anhand von Einstrahlungsdaten und Anlagenparameter zu erstellen oder eine gemessene Leistungszeitreihe zu hinterlegen.

Um die Komponentenmodelle direkt zur Modellierung eines anderen Energiesystems verwenden zu können, müssen externe Daten wie Messdaten einheitlich aufbereitet sein. Das bedeutet, dass sowohl der Dateityp an sich als auch die inhaltliche Struktur der Datei selbst einheitlich vorgegeben sein müssen. Jeder Modellblock hat seine eigenen Anforderungen an die Eingangsgrößen.

3.1.3 Erfassung der notwendigen Systemdaten

So wie die Ausgangsgrößen der Simulation durch die Eingangsgrößen der Zielfunktionen bestimmt werden, legen die notwendigen Eingangsdaten des Modells die zu erfassenden Daten des Energiesystems fest. Anhand der Modell-Bibliothek wird definiert, welche Eingangsgrößen das jeweilige Komponentenmodell fordert. Je nach Art der Modellierung einer Komponente variieren diese Eingangsgrößen. Hat das Energiesystem eigene regenerative Erzeuger gibt es wie zuvor beschrieben zwei Optionen. Entweder werden direkt Leistungsdaten gemessen oder es werden die Anlagenparameter erfasst und Wetterdaten gemessen oder anderweitig bezogen. Jedes Energiesystem ist am Netzanschlusspunkt mit dem übergeordneten Energienetz verbunden. An dieser Stelle können Lastgangdaten (Residuallast) vom Netzbetreiber bezogen werden. Die Lastgangdaten des Netzbetreibers, welche in der Regel in einer Auflösung von 15 Minuten zur Verfügung stehen, können für eine erste Voranalyse genutzt werden um eine angestrebte Leistungsbegrenzung und kritische Zeiträume zu ermitteln.

Neben den für die Modellierung des IST-Zustands relevanten technischen Daten, werden abhängig von den Szenarien und Zielfunktionen weitere externe Daten benötigt. Um den Ausbau einer Komponente zu simulieren, müssen neben technischen Aspekten auch die Potentiale der örtlichen Gegebenheiten berücksichtigt werden. Beispielsweise muss bekannt sein welche Ausbaufächen zur Verfügung stehen. Ergänzende Daten zur Bewertung von ökonomischen Zielen liefert der Stromtarif. Darin enthalten sind unter anderem der zu zahlende Grundpreis, Arbeitspreis und der Leistungspreis sowie die Erzeugungsart und damit die CO₂-Emissionen pro bezogener Kilowattstunde. Diese Daten variieren von Energiesystem zu Energiesystem. Dagegen müssen systemübergreifende Daten wie der Flächenbedarf pro Leistung einzelner Systemkomponenten einmalig erfasst und hinterlegt werden.

3.2 Zeitlicher Ablauf des Prozesses

Aus dem unter 3.1 beschriebenen Prozessgenerierung ergibt sich eine Abhängigkeit der Arbeitspakete zueinander. Dieser Einfluss findet sich im Prozess (vgl. Abbildung 3) wieder. Der gesamte Prozess beschreibt sowohl den zeitlichen Ablauf als auch den Einfluss des Kunden (vgl. Abbildung 3 ‚Orange‘) auf die Analyse und die Ausgangsgrößen der Schnittstellen.

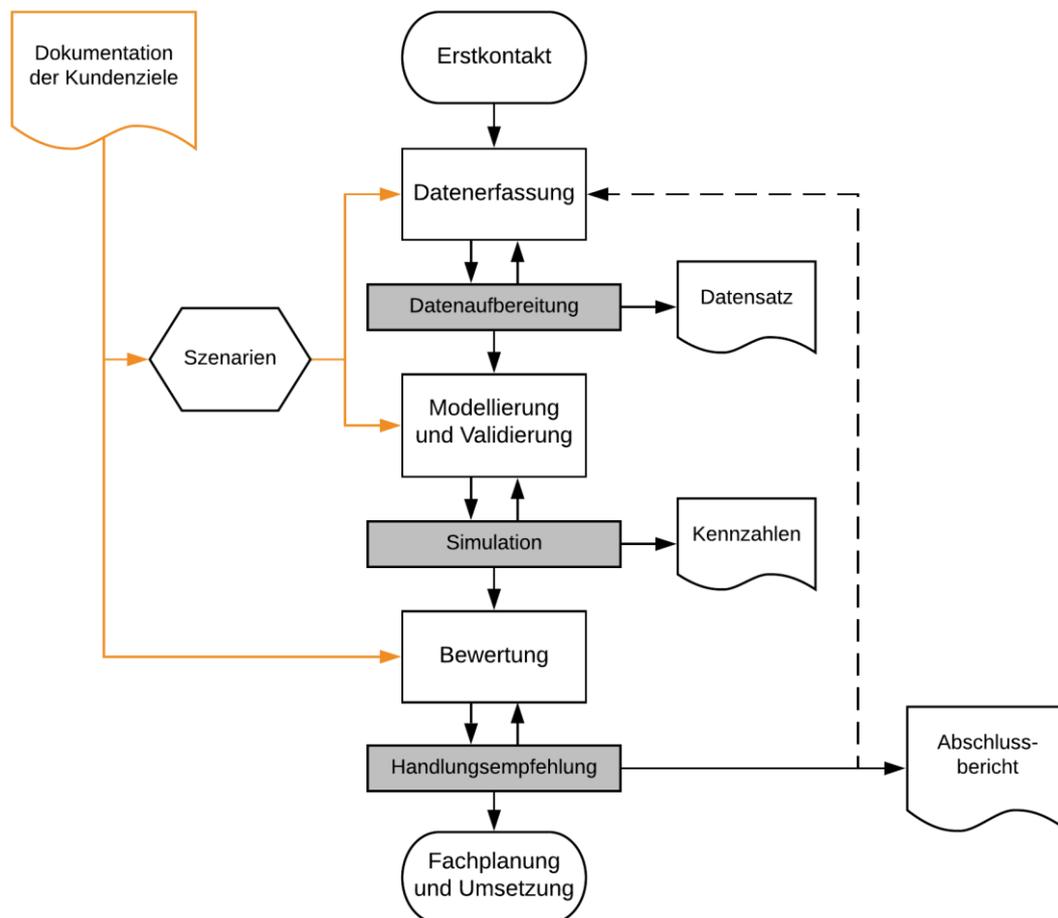


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Prozesses zur individuellen Analyse elektrischer Energiesysteme unter direkter Einbindung des Kunden.

Die Analyse beginnt mit dem Erstkontakt mit dem Kunden. Gemeinsam werden die Anforderungen und Erwartungen anhand der konkreten Ziele und individuellen Präferenzen formuliert und Zielfunktionen aus ihnen abgeleitet. Anhand der Kundenziele werden die zu simulierenden Szenarien ausgewählt. Die Szenarien bestimmen, welche Systemkomponenten modelliert und damit welche Daten erfasst werden müssen. Auf Basis der Voranalyse ergeben sich weitere Komponenten, deren Daten detaillierter aufgenommen werden. Alle Daten werden in dem standardisierten Format für die Modellierung aufbereitet. Der resultierende Datensatz umfasst alle zur Modellierung des IST-Zustands und verschiedener Szenarien notwendigen Informationen.

Aus der messtechnischen IST-Zustandserfassung, inklusive zeitlich korrelierter Informationen relevanter Verbraucher und Erzeuger, ist ein weiterer unabhängiger Datensatz bekannt.

Dieser wird nach der Modellierung des IST-Zustands mit den Simulationsergebnissen verglichen. Die daraus resultierenden Zielfunktionen, wie zum Beispiel Strombezug, Stromerzeugung und laufende Kosten werden mit den Kundendaten verifiziert. Dies ermöglicht die Validierung des IST-Zustand-Modells. Das validierte Modell wird entsprechend der Szenarien für die verschiedenen Simulationsdurchläufe abgewandelt und parametrisiert. Ausgegeben werden die Kennzahlen der Zielfunktionen für jeden einzelnen Durchlauf.

Kennzahlen ermöglichen eine einheitliche Bewertung der Szenarien. Darunter fällt beispielsweise eine Kosten-Nutzen-Analyse, um die Szenarien zu priorisieren. Aus den Ergebnissen der Bewertung wird eine Handlungsempfehlung generiert. Damit werden dem Kunden konkrete Maßnahmen zur Umsetzung vorgeschlagen. Ein umfassender Abschlussbericht enthält alle relevanten Daten der Analyse der IST-Zustands bis hin zur Darstellung aller Szenarien und deren Bewertung. Dies markiert das Ende des Prozesses.

Im Anschluss an den Prozess hat der Kunde die Möglichkeit anhand der Handlungsempfehlung Maßnahmen ganz oder teilweise umzusetzen, um sein Energiesystem zu optimieren. Durch diese Veränderungen ergibt sich ein neuer IST-Zustand des gesamten Energiesystems, welcher erneut analysiert, bewertet und optimiert werden kann. Da es sich zumeist um inkrementelle Veränderungen handelt, erhöht sich die Durchlaufgeschwindigkeit bei einer erneuten Anwendung des Prozesses auf das gleiche Energiesystem erheblich. Es ist eine große Datengrundlage vorhanden, sodass lediglich einzelne Daten erneut oder zusätzlich erhoben werden müssen.

4 Weiteres Vorgehen

Am Referenzsystem der Bio-Bäckerei wurde dieser hier beschriebene Prozess erarbeitet und es konnten bereits erste Optimierungspotentiale identifiziert werden. Die Ergebnisse sind unter ‚Identifizierung von Optimierungspotentialen in elektrischen Energiesystemen anhand von Last- und Erzeugungsprofilen‘ [8] nachzulesen. Eine zukünftige Fragestellung ist das Prüfen der Übertragbarkeit des Prozesses, sowie dessen Verfeinerung. In den Details liegen kommende Herausforderungen. Beispielsweise muss die Anwendbarkeit der Zielfunktionen auf diverse Energiesysteme, der notwendige Detailgrad in der Modellierung sowie der Einfluss der Abstrakte der Eingangsdaten auf die Genauigkeit der Ausgangsdaten untersucht werden.

5 Zusammenfassung

Der vorgestellte Prozess bietet eine übertragbare, strukturierte Methodik zur modellbasierten Analyse und Optimierung elektrischer Energiesysteme. Dabei erfolgt eine Aufteilung in drei Arbeitsschritte:

1. Der erste Schritt „Datenerfassung“ beinhaltet die Voranalyse auf Basis von Lastgangdaten, die Erfassung aller Systemdaten, abhängig von gewählten Kundenzielen und Szenarien sowie die Aufbereitung dieser Daten.
2. Als zweiten Schritt „Modellierung“ wird das Energiesystem auf Grundlage dieser Daten nachgebildet. Nach der Validierung des modellierten IST-Zustands werden Systemvariationen und -erweiterungen simuliert.

3. Im dritten Schritt „Bewertung“ erfolgt eine Bewertung der Simulationsergebnisse hinsichtlich vordefinierter Zielfunktionen. Basierend auf der Bewertung werden konkrete Handlungsempfehlungen formuliert, die dem Kunden vorgelegt werden.

Der Prozess ist als iterativ zu betrachten, da sich nach Realisierung einer Handlungsempfehlung ein neuer IST-Zustand ergibt. Aufgrund der vorhandenen Datengrundlage des ersten Durchlaufs, wird bei einem erneuten Durchlauf Zeit gespart.

6 Danksagung

Die Autoren danken Herrn Gürtner und seinen Mitarbeitern für die Bereitschaft, seine Bio-Bäckerei als Referenz zur Verfügung zu stellen, für die Bereitstellung der notwendigen Informationen und die Möglichkeit dort umfangreiche Messungen durchzuführen. Herrn Dr. Wolfgang Christl, Beauftragter für Innovation und Technologie der Handwerkskammer für München und Oberbayern, danken die Autoren für Informationen und Impulse zu diesem Projekt.

7 Literatur

- [1] K. Mainzer, „Analyse und Optimierung urbaner Energiesysteme - Entwicklung und Anwendung eines übertragbaren Modellierungswerkzeugs zur nachhaltigen Systemgestaltung“, *Karlsruher Inst. Für Technol. KIT*, 2019.
- [2] M. Baudette, M. Castro, T. Rabuzin, J. Lavenius, T. Bogodorova, und L. Vanfretti, „OpenIPSL: Open-Instance Power System Library — Update 1.5 to “iTesla Power Systems Library (iPSL): A Modelica library for phasor time-domain simulations”“, *SoftwareX*, Bd. 7, S. 34–36, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.softx.2018.01.002.
- [3] M. Zhang, M. Baudette, J. Lavenius, S. Løvlund, und L. Vanfretti, „Modelica Implementation and Software-to-Software Validation of Power System Component Models Commonly used by Nordic TSOs for Dynamic Simulations“, gehalten auf der The 56th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 56), October, 7-9, 2015, Linköping University, Sweden, 2015, S. 105–112, doi: 10.3384/ecp15119105.
- [4] I. Papas, B. Estibals, C. Ecrepont, und C. Alonso, „Energy Consumption Optimization through Dynamic Simulations for an Intelligent Energy Management of a BIPV Building“, in *2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Paris, 2018, S. 853–857, doi: 10.1109/ICRERA.2018.8566915.
- [5] „TRNSYS - Official Website“. [Online]. Verfügbar unter: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/features.html>. [Zugegriffen: 21-Okt-2019].
- [6] „HOMER Pro - Microgrid Software for Designing Optimized Hybrid Microgrids“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>. [Zugegriffen: 21-Okt-2019].
- [7] T. Rabuzin, M. Baudette, und L. Vanfretti, „Implementation of a continuous integration workflow for a power system Modelica library“, 2017, S. 1–5, doi: 10.1109/PESGM.2017.8274618.
- [8] C. Vogel, M. Eggemann, V. Barta, S. Uhrig, und S. Schramm, „Identifizierung von Optimierungspotentialen in elektrischen Energiesystemen anhand von Last- und Erzeugungprofilen“, Jan. 2020.