

FINEconcepts - Wissenstransfer und Energiesystemoptimierung mithilfe des digitalen Zwillings

Klaus Markgraf, Benjamin Dietrich, Katja Müller, Robert Flassig, Peter Flassig

Technische Hochschule Brandenburg, Magdeburger Straße 50, 14770 Brandenburg an der Havel

Abstract

Climate change, but also geopolitical circumstances, are moving topics such as energy efficiency and renewable energies more and more into the focus of the population, economy, and politics. As a result, the will to optimize new and existing energy systems extends from private individuals to companies and even entire communities. This work describes the development and usage of a new software called FINEconcepts which creates a digital twin of an energy system. This virtual model can then be used to optimize the energy system based on annual costs, CO₂ emissions or other relevant criteria such as self-sufficiency. Because all system components, which include renewable technologies as well, can be added as a building block with chosen but changeable parameters, the software allows the user to explore and awaken interest and understanding of technologies that were previously considered too costly, irrelevant, or unrealistic. Implemented projects in small and large companies as well as in residential areas did prove, that the usage of FINEconcepts leads not only to more efficient energy systems by increasing the use of renewable energy, but also increased knowledge and understanding in terms of energy. Besides economics, ecology and security, understanding is an equally important factor in achieving a sustainable energy supply.

Keywords: Digitaler Zwilling, Energiesystemoptimierung, CO₂-Reduktion

1 Motivation

Durch den sich verschärfenden Klimawandel und immer komplexer werdende geopolitische Herausforderungen rücken Themen wie energetische Effizienz und erneuerbare Energien immer weiter in den Fokus. Für Bevölkerung, Wirtschaft und Politik ergibt sich daraus unter anderem die Notwendigkeit, bestehende und neue Energiesysteme zu optimieren.

Trotz umfassender Forschungen im Bereich des wirtschaftlichen und ökologischen Nutzens von erneuerbaren Technologien, existiert noch immer eine Divergenz zwischen Vorurteilen der Bevölkerung und Forschungsergebnissen (Radtke & Canzler, 2019). Um die daraus resultierende Hemmung der Energiewende zu lösen, müssen dem Verbraucher Einsatzpotenziale aktueller Technologien für bedarfsorientierte Zielstellungen auf breiter Ebene plausibel und zugänglich gemacht werden (Radtke & Canzler, 2019). Zu diesem Zweck werden immer häufiger Online-Tools veröffentlicht, welche dem Anwendenden Unterstützung bieten sollen. Aufgrund ihrer einfachen Bedienbarkeit, geben die Tools einen Einblick, sind jedoch für die Beratung zum Aufbau eines Energiesystems ungeeignet. Somit ergibt sich als Ziel des hier beschriebenen Projekts, Energiesysteme als digitalen Zwilling aufzubauen. Im Fokus liegt hier die effiziente Auslegung mithilfe

mathematischer Optimierung nach ausgewählten Aspekten. Dabei soll der Prozess gemeinsam mit dem Verbraucher stattfinden, Freiraum für Konfigurationen lassen und klare Ergebnisse liefern, um einen Wissenstransfer und Akzeptanz für die Optimierung von bestehenden und zukünftigen Energiesystemen zu schaffen.

2 Software

Zur Lösung der in Abschnitt 1 beschriebenen Herausforderung, bedarf es einer Software, welche es dem Anwendenden ermöglicht, intuitiv Erkenntnisse bei der selbstständigen Nutzung des Tools zu gewinnen. Dabei muss die Qualität der Ergebnisse hoch genug sein, um fundierte Entscheidungen treffen zu können.

Einen möglichen Lösungsansatz bietet das Framework FINE (engl.: Framework for Integrated Energy System Assessment), welches vom Institut für Energie- und Klimafor- schung im Forschungszentrum Jülich entwickelt wurde. Dieses ermöglicht den Aufbau eines virtuellen Energiesystems (FINE, o. D.). Hierzu sind jedoch interdisziplinäre Kom- petenzen sowohl im Bereich der Energiesystembilanzierung als auch in der Program- mierung notwendig, um Energieströme aller Energieformen sowie Stoff- und Material- ströme simulieren und optimieren zu können.

Im Zuge des Forschungsprojekts GREEN der Technischen Hochschule Brandenburg wurde die webbasierte Software FINEconcepts zur Optimierung ganzheitlicher Energie- systeme entwickelt (Technische Hochschule Brandenburg, o. D.). FINEconcepts er- möglicht das Erstellen von Systemkomponenten und deren Parametrisierung über eine grafische Benutzeroberfläche. Dabei werden alle Ströme innerhalb des Systems zeit- diskret mit einer stündlichen Auflösung betrachtet. Hierzu wird jeder Komponente, die sich durch einen zeitlich abhängigen Verbrauch/Ertrag auszeichnet, ein spezifischer Last-/Ertragsgang zugewiesen. Dies bietet die Möglichkeit, den zeitgenauen Verbrauch einer Senke mit den zu diesem Zeitpunkt zur Verfügung stehenden Quellen zu decken, und dabei stets ein optimales Energiesystem zu modellieren. Die Komplexität der Ener- giesysteme wächst mit der Anzahl ihrer Komponenten. Weiter besitzt jede einzelne Komponente eine Vielzahl technoökologischer und -ökonomischer Parameter, die di- rekten oder indirekten Einfluss auf das Energiesystem haben. Die gesteigerte Komple- xität bei umfangreichen Energiesystemen steht einer einfachen und intuitiven Bedie- nung entgegen. Somit wird der schmale Grat zwischen einem äußerst komplexen Pro- gramm mit nahezu unzähligen Möglichkeiten und einem intuitiv bedienbaren Programm mit eingeschränkten, aber dennoch individuellen Möglichkeiten, erkennbar. Ein Lö- sungsansatz hierfür wurde in der Software durch ein Bausteinprinzip realisiert. Dieses ermöglicht dem Anwendenden das Hinzufügen von initial parametrisierten Kompen- ten. Die Akquise der hierfür notwendigen Daten wird im folgenden Abschnitt erläutert.

3 Datenakquise

Damit FINEconcepts möglichst genaue Ergebnisse liefert und dem Anwendenden ver- deutlicht, dass sich das modellierte System identisch zum realen verhält, bedarf es einer Vielzahl von individuellen Daten, welche in die Berechnung mit einfließen müssen.

Am wichtigsten sind dabei die spezifischen Verbrauchsdaten des betrachteten Energie- systems, da diese ausschlaggebend für die zu installierenden Kapazitäten alternativer Energiequellen sind. Um das in Abschnitt 2 erwähnte Bausteinprinzip auch im Fall der Verbrauchsdaten vereinfacht anwenden zu können, wurde ein Standardlastprofil der

Kategorie H0 (Haushalt) genutzt, welches auf dem Bedarf elektrischer Energie in Berlin beruht (Netznutzer - Stromnetz Berlin, o. D.). Eine Variationsbreite für Jahresverbräuche wird durch Skalierung des Lastprofils erreicht. Abbildung 1 zeigt einen Lastgang, wobei das für Wohnquartiere charakteristische Badewannenprofil erkennbar ist. Dieses ergibt sich aus der Tatsache, dass in den Sommermonaten aufgrund erhöhter Aktivität im Freien und einem späteren Sonnenuntergang weniger Energie benötigt wird. Die Profile sind für unterschiedliche Standorte bei den ansässigen Netzbetreibern abrufbar. Da einzelne Wohnquartiere nicht ohne Weiteres einen spezifischen Lastgang beziehen können, bietet die Verwendung dieser Standardlastprofile einen adäquaten Ersatz mit ausreichender Genauigkeit. Zur Steigerung der Zuverlässigkeit berechneter Ergebnisse können diese Standardlastprofile stets durch individuell aufgezeichnete Lastgänge ersetzt werden.

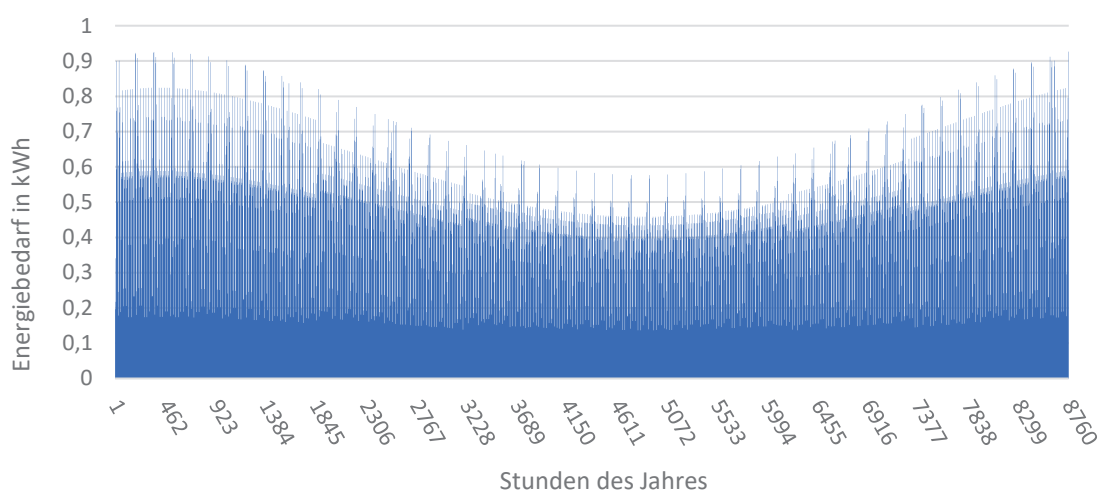


Abbildung 1: Stündlicher Lastgang eines Wohnquartiers mit einem jährlichen Bedarf von 3500 kWh (2022)

Bei der Energiesystemoptimierung von Unternehmen sollten ausschließlich spezifische Lastprofile verwendet werden, da aufgrund des unternehmensartabhängigen Energiebedarfs ein standardisiertes Profil zu sehr vom realistischen Bedarfsprofil abweicht. Spezifische Lastprofile können häufig durch die Datenerfassung des Netzbetreibers beschafft werden.

Neben dem Energiebedarf sind vor allem standortspezifische Wetterdaten für eine Energiesystemoptimierung wichtig. Diese geben Aufschluss, ob und wieviel Energie aus erneuerbaren Quellen für die Deckung einer Last zu einem spezifischen Zeitpunkt zur Verfügung stehen würde. Um möglichst präzise Vorhersagen für den Ertrag aus Sonnen- und Windenergie treffen zu können, greift FINEconcepts auf das Informationssystem PVGIS (Photovoltaik Geographical Information System) zu, welches vom Joint Research Center der Europäischen Kommission entwickelt wurde. Der in PVGIS integrierte Zugriff auf die Solareinstrahlungsdatenbank SARA-2 ermöglicht auf Grundlage historischer Daten eine Prognose der zur Verfügung stehenden Solarenergie in Abhängigkeit vom Standort, Azimut und Neigungswinkel (SARA-2 Solar Radiation Data, o. D.). Die daraus resultierenden Ertragsgänge werden innerhalb von FINEconcepts für jede Komponente separat erstellt und hinterlegt. Auch für windbasierte Technologien können Ertragsgänge mithilfe von PVGIS erstellt werden, wobei jedoch die CDC-Datenbank des Deutschen Wetterdienstes genauere Werte bereitstellt (Climate Data Center, o. D.).

Zusätzlich zu Last- und Ertragsgängen existieren für jede Komponente eines Energiesystems eine Vielzahl technoökologischer und technoökonomischer Parameter, die zur Optimierung eines Energiesystems berücksichtigt werden müssen. Dazu zählen neben kostenbasierten Parametern wie Investitionskosten, Betriebs-, Annuitäten- und Wartungsfaktoren auch jene, die Einfluss auf die Effizienz des Systems nehmen, wie unter anderem Ladungs- und Entladungsraten eines Speichers. Diese Informationen müssen in aktiver Zusammenarbeit mit den Akteuren möglichst individuell aus der Literatur oder vom Hersteller bezogen werden.

Ein weiteres Ziel von FINEconcepts ist die Prognose von CO₂-Emissionsreduktionspotenzialen. Aktuelle Werte aus der Literatur ermöglichen die Berechnung der Emissionen des jeweiligen Energieversorgungskonzepts. Die Emissionen des deutschen Strommix werden vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle mit 366 g CO₂e/kWh angegeben (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2022). Auch Energie aus erneuerbaren Technologien wird aufgrund des ganzheitlich betrachteten Lebenszyklus mit CO₂-Äquivalenten belastet. Energie aus Photovoltaik wird mit 56 g CO₂e/kWh und Energie aus Windkraftanlagen mit 10 g CO₂e/kWh beaufschlagt (Lauf et al., 2021).

Die anschließende Anpassung und Variation aller Parameter ermöglicht die Erstellung verschiedener Versorgungsszenarien und Sensitivitätsanalysen. Bei der Erstellung eines jeden Bausteins gilt es, dessen Parameter zunächst mit Mittelwerten aus der Literatur zu füllen.

Die Exaktheit der in diesem Abschnitt beschriebenen Daten ist entscheidend für die Qualität der Ergebnisse und entsprechender Beratungsleistungen. Während kleine Energiesysteme wie einzelne Wohnquartiere bereits mittels pauschaler Daten mit ausreichender Genauigkeit beschrieben werden können, sollte bei komplexeren Energiesystemen wie Unternehmen ein zusätzlicher Aufwand bei der Beschaffung individueller Daten betrieben werden.

4 FINEconcepts in Verbindung mit Siemens HEEDS®

Eine Möglichkeit zur weiteren Optimierung des Energiesystems liegt in der Verwendung zusätzlicher numerischer Methoden. Unter anderem wurde dazu die Software HEEDS® des Konzerns Siemens eingebunden, welche eine multidisziplinäre Designoptimierung ermöglicht (Siemens, o.D.). Dazu laufen verschiedene, direkt mit HEEDS® verknüpfte Programme je nach Bedarf seriell oder parallel ab. Die Parameter, welche in jedem einzelnen Programm Verwendung finden, werden dabei von HEEDS® selbst verwaltet und für die Optimierung einer oder mehrerer Zielgrößen variiert.

Die Einbindung von FINEconcepts in HEEDS® fokussiert zunächst die Verwendung von PV-Anlagen. Ziel ist es, ein Energiesystem zu optimieren und dabei die für dieses System besten Ausrichtungparameter der PV-Module zu identifizieren. Dies erweist sich vor allem dann als hilfreich, wenn im betrachteten Projekt Freiflächen zur Verfügung stehen, die eine restriktionsfreie Aufstellung der Module ermöglichen. Da innerhalb von HEEDS® Optimierungsziele unkompliziert verändert werden können, bietet die Kombination beider Programme zudem eine gute Grundlage, einzelne Parameter und ihre Einflüsse zu untersuchen und Sensitivitätsanalysen durchzuführen.

Die Optimierung komplexer Systeme ist oftmals mit dem Bedarf einer hohen Rechenleistung und -zeit verbunden. Die in HEEDS® verfügbare Entwurfsraumexploration ermöglicht es, das Optimierungsproblem auf Korrelationen zu prüfen und eine Antwortfläche zu trainieren. Dies kann genutzt werden, um die Entwurfsvariablen schon im Vorfeld einzugrenzen, was den Rechenprozess beschleunigt und dem Anwendenden zudem ein besseres Verständnis über das betrachtete System ermöglicht. Ferner können trainierte Antwortflächen als Prognose dienen. Es gilt stets zu beachten, dass eine Antwortfläche, abhängig von der Anzahl der durchgeführten Berechnungen, mittels verschiedener Verfahren geglättet wird. Somit stellen die der geglätteten Funktion entnommenen Werte keinesfalls exakte Werte dar.

5 Anwendungsbeispiele

Im Zuge des Forschungsprojekts GREEN konnte die Software FINEconcepts in mehreren Projekten mit Kooperationsunternehmen angewandt, validiert und ihre Funktionsfähigkeit zur Zielerreichung bestätigt werden. Folgend werden zwei Hauptprojekte aufgeführt. Dabei werden die Ziele, die Umsetzung mithilfe von FINEconcepts und die Ergebnisse für jedes Projekt zusammenfassend beschrieben.

5.1 Dekarbonisierung der Sekundärstahlproduktion (Goschin et al., 2022)

Zur Senkung der CO₂-Emissionen in der Sekundärstahlerzeugung wurde eine numerische Studie durchgeführt, bei welcher das mit der Produktion verbundene Energiesystem ganzheitlich betrachtet wurde. Ziel dieses Projekts war es, den gesamten Prozess als virtuelles Modell darzustellen, um Möglichkeiten zur Dekarbonisierung zu identifizieren. Dabei wurden neben Energie- auch Materialströme simuliert, um den Produktionsprozess und die dabei entstehende Prozesswärme, zeitdiskret in die Optimierung einfließen zu lassen. Als Optimierungsmaßnahme wurde unter anderem die Installation einer PV-Anlage und einer ORC-Anlage (engl.: Organic-Rankine-Cycle) simuliert. Ein weiteres Szenario umfasste die Abwärmenutzung zum Betreiben eines Fernwärmenetzes innerhalb der Kommune. Die in Abbildung 2 dargestellten Projektergebnisse zeigen, dass jede Maßnahme zu einer Senkung der CO₂-Emissionen und Kosten beiträgt, wobei jedoch die Installation einer PV-Anlage einen größeren positiven Einfluss hat, als die Installation der ORC-Anlage. Insgesamt konnte mithilfe von FINEconcepts aufgezeigt werden, dass eine Reduktion der CO₂-Emissionen um ca. 14.000 t pro Jahr mit den simulierten Szenarien möglich ist.

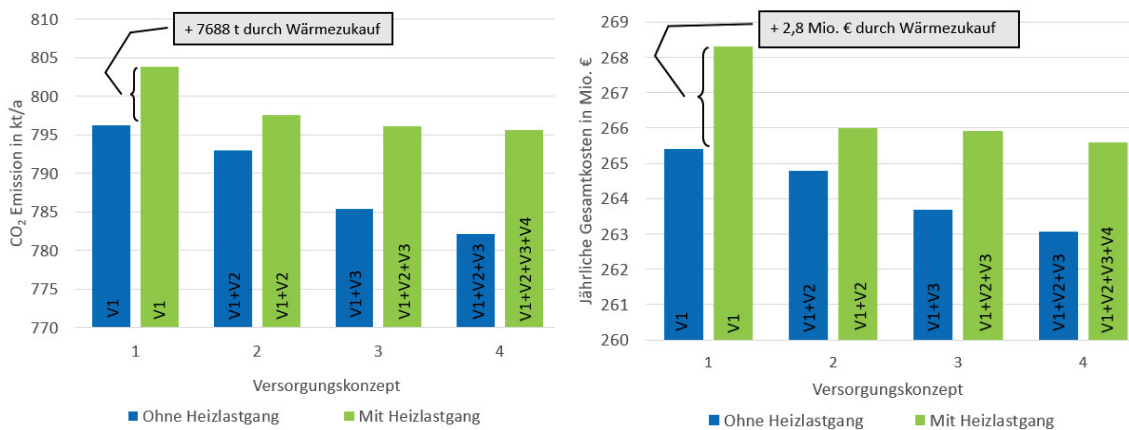


Abbildung 2: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse für CO₂-Emissionen (links) und jährliche Gesamtkosten (rechts) in den Szenarien: V1 - Ausgangsszenario, V2 - ORC-Anlage, V3 - PV-Anlage, V4 - Wärmespeicher (nach Goschin et al., 2022)

5.2 Kosten- und CO₂-Emissionssenkung eines mittelständischen Unternehmens durch interaktive Zusammenarbeit (Müller et al., 2023)

Bei diesem Projekt handelte es sich um eine vom Unternehmen gewünschte Senkung von Kosten und CO₂-Emissionen. Zusätzlich wurde im Rahmen dieses Vorhabens ein Konzept für eine interaktive Zusammenarbeit unter Verwendung von FINEconcepts entwickelt. So sollte der Aufbau eines Leitfadens für partizipative Beratungsprojekte zur Steigerung des Wissenstransfers in allen Folgeprojekten beitragen. Dazu erfolgte ein wiederkehrender, interaktiver Austausch mit den Akteuren des Unternehmens. Der Wissenstransfer wurde gefördert, indem zunächst ein Brainstorming zur Ideenfindung von alternativen Technologien durchgeführt wurde. Dies hatte zur Folge, dass sich die Entscheidungsträger neben bekannten und etablierten Technologien, auch mit neuen Ideen auseinandersetzten. Neben der Simulation einer PV-Anlage in unterschiedlichen Ausrichtungen und einem Speicher, wurde auch eine Kleinwindkraftanlage (KWKA) in Betracht gezogen und simuliert. Auch bei der Parameterrecherche wurde das Unternehmen aktiv eingebunden. Die für die Simulation benötigten Parameter vermittelten ein tieferes Verständnis für die Bedeutung einzelner Kennwerte in Bezug auf die kompletten Komponenten. Im letzten Schritt wurden die durch das Team erstellten Szenarien mit den Entscheidungsträgern besprochen und interaktiv, live simuliert. Somit wurden die Akteure nicht nur in die Lage versetzt, wiederholt durch kleine Änderungen zu erkennen, wie sich das Gesamtsystem einschließlich Kosten und Emissionen verhält, sondern auch fiktive Situationen wie beispielsweise Preisentwicklungen zu betrachten. Neben dem Verständnis zur Notwendigkeit eines digitalen Zwillings, konnten Handlungsempfehlungen für ein optimiertes Energiesystem entwickelt werden.

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse. Dabei unterscheidet sich Szenario B von Szenario A in der Nutzung einer un bebauten Freifläche. Um das Kostenminimum in Szenario B zu erreichen, sieht der Optimierer eine auf der Freifläche vollständig nach Süden ausgerichtete PV-Anlage vor, wodurch sich die installierte Gesamtleistung um 78 kW_p verringert. Aufgrund höherer Spitzenerträge bleibt der jährliche Netzbezug im Vergleich zu Szenario A trotz verringerter Anlagenleistung nahezu identisch. Die verminderte Installation der PV-Anlagen geht jedoch mit einer geringeren Eigendeckungsrate und höheren jährlichen CO₂-Emissionen einher. Da die Zielstellung nicht nur eine Kosten-, sondern

ebenso auch eine Emissionsreduktion vorsah, wurde Szenario A zur Umsetzung von den Akteuren ausgewählt. Die Verwendung eines Speichers und auch die Installation einer KWKA konnte durch die Simulation als nicht wirtschaftlich und ökologisch für das betrachtete Energiesystem eingestuft werden.

Tabelle 1: Ergebnisse der Systemmodellierung (Szenario A - Modell ohne Freifläche, Szenario B - Modell mit Freifläche) (nach Müller et al., 2023)

		Ausgangszustand	Szenario A	Szenario B
Installierte Leistung (PV)	kW _p	-	312	234
Jährliche Gesamtkosten	€/a	123.000	105.000 (-14,6 %)	103.000 (-16,3 %)
Stromgestehungskosten (PV)	ct/kWh	-	9,54	7,87
CO ₂ -Emissionen	t CO ₂ e/a	251	178 (-29,1 %)	185 (-26,3 %)
Eigendeckungsrate	%	0	35 (+35 %)	32 (+32 %)
Netzbezug	kWh/a	692.000	449.000 (-35 %)	471.000 (-32 %)

Mit der erfolgreichen Beendigung des Projekts konnte nicht nur die Effizienz des Unternehmens gesteigert, sondern auch ein besseres Bewusstsein, Verständnis und Interesse für energiebezogene Prozesse geschaffen werden. Der entwickelte Leitfaden kann in Folgeprojekten verwendet werden und sichert zukünftig den Wissenstransfer.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die entwickelte Software FINEconcepts ermöglicht dem Anwendenden, ein bestehendes oder geplantes Energiesystem zu simulieren und gezielt zu optimieren. Die Möglichkeit, die Modellierung des Systems durch Bausteinkomponenten zu realisieren, gibt den Akteuren dabei die Freiheit verschiedene Technologien zu implementieren und deren Auswirkung auf das System zu testen. So können auch weniger etablierte Technologien Anwendung finden. Dies erweitert die Perspektive und schafft eine Verbindung zwischen Forschung und Praxis.

Die Modellierung von Energiesystemen mit FINEconcepts kann die Motivation fördern, eigene Energiesysteme zu verstehen und durch eine verbesserte Parametrisierung das vorhandene Optimierungspotenzial auszuschöpfen. Dies wird durch die Zugänglichkeit der Parameteränderung und unmittelbare Darstellung der Auswirkungen auf die Ergebnisse erreicht. Zudem wird hierbei das Vertrauen in die digitale Abbildung der Prozesse erhöht.

Da die meisten mit FINEconcepts geplanten und durchgeführten Projekte zu einer Implementierung erneuerbarer Energiequellen führten, besteht bei der Verwendung dieser oder ähnlicher Softwaretools das Potenzial, den Ausbau eines dezentralen Energienetzes auf Basis erneuerbaren Energien weiter voranzutreiben. Sowohl die Optimierung von Energiesystemen als auch der damit einhergehende Wissenstransfer kann durch die Interaktion der Akteure von Wissenschaft und Praxis gewährleistet werden. Auch dies wurde mittels der durchgeführten Projekte belegt.

Ausblickend kann auf Tools wie FINEconcepts bezüglich der Wissensvermittlung und der Anwendung aufgebaut werden. Um sowohl die generelle Zugänglichkeit zu ermöglichen, als auch Nutzer:innen an das Programm heranzuführen, soll zunächst eine Demoversion mit eingeschränkten Funktionen und Tutorials online zur Verfügung gestellt werden.

Zur Erhöhung der Datengenauigkeit kann FINEconcepts mit Schnittstellen und Algorithmen ergänzt werden, welche den Datenbezug aus Smart-Home Hardwarekomponenten ermöglichen. Aus diesen Datensätzen können Last- und Ertragsgänge modelliert werden, welche die bisher verwendeten Standardprofile ersetzen.

Insgesamt können Nutzende durch mehr Möglichkeiten und genauere Berechnungen mehr über das eigene System lernen und ein tieferes Verständnis für energetische Abläufe im Allgemeinen gewinnen. Dabei sind es dann jedoch nicht äußere Einflüsse, die eine Handlung antreiben, sondern die Erkenntnis des Mehrwerts, den ein Verständnis und die Offenheit für neue Technologien mit sich bringt.

Insgesamt können Nutzende durch gesteigerte Möglichkeiten und genauere Berechnungen mehr über das eigene System lernen. Dabei ist es dann jedoch das Wissen über das mögliche Potenzial, was dazu führt, aus eigenem Antrieb das Verständnis für energetische Abläufe zu vertiefen und ein Vertrauen in neue Erkenntnisse aus der Wissenschaft zu setzen.

Quellen

- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. (2022). *Informationsblatt CO2-Faktoren*. BAFA. https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2022.pdf
- Climate Data Center. (o. D.). *CDC - Climate Data Center*. Deutscher Wetterdienst. <https://cdc.dwd.de/portal/>
- FINE. (o. D.). *Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3)*. Forschungszentrum Jülich. <https://www.fz-juelich.de/de/iek/iek-3/forschung/open-source/fine>
- Goschin, T., Vogel, M., & Flassig, R. (2022). *Energy Technologies For Decarbonizing The Steel Processing Industry – A Numerical Study*. IFAC-PapersOnLine, 55(9), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.001>
- Technische Hochschule Brandenburg. (o. D.). *GREEN: Ganzheitliche Lösungen zur regionalen Energiewende für Industrie und Kommune*. <https://technik.th-brandenburg.de/forschung-und-kooperation/projekte/green/>
- Siemens. (o.D.). *Simcenter HEEDS*. Siemens. <https://plm.sw.siemens.com/de-DE/simcenter/integration-solutions/heeds/>
- Lauf, Dr. T., Memmler, M., & Schneider, S. (2021). *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger*. Umweltbundesamt.
- Müller, K., Markgraf, K., Kunze, P., & Flassig, R. (2023). *Optimierte Energieversorgung mithilfe eines digitalen Zwillings*. IKZ-Fachplaner 05/2023 (in print)
- Netznutzer-Stromnetz Berlin. (o. D.). Stromnetz Berlin. <https://www.stromnetz.berlin/netz-nutzen/netznutzer/>
- Radtke, J., & Canzler, W. (2019). *Energiewende: Eine sozialwissenschaftliche Einführung*. Springer VS. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-26327-0>
- SARAH-2 Solar Radiation Data. (o. D.). *SARAH-2 Solar Radiation Data*. EU Science Hub. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool/pvgis-data-download/sarah-2-solar-radiation-data_en