

VALIDIERUNG EINER WERKZEUGKETTE ZUR MULTIKRITERIELLEN OPTIMIERUNG VON ENERGIESYSTEMEN AUF MODELICA BASIS

Sebastian Mortag ^{1*} und Herbert Palm ^{2*}

¹Hochschule München, +49 89 1265-3445, mortag@hm.edu, www.hm.edu

²Hochschule München, +49 89 1265-3420, palm@hm.edu, www.hm.edu

* ISES-Institut, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lothstraße 34,
80335 München

Kurzfassung: Der Umbau auf nachhaltige Energieversorgungssysteme und die damit verbundene Dezentralisierung bedingen in Deutschland einen massiven Planungs- und Investitionsbedarf. Entscheidungen müssen im bestmöglichen Trade-off von konkurrierenden Zielen getroffen werden. Die dazu notwendige Datenbeschaffung und -aufbereitung wird von Kommunen oder Unternehmen vielfach an externe Auftragnehmer wie Ingenieurbüros oder Forschungseinrichtungen delegiert. Hier besteht ein Bedarf an alternativer Software zu proprietären Lösungen für Modellierung, Simulation und multikriterielle Optimierung. Solche Softwareprodukte sind bislang oft mit hohen Lizenzkosten und nötigem produktspezifischen Fachwissen verbunden. Zusätzlich arbeiten sie in vielen Fällen nicht ausreichend transparent („closed-source“) und editierbar oder relevante Funktionen wie multikriterielle Optimierung sind nicht vorhanden. Im vorliegenden Beitrag stellen wir eine Werkzeugkette vor, die dem Anwender eine multikriteriell optimierte Auslegung von Energiesystemen auf Basis von frei verfügbaren, „open-source“, Werkzeugkomponenten ermöglicht.

Keywords: Energiesysteme, Optimierung, Open-Source Software, Modellierung und Simulation

1 Einleitung – kommunale Energiesystemplanung

Die Verantwortung für Planung, Installation und Betrieb von dezentralen Energiesystemen verschiebt sich im Rahmen der Energiewende auf die kommunale oder betriebliche Ebene. Entscheidungen über Konzeption und Umsetzung von Energiewendemaßnahmen werden vielfach von lokalen Verantwortlichen auf Basis von Vergleichen verschiedener Ausbaualternativen getroffen. Dazu bedürfen sie einer fundierten Datengrundlage und entsprechender Entscheidungsvorlagen, um den spezifischen und individuellen Herausforderungen – speziell im Spannungsfeld von im Konflikt stehenden Zielen wie maximalem CO₂ Effekt bei minimaler Investitionshöhe – gerecht zu werden.

1.1 Herausforderungen bei der Planung dezentraler Energiesysteme

Die Planung des Ausbaus von dezentralen Energiesystemen auf kommunaler oder betrieblicher Ebene erfolgt unter Berücksichtigung des Drei-Säulen-Modells [1] zu ökologischer, ökonomischer und sozialer Nachhaltigkeit. Zusätzlich müssen spezifische Gegebenheiten und Ziele miteinbezogen werden, insbesondere zur Effektivität und Effizienz von Anlagefinanzierungen. Dieser Aspekt wird im kommunalen Bereich in dem 3-stufigen

Prozess der kommunalen Planungsinstrumente „Energienutzungsplanung“ [2] und „integriertes Klimaschutzkonzept“ nur unzureichend betrachtet [3]. Für Betriebe gibt es an dieser Stelle nicht einmal einen Referenzprozess. Als Grundlage für Entscheidungsprozesse ist der vergleichende Aspekt der Potenzialanalyse mit Trade-off-Analyse alternativer Varianten von grundlegender Bedeutung. Dazu sind auch in den bereits bestehenden Prozessen und Werkzeugen Erweiterungen notwendig wie sie zum Beispiel in [3] vorgestellt wurden. Zu deren Umsetzung müssen kommunale Planungsreferate, damit beauftragte Unternehmen oder Institutionen durch geeignete Werkzeuge befähigt werden.

1.2 Anforderungen an Prozesse und Werkzeug

Bei Anwendungen auf kommunaler Ebene sind neben technischen Kriterien zur Auswahl der Werkzeugkette auch Kosten und Transparenz und Eingriffsmöglichkeiten in Modelle und Algorithmen von essenzieller Bedeutung. Für den Einsatz in dezentral verwalteten, lokalen Systemen müssen außerdem Lizenzkosten geringgehalten werden. Es bietet sich die Nutzung von frei verfügbarer „open-source“ Software an. Sie muss in der Lage sein, die existierenden technologiespezifischen Ausbaualternativen im Umfeld nachhaltiger Energiesysteme abzubilden, individuelle Varianten in parametrischer Form darzustellen und gegeneinander zu bewerten. Ferner müssen lokale Gegebenheiten, zum Beispiel zu lokalem Strom- und Wärmebedarf, zur Bevölkerungsentwicklung oder auch zur Menge weiterer lokal relevanter Ziele abgebildet werden können. Im Umfeld Sektoren-gekoppelter Energiesysteme muss ein fachdomänenspezifisches Werkzeug objektorientiert Komponenten abbilden und deren Zusammenspiel für beliebige Leistungserzeugungs- und Leistungsverbrauchsprofile simulieren können. Ein integrierendes, hierarchisch übergeordnetes Werkzeug muss Versuchspläne für Simulationen solcher Energiesysteme manuell oder automatisiert steuern können und dadurch erlauben, Komponentenparameter bei gegebener oder parametrisch anpassbarer Topologie multikriteriell optimal auszulegen. Das schließt Optionen der Zwischenspeicherung und der Umwandlung verschiedener Energieformen ein. Für verlässliche Entscheidungen muss die Werkzeugkette selbst auf Komponenten- wie auch auf System-Ebene realitätsnahe („richtige“) Ergebnisse liefern, i.e. sie muss validiert sein.

1.3 Dezentrale Energiesysteme – Modellierung und Simulation

Die Modellierung von dezentralen Energiesystemen erfolgt im Rahmen einer Zielindikatorenorientierten Analyse. Die Zielindikatoren quantifizieren kommunale Ziele in Form energietechnisch-betriebswirtschaftlicher (ggf. zusätzlich sozialer) Metriken auf Basis von Modellberechnungen. Die Modellierung selbst sollte objektorientiert technologiespezifische Komponenten aus der Gruppe der Energiewandler (e.g. Photovoltaik-Freiflächen-Anlagen PV-FFA oder Windkraftanlagen WKAn), der Energiespeicher (e.g. elektrische ESS oder thermische Energiespeicher), der Netze (Grids) und der Verbraucher anbieten, die in frei wählbarer Topologie des Energiesystems parametrisiert und verschaltet werden können. Die Systemauslegung muss Sektor-übergreifend erfolgen. Die Kopplung der Sektoren erfolgt mithilfe von Energiewandlern (e.g. Blockheizkraftwerken). Lokal-spezifische Aspekte werden unter anderem durch Lastgänge der „Verbraucher“ mittels Lastprofilen sowie durch lokale Generatorprofile (e.g. solare Inzidenz) abgebildet.

1.4 Multikriterielle Optimierung und Entscheidung

Die auf kommunaler Ebene existierende Problematik der vielschichtigen Entscheidungsfindung in Bezug auf den Ausbau dezentraler energetischer Versorgung wird in den gängigen Methoden zur Systemoptimierung auf Basis von proprietärer Software nur unzureichend abgebildet. Die Identifikation bestmöglicher Ausbauziele im Kontext einer quantitativen Abwägung einer Mehrzahl definierter Ziele fällt in den Bereich der Trade-off-Analyse und multikriteriellen Optimierung von komplexen Systemen. Nach dem aktuellen Stand der Technik erfolgt dies methodisch nach dem Ansatz der Hyperspace Exploration (HSE) [4].

In dieser Arbeit stellen wir eine Werkzeugkette vor, die es sowohl erlaubt, spezifisch kommunale Gegebenheiten und Ziele abzubilden als auch den Zugriff auf frei verfügbare Komponenten zur multikriteriell optimierten Systemauslegung zu verwenden. Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 wird der Ansatz der Energiesystemmodellierung beschrieben sowie die Methodik der Optimierungsumgebung und Energiesystemvalidierung erläutert. In Kapitel 3 zeigen wir Ergebnisse der Validierung und präsentieren einen Vergleich zu gängiger proprietärer Software anhand des Beispiels einer Referenzgemeinde. In Kapitel 4 gehen wir schließlich auf die beobachteten Abweichungen des Vergleichs ein und geben einen Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen der Werkzeugkette sowie weitere Anwendungsbereiche der verwendeten Methoden und Werkzeuge.

2 Methodik – Energiesystemmodellierung und -validierung

Energetische Ausbauplanung sollte methodisch dem Referenzprozess zur Bestandsanalyse und vergleichenden Potenzialanalyse der Phase 1 des kommunalen Planungsinstruments „Energienutzungsplanung“ (ENP) [2] folgen. Dieser ursprünglich für Kommunen entwickelte Referenzprozess ist direkt auf Unternehmen übertragbar. Der vergleichende Aspekt der Potentialanalyse ist mithilfe einer multikriteriell optimierten Systemauslegung auf Basis der in [3] vorgestellten Methodik umsetzbar. Die resultierende Werkzeugkette lässt sich als integrale Umgebung aus Komponenten zur Modellierung und Simulation von Energiesystemen sowie zur Versuchsplanung, Durchführung und Optimierung mit einem Datenspeicher zusammensetzen [4] (siehe Abbildung 1). Zum Nachweis ihres Wertes (i.e. korrekte und brauchbare Werte zu liefern), wird die in Abbildung 1 dargestellte Werkzeugkette einer Validierung auf Komponenten- und Systemebene unterzogen. Methodisch wird dabei ein Vergleich der Simulations- und Optimierungsergebnisse mit bekannten Ergebnissen der in [3] **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** vorgestellten Referenzgemeinde angestellt. Die Definition eines Fehlertoleranzbandes erlaubt die Quantifizierung des Werts der Werkzeugkette im ursprünglichen Sinne von „Validierung“.

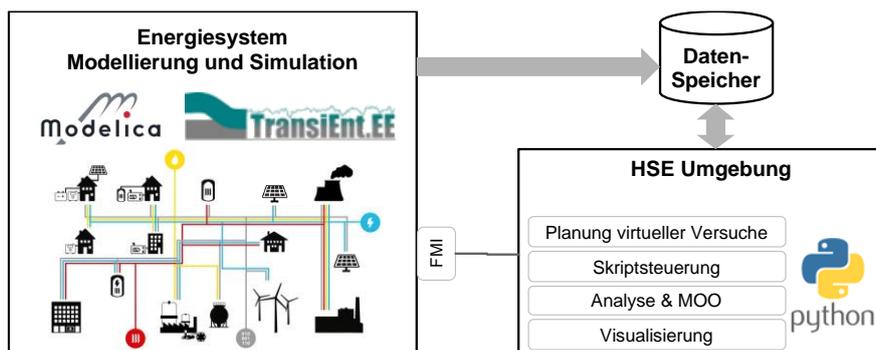


Abbildung 1: Konzeptionelle Darstellung des strukturellen Aufbaus der neu vorgeschlagenen Werkzeugkette.

2.1 Open-Source OO Modellierungs- und Optimierungsumgebung

Die Modellierungs- und Simulationsumgebung wird auf Basis der Modellierungssprache Modelica realisiert. Dabei handelt es sich um eine frei-verfügbare objektorientierte (OO) und Differenzialgleichungs-basierte Modellierungssprache zur Abbildung von multi-physikalischen Systemen. Die Abbildung der in Kap. 1.3 beschriebenen Energiesysteme erfolgt mit der Bibliothek TransiEnt [5], einer frei verfügbaren Sammlung aus generischen, parametrisierbaren Komponenten zur Modellierung von Energiesystemen, die als Resultat aus mehreren Verbundprojekten [6] hervorgegangen ist. Sie verfolgt einen hierarchischen und modular gekapselten Ansatz, der eine Parametrisierung mit variablem Detailgrad ermöglicht. Komponenten werden „out-of-the-box“ mit generischer Parametrisierung geliefert und sind auf Systemebene des Modells konsistent koppelbar. Der modular gekapselte Aufbau des Modells erlaubt, Komponenten und Subkomponenten individuell zu parametrisieren. Auf unterster Detailebene können einzelne anlagespezifische Werte gesteuert werden, um (technische und betriebswirtschaftliche) Anlagenkenngrößen realer Komponenten abzubilden. Zusammen mit einer generisch formulierten Schnittstelle zum Laden textbasierter Zeitreihen lassen sich beliebige Anlagekennwerte, Umwelteinflüsse und Effekte hinterlegen. In Abbildung 2 ist die oberste Ebene eines Energiesystems, bestehend aus den Komponenten PV-FFA, WKA, ESS, Wärme und Energienetz gezeigt. Die Erzeuger-Komponenten werden mit Anlagekenngrößen parametrisiert. Der Verbrauch wird über zeitlich aufgelöste Lastprofile abgebildet. Das Energiesystem wird analog zur Referenzgemeinde mit historischen Daten der Umwelteinflüsse „Solare Inzidenz“, „Umgebungstemperatur“ und „Windgeschwindigkeit“ am Standort Höhenkirchen-Siegertsbrunn entsprechend Referenz [3] parametrisiert.

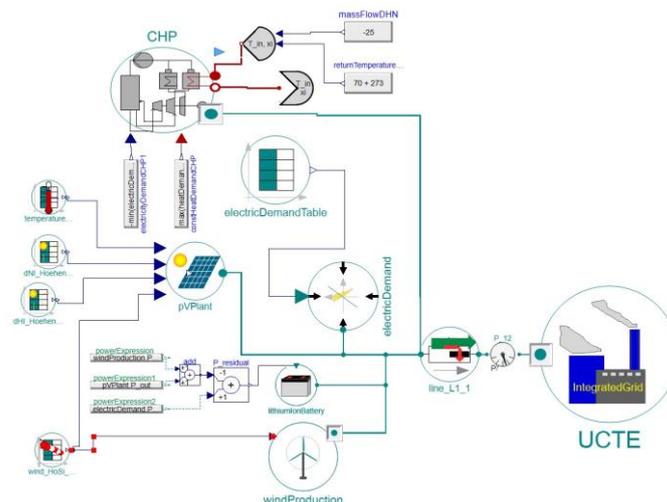


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Sektoren-gekoppelten Energiesystems mit Erzeuger- und Verbraucherkomponenten sowie elektrischem Energiespeicher.

Die an die neue Werkzeugkette in Kapitel 1.2 gestellten Anforderungen werden durch Ergänzung um eine Python-basierte Optimierungsumgebung realisiert. Sie basiert auf dem frei verfügbaren Softwarepaket paref [7]. Diese Umgebung ist mit einer Software zur Planung virtueller Versuche verbunden und greift skriptgesteuert über die Schnittstelle FMI (Functional-Mockup-Interface) auf die Modelica-Modelle des Energiesystems zu. Dabei werden die

exportierten FMUs (Functional-Mockup-Units) als rechenintensive Black-Box Modelle betrachtet und sequenziell ausgewertet. Final werden die Simulationsergebnisse aus der Modelica Fachdomäne zeitlich aufgelöst im Datenspeicher zur weiteren Analyse abgelegt.

2.2 Validierung – Prozess und Werkzeugkette

Die Validierung wird Szenario-basiert [8] auf Komponenten- und Systemebene durchgeführt. Mit historischen Daten werden solare Inzidenzwerte, Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeiten für die Standorte München und Höhenkirchen-Siegertsbrunn im Energiesystemmodell parametrisiert. Das Modell wird in verschiedenen Varianten zu Größe der PV-FFA, Nominalleistung der WKA und Speichergröße des ESS simuliert. Der betrachtete Zeitraum der Simulationen beträgt ein Jahr mit einer Auflösung im Stundentakt. Als Akzeptanzkriterium wird ein zulässiges Fehlertoleranzband von $\pm 5\%$ Abweichung des kumulierten Ertrags einer Anlage über den Zeitraum von einem Jahr definiert. Als Referenz dienen die kumulierten Ertragswerte der Referenzgemeinde, die mithilfe der proprietären Software PSS@DE [9] ermittelt wurden [3]. Ergebnisse der Modelica-basierten Werkzeugkette erfüllen die Akzeptanzkriterien und gelten als validiert, wenn sie sich innerhalb des definierten Toleranzbandes befinden. Die Validierung wird im ersten Schritt auf Komponentenebene für PV-FFA und WKA durchgeführt und im zweiten Schritt auf der Systemebenen für das in Abbildung 2 dargestellte Energiesystem. Auf Systemebene erfolgt zusätzlich eine Validierung durch Test auf Befähigung, eine multikriterielle Systemoptimierung des Energiesystems durchzuführen. Dazu wird das Hypervolumen [10] einer über die Werkzeugkette automatisiert mit weniger als 100 Simulationen ermittelte Paretofront mit einer auf Basis von 1000 Simulationen eines voll-faktoriellen Versuchsplans ermittelten Paretofront verglichen.

3 Validierung - Ergebnisse

Die Validierung erfolgt auf Basis von Szenarien [8] durch Vergleich mit bekannten PSS@DE Referenzwerten [3]. Auf Systemebene wird zusätzlich eine Verifikation durchgeführt. Durch Vergleich der Abweichungen gegenüber dem zulässigen Toleranzband wird sichergestellt, dass die hier vorgestellte Werkzeugkette auf Modelica-Basis brauchbare und korrekte Ergebnisse im Vergleich mit gängiger proprietärer Software liefert.

3.1 Validierung auf Komponentenebene

Zur Validierung werden Erträge für PV-FFA und WKA Komponenten in stündlicher Auflösung über ein Jahr kumuliert simuliert und mit bekannten Referenzgemeinde-Erträgen verglichen.

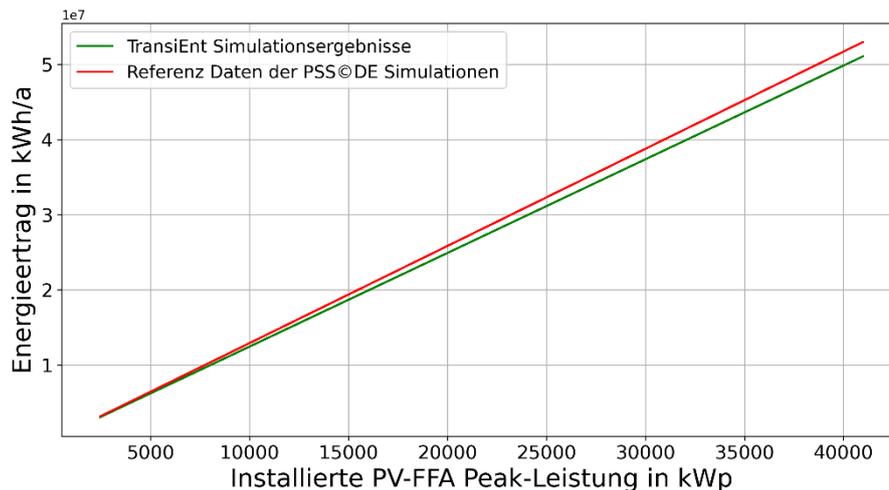


Abbildung 3: Vergleich der Simulationsergebnisse für eine PV-FFA.

Abbildung 3 zeigt den PSS@DE vs. TransiEnt Vergleich der Jahreserträge einer PV-FFA, die mit Umgebungsdaten zur solaren Inzident am Standort Höhenkirchen-Siegertsbrunn für eine installierte Peak-Leistung zwischen 2 und 41 MWp simuliert wurde.

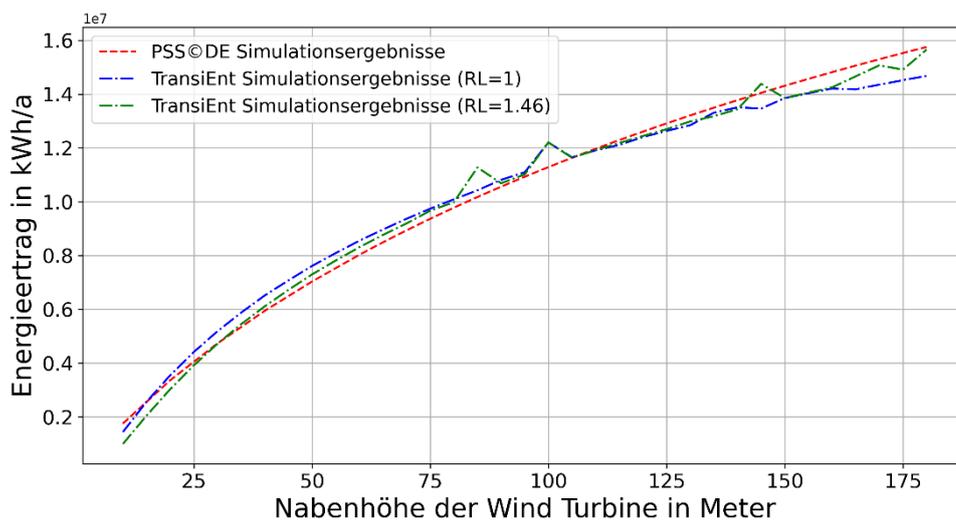


Abbildung 4: Vergleich der Simulationsergebnisse für eine WKA.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der Jahreserträge des WKA-Modells einer Nordex 149/5.X Anlage, die mit dem lokalem Windgeschwindigkeitsprofil für unterschiedliche Nabenhöhen zwischen 10 und 180 Meter simuliert wurde. Die Simulationen wurden für Rauigkeitslängen (RL) zwischen 1 und 1,46 durchgeführt, die PSS@DE Simulationsergebnisse wurden mit dem Hellman'schen Exponenten 0,28 ermittelt.

3.2 Verifikation und Validierung auf Systemebene

In Schritt 2 wird die Werkzeugkette auf Systemebene über einen Szenario-basierten Ansatz [8] verifiziert und validiert. Dazu wird das Energiesystem mithilfe von Komponenten der TransiEnt Bibliothek (siehe Abbildung 2) aufgebaut und mit Parameterausprägungen des Referenzsystems bedatet.

Die Systemverifikation testet die korrekte Berechnung der Zielgrößen zur bilanziellen Autarkie („Overall Autarky“, OA) und zum Eigenverbrauch („Own Consumption“, OC) gemäß

$$OA := \frac{\int P_{gen}(t)dt}{\int P_{con}(t)dt} \quad \text{und} \quad OC := \frac{\int \min[P_{con}(t); P_{gen}(t)]dt}{\int P_{gen}(t)dt},$$

wobei P_{gen} die von der Anlage generierte und P_{con} die von den Nutzern verbrauchte Leistung bezeichnen. Die besondere Bedeutung dieser Zielgrößen ergibt sich aus der Formulierung des Optimierungsproblems in Form einer gleichzeitigen Minimierung von $1 - OA$ und $1 - OC$.

Der kumulierte jährliche Strombedarf beträgt in allen Systemtestszenarien 43,7GWh. Das System wird in Sterntopologie modelliert. Der Design Space umfasst zwischen Null und drei WKA mit jeweils 5,7MW Nominalleistung, eine PV-FFA zwischen 0 bis 21MWp installierter Peak-Leistung und einen ESS zwischen 0 und 100MWh Speicherkapazität.

Zur Verifikation werden für fünf Szenarien die Zielgrößen per direkter Eingabe über die Modellierungsumgebung berechnet (Index „sim“), und mit Python-Skript ausgewerteten Werten (Index „ver“) verglichen, die auf Momentleistungen P_{gen} und P_{con} zugreifen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Modellverifikation auf Systemebene für fünf Szenarien.

#	WKA	PV-FFA	ESS	OA_{sim}	OA_{ver}	OC_{sim}	OC_{ver}
1	0	2MWp	0MWh	5.5%	5.5%	100%	100%
2	1	21MWp	10MWh	81.4%	81.4%	71.3%	71.3%
3	3	2MWp	10MWh	72.0%	72.0%	66.6%	66.5%
4	3	21MWp	0MWh	123.2%	123.2%	55.7%	55.7%
5	3	21MWp	100MWh	126.9%	126.9%	68.4%	68.4%

Zur Validierung wird die über 1000 Szenarien eines voll-faktoriellen Versuchsplans ermittelte Paretofront mit der über 72 Szenarien in der neuen Werkzeugkette automatisch identifizierten Paretofront hinsichtlich des damit jeweils aufgespannten und nach [10] berechneten Hypervolumens sowie der zur Berechnung benötigten Rechenzeit verglichen.

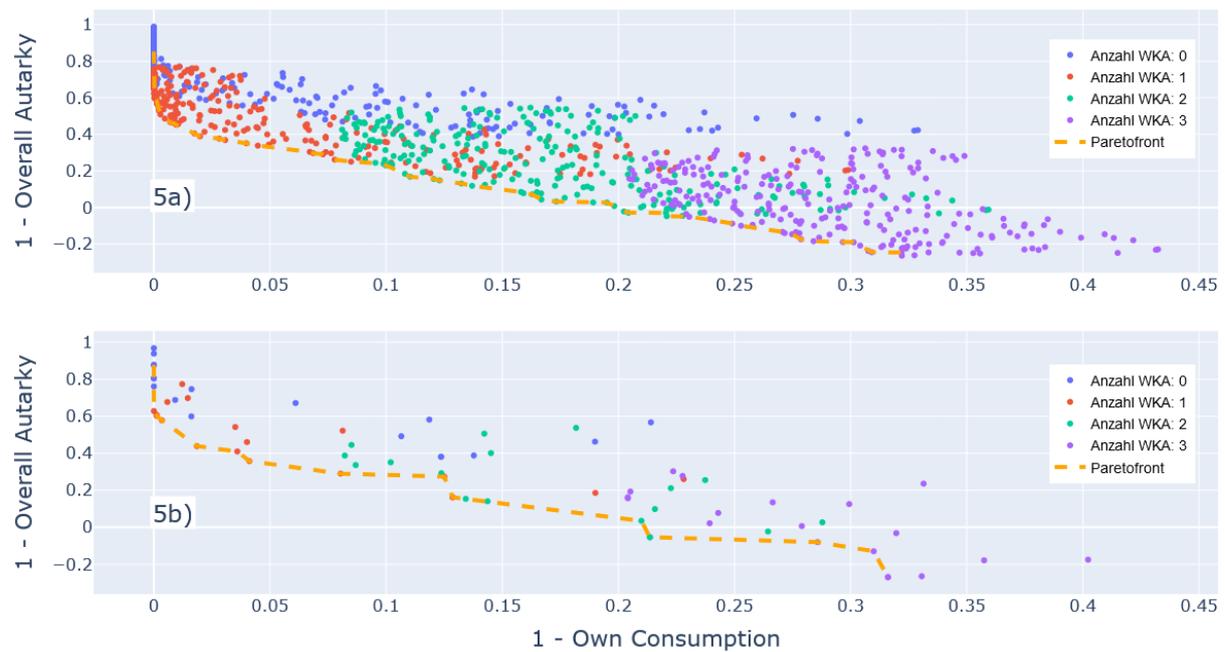


Abbildung 5: Ermittelte Paretofronten qua a) 1000 Szenarien eines voll-faktoriellen Versuchsplans und b) 72 Szenarien eines im Rahmen der multikriteriellen Optimierung automatisch gewählten Versuchsplans.

Die orange in Abbildung 5 angedeuteten Paretofronten verbinden jeweils identifizierte nicht-dominierte Lösungen durch Geraden.

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Validierungsbewertungsgrößen. Zur Ermittlung des Hypervolumens wurde der Referenzpunkt [0.5, 1] verwendet. Benötigte Rechenzeiten wurden auf einer i7-9750H CPU mit sechs Kernen bei 2.60GHz und verteilter Last über 12 Threads ermittelt. Die Berechnung der Paretofront mittels multikriterieller Optimierung (Werkzeugkette) erfolgte im Single-Thread Modus.

Tabelle 2: Vergleich der Ansätze zur Berechnung der Paretofront.

Kenngröße	Voll-faktorielles Design (1000 Simulationen)	Werkzeugkette (72 Simulationen)
Ermitteltes Hypervolume	0.516	0.496
Benötigte Rechenzeit	3h10min.	35min.

4 Diskussion und Ausblick

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Komponentvalidierung sowie der Verifikation und Validierung auf Systemebene diskutiert. Die Werkzeugkette wird gegenüber den an sie gestellten Anforderungen bewertet mit abschließendem Ausblick auf weitere Anwendungen.

4.1 Diskussion der Ergebnisse

Sowohl auf Komponenten- als auch auf Systemebene bleiben für alle relevanten Szenarien die über die neue Werkzeugkette ermittelten Werte innerhalb des 5%-Toleranzbandes gegenüber zugehörigen PSS@DE Referenzwerten und werden daher als valide eingestuft.

Bei PV-FFA kumulieren die Jahreserträge im Vergleich zu den bekannten Daten des Referenzsystems auf 96,4% und nehmen mit steigender installierter Leistung zu. Im

Durchschnitt wird eine Abweichung von 1 GWh (und damit 3,6%) pro Jahr über den Bereich der installierten Leistungen von 2 bis 41 MW festgestellt. Eine mögliche Erklärung für diese Unterschiede könnte in den Mehrverlusten durch die simulierte Wechselrichterleistung der in der TransiEnt Bibliothek verwendeten PV-FFA Komponente liegen. Die mit der installierten Leistung zunehmenden Verluste sind möglicherweise ein Hinweis auf die Notwendigkeit, die Modellparameter anzupassen, um die Genauigkeit der Simulationsergebnisse zu verbessern. Im Rahmen der geforderten 5% Toleranz erfüllen die Komponenten jedoch die an sie gerichteten Genauigkeitsanforderungen.

Bei WKAn sind die Simulationsergebnisse kompatibel mit denen des Referenzsystems (siehe Abbildung 4), mit einem durchschnittlichen Unterschied der Jahreserträge von etwa 448,4 MWh (und damit 4,7%). Diese Differenz lässt sich durch die Modellierungsunterschiede zwischen der Verwendung eines Hellman'schen Exponenten und der Rauigkeitslänge in der Konvertierung der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe erklären. Dies könnte durch eine Anpassung der Modellparameter an die realen Gegebenheiten der WKA verbessert werden.

Bei der anschließenden Systemvalidierung zeigt die neue Werkzeugkette ihre Stärke in Form einer automatisierten Berechnung der Paretofront der konkurrierenden Zielgrößen „Eigenverbrauch“ (OC) und „bilanzielle Autarkie“ (OA). Das Hypervolumen liegt bei 72 im Rahmen der automatisiert identifizierten Paretofront benötigten Simulationen um weniger als 4% unter dem Wert einer Paretofront, für die über 1000 Simulation eines vollfaktoriellen Versuchsplans notwendig waren bei einer um den Faktor >6 höheren Rechenzeit.

4.2 Vergleich der Ergebnisse mit Zielsetzung - Systemvalidierung

Die Ergebnisse zeigen, dass die vorgestellte Werkzeugkette auf Basis von frei verfügbaren Komponenten dazu geeignet ist, brauchbare und in der Gegenüberstellung mit gängiger proprietärer Software vergleichbare Ergebnisse zu produzieren. Zusätzlich ermöglicht sie die vergleichende Trade-off-Analyse von Ausbauszenarien durchzuführen. Technologiespezifische Ausbaualternativen können so mithilfe frei verfügbarer und editierbarer Komponenten systematisch untersucht und quantitativ hinsichtlich konkurrierender Ziele optimiert werden.

Die durchgeführte Validierung auf Basis eines Vergleichs mit bekannten Ergebnisgrößen zeigt sowohl die Zuverlässigkeit als auch die Aussagekraft der Ergebnisse der Werkzeugkette.

Der Einsatz der Werkzeugkette zur effektiven und effizienten Ermittlung optimaler Ausbauszenarien ist sinnvoll und stellt einen substantiellen Mehrwert dar, vor allem im Kontext der Entscheidungsfindung für dezentrale Energiesysteme.

Mithilfe des quantitativen Vergleichs von Ausbaualternativen bietet der neue Ansatz eine fundierte Basis für eine Zielindikatoren-orientierte Analyse zur multikriteriell optimierten Auslegung nachhaltiger Energiesysteme als Basis eines begleitenden Entscheidungsprozesses. Dabei spielen auch minimierte Lizenzkosten eine tragende Rolle, ohne dabei auf den Funktionsumfang gängiger Softwarelösungen verzichten zu müssen.

4.3 Perspektiven für weitere Forschungsarbeiten und Anwendungsfelder

Aufgrund der Mächtigkeit der TransiEnt Bibliothek eignet sie sich als Basis für die systematische energetische multikriteriell optimierte Ausbauplanung sowohl im industriellen

wie auch im kommunalen Umfeld. Insbesondere bei komplexen Varianten der Energiesystemtopologie (v.a. im Umfeld der Sektorenkopplung) zeigt der neue Ansatz seine Stärken. Die Pflege der Komponenten, um jeweils hinsichtlich technischer und betriebswirtschaftlicher Parameter auf dem neuesten Stand zu bleiben, stellt gleichermaßen eine Herausforderung dar. Eine möglichst große „open source user community“ ist hier von Vorteil. Entsprechend planen die Autoren selbst weitere Anwendungen und freuen sich über viele weitere Nutzer sowie zusätzliche Anregungen und Ideen.

Source Codes können auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden.

5 Referenzen

- [1] Elkington, J. (2004) Enter the Triple Bottom Line. In: Henriques, A. and Richardson, J., Eds., *The Triple Bottom Line, Does It All Add up? Assessing the Sustainability of Business and CSR*, Earths can Publications Ltd., London, 1-16. 10.4324/9781849773348
- [2] Energienutzungsplanung, Bayerische Staatsregierung, <https://www.energieatlas.bayern.de/kommunen/energienutzungsplan.html> (2024-01-04)
- [3] Stadler, Andreas & Mutzhas, Dominic & Vollmar, Jan & Palm, Herbert. (2022). Prozess und Werkzeugkette zur multikriteriell optimierten Auslegung kommunaler Energiesysteme. 10.13140/RG.2.2.24208.69122.
- [4] Palm, Herbert & Holzmann, Jörg. (2018). Hyper Space Exploration A Multicriterial Quantitative Trade-Off Analysis for System Design in Complex Environment. 1-6. 10.1109/SysEng.2018.8544435.
- [5] Andresen, Lisa & Dubucq, Pascal & Peniche Garcia, Ricardo & Ackermann, Günter & Kather, Alfons & Schmitz, Gerhard. (2015). Status of the TransiEnt Library: Transient Simulation of Coupled Energy Networks with High Share of Renewable Energy. 10.3384/ecp15118695.
- [6] TransiEnt Library, Technische Universität Hamburg, <https://www.tuhh.de/transient-ee/projekt.html> (2024-01-09)
- [7] Paref Package, <https://paref.readthedocs.io/en/latest/> (2023-11-28)
- [8] Arnold, D., Corriveau, J. P., & Shi, W. (2010, April). Scenario-based validation: Beyond the user requirements notation. In *2010 21st Australian Software Engineering Conference* (pp. 75-84). IEEE. 10.1109/ASWEC.2010.29.
- [9] Siemens AG, Hg., „Technical Description PSS@DE 3.3: Techno-economic Simulation Software for Distributed Energy Systems and Hybrid Power Plants“, Nürnberg, 2021.
- [10] Beume, N., Fonseca, C. M., Lopez-Ibanez, M., Paquete, L., & Vahrenhold, J. (2009). On the complexity of computing the hypervolume indicator. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13(5), 1075-1082.