

Ganzheitliche Planung dezentraler Energiekonzepte durch mathematische Optimierung

Pascal Liedtke BSc, DI Dr. Michael Stadler, Michael Zellinger MSc

Bioenergy 2020+, 3250 Wieselburg, AUT

DI Franz Hengel

AEE INTEC, 8200 Gleisdorf, AUT

ABSTRACT: The main topic of this paper concerns the holistic conceptual design of microgrids and focuses on reducing the operating costs and CO₂ emissions of a planned residential complex in a community in Styria. Microgrids allow the coordinated generation of Distributed Energy Resources (DER), such as PV, wind, solar thermal and storage etc., as well as load management to balance heating, cooling and electricity services. Mathematical optimization serves as an unbiased and reliable alternative for the conceptual design of Microgrids, which is needed to optimize the costs and CO₂ emissions via its multiple combinations of technology choices as well as capacity ranges. The used optimization program *OptEnGrid* considers a quasi-static setup using Mixed Integer Linear Programming (MILP) models. A common and simple way to design a microgrid is to use synthetic load profiles when real loads are missing. For the planned community in Styria, however, geographical conditions, target values and control parameters have a major influence on the entire energy system. In a supporting *TRNSYS* simulation these inputs are involved and create detailed load data for a base case scenario in an optimization program. By embedding the simulation data in the optimization, it can be investigated what influence detailed and tailored load profiles have on mathematical-based investment decisions. This shows that errors can occur especially in the design of peak loads and that higher outputs must be demanded from energy resources. For the community in Styria an optimization based on synthetic heat data missed a central heating system because the peak loads in the heating season are designed too low.

1. EINLEITUNG

In Österreich fallen rund 24 % des energetischen Endenergieverbrauchs auf den Sektor Haushalt, wodurch 8,1 Mio. Tonnen Treibhausgase jährlich produziert werden (Umweltbundesamt, 2018). Mit dem Ziel den energetischen Endenergieverbrauch und die Treibhausgase zu senken, sollen dezentrale und erneuerbare Technologien dort eingesetzt werden, wo elektrische oder thermische Lasten für Gebäude bereitgestellt werden müssen. Durch unterschiedliche Speichertechnologien und andere dezentrale Energieversorgungstechnologien (**Distributed Energy Resources** - DER) wird der Eigenverbrauch von volatilen Energieträgern gesteigert und ein Lastmanagement realisierbar. Der ideale Betrieb des Energienetzes oder „Microgrids“ wird mit einer übergeordneten und intelligenten Regelung erreicht, wodurch Kapazitäten von Technologien und die dafür aufgewendeten Kosten und Ressourcen reduziert werden. Die Auslegung eines Microgrids steht vor der Hürde, eine gesamtheitliche und unvoreingenommene Planung zu realisieren um geringste Kosten- oder CO₂-Emissionen für die Energiebereitstellung zu generieren. Um eine allgemeine Aussage treffen zu können, welche auch auf andere ähnliche Gegebenheiten übertragen werden

kann, wird eine Siedlungsanlage in der Steiermark mit einem dezentralen Energiesystem mithilfe eines Optimierungsprogramms ausgelegt. Als Optimierungsprogramm wird hierbei *OptEnGrid* herangezogen, welches im Zuge des FFG finanzierten Projekts „N440840 – OptEnGrid“ von der Bioenergy 2020+ GmbH entwickelt wird. Um Stärken und Schwächen einer vereinfachten Auslegung mit synthetischen Daten identifizieren zu können, wird mithilfe von *TRNSYS* (Klein et al., 2018) eine Gebäude- und Anlagensimulation der Siedlungsanlage erstellt. Die simulierten Bedarfe an Heizwärme aus der Simulation dienen als Referenzdaten zu synthetischen Heizleistungsprofile (SYN-HLP). Ziel der Arbeit ist ein Vergleich von mathematisch-basierenden Auslegungen eines Microgrids mit fehlenden Lastdaten durch synthetische und simulierte Heizleistungsprofile (SIM-HLP).

2. METHODIK

Grundsätzlich werden für eine mathematische Optimierung zur ganzheitlichen Auslegung von DERs reale Strom-, Wärme- und Kälteprofile benötigt, wobei Wärmeprofile in Warmwasser und Heizung getrennt werden. Synthetische Strom- und Warmwasserprofile werden auch für diese Analyse herangezogen, da die individuelle Nutzung des Verbrauchers stark schwanken kann. Heizungsprofile variieren zwar durch das Nutzerverhalten und unterschiedliche Auslegungsparameter, jedoch wird mithilfe einer *TRNSYS* Simulation und diversen Annahmen ein realistisches Heizleistungsprofil generiert. Für die ökologische und ökonomische Bewertung der Optimierungsvarianten benötigt eine mathematische Optimierung Kostenfunktionen, Betriebskosten, CO₂-Emissionen für Brennstoffe und elektrischen Strom vom öffentlichen Netz. Diese Parameter werden mit den synthetischen Strom- und Warmwasserprofilen sowie SIM-HLP in *OptEnGrid* geladen und bilden die erste Optimierungsvariante. Ziel der Optimierung sind Kosten- und CO₂-Einsparungen, indem DERs den Energiebedarf (teilweise) decken und einen idealen Betrieb bereitstellen. Anschließend werden die SYN-HLP statt den SIM-HLP verwendet und mit derselbe Methodik eine zweite Optimierungsvariante erstellt. Die Ergebnisse der beiden Optimierungsvarianten werden bzgl. der Auslegung von DERs (Leistungen), resultierender Kosten und ökologischen Einfluss gegenübergestellt.

2.1 SIEDLUNGSANLAGE IN DER STEIERMARK

Die Siedlungsanlage besteht aus vier Doppelhäusern (*DH*), einem Mehrfamilienhaus (*MFH*) und einer Energiezentrale (*EZ*). Die Energiezentrale versorgt die insgesamt 14 Wohneinheiten mit Strom aus dem öffentlichen Netz und mit Wärme aus einer zentralen Heizungsanlage. Weiters befindet sich ein Carport zur Aufladung von E-Fahrzeugen und zur Aufstellung etwaiger solarer Energieträger auf der Anlage. Aus Tab. 1 können die beheizten Raumflächen, die Heizwärme- (HWB) und Warmwasserbedarfe (WWB), die Heizlasten (HL), die elektrischen Endenergiebedarfe (W_{el}) und die Anzahl der Personen in den Doppelhäusern sowie im Mehrfamilienhaus entnommen werden.

Tab. 1: Ermittelte Gebäudekennndaten über ein Jahr anhand der Simulationssoftware *TRNSYS* (Klein et al., 2018) und angenommener Stromverbrauch in den Wohneinheiten (Statistik Austria I, 2017)

Gebäude	Fläche [m ²]	HWB [kWh]	WWB [kWh]	HL [kW]	W_{el} [kWh]	Bewohner [Pers]
Doppelhäuser	1232	67470	35175	77,3	35748	27
Mehrfamilienhaus	294	24289	16935	48,6	17171	13

Abb. 1 zeigt auf der linken Hälfte die Topologie der Siedlungsanlage, welche mit *OptEnGrid* und *TRNSYS* modelliert wird. Die grafische Modellierung für *TRNSYS* demonstriert die rechte Seite der Grafik unten.

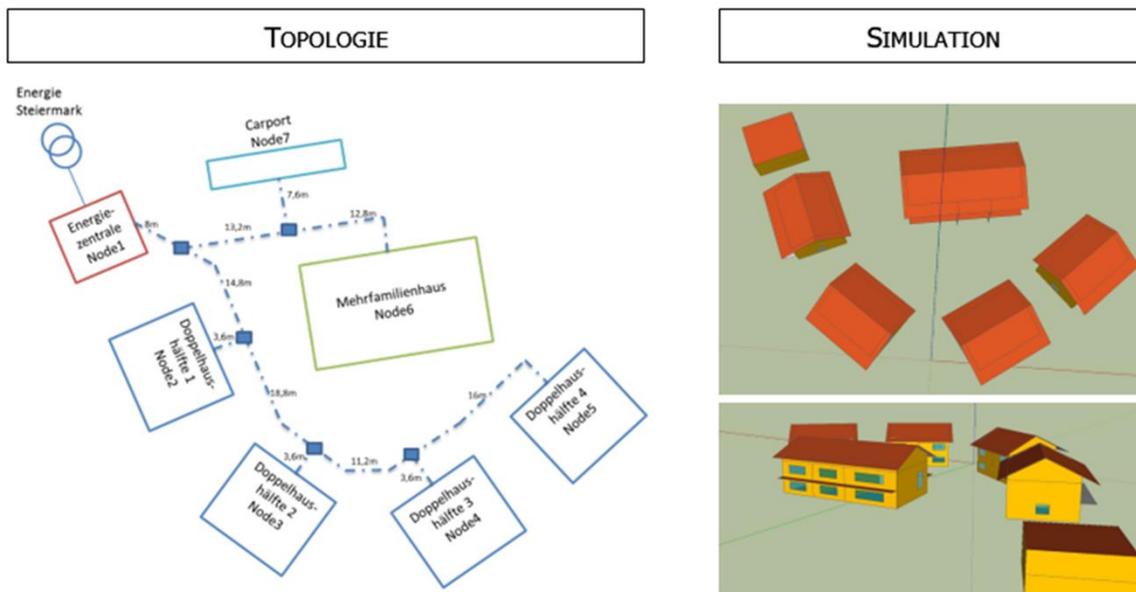


Abb. 1: Vereinfachte Topologie der Siedlungsanlage, der Aufbau des Energieverteilungsnetzes und die Gebäudemodellierung für die *TRNSYS* Simulation mit Google SketchUp Pro 2017

Um solar-dezentrale Energieträger, wie Photovoltaik und Solarthermieanlagen, für die Siedlungsanlage zu planen, müssen die **solararchitektonisch nutzbare Flächen (SAN-F)** pro Dachfläche (DF) und deren Ausrichtungen bzw. Dachneigungen erhoben werden.

Tab. 2: Solararchitektonisches Potential der Siedlungsanlage inkl. Neigung und Ausrichtung nach Gebäude bzw. Knoten

Knoten	Wohneinheit	SAN-F [m ² /DF]	Neigung [°]	Azimut [°]
1	Energy Central	113	35	-10
2	DH1 / DH2 / DH3 / DH4	127	26	65 / 35 / -35 / -45
6	MFH	217	20	-10
7	Carport	140	35	-10

2.2 SYNTHETISCHE LASTPROFILE UND WETTERDATEN

Für die Modellierungen – Simulation und Optimierung – wird ein steirischer Klimadatensatz mit einer Norm-Außentemperatur von -14,77 °C und 3199 Kd/a Heizgradtagen bei einer Raumtemperatur von 20 °C und einer maximalen Heizgrenze von 12 °C herangezogen. Die Stromprofile von Austrian Power Clearing & Settlement (APCS, 2018) werden zusätzlich mit einer randomisierenden Funktion (bis zu ±15 % Einfluss) korrigiert. Dadurch werden die Lastdaten nicht auf die 14 Wohneinheiten skaliert, sondern glätten das Gesamtstromlastprofil der Siedlungsanlage. Die korrigierten Stromlastprofile werden mit einem durchschnittlichen Strombedarf von 3560 kWh pro Haushalt und Jahr (Anlehnung an Statistik Austria I, 2018) multipliziert. Die Stromlastprofile dienen der Simulation als interne Lasten und der Optimierung als Rahmenbedingungen. Die standardisierten Profile für WWB (Edwards et al.,

2015) werden mit einem durchschnittlichen Wärmebedarf von 1300 kWh pro Person und Jahr (berechnet für Niederösterreich durch Statistik Austria II & III, 2017) hochgerechnet. Mit den synthetischen Warmwasserprofilen werden die Abzapfmengen des Warmwassers über ein Jahr für die Simulation errechnet und dienen als Lastprofile für die Optimierung. Die SYN-HLP stammen aus dem ISEB Projekt und vom Programm „Energie der Zukunft“ (Run-Ming et al., 2005). Diese Profile werden für den Vergleich von SYN-HLP UND SIM-HLP im mathematischen Optimierungsprogramm herangezogen.

2.3 ÖKONOMISCHE UND ÖKOLOGISCHE PARAMETER

In der Optimierung sind ökonomische Parameter wie Kostenfunktionen und Angaben über Wartungskosten und Lebensdauer essentiell, um Lebenszykluskosten errechnen zu können. Aus diesem Grund wurde im Zuge des Forschungsprojekts „Grundlagenforschung für Smart- und Microgrids“, finanziert vom Land Niederösterreich (K3-F-755/001-2017), Daten zu diversen Technologien im Haushaltssektor erhoben. Mithilfe der erstellten linearen Kostenfunktionen und laufenden Betriebskosten werden in der mathematischen Optimierung Investitionsszenarien kalkuliert. Die betrachteten Energiepreise beziehen sich auf den Energieträgervergleich des Biomasse-Verbandes von Juli 2019 (Österreichischer Biomasseverband, 2018).

Für die Modellierung der CO₂-Bilanzen von Brennstoffen werden Daten aus einem Bericht des Umweltbundesamt (Umweltbundesamt, 2018) und aus Angaben des österreichischen Biomasse-Verbandes (Österreichischer Biomasse-Verband, 2017) verwendet. Die CO₂-Bilanzen vom elektrischen Stromnetz Österreich, bezogen auf eine monatliche Darstellung, können von der OIB-RL 6 von 2019 übernommen werden (OIB-RL 6, 2019).

2.4 TRNSYS SIMULATION

Abb. 2 gibt einen Einblick über die thermische Simulation mit *TRNSYS*, verwendet im Szenario *SIM-HLP*. Für jedes Doppelhaus ist eine hydraulische Schaltung, in Abb. 2 rechts, mit einer Übergabestation vorgesehen. Für das Mehrfamilienhaus gibt es darüber hinaus drei Heizkreise für Ober- und Erdgeschoß, sowie einen weiteren Heizkreis für Spitzenlasten. Letzterer kommt dann zur Anwendung, falls mehr als zwei der sechs Wohneinheiten unterhalb des Sollwerts liegen.

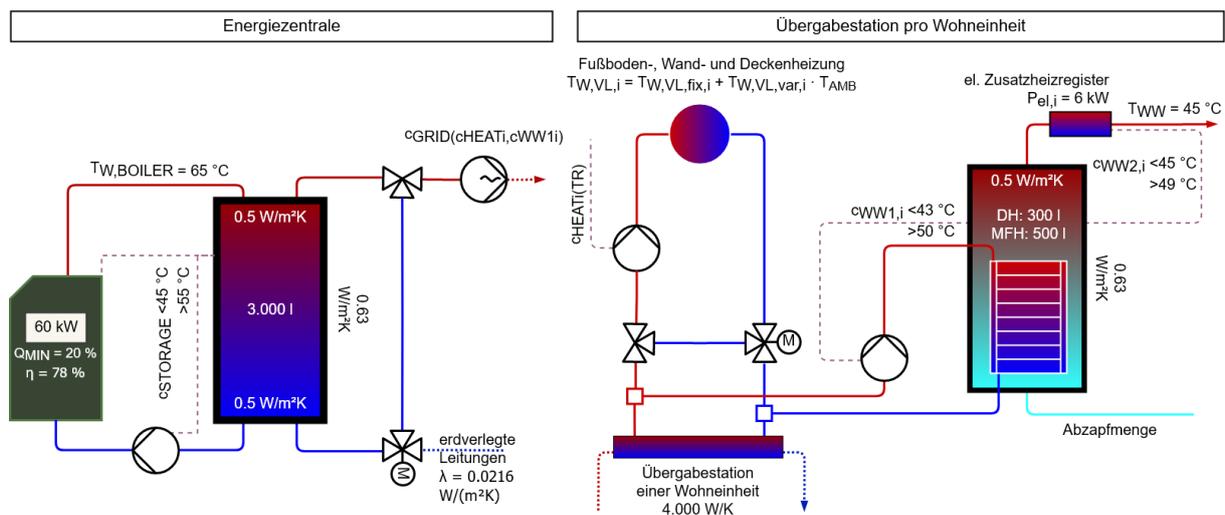


Abb. 2: Schema der Anlagensimulation für die Siedlungsanlage inklusive Annahmen, Auslegungen und Parameter

Eine Einspritzschaltung pro Wohneinheit regelt die Vorlauftemperatur bei konstantem Volumenstrom. Die Vorlauftemperatur ist abhängig von der Außentemperatur und die Einschaltzyklen der Pumpe werden über die Raumtemperatur gesteuert. Die Vorlauf-temperatur errechnet sich aus einer linearen Funktion mit einem fixen Vorlauf-Sollwert und einem von der Außentemperatur abhängigen Anteil. In der Nacht reduziert sich der Sollwert für die Raumtemperatur um 1 bis 2 K (variiert nach Wohneinheit). Zusätzlich beinhaltet die Raumtemperaturregelung für die Sekundärpumpe eine Hysterese von 0,5 K. Als interne Last werden die Stromdatenprofile und anwesende Personen, jedoch nicht die Warmwasserprofile pro Wohneinheit berücksichtigt. Die Anwesenheit der Personen wird über eine Zufallsfunktion angenommen, die zwischen einem prozentuellen Mindest- und Maximalwert schwanken kann. Die Mindest- und Maximalwerte richten sich nach zwei verschiedene Haushaltsarten („Familienhaushalt“ und „Single- oder Zweipersonenhaushalt“). Der Maximalwert wird vor allem am Spätabend bis morgens erreicht. Der Mindestwert für die Zufallsfunktion variiert je nach Haushaltsart und Uhrzeit zwischen 0 bis 50 %. Die Wärmeabgabe in den Gebäuden erfolgt über Wand-, Fußboden- und Deckenheizungen. Da die modularen Gebäude aus Baustoffen mit geringem CO₂-Äquivalenten bestehen, werden vorwiegend Materialien aus Holz, Holzfasern und Lehmputz mit integrierter Verrohrung betrachtet.

2.5 OPTIMIERUNG MIT OPTENGRID

OptEnGrid ist ein mathematisches Optimierungsprogramm für ein ganzheitliche Planung und Auslegung von dezentralen Energieressourcen inklusive deren idealer Betrieb. Das Programm basiert auf mathematische Optimierungsalgorithmen von DER-CAM (Cardoso et al., 2018) und wird mit neuen Ansätzen vor allem im thermischen und Wasserstoff-Bereich erweitert. Das Optimierungsprogramm besteht aus einem quasistatischen Aufbau unter Verwendung von *Mixed Integer Linear Programming* mit einer Zeitschrittweite von einer Stunde. Anhand diverser Eingabemöglichkeiten – wie thermische und elektrische Lastprofile, Wetterdaten, Investitionskosten, CO₂-Emissionen, Wirkungsgraden, etc. – errechnet *OptEnGrid* eine Vielzahl an Investitionsportfolios und Einsatzplänen und wählt anschließend die ideale Variante aus. Eine wesentliche Rahmenbedingung der Optimierung ist, dass die Nachfrage an Energie in jedem Zeitschritt mit einem Energieträger, -speicher oder -transfer gedeckt wird. Diese Bilanz wird für einen festgelegten Zeitraum optimiert und mit Hinblick auf das Projektziel (Kosten und/oder CO₂-Emissionen) minimiert. Dabei werden pro Zeitschritt die Betriebskosten (bspw. jährliche Investitionskosten, Brennstoffkosten, Strompreise und Netzegebühren, Wartungskosten, CO₂-Steuern, etc.) durch den richtigen Einsatz von Technologien minimiert und somit bestimmt, welche Investitionen im Sinne des Projektziels am sinnvollsten sind.

Die Erweiterungen des Optimierungstools *OptEnGrid*, die im Laufe des Projekts *OptEnGrid* von der BIOENERGY 2020+ GmbH integriert wurden, beinhalten im Vergleich zu der ausgehenden Basisversion zusätzliche Funktionen, bspw. die Wasserstoffproduktion und deren Speicherung, die Berücksichtigung von Saisonspeichern und die von der Außentemperatur abhängigen Leistungszahl für Wärmepumpen und Kompressionskältemaschinen.

Lastprofile werden für *OptEnGrid* in standardisierten Wochen-, Wochenend- und Spitzenlasttage für jeden Monat konfiguriert. Dadurch ergeben sich 36 Tageslastprofile für Strom, Warmwasser und Heizwärme, die mit dezentralen Energieträgern oder öffentlichen Energienetzen (Strom, Gas) gedeckt werden müssen. Diese Lastprofile können entweder synthetisch oder simuliert sein. Weiteres müssen diverse Parameter und Energiekennzahlen von der Simulation auf die Optimierung konvertiert werden, da *OptEnGrid* im Gegensatz zu *TRNSYS* teilweise Wärmeverluste in Prozent des Energietransfers berechnet.

3. RESULTATE

Abb. 3 zeigt die Referenzszenarien oder *Base Case Szenarien* mit SIM-HLP (*BC SIM*) und SYN-HLP (*BC SYN*), die in *OptEnGrid* modelliert werden. Eine Abweichung der beiden Referenzszenarien bezogen auf den jährlichen Endenergiebedarf und den produzierenden CO₂-Emissionen liegen unter 0,5 %, dementsprechend liegen die Unterschiede lediglich in den Heizleistungsprofilen. Die letzten beiden Auswertungen der Grafik demonstrieren die Ergebnisse der Optimierungsvarianten mit SIM-HLP (*OPT SIM*) und SYN-HLP (*OPT SYN*). Im Vergleich zu den jeweiligen Referenzfällen in *OptEnGrid* (*BC SIM* und *BC SYN*) werden die Lebenszykluskosten um 22 % bzw. 27 % und die jährlichen CO₂-Emissionen um 85 % bzw. 87 % reduziert. Hierbei taucht bei der ersten Optimierungsvariante *OPT-SIM* eine um ΔQ_{BrSt} höhere Brennstoffzufuhr im Jahr auf.

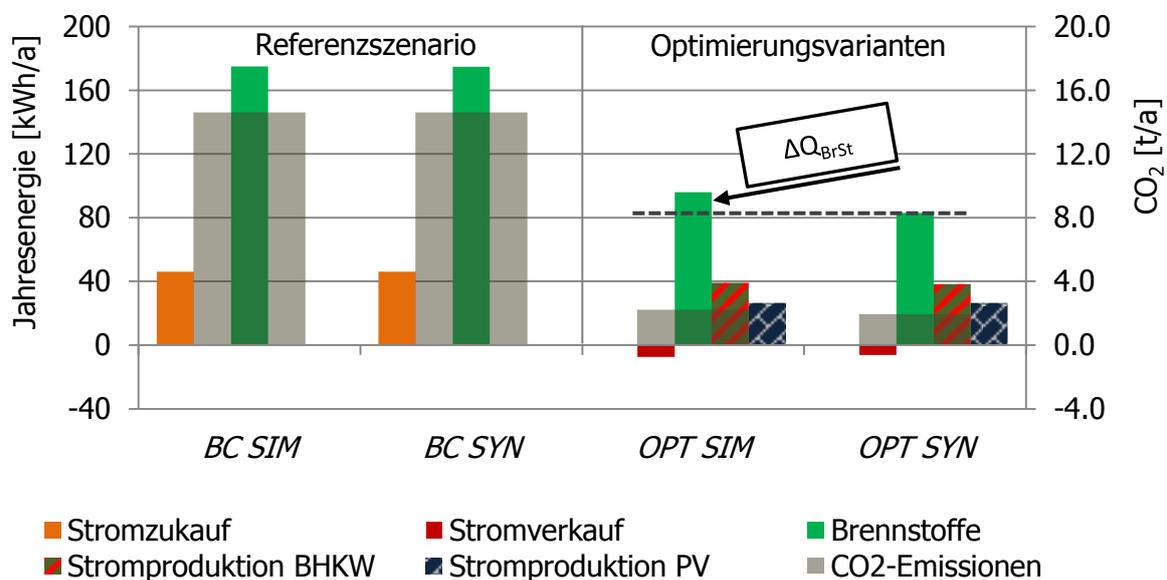


Abb. 3: Gegenüberstellung von *TRNSYS* und Investitionsszenarien von *OptEnGrid*

Anhand der optimal gewählten Energieträger und Speichertechnologien werden die Auswirkungen der Lastprofile und ein Zusammenhang mit der erhöhten Brennstoffzufuhr ersichtlich. In beiden Varianten wird eine Kombination aus Grundwasserwärmepumpe (*GSHP*), Blockheizkraftwerk (*BHKW*), Photovoltaik-Anlage (*PV*) und Stromspeicher (*E-Storage*) als Optimum errechnet. Im *OPT SYN* Szenario reicht jedoch noch eine geringe Solarthermie-Anlage (*SOLAR*) aus, um alle stündlichen Energiebilanzen im Jahr abdecken zu können. Hingegen benötigt das Szenario *OPT-SIM* zusätzlich eine mit 29 kW biogenbetriebene Zentralheizung (*CENTRAL HEAT*). Den Grund für diese Auslegung zeigen die Spitzenlastprofile der zwei Optimierungsvarianten, siehe Abb. 5. Als Beispiel wird das Spitzenlastprofil der gesamten Siedlungsanlage vom April herangezogen. Das thermische Spitzenlastprofil in der Optimierungsvariante *OPT SYN* (Abb. 5 oben) zeigt kaum Änderungen zum thermischen Wochen- oder Wochenendprofil, da die SYN-HLP ein für jedes Monat durchgängiges Profil aufweist. Das thermische Spitzenlastprofil im April für *OPT SIM* (unten in Abb. 5) beinhaltet Spitzen die rund 50 % höher sind als im üblichen Wochen- oder Wochenendprofil. So zeigt sich in der Abb. 5 ein Energiebedarf für die Optimierungsvariante *OPT-SIM* zwischen 6 und 13 Uhr, der nicht mehr mit der *GSHP*, den *BHKW* und den thermischen Speicher (*HT und LT Storage*) gedeckt werden kann und dadurch die zusätzliche biogen-betriebene Heizleistung benötigt.

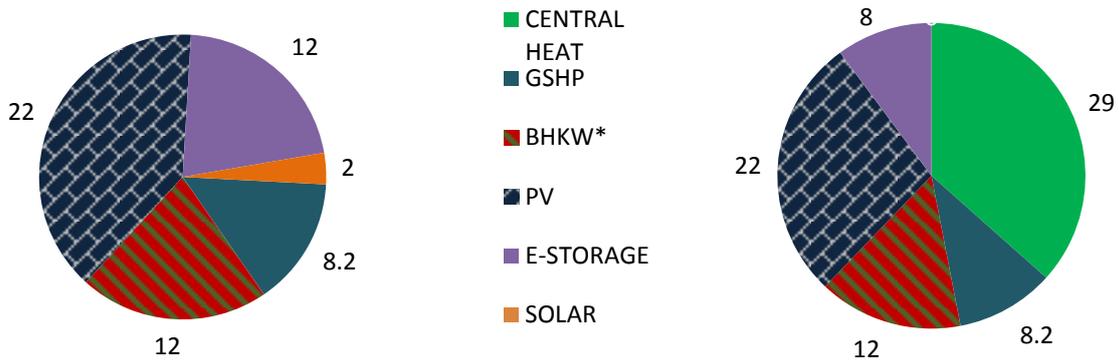


Abb. 4: Technologieportfolios laut *OptEnGrid* für die Optimierungsvarianten *OPT SYN* (links) und *OPT SIM* (rechts)

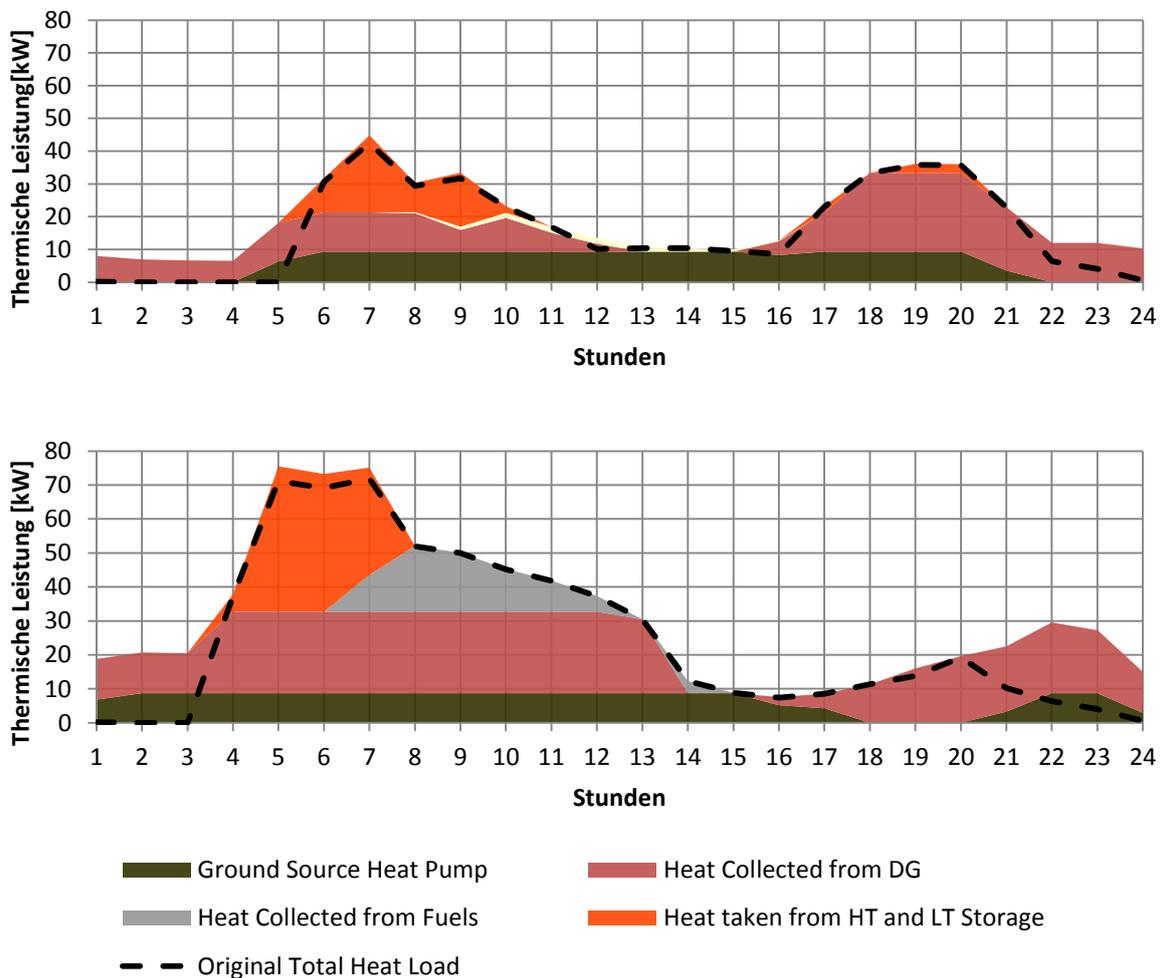


Abb. 5: Spitzenlastprofile im April laut Optimierungsprogramm *OptEnGrid* für die Optimierungsvarianten *OPT SYN* (oben) und *OPT SIM* (unten)

4. SCHLUSSFOLGERUNG

Die Kombination aus thermischer Simulation und einer gesamtheitlichen Auslegung mittels mathematischer Optimierung zeigt enorme Einsparmöglichkeiten in Bezug auf Lebenszykluskosten und CO₂-Emissionen. Weiters wird ersichtlich, welche Notwendigkeit die thermische Simulation bei einer Siedlungsanlage dieser Größe haben kann, da eine vereinfachte Variante mit synthetischen Lastprofilen zu einer Fehlinterpretation führen kann. Um die Ergebnisse aus der mathematischen Optimierung via *OptEnGrid* überprüfen zu können, müssen die Energieträger und Speichertechnologien in die Simulation eingebettet werden, um tatsächliche Realisierbarkeit der Technologien überprüfen zu können. Weiters muss die *TRNSYS* Simulation den Betrieb der Technologien von *OptEnGrid* berücksichtigen, da die Optimierung in der Planung bereits einen MPC (*Modelling Predictive Controller*) vorsieht.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds und im Rahmen des COMET-Programms der österreichischen Bundesregierung finanziert, die beide von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) betrieben werden. Die Förderung durch den Bund des Landes Niederösterreich und die UBOS 4.0 Development and Consulting GmbH wird hochgeschätzt.

LITERATUR

- APCS (2018) Synthetische Lastprofile; zuletzt abgerufen am 24.08.2018;
<https://www.apcs.at/de/clearing/technisches-clearing/lastprofile>
- Cardoso G., Eto J. (2018) DER-CAM⁺ User Manual; Lawrence Berkeley National Laboratory
- Edwards S., Beausoleil-Morrison I., und Laperrière A. (2015) Representative hot water draw profiles at high temporal resolution for simulating the performance of solar thermal systems; Solar Energy 2015
- Klein S. A. et al. (2018) TRNSYS 18 – A Transient System Simulation Program, Volume 4
- OIB-RL 6 (2019): Energieeinsparung und Wärmeschutz; OIB-Leitfaden Energietechnisches Verhalten von Gebäude
- Österreichischer Biomasse-Verband (2019) Energieträger-Vergleich von Juli 2019
- Statistik Austria I (2018) Energiestatistik: Strom- und Gastagebühren 2008/2012/2016, im Auftrag der Energie-Control Austria und des BMNT. 2018.
- Statistik Austria II (2017) Energiestatistik: MZ Energieeinsatz der Haushalte 2003/2004, 2005/2006, 2007/2008, 2009/2010, 2011/2012, 2013/2014 und 2015/2016
- Statistik Austria III (2017) Zahlen-Fakten-Daten - Bundesland Niederösterreich
- Umweltbundesamt (2018) Berechnung von Treibhausgas (THG) Emissionen verschiedener Energieträger; zuletzt abgerufen am 18.09.2019;
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3856.pdf>
- Run-Ming Y., Steermers K. (2005) A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK, *Energie and Building*; Volume 37