

Potentialanalyse eines Schwarms biogener Wärmekraftkoppelungsanlagen zur Kompensation fluktuierender erneuerbaren Stromquellen

Philipp Vögelin, Gil Georges, Konstantinos Boulouchos

ETH Zürich, Sonneggstrasse 3, +41 44 632 07 96, voegelin@lav.mavt.ethz.ch,
www.lav.ethz.ch

Kurzfassung: Der zunehmende Anteil erneuerbarer fluktuierender Elektrizitätserzeugung gepaart mit abnehmender Bandlast grosser thermischer Kraftwerke fordert zukünftig dynamische einsetzbare Anlagen zur Stromerzeugung oder –Speicherung. Ein substantieller Beitrag könnten dabei dezentrale dynamisch eingesetzte Wärmekraftkoppelungsanlagen (WWK) liefern, die gleichzeitig die entstehende Wärme für Gebäude oder Industrieprozesse nutzbar macht. Weiter kann der koordinierte Verbund mehrerer Anlagen als virtuelles Kraftwerk dienen und den Einsatz gebündelter Leistung ermöglichen. Das Projekt „CHPswarm“ untersuchte das Potential solcher Schwärme biogener WKK-Anlagen in verschiedenen Schweizer Regionen und deren Einfluss auf ein Stromnetz mit erhöhten PV-Penetrationen. Es waren vier Forschungsgruppen aus den Fachbereichen Verbrennungssysteme (WKK-Technologie, -Optimierung) Geoengineering (räumliche Daten, Biomasseverfügbarkeit), Elektrotechnik (Stromnetzsimulationen) und Energieökonomik (Zukunftsszenarien bis 2050) involviert. Wir stellen in diesem Beitrag das Projekt vor, gehen auf die Modellierung von Wärmesenken und WKK sowie deren Optimierung ein und geben Einblicke zum Potential eines solchen Ansatzes. Nimmt man als Biomethankosten 0.16 EUR/kWh, 2000 Betriebsstunden pro Jahr und die Wärmevergütung an ergeben sich Stromgestehungskosten von 0.20 bis 0.28 EUR/kWh je nach Grössenklasse (bei Erdgas 0.11-0.18 EUR/kWh). Die Jahresanalyse der Region des Kantons Luzern zeigt, dass die Nutzung der verfügbaren Biomasse als Biomethan (692 GWh) in einem WKK-Schwarm (256 GWhel, 37% elektr. Wirkungsgrad) vom Stromnetz (2713 GWhel) toleriert wird, auch wenn die Anlagen ohne Kommunikation nach dem Marktpreis gewinnorientiert operieren. Auf diese Weise können bereits 12-15% (20-30% bei doppelter Schwarmgrösse) der Residuallast aus Nachfrage und PV-Erzeugung abgedeckt werden. Erst bei der doppelten Grösse entstehen erste Netzengpässe, die aber mittels Verlagerung von Betriebsstunden behoben werden können.

Der öffentliche Projektbericht gibt detailliert Auskunft über die Arbeit aller Gruppen und deren Resultate [1].

Stichwörter: Wärmekraftkoppelung, Biomasse, Photovoltaik, Stromnetz

1 Forschungsprojekt „CHPswarm“

1.1 Konzept

Der zunehmende Anteil erneuerbarer fluktuierender Elektrizitätserzeugung gepaart mit abnehmender Bandlast grosser thermischer Kraftwerke fordert zukünftig dynamische einsetzbare Anlagen zur Stromerzeugung oder –Speicherung.

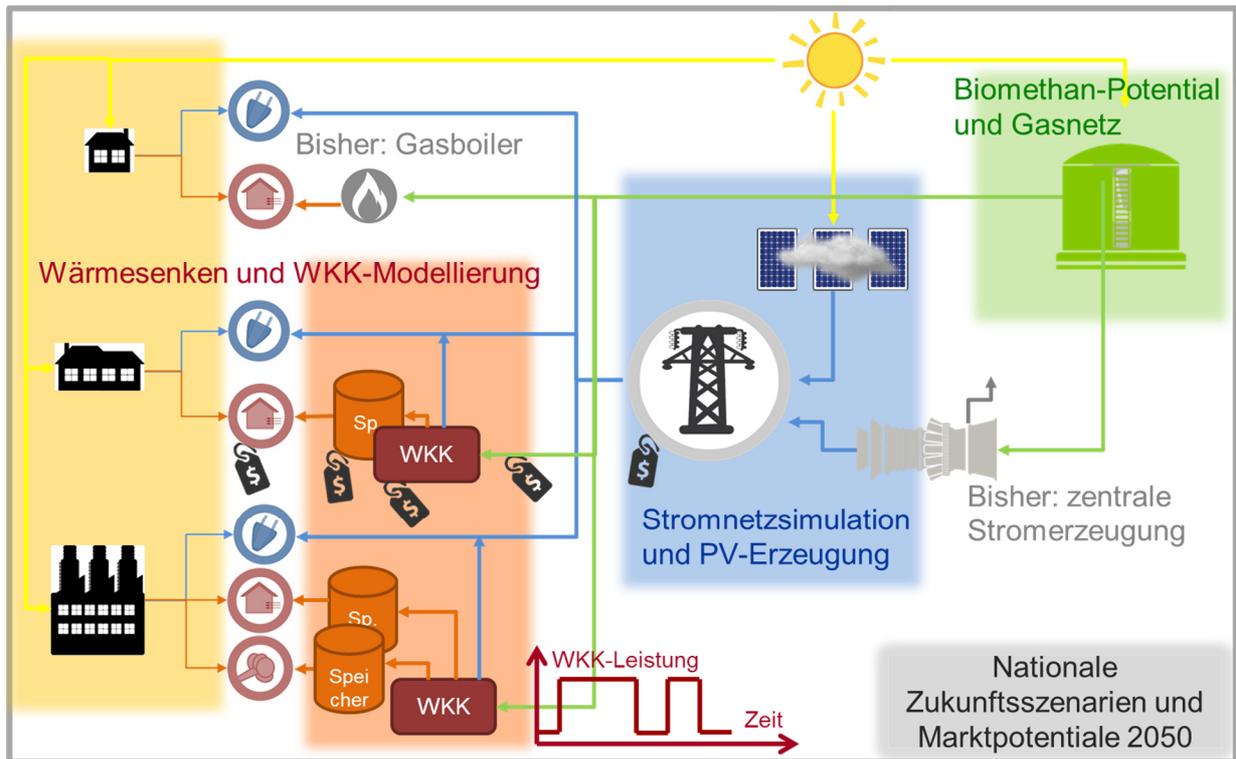


Abbildung 1: Konzeptschema biogener WKK-Schwarm mit den vier Projektgruppen.

Ein substantieller Beitrag könnten dabei dezentrale dynamisch eingesetzte Wärmekraftkoppelungsanlagen liefern, in deren Kern eine thermische Maschine chemisch gebundene Energie eines Brennstoffes in Kraft umwandelt und gleichzeitig die entstehende Wärme für Gebäude oder Industrieprozesse nutzbar macht. Weiter kann der koordinierte Verbund mehrerer Anlagen als virtuelles Kraftwerk dienen und den Einsatz gebündelter Leistung ermöglichen.

Abbildung 1 skizziert das Konzept des biogenen WKK-Schwarms, wobei die konventionellen Erzeugungstechnologien zum Vergleich eingezeichnet sind. Üblicherweise wird in einem zentralen Grosskraftwerk mit höchsten thermodynamischen Wirkungsgraden Strom für das Verteilnetz erzeugt und die kaum nutzbare Tieftemperaturabwärme rückgekühlt (~40%). Wärme hingegen wird dezentral bei den Wärmesenken (Gebäude, Industrie) mit einem Brenner erzeugt. In diesem Ansatz soll aber regionale Biomasse in Form von Biomethan übers Gasnetz an dezentralen WKK-Anlagen verteilt werden, die Strom nach Bedarf dem Netz zuführen und eine Wärmesenke decken (Hoch- und Tieftemperaturwärme). Der Wärmespeicher sorgt für die zeitliche Entkoppelung von Stromerzeugung und Wärmeabgabe. Der Gesamtwirkungsgrad erhöht sich damit auf etwa 90% und der Netzausgleich kann direkt auf den tiefsten Netzebenen stattfinden. Die Sonnenstrahlung

übersetzt sich in diesem Energiesystem langfristig ins Biomassewachstum und kurzfristig mit relevanter Dynamik in die dezentrale PV-Erzeugung sowie die Beeinflussung des Gebäudewärmebedarfs.

Das Projekt „CHPswarm“ untersuchte das Potential solcher Schwärme biogener WKK-Anlagen in verschiedenen Schweizer Regionen und deren Einfluss auf ein Stromnetz mit erhöhten PV-Penetrationen. Für diese Untersuchung wurde als Brennstoff Biomethan angenommen, das aus Vergärung von Bioabfall oder mittels Vergasung und Katalyse aus Holz gewonnen wird. Die Speicherung und Verteilung erfolgt über das Gasnetz. Auf diese Weise soll aus einem CO₂-freien Brennstoff hochqualitative Energie in Form von Strom erzeugt werden, die zeitlich flexibel eingesetzt werden kann.

1.2 Gasmotoren als WKK-Technologie

WKK-Anlagen mit Gasmotoren haben folgende Merkmale, die primär für ihre Nutzung als flexible Stromerzeugungstechnologie und eher sekundär als Heizung sprechen:

- Ansprechzeit auf Vollast von einigen Sekunden bei Kleinanlagen bis 25 kW elektrischer Leistung und einige Minuten bei Grossanlagen bis 20 MW. Grosse Gas- und Dampfkraftwerke benötigen mindestens 20 min.
- Dezentrale Positionierung der Anlagen im Verteilnetz auf den unteren beiden Netzebenen, wobei lokale fluktuierende Stromnachfrage gedeckt werden kann ohne Belastung der Übertragungsleitungen auf höheren Netzebenen.
- Hoher Gesamtwirkungsgrad von etwa 90 % bei vollständiger Nutzung von Strom und Wärme, im Gegensatz zu grossen Gas- und Dampfkraftwerken mit etwa 60 % und der rückgekühlten Tieftemperaturabwärme.

Andere thermische Maschinen wie Brennstoffzellen oder Dampfturbinen scheiden vor allem wegen deren Brennstoffe oder Betriebsanforderungen (Anzahl Zyklen, Ansprechzeit) aus.

Den Vorteilen von Gasmotor-WKKs stehen aber hohe spezifische Kosten im Vergleich zu Grosskraftwerken entgegen, was für einen rentablen Betrieb hohe stündliche Strompreise bei Zeiten der Knappheit fordert. Die Betriebsflexibilität erreicht die Anlage durch einen Wärmespeicher, der für eine zeitliche Entkoppelung von Stromerzeugung und meist kontinuierlichen Wärmebereitstellung sorgt.

1.3 Theoretisches Potential in der Schweiz

Betrachtet man die Fragestellung nach dem biogenen WKK-Potential rein theoretisch auf Basis der nachhaltig verfügbaren Biomasse [2], ergeben sich 15 TWh Biomethan verteilt über das Erdgasnetz (Abbildung 2). Der Brennstoff setzt sich in Gasmotor-WKK-Anlagen zu dezentral verfügbaren Strom und Wärme um, die ~10% beziehungsweise ~9% des Schweizerischen Jahresbedarfs ausmachen.

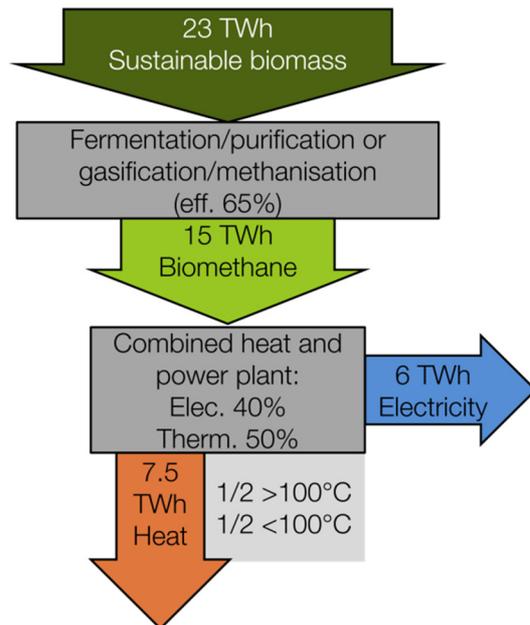


Abbildung 2: Theoretisches aggregiertes Potential nachhaltiger Biomasse [2] und ihrer Umsetzung zu Strom und Wärme mittels WKK-Anlagen. Die Energiemengen entsprechen ~10% des jährlichen Schweizerisch Strombedarfs und ~9% der Wärme aus Erdgas.

Nimmt man als Gedankenexperiment an, dass die WKKs 2000h pro Jahr laufen sollen und der Anlagenpark aus Einheiten mit 1000x1000kW, 10'000x100kW und 100'000x10kW elektrischer Leistung besteht, ergäbe sich eine Spitzenleistung des virtuellen Kraftwerkes von 3GW oder einem Drittel des Schweizer Spitzenstrombedarfs.

1.4 Projektgruppen und Artikelumfang

Die vier involvierten Forschungsgruppen sind in Abbildung 1 zusammengefasst:

- Unsere Gruppe das Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV, ETH Zürich) brachte die WKK-Technologie und -Optimierung sowie die Wärmesenkenmodelle ein.
- Das Geoinformation Engineering (GIE, ETH Zürich) erfasste die räumliche und zeitliche Biomassverfügbarkeit, optimierte potentielle Standorte für Biogasanlagen und bearbeitete Wärmesenkenstandorte (Gebäude, Industrien).
- Die Forschungsstelle Energienetze (FEN, ETH Zürich) modellierte und simulierte das Elektrizitätsnetz inklusive der PV- und WKK-Penetration.
- Die Energy Economics Group (Paul Scherrer Institut) zeichnete Zukunftsszenarien und berechnete ökonomische Potentiale der Erzeugungstechnologien bis 2050.

Wir stellen in diesem Beitrag das Projekt vor, gehen auf die Modellierung von Wärmesenken und WKK sowie deren Optimierung ein und geben Einblicke zum Potential eines solchen Ansatzes. Der öffentliche Projektbericht gibt detailliert Auskunft über die Arbeit aller Gruppen und deren Resultate [1].

1.5 Regionsauswahl für die Fallstudien

Eine detaillierte Analyse für die ganze Schweiz basierend auf einzelnen Wärmesenken, Biomassevorkommen oder Verteilnetzen bis zum integrierenden Energiesystem des WKK-

Schwarm würde den Rahmen sprengen. Deshalb fokussierten wir uns auf Fallstudien repräsentativer Schweizer Regionen. Thurgau ist ländlich, Luzern gemischt und Basel rein städtisch (Abbildung 3). Zur geographischen Definition nutzten wir die Kantons Grenzen.

Demographie	ländlich	städtisch	gemischt
Topographie	flach	alpin	voralpin
Sonnen- einstrahlung	tief	mittel	hoch
Dominierende Biomasse	Gülle	Kompost	Holz

Abbildung 3: Relevante Eigenschaften von Regionen in verschiedenen Kombinationen führte zu den Fallstudien-Regionen Kantone Thurgau, Luzern und Basel-Stadt.

Abbildung 4 zeigt eine schematische Abgrenzung der WKK-Standorten und PV-Penetration. Die Gebäude- bzw. Industriinfrastruktur und Biomasse überdeckt die ganze Region, wobei das Stromnetz ein eingegrenztes Gebiet einschliesst. Im ganzen Stromnetzgebiet findet über Gebäudedächer die PV-Erzeugung statt. Die PV-Penetrationsstufen für die ganze Schweiz haben wir aus der Studie Energieperspektiven 2050 von Prognos (5.5, 11, 16.5TWh [3]) übernommen und mittels der Bevölkerungszahl auf die Regionen herunterskaliert. Wiederum ein kleinerer Teil des Gebiets ist zusätzlich mit dem Erdgasnetz erschlossen, was überhaupt die Bedingungen für die Installation von Biogasanlagen und WKKs schafft.

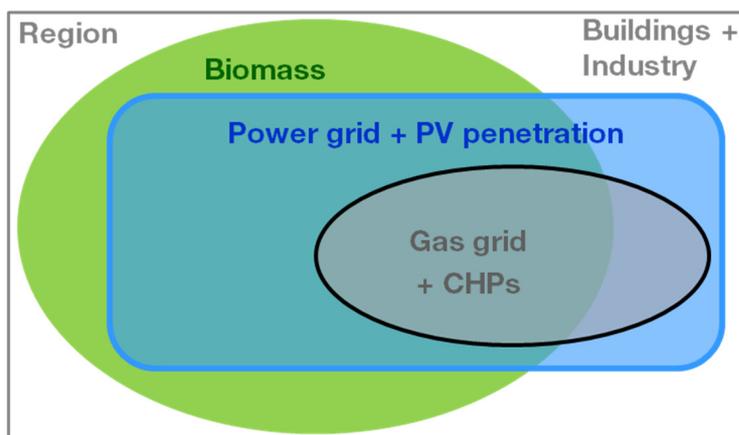


Abbildung 4: Schematische Abgrenzung von Ressourcen, Netzen und WKK-/Biogasanlagen-Standorten.

2 Modellierung

2.1 Gebäudewärmebedarf

Das Verhalten der Wärmesenke beeinflusst den WKK-Betrieb massgeblich im Tages- und Wochengang sowie saisonal. Deshalb haben wir das Gebäudewärmemodell nach der Norm EN ISO 13790 aufgebaut [4]. Das Modell simuliert das Gebäude in stündlicher Auflösung über ein ganzes Jahr als eine thermische Masse mit Wärmeverlusten durch die Gebäudehülle, Wärmeerträgen durch Sonneneinstrahlung, inneren elektrischen Lasten und metabolischer Wärme der Bewohner beschrieben (Abbildung 5). Das Modell hält die Raumtemperatur auf einer Mindesttemperatur, woraus sich der Wärmebedarf ergibt. Alle Gebäude wurden individuell berechnet definiert über Grundfläche, Anzahl Geschosse und Bauperiode (aufbereitet von GIE, siehe 1.4). Als Parametrisierung wurden Standardwerte des Schweizerischen Ingenieur und Architektenverband verwendet [5] [6] [7]. Wetterdaten wie Aussentemperatur und Sonneneinstrahlung haben wir mit dem Programm „meteonorm“ für ein typisches repräsentatives Wetterjahr der Region erzeugt [8].

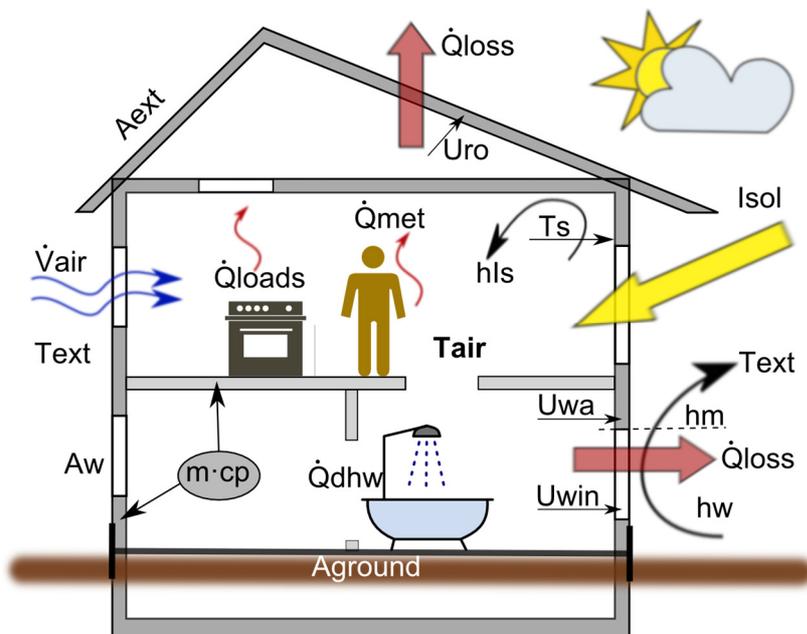


Abbildung 5: Gebäudewärmemodell mit stündlicher Auflösung nach EN ISO 13790 [4]. Aext: Aussenfläche, Aground: Grundfläche, Aw: Fensterfläche, Isol: Sonnenstrahlung diffuse/direkt, hls: Wärmeübergangskoeff. Innen, hm: Wärmeübergangskoeff. Gebäudemasse aussen, hw: Wärmeübergangskoeff. Fenster aussen, m·cp: Wärmekapazität Gebäudemasse, Qdhw: Wärmebedarf Warmwasser, Qloads: Interne elektr. Lasten, Qmet: metabolische Wärme Bewohner, Tair: Raumtemperatur Luft, Text: Umgebungstemperatur, Ts: Temperatur Innenoberfläche, Uro: Wärmeübergangskoeff. Dach, Uwa: Wärmedurchgangskoeff. Wände, Uwin: Wärmedurchgangskoeff. Fenster, Vair: Frischluftstrom.

2.2 Industriewärmebedarf

Der Industriewärmebedarf haben wir auf Basis von eigens recherchierten Daten erarbeitet (Industriestandorte von GIE, siehe 1.4). Wir bildeten aus Daten wie dem jährlichem Gesamtbedarf, dem Hochtemperaturanteil über 90 °C und dem Prozess- bzw. Schichtbetrieb ein Wärmebedarfsmuster über 8760 h mit meist konstanten Wärmeleistungen.

2.3 Wärmekraftkoppelung

Die WKK-Anlage ist vereinfacht als Energiekonverter mit Wirkungsgraden für Elektrizität und Wärme modelliert, der nur auf Vollast bei höchstem elektrischem Wirkungsgrad betrieben wird, siehe Abbildung 6. Die zeitliche Basis sind wiederum 8760 Stunden. Der Wärmespeicher ist als eine Kapazität mit konstantem stündlichem Verlustfaktor modelliert.

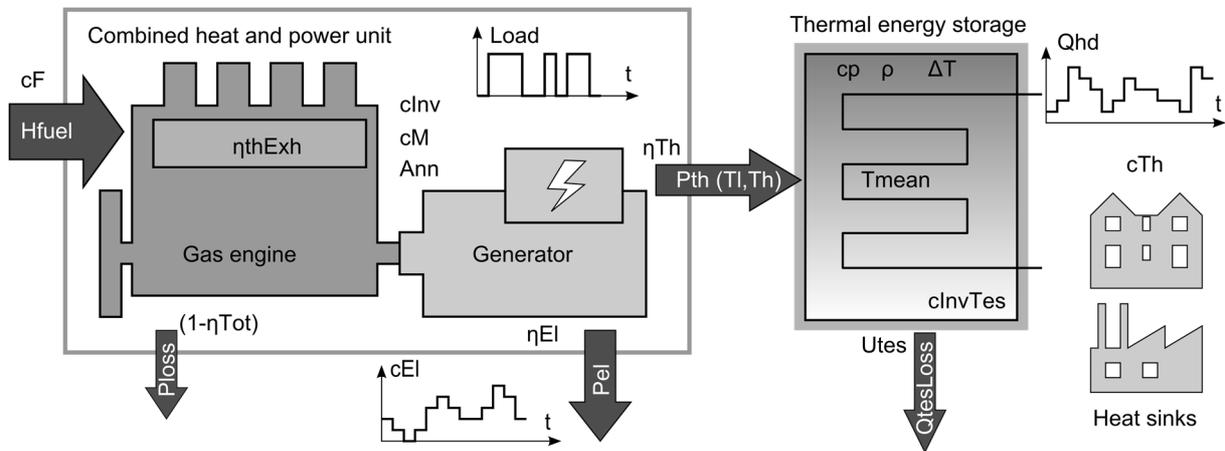


Abbildung 6: Schema des WKK-Modells mit technischen und ökonomischen Größen. Ann: Annuitätsfaktor, c_F : Brennstoffpreis, c_{inv} : Investitionskosten, c_{Th} : Wärmepreis, c_{invTES} : Investitionskosten Wärmespeicher, c_M : Unterhaltskosten, cp : Wärmekapazität Speichermedium, η_{Th} : thermischer Wirkungsgrad, η_{ThExh} : thermal efficiency of the exhaust gases, η_{Tot} : total plant efficiency, H_{fuel} : fuel enthalpy, P_{loss} : heat power loss from plant, ρ : density of heat storage media, T_{mean} : mean TES temperature, U_{tes} : U-value TES losses, Q_{hd} : heat demand, $Q_{tesLoss}$: TES heat losses, Tl/h : low/high temperature.

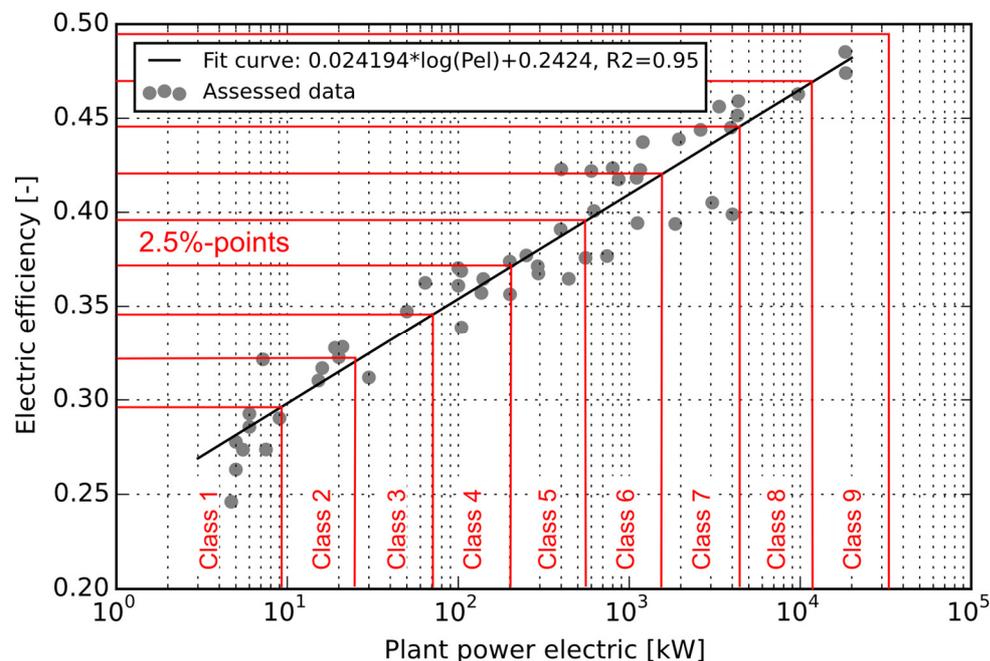


Abbildung 7: Unterteilung des Leistungsspektrums von Gasmotor-WKK-Anlagen in neun Klassen anhand des elektrischen Wirkungsgrades.

Das breite elektrische Leistungsspektrum von 3-20'000 kW wurde auf Basis des elektrischen Wirkungsgrades in neun Klassen unterteilt, wo nebst den Wirkungsgraden auch Kostenparameter für die Anlage und den Speicher erfasst wurden (Abbildung 7). Es zeigt sich ein logarithmisches Verhalten, wo sich konstante Schritte im elektrischen Wirkungsgrad

von 2.5%-Punkten zur Leistungsabstufung anbieten. Alle Anlagenspezifikationen sind innerhalb der Klassen konstant gesetzt, damit die mathematische Formulierung als lineares Programm für die Optimierung möglich ist. Als konstanter Wärmepreis sind die Kosten einer äquivalenten Biomethan-Gasheizung angenommen [9] [10]. Der Strompreis ist zeitvariabel und von der Epex Spot als Zeitreihe stündliche Day-Ahead-Marktpreis 2014 übernommen [11].

2.4 WKK-Auslegung und Optimierung

Die WKK-Anlage arbeitet zwischen dem Strompreis und der Wärmenachfrage. Ist die Anlagenleistung nun vorgegeben, stellt sich die Frage nach dem ökonomisch optimalen Betriebsmuster und der Wärmespeicherkapazität. Jeder Zeitschritt (8760h) ist eine binäre Entscheidungsvariable und die Wärmespeicherkapazität eine kontinuierliche Grösse.

Als Zielfunktion gilt es die Jahreskostenbilanz (Net Present Value), inklusive annuisierte Investitionskosten und Wärme- bzw. Stromverkauf, zu maximieren. Die Randbedingung besteht aus der Wärmebilanz über die gesuchte Speicherkapazität, in die die Anlage einspeist und aus der die Wärmesenke bezieht:

Objective function (annual cost balance including annualised investment costs):

$$\max O = \left[\sum_{t=1}^{8760} Pel \cdot op(t) \cdot \left(cEl(t) - cM - \frac{cF}{\eta El} \right) \right] + cTh \cdot QhdTot - Ann \cdot (cInv \cdot Pel + cInvTes \cdot QtesCap)$$

Constraints. Energy balance must be fulfilled for all time steps with respect to the storage capacity:

$$QtesCap \geq \left[\sum_{t=1}^t \left(\frac{Pel \cdot \eta Th}{\eta El} \cdot op(t) - Qhd(t) \right) - QtesCap \cdot tesLoss \cdot t \right] \geq 0, \forall t \in [1, 8760]$$

Dieses lineare Optimierungsproblem wird typischerweise mit einem kommerziellen Algorithmus für Mixed-integer linear programming gelöst (Gurobi [12]). Für jeden potentiellen Standort haben wir individuell sieben verschiedene Leistungsstufen gesetzt, optimiert und die kostenoptimalste Variante ausgewählt.

3 Resultate der WKK-Einzelanlagen

3.1 Stromgestehungskosten

Nimmt man als Biomethankosten 0.16 CHF/kWh, 2000 Betriebsstunden pro Jahr und die Wärmevergütung sich je nach Grössenklasse Stromgestehungskosten von 0.20 bis 0.28 CHF/kWh (bei einem Erdgaspreis von 0.08 CHF/kWh sind es 0.11-0.18 CHF/kWh), siehe Abbildung 8. Die Wärmespeicherkapazität entspricht in dieser Rechnung vier Stunden der thermische Anlagenleistung. Die kleinsten WKK-Anlagen haben tiefere Stromgestehungskosten als die nächst grösseren, da die äquivalente Gasheizung in diesem Massstab zu hohen spezifischen Wärmepreisen führt und gleichzeitig der thermische Wirkungsgrad der Anlage am höchsten ist, ergeben sich hohe Gewinne aus dem Wärmeverkauf.

Korreliert man für ein Spektrum von 27'000 Anlagen die elektrische Leistung mit der optimalen Speicherkapazität zeigt sich ein linearer Zusammenhang. Die Speicherkapazität in [kWh] entspricht der 10 bis 20-fachen Leistung in [kW].

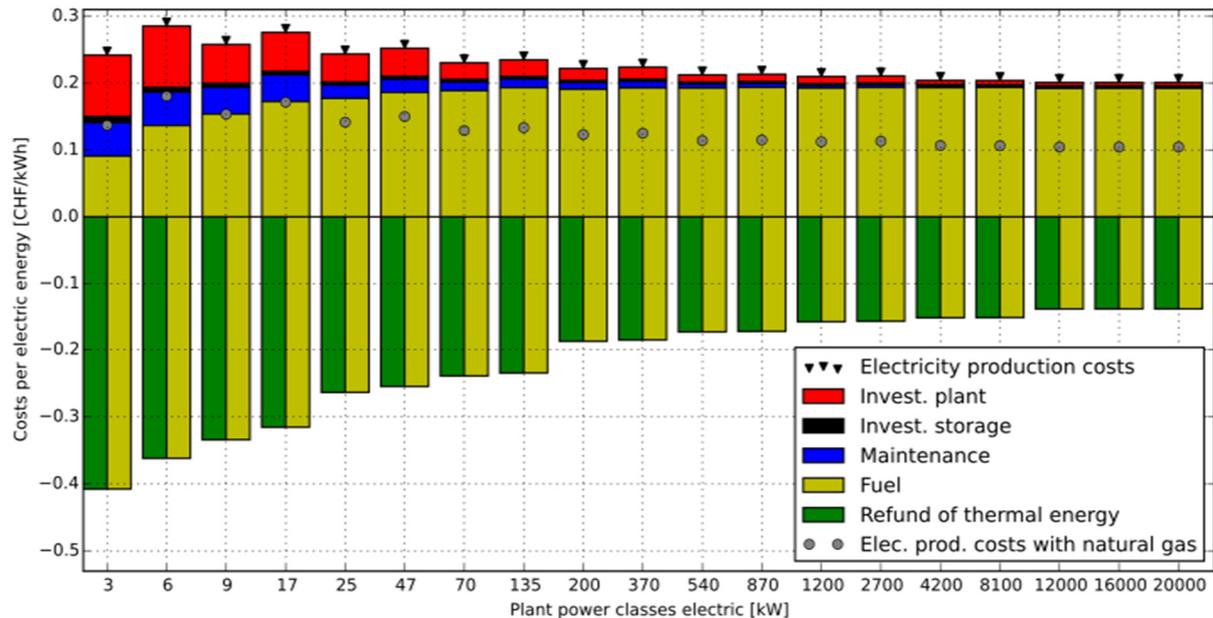


Abbildung 8: Stromgestehungskosten des WKK-Leistungsspektrums inklusive Wärmeverkauf.

4 Resultate der Fallstudien

Die Auswahl der berechneten potentiellen WKK-Anlagen für einen Schwarm hat folgende Randbedingungen von anderen Forschungsgruppen (siehe Abschnitt 1.4):

- Die Gruppe Geoinformations-Engineering berechnete für die Regionen ein jährliches Biomethanpotential aus Fermentation oder Holzvergasung, das im Erdgasnetz verfügbar ist.
- Die Forschungsstelle Energienetze wertete die Stromnetzdaten aus und setzte Leistungskapazitäten für jeden Netzknoten fest.

Gesucht ist ein Satz von WKK-Anlagen die in der Summe die höchste Jahreskostenbilanz haben und gleichzeitig das ganze Biomethan konsumieren. Diese Aufgabe ist als „Rucksack-Problem“ bekannt, wo beschränkt Einheiten eingebackt werden und eine Zielfunktion maximiert werden soll. Gelöst haben wir es als Mixed-Integer Problem mit Gurobi [12].

Abbildung 9 zeigt die Schwarmauswahl von WKK-Anlagen in der Fallstudienregion Kanton Luzern. Folgende Anlagen wurden typischerweise vom Optimierungsproblem nicht ausgewählt

- Grosse industrielle Anlagen wegen Stromnetzeinschränkungen
- Anlagen im Bereich von 10kW elektrischer Leistung wegen hohen spezifischen Stromgestehungskosten (siehe auch Abbildung 8)

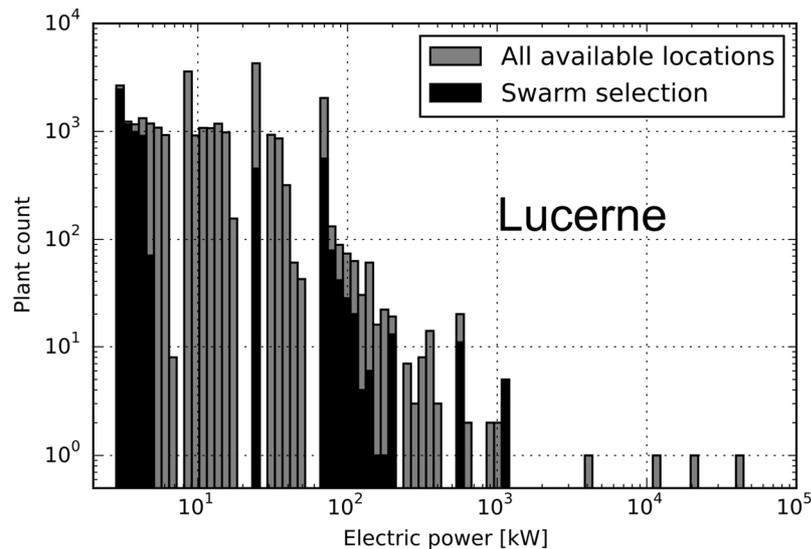


Abbildung 9: Schwarmauswahl von WKK-Anlagen aus allen berechneten potentiellen Standorten.

Die Jahresanalyse der Region des Kantons Luzern zeigt, dass die Nutzung der verfügbaren Biomasse als Biomethan (692 GWh) in einem WKK-Schwarm (296 GWh) vom Stromnetz (2713 GWh) toleriert wird, auch wenn die Anlagen ohne Kommunikation nach dem Marktpreis gewinnorientiert operieren (Abbildung 10). Der elektrische Wirkungsgrad über den ganzen Schwarm beträgt 37 %. Es können etwa 18% der Wärmesenken im Gasnetzgebiet abgedeckt werden. Erst bei der doppelten Grösse entstehen erste Netzengpässe, die aber mittels Verlagerung der Schwarmbetriebs behoben werden können. Im Fall Basel-Stadt kann wegen der sehr geringen Biomassevorkommen nur ein hundertstel abgedeckt werden.

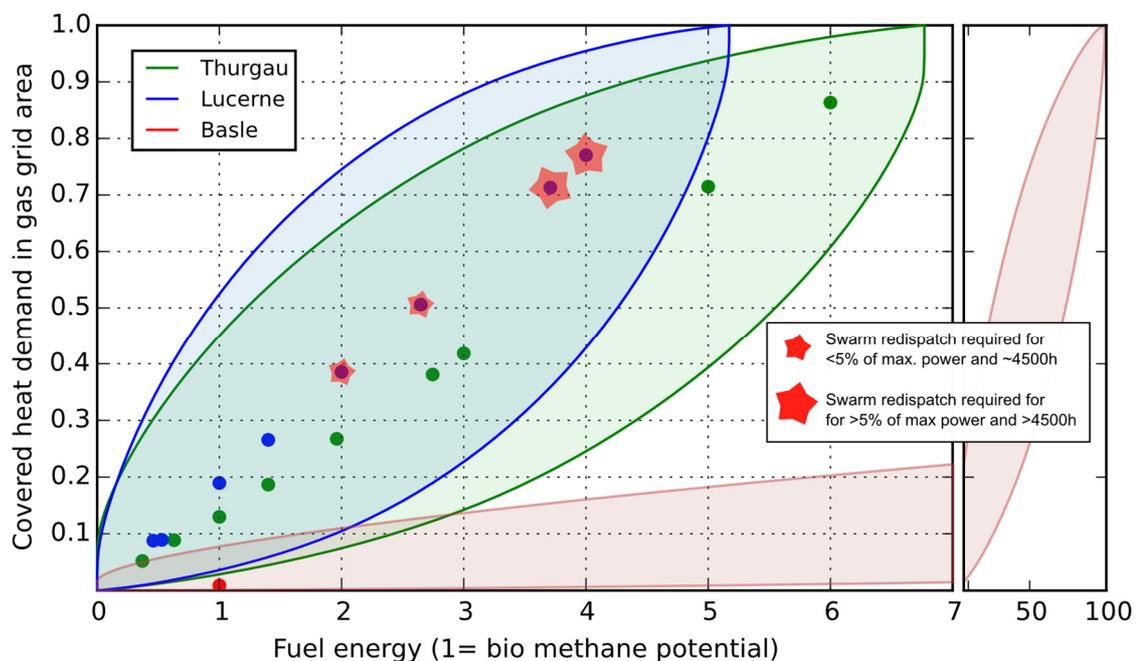


Abbildung 10: WKK-Schwärme der Fallstudienregionen in verschiedenen grössen indiziert durch das jeweilige Biomethanpotential normiert auf 1. Die umschliessenden Kurven stellen das Spektrum der Schwarmzusammensetzung dar.

Mit einem biogenen WKK-Schwarm können 12-15% der Residuallast aus Nachfrage und PV-Erzeugung abgedeckt werden (Abbildung 11). Bei doppelter Grösse sind 20-30% möglich.

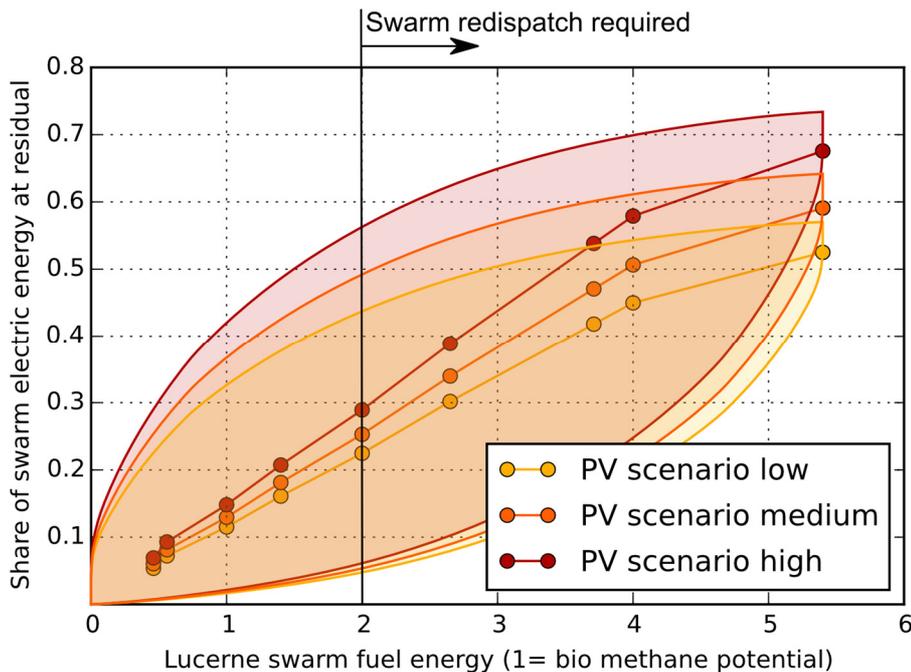


Abbildung 11: Anteil der elektrischen WKK-Schwarmenergie an der Residuallast von Stromnachfrage und PV-Erzeugung. Die WKK-Schwarmgröße ist über das normierte Biomethanpotentials angegeben. Die umschliessenden Kurven stellen das Spektrum der Schwarmzusammensetzung dar.

5 Fazit

Ein biogener WKK-Schwarm ist technisch machbar und die stromgeführte Betriebsstrategie funktioniert ohne Rückkühlung. Grundsätzlich sind die Wärmesenken im Gasnetzgebiet nicht limitierend sondern die Biomethan-Menge.

Das Potential eines biogenen WKK-Schwarms in einer typischen Schweizer Region wie Luzern bezüglich des totalen Strombedarfs ist 9.4% und es können bis zu 15% der Residuallast von Nachfrage und PV-Erzeugung abgedeckt werden. Der Aufbau eines WKK-Schwarms muss Stromnetzkapazitäten angepasst werden. Bei der doppelten Schwarmgröße zeigen sich erste Netzengpässe, die aber durch eine Betriebsstundenverschiebung behoben werden könnten.

6 Ausblick

Die Zusammenarbeit mit Energieversorgern kann zur Bildung von Geschäftsmodellen führen, wo ein WKK-Schwarm zur Eigenkompensation oder für Netzdienstleistungen eingesetzt werden kann. Aus Modellierungssicht ist die Koppelung von Schwarmbetrieb und Stromnetzsimulation ein wichtiger Aspekt zur Vermeidung von Netzproblemen und gezielterem Einsatz zur PV-Kompensation. Weiter ermöglicht die Nutzung von existierenden Nahwärmeverbündungen die Placierung grösserer, effizienteren und kostengünstigeren WKK-Anlagen.

Aus technologischer Sicht sehen wir die Erweiterung des Energiesystems mit Stromsenken wie Wärmepumpen und Elektrolyseuren als ein wichtiger Beitrag, um mit positiver und negativer Leistung im Netz zu agieren. Die Integration der Mobilitätsenergienachfrage sowohl auf Seiten Stromnetz wie Gasnetz würde ein weitere relevanter Schritt darstellen.

7 Danksagung

Grossen Dank gilt unseren Auftraggebern **Swisslectric research (SER) und Bundesamt für Energie (BFE)** für das Vertrauen von Beginn weg in den multi-disziplinären Ansatz. Unseren Kollegen der Forschungsgruppen GIE, FEN und EEG (siehe 1.4) danken wir für die konstruktive und spannende Zusammenarbeit. Wir haben die Unterstützung mit Daten den folgenden Energiedienstleistern sehr geschätzt: **Centralschweizerische Kraftwerke (CKW), Energie Wasser Luzern (EWL), Industrielle Werke Basel (IWB), Thurgau Energie, Wasserwerke Zug WWZ**. Die WKK-Hersteller **Avesco** und **IWK** haben uns bei der Strukturierung der WKK-Spezifikationen grosse Hilfe geleistet. **Axpo Kompogas** und **Eisenmann/I.C.E AG** standen für Fragen zu Biogasanlagen hilfsbereit zur Verfügung. Der Abteilung Raum und Wirtschaft des **Kanton Luzern** danken wir für Daten zum Solarpotential bei Gebäuden.

Literatur

- [1] P. Vögelin, R. Buffat, G. Beccuti, E. Panos, G. Georges, K. Boulouchos, M. Raubal, T. Demiray und K. Ramachandran, «System modelling for assessing the potential of decentralised biomass-CHP plants to stabilise the Swiss electricity network with increased fluctuating renewable generation,» Bundesamt für Energie, www.bfe.admin.ch, Bern, Schweiz, 2016.
- [2] B. Steubing, R. Zah, P. Waeger und C. Ludwig, «Bioenergy in Switzerland: Assessing the domestic sustainable biomass potential,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 14, p. 2256–2265, 2010.
- [3] Prognos, Ecoplan, «Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050,» Bundesamt für Energie, Basel, 2012.
- [4] EN ISO 13790 Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling, ISO, 2008.
- [5] SIA 416/1 Kennzahlen für die Gebäudetechnik, SIA, 2003.
- [6] SIA 2024 Standard-Nutzungsbedingungen für Energie- und Gebäudetechnik, SIA , 2006.
- [7] SIA 380/1 Thermische Energie im Hochbau, SIA, 2009.
- [8] meteonorm Software, www.meteotest.ch, METEOTEST, Fabrikstrasse 14, CH-3012 Bern, 2014.
- [9] Viessmann Gasheizungen Preisliste, <http://www.viessmann.ch/>, accessed 01.05.2015, Viessmann (Schweiz AG), Haerdlistrassen 11, CH-8957 Spreitenbach, 2015.
- [10] Weishaupt Industriebrenner Preisliste, www.weishaupt-ag.ch, Weishaupt price list 2015 <http://www.weishaupt-ag.ch>, Chrummacherstrasse 8, CH-8954 Geroldswil, 2015.
- [11] EpexSpot, «Day-ahead electricity prices,» Epex Spot, www.epexspot.com, Paris, 2014.
- [12] «Gurobi Optimization Inc., Gurobi 6.0,» 3733-1 Westheimer Rd. #1001, Houston TX

77027, USA.