

Das virtuelle Heizkraftwerk als realer Cluster stromerzeugender Heizungen – Ein neuer Ansatz zur netzlastkorrelierten Einspeisung ins Niederspannungsnetz

Virtual Cogeneration Plants as Real Micro-CHP Clusters

Gunnar Kaestle, Karlsruhe, DE

Kurzfassung

Zur Koordinierung steuerbarer Kleinstspeiser wird am Beispiel der Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung (μ KWK) die Spannungsführung vorgeschlagen. Dieses erlaubt die netzlastkorrelierte Stromproduktion zu Grenzkosten nahe Null, da auf eine direkte leittechnische Anbindung verzichtet wird. Abschließend wird erörtert, wie der Mehrertrag dieses selbstorganisierenden Clusters zwischen den beteiligten Akteuren mit pauschalen Bewertungen abgerechnet werden kann.

Abstract

A virtual power plant (VPP) is the concept of pooling distributed electricity generating units. Besides the grid connection, they are attached to a telecommunication network. Since the installation of the data network is costly, major utilities hesitate until the net surplus may justify extra expenditures.

To coordinate micro cogeneration units, a voltage driven mode is proposed. This self-organising method allows load correlated power production with marginal costs near zero, as no direct link to a central control system is needed. Finally, a business model is discussed, settling the surplus value between the VPP's stakeholders based on lump sum payments.

1 Motivation

Wachsende Verkaufszahlen des Mini-Blockheizkraftwerks (BHKW) *Dachs* der Firma Senertec in Deutschland sowie die des *Ecowill* (Fa. Honda) in Japan zeigen, dass Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (μ KWK) auf dem Weg sind, ihren Nischenmarkt zu verlassen. Weiterhin plant der britische Energieversorger Powergen bis zum Ende der Dekade die großangelegte Installation von *Whispergen* Stirlingmotoren. Das Smart Grid Konzept der Europäischen Union zeigt eine Vision zukünftiger Energienetze [1], dessen Rahmenbedingungen die dezentrale Stromerzeugung in hohem Maße unterstützen. Es stellt sich nun die Frage, ob dezentrale Einspeiser voneinander unabhängig arbeiten sollten oder ob Synergieeffekte einer konzertierten Aktion den Mehraufwand für die Koordinierung rechtfertigen.

2 Mikro-KWK

Die gekoppelte Produktion von Strom und Wärme verspricht eine effiziente Nutzung von Brennstoffen. Kleinste KWK-Einheiten, auch als stromerzeugende Heizungen bekannt, dienen als Energiezentralen für Gebäude. Dabei profitiert die Mikro-KWK von der baulichen Integration, da im Gegensatz zur großen KWK kein Fernwärmenetz benötigt wird. Dennoch hemmt der im Vergleich zu klassischen Heizungssystemen deutlich höhere Investitionsaufwand die schnelle Verbreitung dieser neuen Technologie.

2.1 Technologieübersicht

Kleine KWK-Module werden in der Regel mit zusätzlichen Komponenten in eine Heizungsanlage eingebaut. Zum einen deckt ein Hilfsbrenner die winterliche Spitzenlast des Wärmebedarfs und dient als Reserve, wenn der Heizkraftblock gewartet wird oder im Störfall abschaltet. Zum anderen minimiert ein Wärmepuffer – üblicherweise ein Heißwassertank

– die An- und Abschaltvorgänge der μ KWK-Anlage und ermöglicht die zeitliche Entkopplung der Wärme- und Strombereitstellung. Über den Anschluss ans Niederspannungsnetz (NS) erfolgt der Ausgleich der Strombilanz (siehe **Bild 1**).

Im Kondensator, in dem der entspannte Dampf sich wieder verflüssigt und wieder zurück zum Dampferzeuger gepumpt wird, geht die Wärme in den Heizkreislauf über. **Mikroturbinen** wiederum sind verwandt mit Abgasturbinen. Fortschritte in

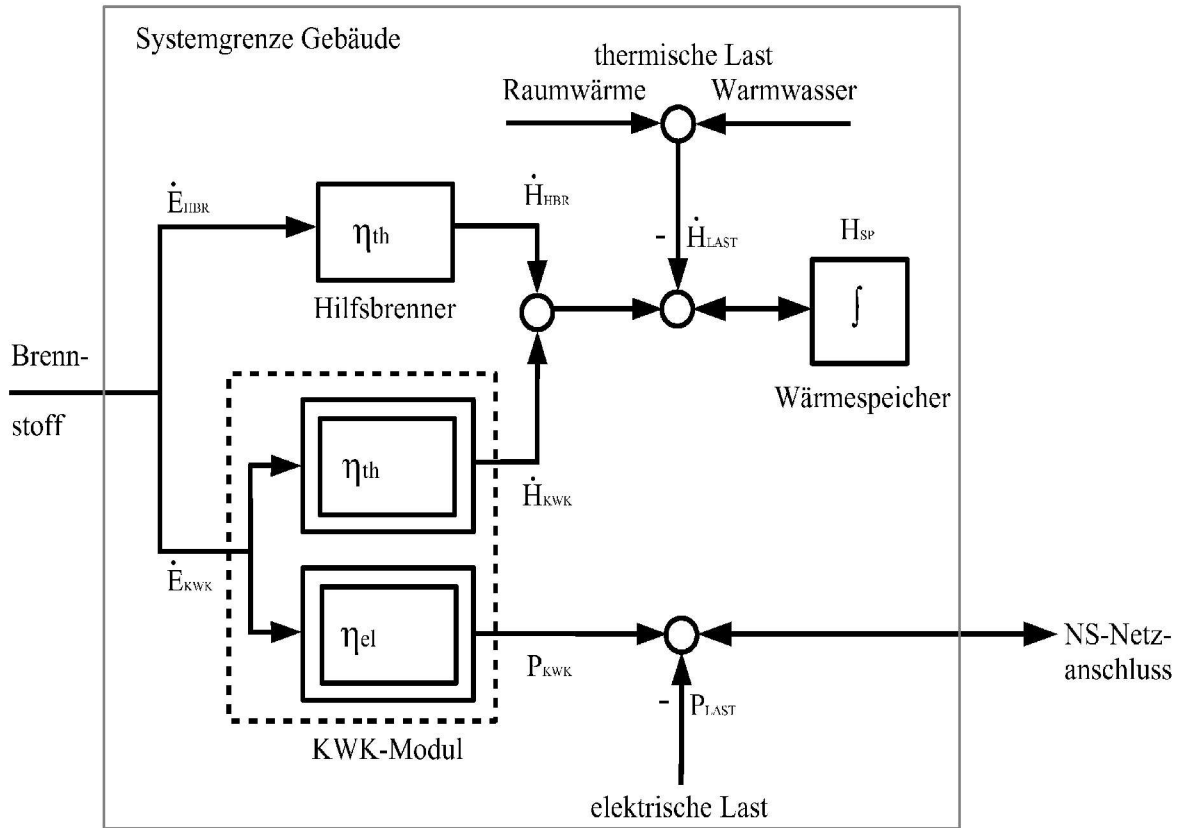


Bild 1: Energieflussdiagramm einer Mikro-KWK-Installation

Verschiedene Technologien zur Energiewandlung [2] wurden entwickelt, um Strom und Wärme als Kuppelprodukte auf der Basis fossiler Brennstoffe bereitzustellen. Mikro-KWK-Anlagen nutzen als Primärenergieträger Erdgas, aber auch Flüssiggas oder Heizöl wird verwendet. Neuere Entwicklungen umfassen auch den Einsatz von Biokraftstoffen.

Der klassische μ KWK-Typ ist ein **Verbrennungsmotor**, der einen Generator antreibt. Die Nutzwärme stammt aus dem Kühlkreislauf des Motors, der Abwärme des Generators und einem Abgaswärmetauscher. Eine andere Bauart beruht auf dem **Stirlingmotor**. Hierbei erhitzt eine stationäre, externe Flamme eine abgeschlossene Menge eines Arbeitsgases. Das Gas treibt einen Kolben an und wird durch den kalten Rücklauf des Heizungswassers wieder abgekühlt. Der **Dampfmotor** funktioniert ähnlich: Wasser wird per externer Verbrennung verdampft, und der Dampf generiert Strom in einem Expander.

den Werkstoffwissenschaften ermöglichten die Entwicklung von Hochgeschwindigkeitsgeneratoren. Das hohe Temperaturniveau der Turbinenabgase ermöglicht die Nutzung als Prozesswärme und lässt sich gut mit Absorptionskältemaschinen kombinieren. Die letzten drei KWK-Technologien zeigen niedrige Emissionen aufgrund der kontinuierlichen Verbrennung und geringere Wartungskosten wegen ölfreier Schmierung.

Brennstoffzellen versprechen hohe elektrische Wirkungsgrade, ebenso wie sehr geringe Emissionen bei niedrigen Wartungskosten. Sie werden als *der* Stromerzeuger der Zukunft angesehen, benötigen jedoch noch weitere Entwicklungsarbeit, um die Herstellungskosten zu senken und die Standzeit zu verlängern. Der Brennstoff wird indirekt in einer elektrochemischen Zelle umgesetzt und erzeugt am Zellstapel einen Gleichstrom. Eine Leistungselektronik, der Umrichter, wandelt diesen in Wechselstrom der Netzfrequenz.

Nicht nur zukünftige KWK-Konzepte mit Brennstoffzellen bedienen sich der Leistungselektronik, sondern auch aktuell verfügbare DEA auf Basis von Wärme-

kraftmaschinen [3] sind mit einem Umrichter ausgerüstet. Dabei fungiert der Inverter als elektronisches Getriebe und unterstützt die Leistungsmodulation durch Variation der Drehzahl bei minimierten Wirkungsgradeinbußen. Des Weiteren umfasst die Elektronik Module zur Netzüberwachung, um einen Netzausfall zu erkennen.

2.2 Betriebsmodi

Zusätzlich zu den Produktionsniveaus AUS und AN (=Volllast) ermöglicht die Leistungsmodulation, dass der Betreiber einer KWK-Anlage einen gezielten Produktionsplan innerhalb der individuellen Kapazitätsgrenzen $P_{MIN,i}$ und $P_{MAX,i}$ abfahren kann.

Wärmeführung

Im wärmegeführten Betrieb folgt die Anlage i dem lokalen Wärmebedarf $H'_{LAST,i}$. Mit der Stromkennzahl $s = \eta_{el} / \eta_{th}$ ergibt sich für die elektrische Leistungsabgabe:

$$P_{KWK,i} = s_i \cdot H'_{LAST,i} \quad (1)$$

Stromführung

Im stromgeführten Betrieb folgt die Anlage des Einspeiseknotens i der lokalen Stromnachfrage $P_{LAST,i}$ – daher ist die Stromerzeugung:

$$P_{KWK,i} = P_{LAST,i} \quad (2)$$

Um kein überschüssiges Wärmeangebot wegzukühlen zu müssen, wird in der betrieblichen KWK-Praxis ein stromgeführter und wärmegedeckelter Modus gewählt.

$$P_{KWK,i} = \text{Min}(P_{LAST,i}; s_i \cdot H'_{LAST,i}) \quad (3)$$

Netzführung

Das Prinzip hinter der Netzführung besteht darin, dass das lokale NS-Netzsegment seinen Lastzustand erkennt und dementsprechend das Produktionsniveau der angeschlossenen DEA-Betriebsmittel vorgibt. Infolgedessen ist der netzgeführte Betrieb eine Variante der Stromführung, bei dem die Anlage i der aggregierten Stromnachfrage $\Sigma P_{LAST,i}$ folgt.

$$P_{KWK,i} = f(\Sigma P_{LAST,i}) \quad (4)$$

Moduswechsel

Der Wärmepuffer wird als Schalter genutzt, um zwischen den verschiedenen Betriebsmodi zu schalten. In Abhängigkeit vom Ladezustand des Speichers schaltet die lokale Steuerung die Anlage ein und wechselt zwischen Volllastbetrieb, Wärme-, Strom- und Netzführung.

Die Betriebsarten sind gemäß dem Ertrag pro umgesetzten Brennstoff geordnet (siehe **Bild 2**). Zu der Wärmegutschrift wird die Stromgutschrift addiert und diese Summe zu den Brennstoffkosten in Bezug gesetzt. Da der Einspeisetarif üblicherweise niedriger ist als der Ertrag durch verringerten Strombezug, ist

der stromgeführte Betrieb aus ökonomischer Sicht der Wärmeführung vorzuziehen.

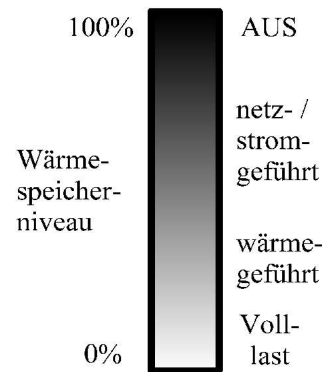


Bild 2: Wärmespeicher als Schalter

An welcher Stelle die Netzführung einzuordnen ist, hängt erheblich von der Sicht des Anlagenbetreibers ab, d.h. ob er beispielsweise als Eigentümer, Contractor oder EVU-naher Stromproduzent auftritt. Entscheidend ist weiterhin die Vergütungshöhe für netzkonformes Einspeiseverhalten.

Nach wie vor ist das μ KWK-Modul die Hauptwärmequelle für das Gebäude. Daher ist es nahe liegend, dass in Zeiten mit großem Wärmebedarf, wie z. B. kalten Wintertagen, der Wärmespeicher leer ist und der Heizkraftblock unter Volllast läuft und gegebenenfalls vom Zusatzbrenner unterstützt wird. Während des Sommers, wenn die Wärmenachfrage eher gering ist und im Wesentlichen vom Warmwasserverbrauch bestimmt wird, ist der Wärmepuffer oft voll und die Anlage schaltet ab. Der Bereich zwischen diesen zwei Extremen kann für die netzgesteuerte Stromproduktion genutzt werden.

3 Koordination durch Kommunikation

Das übliche Konzept eines virtuellen Kraftwerks ist ein DEA-Cluster, in dem die Einzelanlagen leittechnisch verknüpft werden. Die zentrale Leitwarte optimiert den Betrieb des Gesamtsystems und generiert auf diese Weise einen Mehrwert. Dies kann beispielsweise durch Reduzierung der Maximallast und Erzeugung von hochwertigem Spitzenlaststrom geschehen, aber auch durch Bereitstellung von Regelleistung. Dezentrale Energiemanagement-Systeme (DEMS) verheißen eine effizientere Nutzung der Betriebsmittel. Erste Pilotprojekte wurden bereits realisiert, u. a. von den Stadtwerken Unna und einem Konsortium unter der Führung von Vaillant. Weitere Vorhaben sind im Gange, wie die Kooperation der EWE AG mit dem niedersächsischen Forschungsverbund Energie und die Zusammenarbeit von RWE Energy und Siemens PTD zur DEMS-Entwicklung.

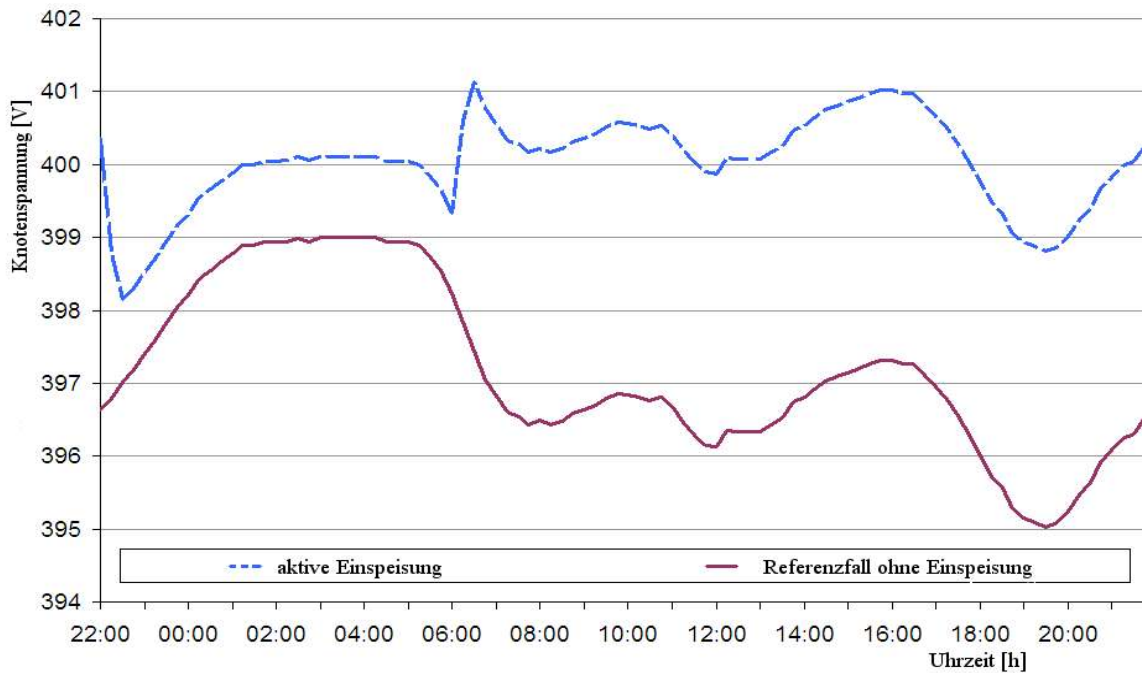


Bild 3: Spannungsverlauf am Endknoten einer Niederspannungsleitung während eines Winterarbeitstages mit dezentraler Einspeisung [9]

Da die Errichtung und der Betrieb des weit verzweigten Datennetzwerkes Kosten verursacht, bezweifeln größere Energieversorger bislang, dass der Mehrwert eines VKWs unter den jetzigen technischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen die zusätzlichen Ausgaben rechtfertigt [4]. Insbesondere bieten die ans NS-Netz angeschlossenen Kleinanlagen nur einen geringen Nutzen im Vergleich zu den Gemeinkosten des datentechnischen Anschlusses. Im Folgenden wird eine Methode vorgeschlagen, die kein Kommunikationsnetz benötigt. Anstelle dessen bestimmen Netzgrößen als Informationsträger für die Kommunikation die Einlastung der DEA mit.

Visionen eines automatischen Stromhandelssystems wurden bereits vorgestellt [5]. Kleinverbraucher und dezentrale Stromerzeuger gleichen Nachfrage und Erzeugung aus. Der Netzbetreiber agiert als zentrale Gegenpartei und sendet Preissignale aus. In [6] wird eine ähnliche Idee skizziert, bei der die Systemregelung auch auf lokaler Ebene erfolgt. Das Preisniveau wird durch die anliegende Arbeitsspannung sowie einer Frequenzkomponente auf Verbundnetzebene bestimmt.

Tabelle 1 gibt typische Kenngrößen für Hoch-, Mittel- und Niederspannungsleitungen wieder. Es zeigt sich, dass der Widerstand von Niederspannungsleitungen durch den ohmschen Anteil dominiert wird. Daher weist in Niederspannungssegmenten des Stromnetzes ein Spannungsabfall auf eine hohe lokale Last hin.

Dieses Zeichen kann für die Leistungsregelung eines netzgeführten KWK-Moduls benutzt werden. Der Vorschlag funktioniert ähnlich wie das in [8] veröffentlichte Verfahren zur Verbesserung der Spannungsqualität. Allerdings ist das Ziel ein anderes: Der Hauptzweck ist hier die wirtschaftlich optimierte Erzeugung von KWK-Strom, wohingegen die Auswirkung auf die Spannung als ein Nebeneffekt gesehen wird.

Tab. 1: Typische Kenngrößen für Stromleitungen [7]

Leitungstyp	spezifischer Wirkwiderstand $R' [\Omega/\text{km}]$	spezifischer Blindwiderstand $X' [\Omega/\text{km}]$	Impedanzwinkel φ ($\cos \varphi$)
Niederspannung	0.642	0.083	7.37° (0.992)
Mittelspannung	0.161	0.190	49.73° (0.646)
Hochspannung	0.060	0.191	72.57° (0.300)

Jedem Einspeiseknoten i wird ein Spannungswert $U_{\text{SOLL},i}$ zugewiesen. Dieser hängt von der Topologie des NS-Netzsegmentes ab, der Entfernung zum Verteiltransformator und den generellen Lastflussbedingungen. In der netzgeführten Betriebsart erhöht die DEA i die Einspeiseleistung $P_{\text{KWK},i}$, falls die Spannung unter $U_{\text{SOLL},i}$ fällt. Umgekehrt wird die Leistung reduziert, wenn die Spannung zunimmt. Die Anpassung der Statik S_i unterliegt dabei denselben Bestimmungsgrößen wie die Einschalt-schwelle $U_{\text{SOLL},i}$.

Die Parametereinstellung kann während der Inbetriebnahme des KWK-Moduls erfolgen und sollte aktualisiert werden, sofern sich größere Änderungen im Niederspannungsnetz zeigen, wie z. B. gestiegene dezentrale Erzeugungskapazitäten, neue Verbraucher mit signifikanter Last und Umbaumaßnahmen in der Netzinfrastruktur. Weiterhin ist auch ein autonomer Algorithmus denkbar, der die täglich gemessenen Spannungsprofile abspeichert und aus diesen Erfahrungswerten die Größen $U_{SOLL,i}$ und S_i als Funktion von $U_{MIN,i}$, $U_{MAX,i}$, dem Volumen des Energiespeichers und dem prognostizierten Wärmebedarf des Folgetages errechnet.

Bild 3 zeigt die Ergebnisse einer Simulation, die für ein Neubaugebiet im Versorgungsbereich der Lechwerke AG durchgeführt wurde [9]. Die Spannungskurve ohne Einspeisung ähnelt sehr einer invertierten Lastkurve für Haushalte. Sobald die Einspeisung der μ KWK-Blöcke längs der Stromleitung einsetzt, steigt die Spannung gemäß dem Leistungsniveau gegenüber dem Referenzfall an. Man erkennt deutlich den niedrigeren Produktionslevel während der Nachtstunden, da die abendliche Temperaturabsenkung der Heizungssteuerung die thermische Last reduziert.

Der Spannungsverlauf während eines Tages ist ein Signal für den Lastzustand des Netzsegmentes. Er dient als Eingabegröße für die betriebliche Optimierung der Einlastung dezentraler Einspeiser, im Sinne einer Tertiärregelung [10]. Spannungsschwankungen werden nicht vollständig ausgeglichen, sondern als Störgrößenaufschaltung in die Regelung mit einbezogen. Stabilitätsbedenken bezüglich eines Ausfalls des zentralen Leitrechners oder Störungen der Datenverbindungen entfallen. Somit ist die spannungsgeführte Betriebsweise von Einspeiseknoten am Niederspannungsnetz eine Form eines selbstorganisierenden virtuellen Kraftwerks.

4 Ökonomische Diskussion

Virtuelle Kraftwerke können in den folgenden Bereichen einen Mehrwert erzielen, indem die dezentrale Stromerzeugung nach systemweiten Zielen ausgerichtet wird:

- a) Erzeugung von Spitzenlaststrom
- b) Bereitstellung von Regelleistung
- c) Asset Optimisation in Verteilnetzen

Der vorgestellte Ansatz vermag das globale Optimum nicht vollkommen zu treffen, dafür ist er mit wenig Aufwand nur durch eine Umprogrammierung der Anlagensteuerung zu realisieren. Bei größeren DEA-Leistungen hat die zentrale Optimierung Vorteile, Kleinstspeiser bevorzugen ein kommunikationsarmes DEMS. Die Grenzkosten der Spannungsführung liegen bei Null.

Um den Vorteil der schlanken Kooperation über die Netzparameter nicht durch die Notwendigkeit einer aufwändigen Lastgangmessung zu kompensieren, sollen im folgenden Abschnitt Abrechnungsmodelle vorgestellt werden, die den Mehrwert des netzlastkorrelierenden Einspeisens pauschal erfassen könnten.

4.1 Spitzenlaststrom

Der Betreiber einer kleinen KWK-Anlage erhält als Einspeisevergütung neben den vermiedenen Netznutzungsentgelten und dem KWK-Zuschlag den üblichen Preis (§4(3) KWK-G) für den eingespeisten Strom. Dieser ist als Durchschnitt des EEX-Base-loadpreises im vorherigen Quartal definiert. Bedenkt man, dass stromerzeugende Heizungen schon ab drei bis viertausend Stunden im Jahr betrieben werden, zeigt sich, dass die Mikro-KWK Mittellaststrom bereitstellen kann, je nach Dimensionierung und Jahreszeit auch Spitzenlast. Sofern man die Speicherbewirtschaftung so optimiert, dass überwiegend zur Spitzen- und Mittellastzeit eingespeist wird, könnte der Abnehmer dieses Stromes dieses mit einem Extra-Bonus vergüten. Beispielsweise wäre dies in Abhängigkeit von der Jahreslaufzeit ein Anteil der Differenz zwischen Phelix Base und Peak.

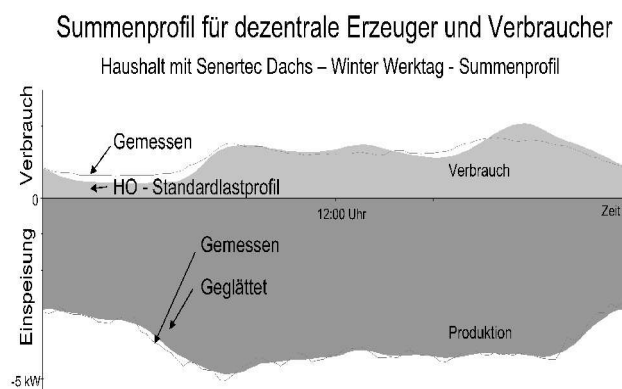


Bild 4: Synthetisches Einspeiseprofil und Standardlastprofil [11]

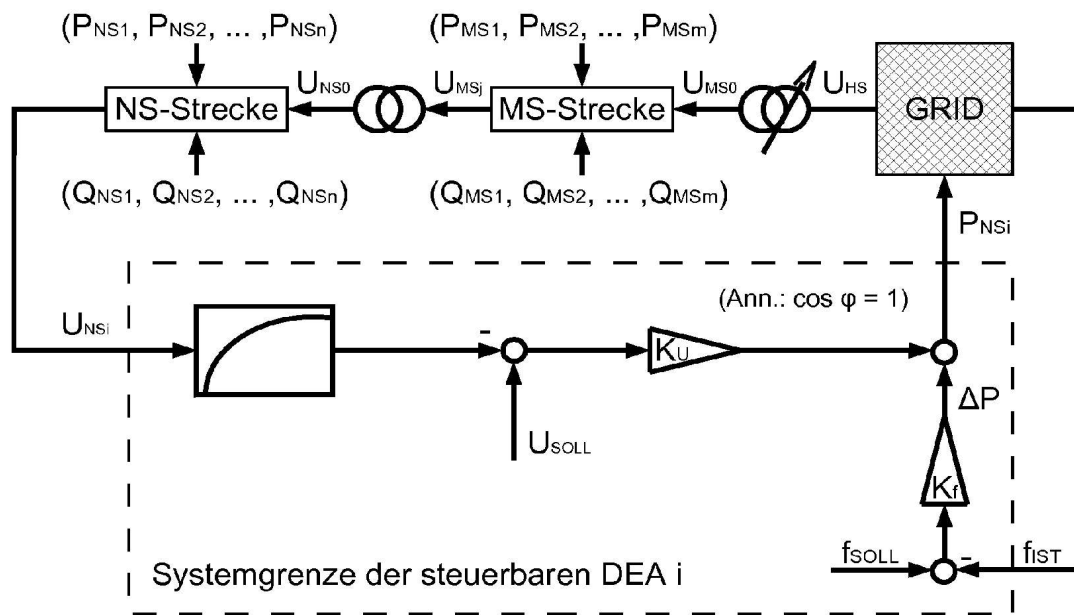
An der TU Clausthal werden synthetische Einspeiseprofile entwickelt (siehe **Bild 4**), die vergleichbar mit den VDEW-Standardlastprofilen zur Abrechnung von Tarifkunden hinzugezogen werden können. Mit Hilfe von Einspeiseprofilen kann die Korrelation zur Netzlast und indirekt auch zum Strompreis nachgewiesen werden.

4.2 Regelleistung

Die Vergütungen für die Leistungsvorhaltung von Minutenreserve [12] liegen zwischen 25 €/kW·a (negative RL) und 80 €/kW·a (positive RL), Stand von 2005. Wie im obigen Fall kann die Kapazität eines mKWK-Clusters zur Lieferung von Regelleistung

mittels Einspeiseprofilen abgeschätzt werden. Im Sommer ist eher positive Regelleistung abrufbar, im Winter überwiegend negative.

leistung kann über empirisch zu ermittelnde P/U-Elastizitäten am Spannungsregler des Leistungstrafos eingestellt werden.



Stromerzeugende Heizungen mit hoher Zahl an Volllaststunden sind in der Lage, negative Regelleistung bereitzustellen, bei wenigen Betriebsstunden im Jahr kann höherwertige positive Regelleistung geliefert werden. Wie oben ist auch hier nicht notwendig, den Beitrag jeder einzelnen Anlage zu messen, sondern es würde in zukünftigen Szenarien eine statistische Erfassung ausreichen.

Spannungssensitive Einspeiser können den Lastverlauf des NS-Segmentes glätten und indirekt auch den der übergeordneten MS-Ebene. Durch die reduzierte Volatilität vermindert sich im Verteilnetz der Bedarf an interner Regel- bzw. Ausgleichsenergie. Darüber hinaus erkennt man in **Bild 5** die Möglichkeit, über eine Stufenschaltung am HS/MS-Trafo auf die DEA Einfluß zu nehmen. Dies erlaubt eine Abweichung vom prognostizierten Lastgang der kumulativen Einspeisungen zur Bildung eines Leistungshubs. In dieses System ließen sich nicht nur steuerbare Stromerzeuger, sondern auch Verbraucher einbinden.

Unter der Annahme, dass der Verteilnetzbetreiber die Systemdienstleistung Regelenergie bündelt und an den Übertragungsnetzbetreiber weiterreicht, könnte der DSO Primärregelenergie dezentraler Kleinanlagen durch die Sprungantwort der Bezugsleistung auf eine Frequenzänderung nachweisen. Eine Sekundärregelung ohne Kommunikation [13] wäre durch Verschiebung der Sollfrequenz f_{SOLL} auf Basis einer kombinierten Symmetrierungs-, Wiederherstellungs-, und Testfunktion zu realisieren. Die tertiäre Regel-

Bild 5: Leistungs-Spannungs-Regelung

4.3 Asset Optimisation

Verteilnetze sind als teuer bekannt. Der größte Kostenblock der Netznutzung entsteht in der Regel auf der Mittelspannungs- und Niederspannungsebene. Virtuelle Kraftwerke können die Netzlast glätten, so dass die Netzbetriebsmittel gleichmäßiger ausgelastet werden. Einzelne Ausbaumaßnahmen aufgrund thermischer Überlast oder dem Erreichen von Spannungsgrenzen wären durch optimierten Lastfluss zu verzögern bzw. zu verhindern.

Als Indiz für den höheren Aufwand bei ungleichmäßiger Netzauslastung mag der unterschiedliche Arbeitspreis über und unterhalb 2500 h Jahresbenutzungsdauer dienen. Verknüpft mit einem Konzentrationsmaß (z.B. Gini-Koeffizient) des Netzlastganges könnte hieraus eine pauschale Bewertung für eine ausgewogenere Netznutzung abgeleitet werden, ohne jede vermiedene Investivmaßnahme einzeln bilanzieren zu müssen.

Somit kann der Einsatz dezentraler Optionen auch von Seiten des Netzbetreibers honoriert werden. Neben der Möglichkeit eines vermiedenen Netzausbaus ist auch die Kostensenkung für die Nutzung der vorgelagerten Netze im Interesse von Verteilnetzbetreibern [11].

5 Ausblick

Große virtuelle Kraftwerke auf Niederspannungsebene könnten als Folge fortschreitender Innovationen im Bereich der Heiztechnik entstehen. Betrachtet man die Produktlebenszyklen von Niedertemperaturkesseln und Brennwertgeräten [14], so hat die stromerzeugende Heizung die Chance, in zwanzig Jahren die vorherrschende Wärmequelle der Hausenergieversorgung zu werden (siehe **Bild 6**).

Condensing boiler uptake in the Netherlands

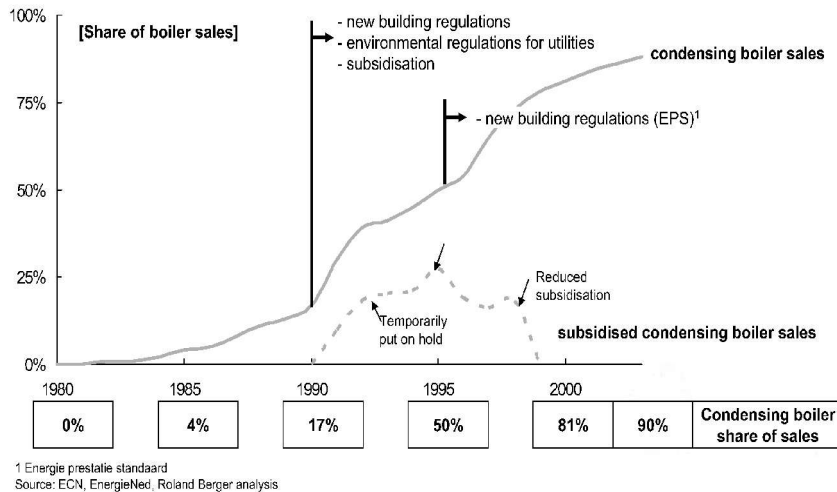


Bild 6: Entwicklung des Marktanteils der Brennwerttechnik in den Niederlanden [14]

Bild 7 stellt das Ergebnis einer Simulation eines virtuellen Heizkraftwerks dar. Abgebildet ist die elektrische Summenlast von 80 Haushalten verteilt auf zehn Mehrfamilienhäusern, von denen jedes mit einem 5 kW_{el} µKWK-Aggregat ausgestattet ist. In die Simulation wurde ebenfalls ein statisches, aber tageszeitvariables Preisprofil integriert. Zu Zeiten mit hohem Wärmebedarf laufen die Heizkraftblöcke unter Volllast, und der Kurvenverlauf wird bestimmt durch die stochastisch verteilte Stromnachfrage. Die ebenen Flächen der Matrix zeigen die Netzführung. Hier wird der voreingestellte Lastfluss über den Distributionstransformator in Höhe von 10 kW sichtbar.

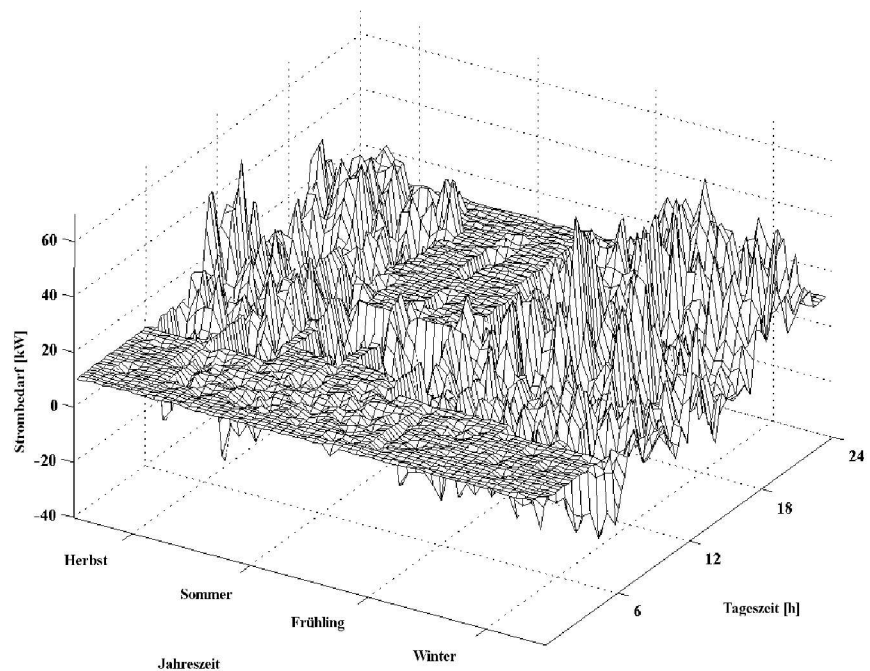


Bild 7: Jahresmatrix des Stromlastgangs einer µKWK-Siedlung (80 Haushalte)

Die Erzeugungskapazitäten des Wohngebiets substituieren Mittellaststrom (z. B. auf Kohlebasis) durch Erdgas, da die Einspeisung überwiegend tagsüber erfolgt. Die Primärenergieeinsparung gegenüber einem modernen Kohlekraftwerk ($\eta_{el} = 45\%$) als Referenz beträgt in diesem Beispiel 10-15%. Der Markt für Raumwärme und Warmwasser beträgt in Deutschland 2400 PJ p.a. [15]. Mit schon jetzt verfügbarer µKWK-Technik (>15 % elektrischer Wirkungsgrad) könnten daraus 100 TWh elektrische Energie gewonnen werden.

Die Förderung der Mikro-KWK ist somit ein zweifach wirksamer Mechanismus einer CO₂-Minderungsstrategie: Effizienzgewinn plus Wechsel zum CO₂-armen Energieträger. Feste Einspeisetarife haben bei der Belegung des Marktes für erneuerbare Energien Wirkung gezeigt [16]. Dieses Instrument hat das Potential, auch das technologie-spezifische Innovationssystem der µKWK zu beschleunigen und einen Massenmarkt für stromerzeugende Heizungen zu entwickeln.

Literatur

- [1] Sánchez Jiménez, M.: *Smart Electricity Networks based on large integration of Renewable Sources and Distributed Generation*. Dissertation, Universität Kassel, 2006.
- [2] Pehnt, M. et al.: *Micro Cogeneration*. Springer, Berlin, 2006.
- [3] Mauch, K.: *Power Electronic Interfaces for DER*. First International Conference on the Integration of Renewable Energy Sources and Distributed Energy Resources, Brussels, 2004.
- [4] Leprich, U. et al.: *Dezentrale Energiesysteme und Aktive Netzbetreiber (DENSAN), Endbericht*. Saarbrücken, 2005.
- [5] Müller, Chr.: *Der gangbare Weg in die regenerative Energiewirtschaft*. Polygon-Verlag, Eichstätt, 1992.
- [6] Köln, K.-W.: *Dezentrale Stromerzeugung im Netz*. DINAR Kick-Off Meeting, Kassel, 2003.
- [7] Engler, A.: *Applicability of Droops in Low Voltage Grids*. International Journal of Distributed Energy Resources, Vol. 1, No. 1, Kassel, 2005.
- [8] Wasiak, I. et al.: *A Power Quality Management Algorithm for Low Voltage Grids with Distributed Resources*. Dispower Info No. 17, Kassel, 2005.
- [9] Arndt, U. et al.: *Energiewirtschaftliche Bewertung dezentraler KWK-Systeme für die Hausenergieversorgung*. Energie und Management Verlagsgesellschaft mbH, Herrsching, 2004.
- [10] Schwab, A.: *Elektroenergiesysteme*. Springer, Berlin, 2006.
- [11] Wenzl, H.: *Virtuelle Kraftwerke – KWK-Anlagen als Basis*. Kraft-Wärme-Kopplung im Heizwärmemarkt, KWK-Tagung, Bad Kreuznach, 2007.
- [12] von Roon, S. et al.: *Simulation von Mikro-KWK-Anlagen zur Bewertung von Netzintegrationskonzepten*. IEWT, Wien, 2007.
- [13] Hauck, M.: *Bildung eines dreiphasigen Inselnetzes durch unabhängige Wechselrichter im Parallelbetrieb*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2002.
- [14] Colijn, M.: *MicroCHP – Internationale Strategien in den Niederlanden und in Großbritannien*. Berliner Energietage, Berlin, 2004.
- [15] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: *Energiedaten – Nationale und Internationale Entwicklung*. BMWi, Berlin, 2006.
- [16] Held, A. et al.: *Evaluation of renewable promotion schemes in the European Electricity market*. Current development of Green IPPs: Experiences, Challenges, and Strategies, Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 2005.