

Untersuchung der Systemdienlichkeit von Wasserstoffrückverstromung mit Kraft-Wärme-Kopplung

System Support Analysis of Hydrogen Regeneration with CHP

M.Sc. Simon Decher, M.Sc. Kaja Aniol, Prof. Dr.-Ing. Hans Schäfers
Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, Deutschland. simon.decher@haw-hamburg.de

Kurzfassung

Im EU-Projekt „mySMARTLife“ wird unter anderem die Nutzung von bis zu 30 vol. % Wasserstoff im Erdgas in Kraftwärmekopplung (KWK)-Anlagen erprobt. Die auf KWK basierende Nahwärmeversorgung eines Wohnquartiers wird dazu teilweise wasserstofffähig umgerüstet. Der Gasnetzbetreiber schafft mit einem Gasmischer und den KWK-Anlagen die Möglichkeit zur (Rück-)Verstromung von Wasserstoff. In der Testphase wird der Betrieb mit verschiedenen Anteilen von Wasserstoff im Verbrennungsgasgemisch erprobt. Ziel ist die Prüfung eines reproduzierbaren Betriebs der Anlagen mit flexiblen Wasserstoffanteilen. Optimierungspotentiale zum Senken von positiven bzw. Anheben von negativen Residuallasten mit wasserstoffbetriebenen Blockheizkraftwerken (BHKW) werden eruiert.

Abstract

The EU project „mySMARTLife“ is testing, among other things, the use of up to 30 vol. % hydrogen in natural gas in combined heat and power (CHP) plants. The CHP-based local heat supply of a residential area will be partially converted to hydrogen. The gas network operator is using a gas mixer and CHP plants to create the possibility of (re)generating hydrogen. In the test phase, operation with different proportions of hydrogen in the combustion gas mixture will be tested. The aim is to test reproducible operation of the plants with flexible hydrogen proportions. Optimization potentials for lowering positive or raising negative residual loads with hydrogen-powered CHP will be elicited.

1 Einleitung

Im Wohngebiet „Am Schilfpark“ in Hamburg-Bergedorf (BGD) wurden in 2019 mehr als 270 Wohneinheiten (WE) in einem Mehrfamilienhaus-Neubaukomplex geschaffen. Für die Wärmeversorgung wurden zwei BHKW und zwei Spitzenlastkessel installiert, die aus dem vorhandenen Erdgasnetz versorgt werden. Ein BHKW und ein Spitzenlastkessel werden mit bis zu 30 vol. % Wasserstoff im Erdgas versorgt. Dazu hat der Gasnetzbetreiber einen Gasmischer vor dem Anschlusspunkt der Wärmeerzeugung errichtet, der dem Erdgas variabel zwischen 0 % und 30 % Wasserstoff beimischen kann. Der Betreiber hat die Anlagen entsprechend wasserstofffähig umbauen lassen. Die BHKW liefern neben der Wärme für die WE auch Strom, der in das Stromnetz eingespeist werden könnte. Die Systemdienlichkeit bzgl. der Residuallast wird analysiert.

2 Motivation

Wasserstoff erlangt zunehmend Bedeutung in der Energiewende als alternativer Kraftstoff und Energieträger. Durch die gut bekannte und verstandene Elektrolyse kann Wasserstoff mithilfe elektrischer Energie erzeugt und somit als Speichermedium verwendet werden. Nach dem Transport und ggf. der Lagerung wird er durch konventionelle Verbrennungskraftmaschinen oder Brennstoffzellen wieder in elektrische Energie umgewandelt. Entsprechend sieht die

nationale Wasserstoffstrategie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter anderem Maßnahmen zur Rückverstromung bei Stromknappheit vor [1].

Im Transformationsprozess von fossilen Energieträgern zu erneuerbarem Wasserstoff ist die Beimischung von Wasserstoff in die vorhandene Erdgasinfrastruktur ein zentraler Punkt. Für einen solchen Ansatz besteht jedoch noch Anpassungs- und Forschungsbedarf an verschiedenen Bauteilen der Infrastruktur [2]–[4]. In einem ersten Schritt zur Umsetzung kommen daher zunächst zwangsläufig Gasgemische aus verschiedenen Teilen Erdgas und Wasserstoff zustande. Da Brennstoffzellen reinen Wasserstoff benötigen, können sie ein solches Gasgemisch nicht oder nur nach Reformation verwerten. An Verbrennungskraftmaschinen muss zwar der Verbrennungsprozess angepasst werden, sie sind jedoch grundsätzlich in der Lage, auch Gemische aus beiden Gasen zu nutzen. Modellrechnungen zeigen, dass die Heizwärmeversorgung Deutschlands in einem (annähernd) CO₂ neutralen Energiesystem auf zwei Säulen ruhen wird: Wärmepumpen (Betrieb unter Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien (EE)) oder KWK-basierte Wärmenetze mit einer Rückverstromung des zu Zeiten negativer Residuallasten (EE-Überschuss) erzeugten Wasserstoff in Zeiten positiver Residuallasten (EE-Mangel) [5]–[7]. Die dafür notwendige Etablierung von Wasserstoff als chemischen Speicher für elektrische Energie erfordert weitere Untersuchungen und Erprobungen entlang der Transportkette von der Wasserstoffherzeugung mit erneuerbarem Strom, der Einspeisung und dem Trans-

port im vorhandenen Gasnetz bis zu den Effekten von Wasserstoff(gemischen) auf den Betrieb von KWK-Anlagen und die stromgeführte Steuerung des KWK-Einsatzes zur Rückverstromung in Zeiten positiver Residuallasten. Wie sich ein variabler Anteil von Wasserstoff im Gasnetz auf den Betrieb eines BHKW samt Spitzenlastkessel für die Wärmeversorgung eines Wohnquartiers auswirkt, ist Gegenstand dieser Untersuchung. Die umgerüsteten KWK-Anlagen beim Verbraucher sind das erste Glied einer Wasserstoffkette vom grünen Strom bis zur Rückverstromung in Bedarfszeiten. Daher wird zusätzlich auch eine erste Abschätzung der Systemdienlichkeit des Wasserstoffeinsatzes vorgenommen.

3 Ausgangssituation

Zur Bewertung der Systemdienlichkeit des Wasserstoff-einsatzes wird die Stromeinspeisung der (wie z.Zt. noch üblich) wärmegeführten BHKW auf ihre Korrelation mit dem Verlauf der positiven Residuallast in Bergedorf untersucht (siehe Abschnitt 4). In diesem Abschnitt werden zunächst die Anlagen und die aus den Messungen erhaltenen Zeitreihen beschrieben.

3.1 Anlagen

Die WE in insgesamt neun Gebäuden werden über ein Nahwärmenetz von einer Heizzentrale mit drei Pufferspeichern versorgt. Die Speicher werden von zwei BHKW und zwei Spitzenlastkesseln gespeist. Die beiden BHKW leisten jeweils 100 kW thermisch und 50 kW elektrisch. Die Spitzenlast wird durch zwei 500 kW leistende Gaskessel abgedeckt. Die fünffach höhere Leistung der Spitzenlastkessel gegenüber den KWK-Anlagen ist dadurch begründet, dass letztere möglichst hohe Volllaststunden bei einem wärmegeführten Betrieb erreichen sollen und nicht auf einen maximal flexiblen Betrieb ausgelegt werden. Diese Kombination von BHKW und Spitzenlastkessel entspricht einer klassischen Auslegung. Zur Erprobung der Wasserstoffkette wird der Wasserstoff dem Erdgas beigemischt, in einem der zwei BHKW verbrannt und so unter Abwärmenutzung rückverstromt.

3.2 Wärmeverbrauch und BHKW-Betrieb

Seit dem 01.12.2019 werden die Erzeugungs- und Verbrauchsdaten ausgelesen und in eine Datenbank geschrieben. In Abbildung 1 ist der Verlauf von Wärmeeinspeisung zusammen mit der Stromproduktion bei einer Stromkennzahl von $s = 0,5$ durch die BHKW im Jahr 2020 dargestellt. Die eingespeiste Wärmeleistung (BHKW und Kessel) zur Versorgung der Wohnungen ist in blau dargestellt, die elektrische Leistung der BHKW in orange. Die Wärmeleistung der BHKW sowie der Kessel ist nicht dargestellt, da sich diese Untersuchung auf die elektrische Leistung fokussiert. Die BHKW werden wärmegeführt und in Volllast betrieben. Sie weisen nur zum An- und Abfahren Rampen im Leistungsverlauf auf, die in der Auflösung der Jahresübersicht nicht erkennbar sind. Daraus ergeben sich im Wesentlichen drei Betriebszustände, in denen die

elektrische Leistung die Werte 0 kW - beide BHKW aus, 50 kW - ein BHKW in Betrieb und 100 kW - beide BHKW in Betrieb annimmt (siehe Abbildung 1). Sowohl die eingespeiste Wärmeleistung als auch die elektrische Leistung der BHKW werden jeweils über die Differenz der eingespeisten Energiemenge pro Zeitschritt berechnet.

Da die Aggregate wärmegeführt betrieben werden, ist die Stromproduktion vom Wärmebedarf der Gebäude abhängig. Dieser Zusammenhang ist im Graph daran zu erkennen, dass höhere Leistungsabfragen bei der Wärmeeinspeisung bei den BHKW zu längeren Volllastphasen der Stromeinspeisung führen. Vice versa führt eine sinkende Wärmeeinspeisung zunächst zur Abschaltung eines BHKW und bei weiterem Absinken auch zu Zeiträumen, in denen beide BHKW nicht produzieren. Wie zu erwarten, laufen beide BHKW in der Übergangszeit und im Winter über größere Zeiträume ununterbrochen. Dagegen gibt es im Sommer längere Phasen, in denen ein BHKW abgeschaltet bleibt. Da der Wärmebedarf auch im Sommer nie auf null sinkt, gab es lediglich kurze Zeiträume, in denen beide BHKW abgeschaltet waren (Juli - August). In Summe liefen die beiden BHKW 11.079 Stunden in Volllast und erzeugten gemeinsam 553.926 kWh elektrische Energie. Bezogen auf die gemeinsame Nennleistung von $\hat{P}_{el} = 2 \cdot 50 \text{ kW} = 100 \text{ kW}$ ergaben sich damit 5.539 Volllaststunden in 2020. Die Eckdaten sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Das zweite BHKW wurde Ende April 2020 in Betrieb genommen. Zu diesem Zeitpunkt wurde die Abtastrate von viertelstündlich auf minütlich erhöht, was am Verlauf der eingespeisten Wärmeleistung deutlich zu erkennen ist. Am 01.12.2020 wurde der erste Inbetriebnahmeversuch einer Beimischung von Wasserstoff durchgeführt. Der Versuch zeigte noch Nachbesserungsbedarf an der Einspeiseregelung auf. Die Arbeiten zur Lösung der Regelungsprobleme für die Beimischung dauern an, so dass zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Papers noch kein dauerhaft zuverlässiger Betrieb mit Wasserstoff möglich war. Der Abschluss der Inbetriebnahme ist für März 2021 geplant.

Anhand der Verbrauchs- und Erzeugungsdaten wird im Folgenden die Korrelation der Stromproduktion mit dem Verlauf der positiven Residuallasten des (lokalen) Energiesystems untersucht. Dabei wird beleuchtet, welchen Nutzen die Umrüstung auf Wasserstoff bei wärmegeführten BHKW bereits haben kann.

Bez.	P_{th} [kW]	P_{el} [kW]	W_{el} [kWh]	Volllast- stunden
BHKW 1	100	50	351.818	7.036
BHKW 2	100	50	202.109	4.042
Verbund	200	100	553.926	5.539

Tabelle 1 Zusammenfassung Wärmeseite in 2020

3.3 Beschreibung Stromseite

Bergedorf ist einer der sieben Bezirke der Stadt Hamburg und hat etwa 130.000 Einwohner. Der Stadtteil Ber-

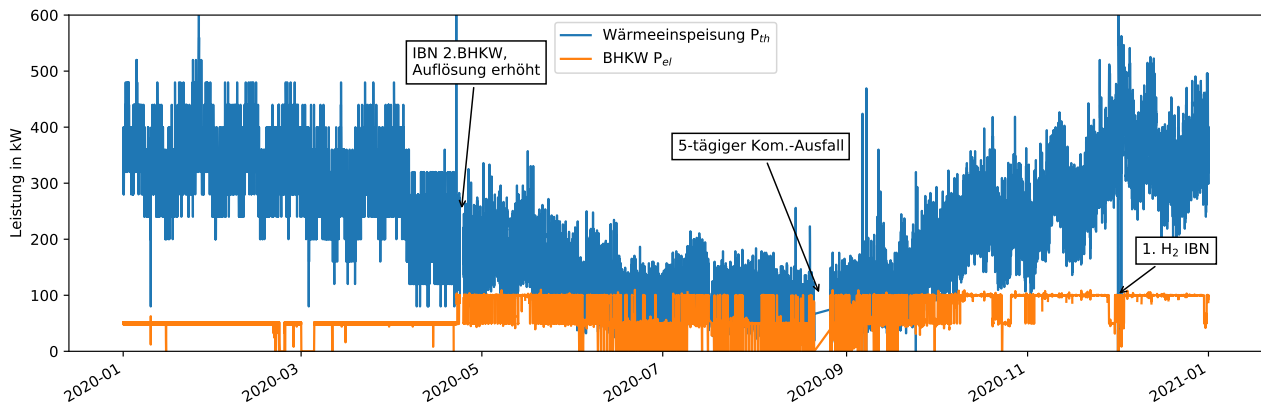


Abbildung 1 Wärmeleistung und Stromerzeugung in 2020

gedorf ist als Siedlungsgebiet deutlich vom restlichen Siedlungsgebiet der Stadt Hamburg abgesetzt und entspricht einer typischen deutschen Mittelstadt. Die Stromversorgung des Stadtteils Bergedorf (und des größten Teils des Bezirks) erfolgt über einen 110 kV-Netzverknüpfungspunkt, der Teil des Hochspannungsverteilnetzes Hamburgs ist. Für die Untersuchung der beschriebenen Erzeugungs- und Verbrauchsdaten werden diese mit dem Verlauf der Residuallast an diesem Netzknoten verglichen. Die viertelstündlich aufgelösten Leistungsdaten der Last und Erzeugung werden von dem Verteilnetzbetreiber (VNB) Stromnetz Hamburg GmbH auf dem Energieportal für Hamburg und die sieben Bezirke bereitgestellt [8]. Die Residuallast ist die Differenz zwischen der nachgefragte Leistung (Stromverbrauch) und der (fluktuierenden) Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien. In diesem Fall wird angenommen, dass die am Netzknoten aufgenommene Erzeugung vollständig der Erzeugung aus regenerativen Energien entspricht. Diese Annahme lässt sich dadurch stützen, dass in der Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur [9] für den Knotenpunkt Bergedorf lediglich das Pumpspeicherkraftwerk Geesthacht auf Hochspannungsebene mit 119,1 MW aufgeführt ist und zusätzlich diverse Windenergieanlagen im Bezirk Bergedorf Strom produzieren. In Abbildung 2 werden für das Jahr 2020 die Tagesmittelwerte der Residuallast in schwarz und deren erste Standardabweichung in hellgrau dargestellt. Die Residuallast kann positive und negative Werte annehmen, so dass die Ordinate von -60 MW bis 80 MW skaliert ist. Das Maximum der dargestellten Residuallast liegt bei $50,26$ MW und das Minimum bei $-40,76$ MW. Für den Zeitraum vom 11. bis zum 13.07.2020 wurden keine Werte veröffentlicht. Im Jahresverlauf zeigt sich, dass die Residuallast zur Mitte des Jahres leicht ansteigt, um dann wieder leicht abzufallen. Dies spiegelt den normalen Trend des Windaufkommens während eines Jahres wieder und findet sich analog in den Stromproduktionsdaten des Windparks Curslack, der zur HAW Hamburg gehört und dessen Produktion am Energiecampus der HAW in Hamburg-Bergedorf kontinuierlich ausgewertet wird. Insgesamt zeigt die Darstellung, dass die Residuallast am Netzknoten Bergedorf zu einem bereits hohen Anteil negativ ist, also mehr Strom in das Übertragungsnetz abgegeben wird, als von ihm be-

zogen wird.

4 Systemdienlichkeit

Im weiteren Text wird Systemdienlichkeit als ein Verhalten von Erzeugern und Verbrauchern verstanden, dass die Maximierung des EE-Stromanteils beziehungsweise ein möglichst weitgehendes Anpassen von Erzeugung und Verbrauch an die fluktuierende EE-Stromerzeugung anstrebt. Dazu wird die Residuallast als Regelgröße herangezogen. Bezogen auf einen regelbaren Stromerzeuger, wie ein BHKW, bedeuten positive, höhere Residuallasten größeren Einspeisebedarf. In Zeiten negativer Residuallasten hingegen besteht (lokal) kein zusätzlicher Stromproduktionsbedarf. Um diese unterschiedlichen Bedarfe zueinander in Relation setzen zu können, wird der *Grid support Coefficient* (GSC, engl. für Netzdienlichkeitskoeffizient) von Klein, Langner, Kalz u. a. [10] verwendet.

4.1 Der Grid Support Coefficient

Obwohl der Koeffizient dem Namen nach die Netzdienlichkeit beschreibt, wird im weiteren Text *Systemdienlichkeit* verwendet, um dem Sinn des Koeffizienten gerecht zu werden, da Netzdienlichkeit in der jüngeren Diskussion insbesondere als vorteilhaft im Sinne der allgemeinen Netzauslastung (insbesondere zur Vermeidung von Netzengpässen) verstanden wird. Für eine detaillierte Diskussion der Begrifflichkeiten „netzdienlich“, „marktdienlich“ und „systemdienlich“ sei in diesem Zusammenhang auf [11, S.48f] verwiesen. Jedoch wird im Folgenden in Ergänzung dieser Diskussion „systemdienlich“, wie oben erläutert, verstanden. Die Urheber des GSC am FHG ISE verwenden zur GSC-Bestimmung die Netzkenngößen Residuallast, EE-Anteil, Strompreis und kumulierten Primärenergieverbrauch. Dabei ergibt jede der vier Kenngrößen jeweils einen GSC mit dezidiert eigenständigem Bezugsrahmen und damit einen von den übrigen Kenngrößen unabhängigen spezifischen GSC.

Zur Ermittlung des GSC wird in einem gewählten Zeitraum die Zeitreihe eines Erzeugers mit der Zeitreihe einer jeweiligen NetzkenngroÙe gewichtet. Zudem wird im Zeit-

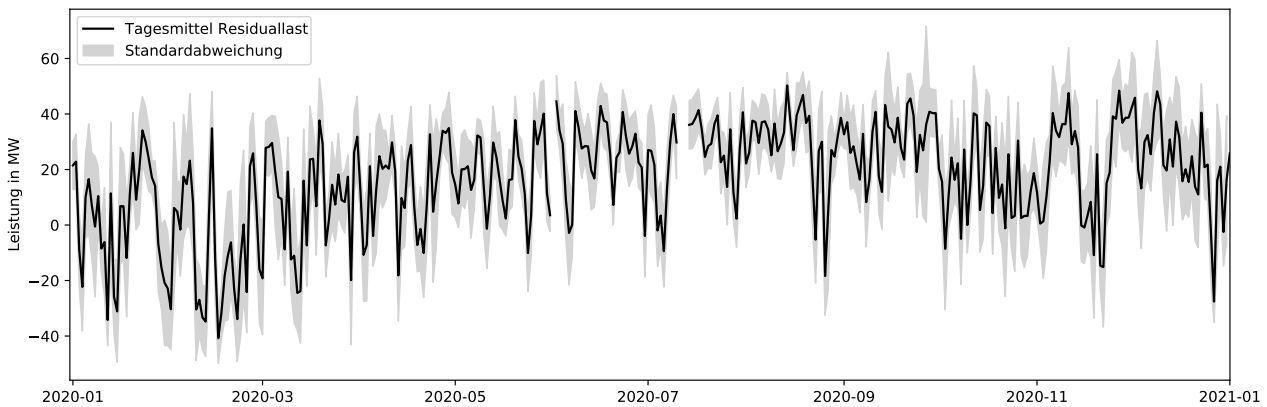


Abbildung 2 Tagesmittelwerte der Residuallast in 2020

raum die eingespeiste Energiemenge des betrachteten Erzeugers mit dem Mittelwert der Netzkenngroße im selben Zeitraum gewichtet.

Der GSC wird in einen absoluten (GSC_{abs}) und einen relativen (GSC_{rel}) Wert unterteilt. GSC_{abs} wird berechnet, indem der Quotient aus gewichteter Zeitreihe und dem Mittelwert gebildet wird. Der relative GSC beschreibt anhand einer Skala von -100 bis $+100$, wie viel Optimierungspotential genutzt wurde. Wird im Zeitraum ein GSC_{rel} von -100 erreicht, war dies der schlechteste Zeitraum, in dem eingespeist werden konnte. Vice versa bedeutet $GSC_{rel} = +100$ den bestmöglichen Zeitpunkt für eine Einspeisung. [10]

Die Bewertung der Systemdienlichkeit in dieser Untersuchung verwendet im Folgenden lediglich die Residuallast als Netzkenngroße und den GSC_{rel} zur Bewertung des zeitlichen Einspeiseverhaltens.

4.2 Systemdienlichkeit der BHKW

Der GSC_{rel} ist ein Maß für die Nutzung des Potentials zur Anpassung der Stromerzeugung der BHKW an den Residuallastverlauf. Zeiträume, in denen die BHKW entweder durchgängig ab- oder angeschaltet waren, haben kein Potential zur Verschiebung der Erzeugung. Entsprechend könne solche Tage nicht berücksichtigt werden. In 2020 gab es 119 Tage, an denen die BHKW nicht durchgängig einen singulären Zustand aufwies. Bis Ende April 2020 war nur ein BHKW in Betrieb, sodass der Zeitraum Januar bis April 2020 für den GSC_{rel} auch nicht herangezogen wird.

Abbildung 3 zeigt den täglichen GSC_{rel} seit Ende April 2020. Lücken zwischen einzelnen Punktwolken sind auf Zeiträume zurückzuführen, in denen kein GSC_{rel} bestimmt werden kann. Bis September ist der ermittelte GSC_{rel} überwiegend im positiven Bereich, was für ein eher systemdienliches Verhalten steht. Ab September treten vermehrt Tage auf, an denen kein GSC_{rel} bestimmt werden kann, da kein Flexibilitätspotential vorhanden ist. Zudem fallen die berechneten GSC_{rel} und erreichen den negativen Bereich. Aufgrund der geringen Anzahl an Tagen, für die der GSC_{rel} bestimmt werden kann, wird zur Plausibilisierung eine qualitative Analyse der Profile von Residuallast und

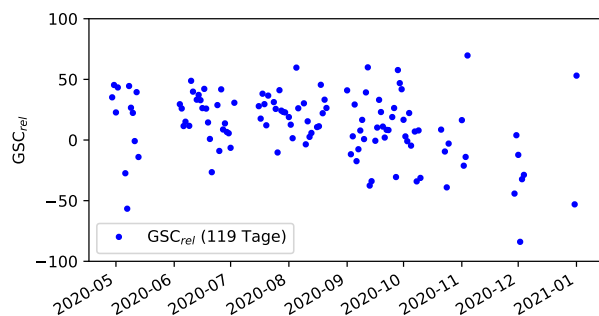


Abbildung 3 Täglicher GSC der BHKW-Einspeisung in 2020

BHKW-Einspeisung unternommen.

4.3 Vergleich der Zeitreihen

Eine rein grafische Beurteilung des Einspeiseverhaltens der BHKW kann unternommen werden, indem das Profil der BHKW-Stromerzeugung über das Profil der Residuallast gelegt wird. Eine übersichtliche Darstellung kann erreicht werden, indem das Jahr in die vier Jahreszeiten unterteilt und jeweils als durchschnittlicher 24h-Lastgangverlauf, wie in Abbildung 3, dargestellt wird. In einer solchen Darstellung wird vernachlässigt, dass sich die Tagesprofile von Werk- und Feiertagen stark unterscheiden, was zu einer höheren Standardabweichung führt. Dennoch resultiert ein charakteristisches Tagesprofil, das den qualitativen Vergleich der Profile ermöglicht. Anders als bei der Verwendung des GSC_{rel} wird der Datensatz lediglich durch Datenlücken und Messfehler begrenzt, was die Betrachtung des gesamten Jahres in dieser Auswertung ermöglicht.

Für jede Viertelstunde eines Tages der Jahreszeit werden der Mittelwert und die Standardabweichung gebildet (siehe Abbildung 4). Das Profil der BHKW wird lediglich durch den Mittelwert dargestellt. Auf der linken Ordinate ist die Residuallast in Megawatt und auf der rechten die elektrische Leistung der BHKW in Kilowatt aufgetragen. Die Abszisse ist in die Stunden eines Tages unterteilt. Das in Orange dargestellte Profil beschreibt die mittlere Residual-

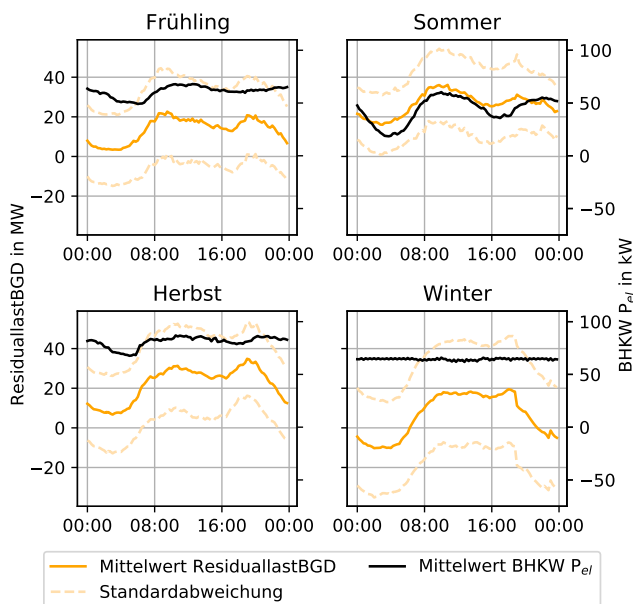


Abbildung 4 Gemittelte Tagesprofile in den Jahreszeiten 2020

last zum jeweiligen Zeitpunkt in der Jahreszeit. Im helleren Orange ist die Standardabweichung (σ_1) für den entsprechenden Zeitpunkt ergänzt. Als schwarze Linie ist der Mittelwert der elektrischen Leistung der BHKW in den einzelnen Viertelstunden über das Residuallastprofil gelegt.

Das Profil der Residuallast ähnelt in jeder Jahreszeit dem zu erwartenden Lastprofil mit jeweils einem lokalen Maximum am Vormittag und am Abend. Jedoch verändert sich die Ausprägung der lokalen Minima und Maxima über die Jahreszeiten. Wo in den Übergangszeiten die beiden lokalen Maxima im Tagesverlauf noch deutlich erkennbar sind, reduzieren sich diese in Sommer und Winter deutlich. Im Winter ist kein lokales Minimum in den Tagesstunden mehr ersichtlich. Die Streuung der Residuallast verändert sich ebenfalls erkennbar. Im Sommer ist der durch die Standardabweichung abgegrenzte Korridor in den Tagesstunden zwischen 47 MW und 13 MW, wohingegen im Winter zur gleichen Tageszeit die Standardabweichung zwischen 44 MW und -9 MW liegt. Das mittlere Tagesprofil der BHKW ändert sich ebenfalls abhängig von der Jahreszeit. In den Übergangszeiten flacht das Profil deutlich ab, sodass lokale Minima und Maxima wenig ausgeprägt sind. Gleichzeitig steigt der Betrag der eingespeisten elektrischen Leistung. Im Winter tritt eine nahezu konstante Linie über den Tag bei 62 kW elektrischer Leistung auf. Im Frühling, Sommer und Herbst liegen die qualitativen Verläufe der jeweiligen Mittelwerte weitgehend passend zueinander. Im Winter liegt der Mittelwert der BHKW-Stromerzeugung unter 100 kW, da in zwei der drei Wintermonate (Januar und Februar 2020) nur ein BHKW in Betrieb genommen war. Der Wärmebedarf in dieser Zeit reichte aus, um das BHKW durchgehend in Volllast zu betreiben (vgl. Abb. 1). Im dritten Wintermonat (Dezember 2020) konnten beide BHKW in Volllast betrieben werden, was den Mittelwert für den Winter in Summe über die 50 kW des einen BHKW anhebt. Es ist aber davon auszu-

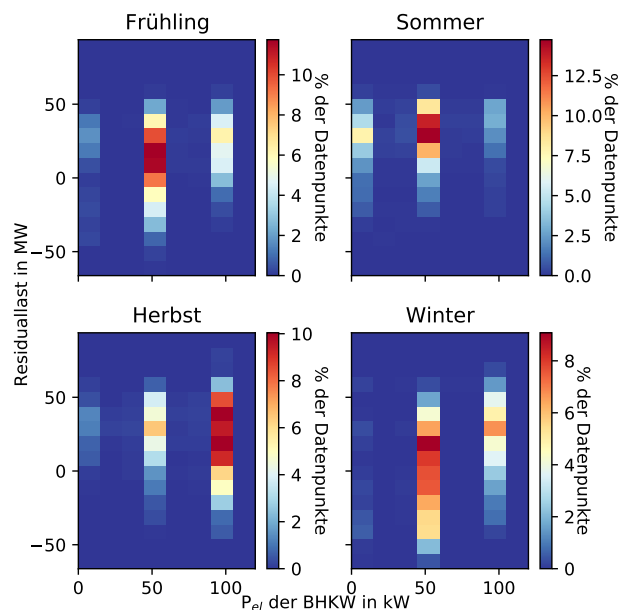


Abbildung 5 Korrelation von Einspeiseleistung und Residuallast in 2020

gehen, dass auch im Januar und Februar 2020 eine Anzahl von Volllaststunden dicht am Maximum erreicht worden wäre, wenn auch das zweite BHKW bereits in Betrieb gewesen wäre. Die jetzt bei 62 kW nahezu konstant verlaufende elektrische Leistung nähert sich dann der 100 kW-Marke an.

Abbildung 5 visualisiert die Korrelation zwischen den beiden Verläufen durch eine Heatmap. Die Heatmap basiert auf einer „Punktwolke“, bei der jeder Datenpunkt die Kombination aus Residuallast und Einspeiseleistung für eine Viertelstunde beinhaltet. Für die Darstellung sind die Segmente anhand der relativen Anzahl der darin liegenden Datenpunkte von blau bis rot eingefärbt. Die Häufung entlang der 0 kW, 50 kW und 100 kW des BHKW entstehen durch die drei Betriebszustände des BHKW-Verbunds (vgl. Abs. 3.1).

Im Frühling und Sommer ist überwiegend eines der beiden BHKW in Betrieb, wodurch es zur Ausprägung um die 50 kW-Marke kommt. In beiden Jahreszeiten liegen die Betriebsphasen zu hohen Anteilen in Zeiträumen mit positiver Residuallast. Im Herbst verschiebt sich die Häufung durch den steigenden Wärmebedarf auf die 100 kW-Marke. Die Einspeisung bleibt aber überwiegend in Zeiträumen mit positiver Residuallast. Im Winter hingegen ist die Verteilung der Einspeisung breiter über die Residuallast verteilt. Befanden sich in Frühling, Sommer und Herbst 50 % der Datenpunkte in jeweils fünf Segmenten mit je 10 MW Seitenlänge in y-Richtung, sind es im Winter bereits sieben. Im Teil der Heatmap mit negativen Residuallasten liegen im Frühling 28 % der Zeiträume, zu denen elektrische Leistung bereitgestellt wird. Im Sommer sind dort 7 %, im Herbst 19 % und im Winter haben 42 % der Zeiträume, in denen Strom eingespeist wird, eine negative Residuallast in Bergedorf und sind damit systemadvers.

Dies deckt sich mit den Beobachtungen aus Abschnitt 4.2. Jedoch kann der GSC_{rel} nur für Zeiträume angewendet

werden, in denen die Betriebszeiten variiert werden können. Die Bewertung anhand der gemittelten Profile hingegen ist qualitativ geprägt und erschwert damit einen Vergleich und die Bezifferung von Optimierungspotential.

Beide Betrachtungen zeigen auf, dass sich die BHKW in Zeiträumen mit geringerem Wärmebedarf eher systemdienlich verhalten. Aufgrund der Auslegung als wärmegeführte Anlagen führt insbesondere der Wechsel in den Grundlastbetrieb im Winter zu einem systemadversen Verhalten. Die scheinbare Korrelation von Residuallast und Einspeisung wärmegeführter BHKW in Frühling, Sommer und Herbst ist jedoch keinesfalls gesichert. Die beeinflussenden Größen der Residuallast und der BHKW-Einspeisung sind nicht voneinander abhängig. Es sind weitere Untersuchungen notwendig, um die Korrelation und deren Änderung über den Transitionsprozess zu beschreiben.

Aus Sicht einer notwendigerweise systemdienlichen Wasserstoffrückverstromung ist zu folgern, dass BHKW nach derzeitigen Dimensionierungen und Betriebsregimen nicht grundsätzlich systemadvers, jedoch auch nicht grundsätzlich systemdienlich Strom erzeugen. Bei hohem Wärmebedarf ist eine Rückverstromung von Wasserstoff nicht systemdienlich möglich. Damit die Verwendung von Wasserstoff zur Zwischenspeicherung von elektrischer Energie eine systemdienliche Wirkung zeigen kann, müssen Heizsysteme mit KWK-Anlagen in Zukunft so dimensioniert werden, dass sie in der Lage sind, die Wärmeversorgung aufrecht zu erhalten, auch wenn die KWK abgeschaltet ist. Dies kann mit größer dimensionierten KWK-Modulen, zusätzlichen und größeren Speichern sowie Power-to-Heat (PtH)-Systemen erreicht werden.

5 Zusammenfassung

Es wird die aus zwei BHKW und zwei Spitzenlastkesseln bestehende Wärmeversorgung eines Nahwärmesystems zur Versorgung von neun Gebäuden mit 270 WE in Hamburg-Bergedorf auf Basis eines Erdgas-Wasserstoff-Gemisches untersucht. Für die Bestimmung der Systemdienlichkeit der Stromeinspeisung der wärmegeführten BHKW wird das Einspeiseverhalten mit der Residuallast am 110 kV Netzknoten in Beziehung gebracht. Dies geschieht einerseits anhand der Korrelation gemittelter Profile von Residuallast und dem Einspeiseverhalten der BHKW und andererseits mit dem relativen GSC, der den Ausnutzungsgrad möglicher Potentiale zur Optimierung der Einspeisesituation angibt. Der positive Bereich der Skala steht dabei für ein systemdienliches und der negative für einen systemadverses Einspeiseverhalten. Nach Prüfung der Daten konnten 119 Tage des Jahres 2020 für die Untersuchung mittels GSC_{rel} genutzt werden. Durch die beiden Betrachtungen wird ersichtlich, dass die BHKW bei niedrigem Wärmebedarf in ihrem Stromeinspeiseverhalten eher systemdienlich sind. Im Winter zeigen sie jedoch eher ein systemadverses Verhalten. Ein systemdienliches Einspeiseverhalten über ein gesamtes Jahr wäre für den untersuchten Fall lediglich mit der Nutzung von zusätzlichen Speichern oder PtH-Anlagen möglich. Da es sich

hierbei um eine typische Systemauslegung handelt, darf gefolgert werden, dass eine systemdienliche Stromerzeugung aus der Rückverstromung von Wasserstoff in KWK-Fernwärmesystemen nicht automatisch erfolgt. Vielmehr ist eine Änderung der Betriebsregime erforderlich, die eine veränderte Zusammenstellung der Anlagenkomponenten in den Heizzentralen erfordert und durch einen geänderten regulatorischen Rahmen angereizt werden muss.

6 Danksagung

Diese Publikation wurde im Rahmen des Horizon 2020 Projekt mySMARTLife (731297) und mit Unterstützung der Projektpartner von Gasnetz Hamburg GmbH und Enercity Contracting Nord GmbH erstellt.

Literatur

- [1] BMWi, Hrsg., *Die nationale Wasserstoffstrategie*, Juni 2020.
- [2] G. Müller-Syring, M. Henel, W. Köppel und H. Mlaker, "Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz", de, Techn. Ber., Feb. 2013.
- [3] Wissenschaftliche Dienste des deutschen Bundestags, Hrsg., *Grenzwerte für Wasserstoff (H₂) in der Erdgasinfrastruktur*, Juni 2019.
- [4] M. Zapf, *Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem*, de. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [5] H.-M. Henning und A. Palzer, "Energiesystem Deutschland 2050", *Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. Freiburg*, 2013.
- [6] Prognos, Öko-Institut und Wuppertal-Institut, "Klimaneutrales Deutschland", Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität, Nov. 2020.
- [7] C. Stephanos und M. Höhne, "» Sektorkopplung «-Optionen für die nächste Phase der Energiewende", acatech, Hrsg., 2017.
- [8] Stromnetz Hamburg GmbH und Freie und Hansestadt Hamburg, *Energieportal Hamburg - Information*.
- [9] Bundesnetzagentur, *Kraftwerksliste*, Jan. 2021.
- [10] K. Klein, R. Langner, D. Kalz, S. Herkel und H.-M. Henning, "Grid support coefficients for electricity-based heating and cooling and field data analysis of present-day installations in Germany", en, *Applied Energy*, Jg. 162, S. 853–867, Jan. 2016.
- [11] W. Fritz, S. Willemsen und C. Linke, "Optionen zur Weiterentwicklung der Netzentgeltsystematik für eine sichere, umweltgerechte und kosteneffiziente Energiewende", Aachen, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, 2018.