

# Optimierung einer intelligenten Steuerungsalgorithmik für Biogas-BHKW inklusive Feldversuchen an einer realen Biogasanlage

Rainer Maier (\*), Bernd Thomas

Hochschule Reutlingen, Alteburgstraße 150, 72762 Reutlingen  
bernd.thomas@reutlingen-university.de, +49 (0)7121-271/7041,  
www.reutlingen-university.de

**Kurzfassung:** Die Zielsetzung des hier vorgestellten Projekts ist es, eine intelligente Steuerungsalgorithmik für Biogas-Blockheizkraftwerke (Biogas-BHKW) zu entwickeln und zu optimieren. Daran schließt sich eine Testphase an einer realen Biogasanlage an, an der die Algorithmik zu diesem Zweck in die Anlagensteuerung implementiert wird. Um beurteilen zu können inwieweit die Steuerungsalgorithmik einen Beitrag zur Entlastung von Stromnetzen leisten kann, wird für die Versuche neben dem elektrischen Bedarf des landwirtschaftlichen Betriebs, an dem die Anlage angesiedelt ist, zusätzlich die Residuallast des benachbarten Stromnetzes betrachtet. Diese basiert auf Daten vom nächstgelegenen Umspannwerk, die so skaliert werden, dass sie eine Siedlung repräsentieren, die von dem Biogas-BHKW der Anlage mitversorgt werden kann. Die Einbindung der Steuerungsalgorithmik in die Anlagensteuerung erfolgt über eine Kommunikationsstruktur mit einer Datenbank als zentraler Schnittstelle. Eine erste Versuchsreihe, bei der das Biogas-BHKW nach den Fahrplänen der intelligenten Steuerungsalgorithmik geregelt wird, zeigt vielversprechende Ergebnisse. Über die gesamte Versuchsreihe hinweg berechnet die Steuerungsalgorithmik zuverlässig neue Fahrpläne, die vom BHKW weitestgehend auch sehr gut umgesetzt werden. Zudem kann nachgewiesen werden, dass durch den Einsatz der Algorithmik das vorgelagerte Stromnetz entlastet wird.

**Keywords:** Biogas-BHKW, intelligente Steuerungsalgorithmik, netzdienlicher Betrieb

## 1 Einleitung

Zur Erreichung der Klimaziele, die sich die Weltgemeinschaft auf dem Pariser Klimagipfel gesetzt hat, bedarf es einer schnellen Dekarbonisierung der Energieerzeugung. Viele Länder setzten dabei auf den Ausbau von Erneuerbaren Energien wie Wind und Photovoltaik. Um die Netzstabilität trotz der damit verbundenen volatilen Erzeugung zu gewährleisten, bedarf es jedoch Mechanismen, um die Schwankungen im Stromnetz auszugleichen. In diesem Kontext können Blockheizkraftwerke eine wichtige Rolle spielen, da sie flexibel und dynamisch geregelt werden können. Biogas-BHKW haben den weiteren Vorteil, dass sie nahezu keine CO<sub>2</sub>-Emissionen erzeugen. Vor allem in Deutschland gibt es ein erhebliches Potenzial an Biogas-BHKW, die zur Stabilisierung der Stromnetze bereitstehen. So betrug die Anzahl der Anlagen im Jahr 2019 knapp 8900 mit einer installierten elektrischen Gesamtleistung von annähernd 6 GW [1]. Allerdings werden die meisten Anlagen bisher aus wirtschaftlichen Gründen nicht flexibel betrieben und verfügen daher auch nicht über entsprechende Steuerungen, die dies ermöglichen. Da innerhalb der nächsten Jahre allerdings viele Anlagen

aus der EEG-Förderung fallen werden und somit keine garantierten Einspeisevergütungen mehr bekommen, wird es für die Anlagenbetreiber zunehmend interessant, die Anlagen flexibel zu steuern. Hier setzt das Forschungsprojekt an. Eine intelligente Steuerungsalgorithmik zur Optimierung von dezentralen Energieerzeugern, die an der Hochschule Reutlingen entwickelt [2] [3] und an die speziellen Randbedingungen von Biogasanlagen angepasst wurde [4], soll in die Steuerung einer realen Biogasanlage integriert und getestet werden. Die Besonderheit dabei ist, dass die Steuerungsalgorithmik für das BHKW mit einer weiteren Algorithmik gekoppelt wird, die basierend auf den optimierten BHKW-Fahrplänen eine optimale Fütterung der Biogasanlage sicherstellt und damit eine Umsetzung der Fahrpläne überhaupt erst ermöglicht. Dieser Fütterungsmanager wurde im Rahmen des Forschungsprojekts von der Universität Hohenheim entwickelt [5].

## 2 Methodik

### 2.1 Funktionsweise der intelligenten Steuerungsalgorithmik

Die intelligente Steuerungsalgorithmik zur Berechnung optimierter BHKW-Fahrpläne unterteilt sich im Wesentlichen in drei Blöcke (siehe Abbildung 1).

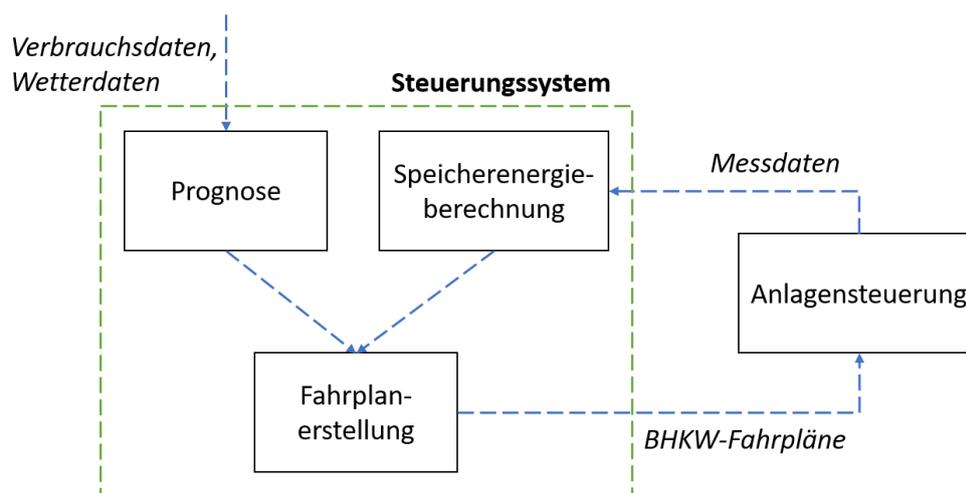


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der intelligenten Steuerungsalgorithmik

Zunächst wird der aktuelle Zustand der vorhandenen Energiespeicher ermittelt. Dafür werden die entsprechenden Messdaten aller vorhandenen Energiespeicher, wie Biogasspeicher, thermischer Speicher (TES), oder auch Batteriespeicher von der Anlagensteuerung ausgelesen. In einem zweiten Block werden Prognosedaten für den Strom- und Wärmebedarf sowie die PV-Erzeugung erstellt. Die Prognosedaten für den Strombedarf basieren auf mathematischen Ansätzen, die auf einer Zeitreihenanalyse des vergangenen Bedarfs beruhen [6]. Dazu wurden im Rahmen dieses Projekts verschiedene Varianten von der Universität Hohenheim untersucht, bewertet und die besten anschließend implementiert. Bei der Wärmeprognose wird auf ein Verfahren zurückgegriffen, dass neben Informationen zum vergangenen Wärmebedarf zusätzlich den Einfluss der Außentemperatur berücksichtigt [7]. Dieser Ansatz wurde im Rahmen einer vorangegangenen Forschungsarbeit bereits in die

Algorithmik implementiert und dann lediglich an die veränderten Rahmenbedingungen angepasst.

Die eigentliche Berechnung des optimalen BHKW-Fahrplans findet im dritten Block der Steuerungsalgorithmik statt. Dieser greift dafür auf die Daten, die in den anderen beiden Blöcken erstellt wurden, zurück. Die Fahrplanoptimierung selbst basiert auf dem sogenannten Monte-Carlo-Verfahren, einem heuristischen Lösungsansatz. Die Ermittlung des optimalen Fahrplans für das BHKW kann dabei in drei Schritte unterteilt werden:

- Eine Menge von N zufällig erzeugten Fahrplänen wird generiert. Dabei wird für jeden Zeitschritt (hier 1 Stunde) „gewürfelt“, ob das BHKW ein oder aus sein soll. Für BHKW, die modulieren können, wird anschließend noch der optimale Modulationsgrad für jeden Zeitschritt in Abhängigkeit des prognostizierten Strom- und Wärmebedarfs ermittelt, sofern das BHKW eingeschaltet sein soll.
- Die Menge von zufälligen Fahrplänen wird an die Randbedingungen der Anlage, wie Mindestlaufzeit des BHKWs oder Füllstand der vorhandenen Energiespeicher, angepasst.
- Abhängig von der gewählten Zielfunktion wird der optimale Fahrplan ausgewählt.

Detailliertere Informationen zur Funktionsweise des Algorithmus können aus [2] und [3] entnommen werden.

Im Unterschied zu erdgasbetriebenen BHKW für Ein- und Mehrfamilienhäuser, für die der Algorithmus ursprünglich entwickelt wurde, verfügen Biogas-BHKW über zwei zusätzliche Komponenten, die bei der Fahrplanberechnung mitberücksichtigt werden müssen. Dies ist zum einen der Gasspeicher, der zur Entkopplung der Gaserzeugung und des Gasbedarfs dient, und zum anderen der Notkühler. In [4] sind die Anpassungen beschrieben, die für die Implementierung des Gasspeichers erforderlich sind. Die Anpassungen zur Implementierung des Notkühlers sind deutlich überschaubarer. Es muss lediglich die Randbedingung, die einen Betrieb des BHKWs bei vollem TES verhindern würde, durch den Einsatz des Notkühlers überschrieben werden. Um den Betrieb des Notkühlers limitieren zu können, wird in die Algorithmik ein zusätzlicher Parameter integriert, der überprüft, wie viel Prozent der erzeugten Wärme bereits über den Notkühler abgeführt wurden. Ab einem definierten Grenzwert wird ein weiterer Betrieb des Notkühlers verhindert, indem die Randbedingung für das obere Limit des TES wieder aktiviert wird.

## 2.2 Die Feldtestanlage

Als reale Anlage zum Test und zur weiteren Optimierung der intelligenten Steuerungsalgorithmik dient der Untere Lindenhof [8], eine landwirtschaftliche Versuchsstation der Universität Hohenheim. Neben einer Biogasanlage befinden sich auf dem Gelände der Versuchsstation verschiedene Stallungen, Verwaltungsgebäude, sowie Wohngebäude, die alle vorrangig vom Biogas-BHKW mit Strom und Wärme versorgt werden sollen. Zum Ausgleich von Defiziten oder Überschüssen bei der Stromerzeugung ist ein Anschluss an das Stromnetz vorhanden. Die Verteilung der Wärme erfolgt über ein Nahwärmenetz. Ein zusätzlicher thermischer Speicher ist geplant; dieser konnte aber im Laufe des Projekts nicht mehr realisiert werden. Zur Deckung von hohen Wärmebedarfen im Winter ist ein zusätzlicher erdgasbetriebener Heizkessel installiert. Eine bereits fertig geplante Photovoltaikanlage soll

künftig die Stromerzeugung durch das BHKW ergänzen. Die ursprünglich angedachte Inbetriebnahme der Anlage innerhalb der Projektlaufzeit konnte allerdings nicht umgesetzt werden.

Die Kenndaten der wichtigsten Anlagenkomponenten des Unteren Lindenhofs sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

| Anlagenkomponente                                      | Technische Daten              |                     |           |
|--|-------------------------------|---------------------|-----------|
| <b>BHKW</b>  | Elektrische Leistung          | [kW]                | 185 – 370 |
|  | Thermische Leistung           | [kW]                | 250 – 401 |
|  | Energieeinsatz                | [kW]                | 523 – 955 |
| <b>Zusatzkessel</b>                                    | Thermische Leistung           | [kW]                | 90 – 680  |
| <b>Gasspeicher</b>                                     | Gesamtvolumen                 | [m <sup>3</sup> ]   | ~ 2300    |
| <b>Fermenter</b>                                       | Maximale Gaserzeugung         | [m <sup>3</sup> /h] | ~ 200     |
| <b>Nahwärmenetz</b>                                    | Kapazität                     | [kWh]               | ~ 180     |
| <b>Ställe,<br/>Verwaltungsgebäude,<br/>Wohngebäude</b> | Strombedarf                   | [MWh/a]             | ~ 800     |
|  | Wärmebedarf                   | [MWh/a]             | ~ 2100    |
| <b>Photovoltaikanlage<br/>(noch nicht installiert)</b> | Maximale elektrische Leistung | [kWp]               | ~ 240     |

Tabelle 1: Übersicht über die wichtigsten Kenndaten der Feldtestanlage

Da der geplante thermische Speicher im Projektzeitraum nicht mehr realisiert werden konnte, muss das vorhandene Nahwärmenetz für die Versuchsreihen als Wärmespeicher dienen. Um die nutzbare Speicherkapazität des Wärmenetzes abschätzen zu können, wurden zunächst Simulationen mit einem in Matlab-Simulink erstellten Modell, das alle wesentlichen Komponenten des Unteren Lindenhofs enthält, durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass ein liegender thermischer Speicher mit einer Kapazität von ca. 180 kWh dem Verhalten des Nahwärmenetzes recht gut entspricht.

Damit sind alle wesentlichen Anlageparameter, die der Algorithmus zur Berechnung des optimalen BHKW-Fahrplans benötigt bekannt.

### 2.3 Integration der Algorithmik in die Anlagensteuerung

Die intelligente Steuerungsalgorithmik zur Berechnung des optimalen BHKW-Fahrplans ist in Matlab programmiert. Um das Programm auf jedem PC ausführen zu können und den Code gegen unzulässige Eingriffe zu schützen, gibt es die Möglichkeit, aus Matlab heraus eine ausführbare Datei (.exe) zu erstellen, die den Code enthält und über eine Desktopverknüpfung oder direkt über Windows-Command aufgerufen werden kann. Eine solche ausführbare Datei mit der darin enthaltenen Steuerungsalgorithmik ist auf einem Rechner im Netzwerk des Unteren Lindenhofs gespeichert. Für die Übermittlung der Daten, die die Algorithmik zur Berechnung eines optimierten Fahrplans benötigt, sowie zur anschließenden Weiterleitung des Fahrplans an die Anlagensteuerung dient eine Datenbank als zentrale Schnittstelle. In Abbildung 2 ist schematisch dargestellt, wie die Kommunikationsstruktur aufgebaut ist.

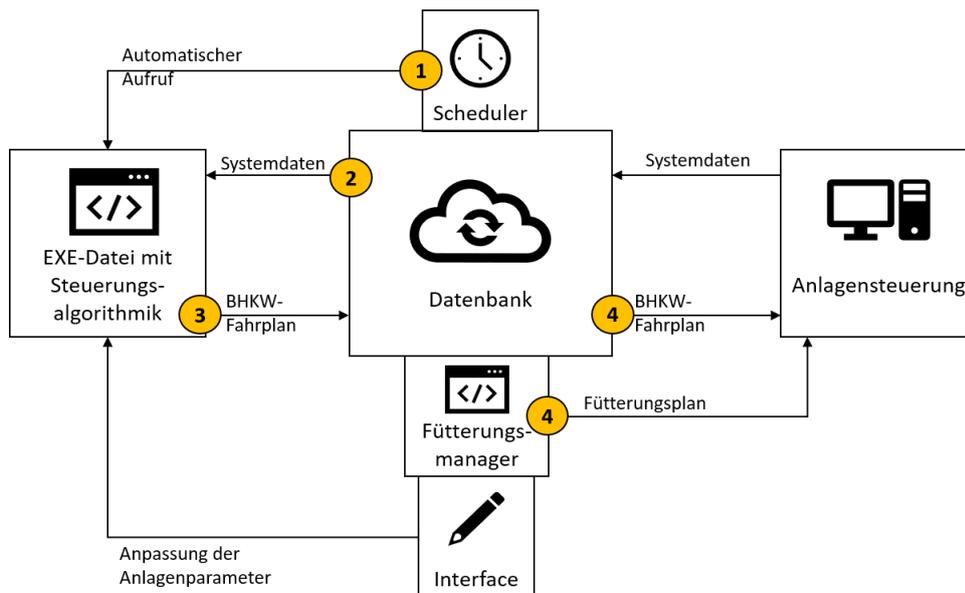


Abbildung 2: Kommunikationsstruktur zur Einbindung der Steuerungsalgorithmik

Zunächst wird die ausführbare Datei mit der Steuerungsalgorithmik über einen in die Datenbank integrierten Scheduler aufgerufen (1). Im nächsten Schritt importiert die Algorithmik alle für die Berechnung relevanten Daten aus der Datenbank und bereitet diese so auf, dass sie das richtige Format haben (2). Anschließend wird der optimale Fahrplan für die nächsten 48 Stunden berechnet. Dieser Fahrplan wird in die Datenbank exportiert (3) und von dort aus der Anlagensteuerung des BHKWs sowie dem Fütterungsmanager zugänglich gemacht (4). Der Fütterungsmanager sorgt dann dafür, dass die Gasproduktion zum Gasbedarf, der aus dem Fahrplan resultiert, passt und der Fahrplan somit umgesetzt werden kann. Der gerade beschriebene Ablauf findet vollständig automatisiert statt. Standardmäßig wird alle 24 Stunden ein neuer Fahrplan berechnet, das Intervall kann bei Bedarf aber auch verkürzt werden.

Ein großer Vorteil der Kommunikationsstruktur mit zentraler Datenbank ist, dass mit diesem Aufbau prinzipiell jede Biogasanlage mit einer intelligenten Steuerungsalgorithmik nachgerüstet werden kann ohne dafür aufwändige und teure Eingriffe in die Hardware durchführen zu müssen.

## 2.4 Randbedingungen der Versuchsreihe

Die erste Versuchsreihe, bei der die Biogasanlage am Unteren Lindenhof nach den optimierten Fahrplänen der intelligenten Steuerungsalgorithmik betrieben wird, basiert auf den nachfolgend aufgeführten Randbedingungen.

Die Anlagenparameter aller für die Berechnungen wichtigen Komponenten der Biogasanlage werden aus den jeweiligen Datenblättern übernommen. Für die Kapazität des TES werden wie in Abschnitt 2.2 erläutert 180 kWh angesetzt.

Um die Eignung der Algorithmik für eine Entlastung des Stromnetzes untersuchen zu können, wird beim Strombedarf zusätzlich zum Eigenbedarf des Unteren Lindenhofes eine Residuallast dazu addiert, die auf Daten des nächstgelegenen Umspannwerkes basiert und das Verhalten des vorgelagerten Stromnetzes abbilden soll. Diese Daten sind dabei so skaliert, dass sie zu einer Siedlung passen, die vom BHKW am Unteren Lindenhof mitversorgt werden kann. Als

Umrechnungsgröße für die Skalierung dient ein durchschnittlicher Pro-Kopf-Stromverbrauch in einer ländlich geprägten Region. Dadurch kann das Profil auf den Bedarf einer Siedlung mit einer bestimmten Anzahl von Einwohnern umgerechnet werden. Basierend auf einer Internetrecherche wird dafür ein Pro-Kopf-Verbrauch von ungefähr 5700 kWh/a angenommen [9].

Als Zielfunktion für die Steuerungsalgorithmik wird ein Kriterium gewählt, das von Forschern am Fraunhofer ISE speziell zur Bewertung der Netzdienlichkeit eines Stromerzeugers bzw. Stromverbrauchers entwickelt wurde [10]. Dieses sogenannte GSC-Kriterium wird an die Rahmenbedingungen der Algorithmik angepasst und leicht modifiziert.

Da das BHKW am Unteren Lindenhof hin und wieder Probleme beim Startvorgang hat, wird festgelegt, dass während der Versuchsreihe zunächst auf ein Ausschalten des BHKWs verzichtet werden soll. Dafür wird die Steuerungsalgorithmik so angepasst, dass die Erzeugung der zufälligen Fahrpläne gezielt deaktiviert werden kann und somit nur Fahrpläne generiert werden, die einen durchgehenden Betrieb des BHKWs vorsehen. Das BHKW läuft trotz dieser Einschränkung dennoch nicht statisch in einem Betriebspunkt, da das BHKW modulierend betrieben wird. Dem entsprechend enthält der BHKW-Fahrplan wie in Abschnitt 2.1 beschrieben nicht nur die Information, ob das BHKW ein oder aus sein soll, sondern zusätzlich den bestmöglichen Modulationsgrad, der in Abhängigkeit des prognostizierten Bedarfs berechnet wird. Um besser beurteilen zu können, wie gut der vorgegebene Fahrplan umgesetzt wird, basiert die Berechnung des Modulationsgrades für die Versuchsreihe allein auf dem Strombedarf. Der Wärmebedarf wird nicht berücksichtigt.

Während der Durchführung der Versuchsreihe stand aufgrund von Wartungsarbeiten nur einer der beiden Fermenter am Unteren Lindenhof zur Verfügung. Dadurch waren die maximal mögliche Gasproduktion und damit auch die maximale Dauerleistung des BHKWs begrenzt. Um die Versuchsreihe dennoch durchführen zu können, durfte das BHKW deshalb nicht mit zu hohem Modulationsgrad betrieben werden. Da der Modulationsgrad in der Versuchsreihe über den Strombedarf vorgegeben wird, der sich wiederum aus dem Eigenbedarf am Unteren Lindenhof und der zusätzlichen Residuallast des vorgelagerten Stromnetzes zusammensetzt, wurde die Residuallast entsprechend niedrig gewählt. Eine Berechnung ergab, dass der verbliebene Fermenter mit einer Residuallast, die dem Bedarf einer Siedlung mit 150 Einwohnern entspricht, gerade noch ausreichend Biogas zur Verfügung stellen kann.

### 3 Ergebnisse

Ein erstes positives Ergebnis, das sich bei der Auswertung der Versuchsreihe zeigt, ist, dass die Fahrplanberechnung jeden Tag erfolgreich und fehlerfrei durchgeführt wird und der entsprechende Fahrplan auch zuverlässig an die Anlagensteuerung des BHKWs sowie an den Fütterungsmanager übermittelt wird. Die Funktion der Kommunikationsstruktur ist demnach einwandfrei gegeben.

Für die weiteren Auswertungen der Versuchsreihe gibt es mehrere Aspekte, die von Interesse sind und anhand folgender Forschungsfragen untersucht werden sollen:

- Wie gut sind die Prognosedaten, die die Algorithmik als Eingangsgrößen bekommt?
- Wie gut wird das vorgegebene Fahrplansignal umgesetzt?
- Wie gut wird die Zielgröße im realen Betrieb optimiert?

Zur Quantifizierung der Ergebnisse werden vor allem zwei Kenngrößen herangezogen.

Die erste Kenngröße gibt an, wie groß die relative kumulierte Abweichung zwischen der Fahrplanvorgabe und den gemessenen Werten über den betrachteten Zeitraum ist. Es gilt folgende Formel:

$$\Delta E_{rel}[\%] = \frac{\sum_{t=1}^n G_{FP}}{\sum_{t=1}^n G_{ist}} * 100 - 100 \quad (1)$$

$G_{FP}$  sind die aus der Fahrplanvorgabe berechneten Werte für die untersuchte Größe,  $G_{ist}$  sind die tatsächlich gemessenen Werte. Die untersuchte Größe kann beispielsweise die elektrische Leistung des BHKWs oder der Gasverbrauch sein. Über die Anzahl der Zeitschritte  $n$  kann die Länge des Zeitraums, der untersucht werden soll, definiert werden.

Als zweite Kenngröße dient der sogenannte SMAPE (Symmetric Mean Absolute Percentage Error). Er gibt den gewichteten Fehler zwischen der Eingangsgröße und der Ausgangsgröße an und wird wie folgt berechnet:

$$SMAPE[\%] = \frac{100}{n} * \sum_{t=1}^n \frac{|G_{FP} - G_{ist}|}{|G_{FP}| + |G_{ist}|} \quad (2)$$

### 3.1 Güte der Prognosedaten

Die Genauigkeit der Strombedarfsprognose über den gesamten Versuchszeitraum liegt mit einer kumulierten Abweichung in der Energiemenge von 1,6 Prozent und einem SMAPE von 5,9 Prozent in einem guten Bereich. Abbildung 3 zeigt die Kurvenverläufe des prognostizierten und des realen Strombedarfs im Vergleich.

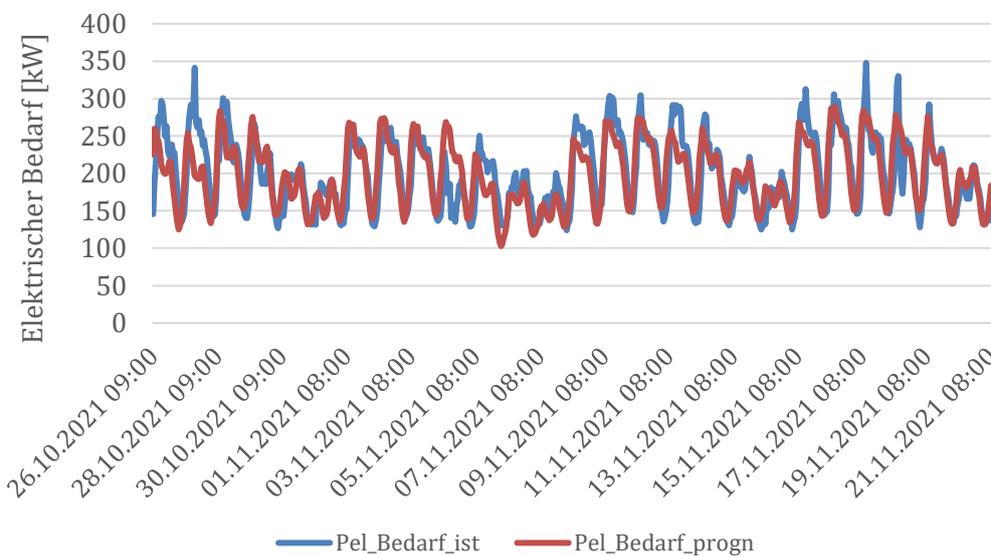


Abbildung 3: Vergleich des prognostizierten und gemessenen Strombedarfs

### 3.2 Umsetzung des Fahrplansignals

In Abbildung 4 ist exemplarisch der Vergleich zwischen der vorgegebenen elektrischen BHKW-Leistung laut Fahrplan (in rot) und der tatsächlich gemessenen Leistung (in blau) über den gesamten Versuchszeitraum dargestellt. Die beiden Kurven sind über weite Bereiche nahezu deckungsgleich, was bedeutet, dass die Fahrplanvorgabe gut umgesetzt wird.

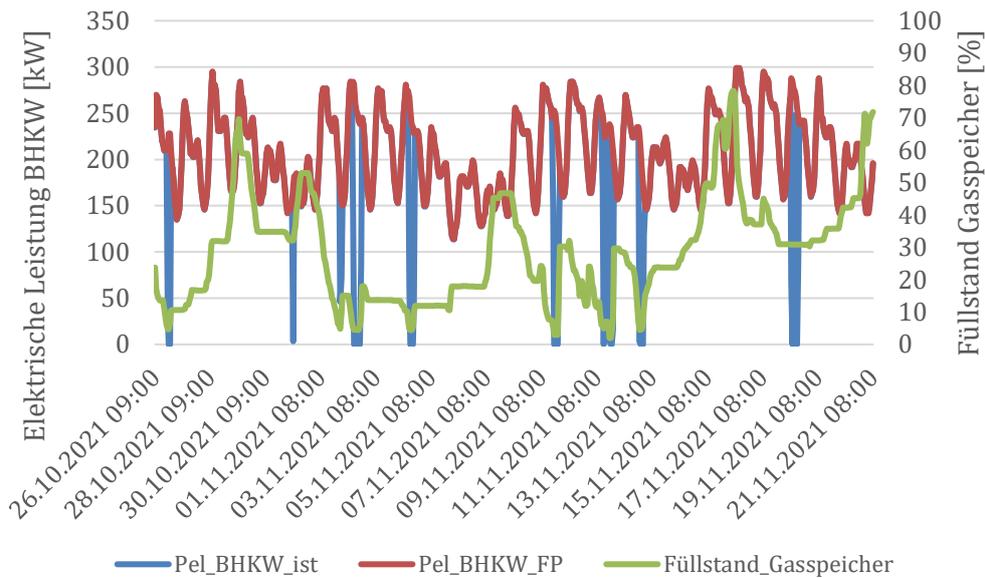


Abbildung 4: Vergleich der elektrischen BHKW-Leistung zwischen Fahrplanvorgabe und Realität

Die großen Abweichungen, bei denen das BHKW entgegen der Fahrplanvorgabe ausgeschaltet wird, resultieren überwiegend daraus, dass die Gasproduktion aufgrund des fehlenden zweiten Fermenters trotz der angepassten Randbedingungen der Versuchsreihe nicht ausreichend ist. Dieser Effekt kann gut am Verlauf des Gasspeicherfüllstandes (grüne Kurve) abgelesen werden. Mit den Fahrplanabweichungen ergibt sich eine Abweichung in der Gesamtmenge der vom BHKW erzeugten elektrischen Energie von 7,3 Prozent bei einem SMAPE von 5,6 Prozent. Rechnet man die Fahrplanabweichungen heraus, die aufgrund der limitierten Gasproduktion auftreten, so ergeben sich eine kumulierte Abweichung in der Gesamtenergiemenge von lediglich 0,3 Prozent und ein SMAPE von 0,1 Prozent.

Dadurch, dass das BHKW der Fahrplanvorgabe grundsätzlich sehr gut folgt, ist auch der aus dem Fahrplan berechnete Gasbedarf nahe am Gasbedarf, der real gemessen wird. Dies ist wichtig, da der berechnete Gasbedarf an den Fütterungsmanager übermittelt wird, der darauf aufbauend die optimale Fütterung des Fermenters bestimmt. Mit allen Fahrplanabweichungen differieren berechneter und realer Gasbedarf um insgesamt 6,8 Prozent, der SMAPE liegt bei 6,2 Prozent. Werden die Fahrplanabweichungen aufgrund der limitierten Gasproduktion herausgerechnet, ergeben sich eine Abweichung von unter 0,1 Prozent zwischen berechnetem und tatsächlichem Gesamtgasbedarf sowie ein SMAPE von 0,8 Prozent.

### 3.3 Optimierung der Zielgröße

Der wichtigste Aspekt bei der Auswertung der Versuchsergebnisse ist, wie gut die vorgegebene Zielgröße durch die Steuerungsalgorithmik tatsächlich optimiert werden kann. Dies zeigt, inwieweit die Algorithmik den Betrieb des BHKWs unter realen Bedingungen in die gewünschte Richtung verschiebt. Ziel der Versuchsreihe war es, den Strombedarf des Unteren Lindenhofs sowie die zusätzliche Residuallast einer Siedlung im vorgelagerten Stromnetz möglichst gut zu decken. An der Bilanzgrenze soll so wenig Energie wie möglich eingespeist bzw. bezogen werden, um so das umliegende Stromnetz zu entlasten. In Abbildung 5 wird der Kurvenverlauf für die übergebene elektrische Leistung an der Bilanzgrenze mit und ohne optimierten BHKW-Betrieb verglichen.

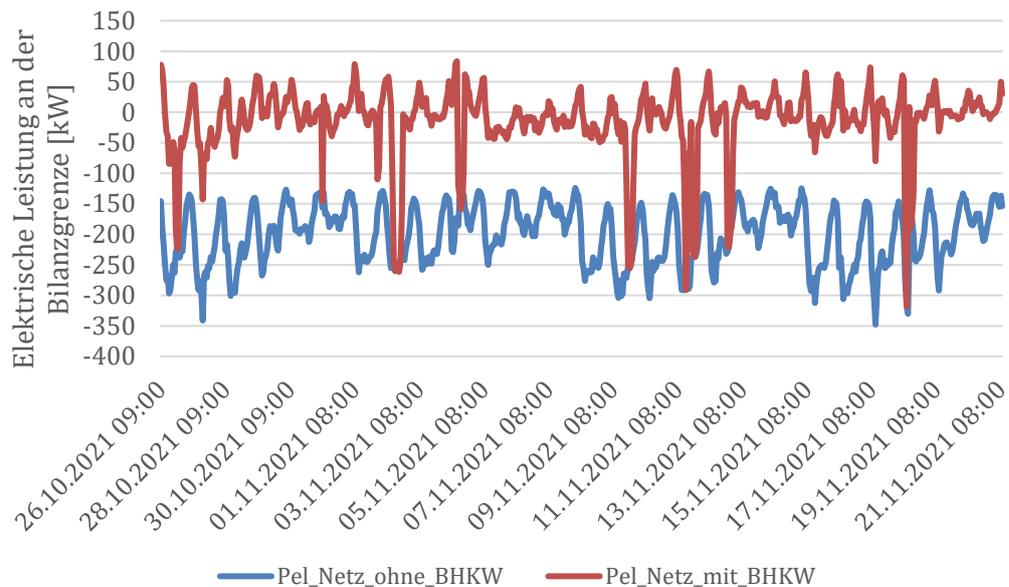


Abbildung 5: Vergleich elektrische Leistung an der Bilanzgrenze ohne und mit optimiertem BHKW-Betrieb

Ohne BHKW müsste der gesamte Bedarf durch Importe gedeckt werden. Zudem weist die Kurve teilweise starke Schwankungen, also eine hohe Dynamik auf, was mit einer hohen Belastung für das umliegende Stromnetz verbunden ist. Durch den Betrieb des BHKWs mit Fahrplänen aus dem intelligenten Steuerungsalgorithmus kann der Bedarf nahezu vollständig gedeckt werden. Nur 2,1 Prozent der gesamten Energiemenge im betrachteten Zeitraum müssen importiert werden. Gleichzeitig werden auch nur 11 Prozent der vom BHKW erzeugten elektrischen Energie in das umliegende Stromnetz eingespeist. Wie gut der optimierte BHKW-Betrieb zur Netzentlastung beiträgt, zeigt sich auch anhand der beiden Boxplots in Abbildung 6.

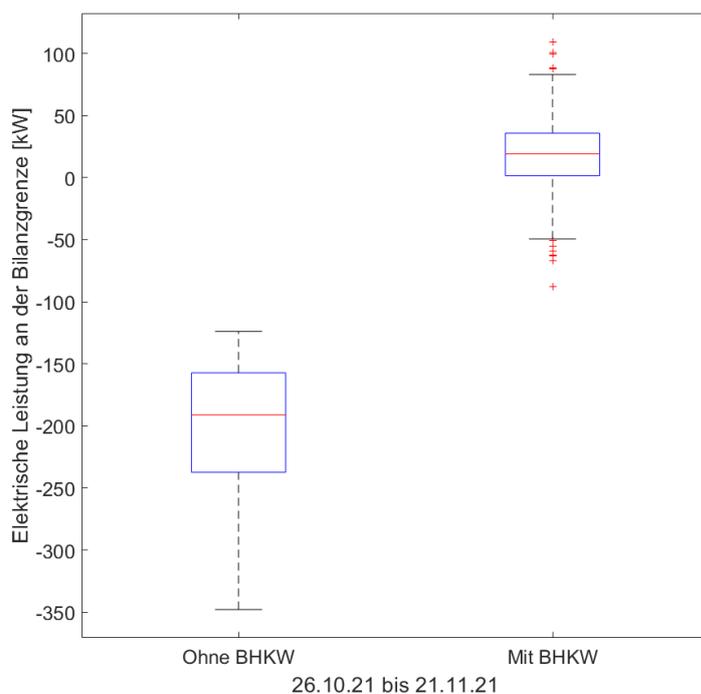


Abbildung 6: Vergleich der statistischen Leistungsverteilung an der Bilanzgrenze

Der linke Boxplot zeigt die Verteilung der elektrischen Leistung an der Bilanzgrenze ohne BHKW. Der Bereich zwischen oberem und unterem Quartil ist mit knapp 80 kW recht groß, was die starken Schwankungen der Kurve widerspiegelt. Beim rechten Boxplot ist der gesamte Bereich durch den Einsatz des BHKWs deutlich nach oben verschoben. Zusätzlich ist der Abstand zwischen den Quartilen mit knapp 35 kW im Vergleich zum Boxplot ohne BHKW mehr als halbiert. Der Energieaustausch zum umliegenden Stromnetz bewegt sich mit optimiertem BHKW-Betrieb folglich in einem deutlich engeren Bereich, die Kurve ist also signifikant geglättet und damit das Stromnetz entlastet.

Betrachtet man die Netzbilanz über den gesamten Versuchszeitraum ergibt sich inklusive aller Fahrplanabweichungen eine Abweichung in der Gesamtenergiemenge von 7,4 Prozent bei einem SMAPE von 10,8 Prozent. Werden die Fahrplanabweichungen aufgrund der limitierten Gasproduktion heraus gerechnet, so ergeben sich eine Abweichung in der Gesamtenergiemenge von 0,9 Prozent und ein SMAPE von 5,7 Prozent. Dies entspricht ziemlich exakt den Abweichungen der Strombedarfsprognose, die die zentrale Eingangsgröße der Optimierung darstellt. Erklären lässt sich diese Beobachtung dadurch, dass bei einer sehr guten Umsetzung des Fahrplansignals der Fehler der Eingangsgröße nahezu unverändert weitergegeben wird. Die Güte der Eingangsgröße hat folglich einen sehr großen Einfluss auf das Endergebnis der Optimierung. Die Entwicklung und Anwendung von guten Prognosemethoden spielt folglich eine sehr wichtige Rolle für einen optimierten und netzdienlichen Betrieb von Blockheizkraftwerken.

## 4 Zusammenfassung

Die intelligente Steuerungsalgorithmik zur Optimierung der Betriebsweise von Biogas-BHKW konnte erfolgreich in die Anlagensteuerung einer realen Biogasanlage implementiert werden. Durch den Aufbau der dabei verwendeten Kommunikationsstruktur mit einer Datenbank als zentraler Schnittstelle lässt sich das Grundprinzip ohne allzu großen Aufwand auf jede Biogasanlage übertragen.

Nach erfolgreicher Implementierung der Algorithmik konnte eine erste Versuchsreihe durchgeführt werden, bei der das Biogas-BHKW der Feldtestanlage am Unteren Lindenhof über mehrere Wochen nach der Fahrplanvorgabe der Steuerungsalgorithmik betrieben wurde. Bei der anschließenden Auswertung der Versuchsreihe hat sich gezeigt, dass die automatisierte Ausführung der Algorithmik zuverlässig funktioniert und jeden Tag ein neuer Fahrplan berechnet und an das BHKW übermittelt wird. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass die Umsetzung des Fahrplansignals grundsätzlich sehr gut funktioniert. Außerdem wurde die Zielvorgabe der Fahrplanoptimierung, eine Entlastung des umliegenden Stromnetzes, vollständig erreicht.

## 5 Danksagungen

Ein Dank geht an die FNR [11], die die Forschungsarbeit unter der Projektnummer 22404618 fördert.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), „Basisdaten Bioenergie Deutschland 2020,“ [Online]. Available: [https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2020/Mediathek/broschuere\\_basisdaten\\_bioenergie\\_2020\\_web.pdf](https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2020/Mediathek/broschuere_basisdaten_bioenergie_2020_web.pdf). [Zugriff am 7 Februar 2022].
- [2] A. Toradmal, T. Kemmler and B. Thomas, "Boosting the share of onsite PV-electricity utilization by optimized scheduling of a heat pump using buildings thermal inertia," *Applied Thermal Engineering*, vol. 137, pp. 248-258, 2018.
- [3] C. Widmann, D. Lödige, A. Toradmal and B. Thomas, "Enabling CHP units for electricity production on demand by smart management of the thermal energy storage," *Applied Thermal Engineering*, vol. 114, pp. 1487-1497, 2017.
- [4] R. Maier and B. Thomas, "Flexible and robust control algorithm for intelligent control of biogas CHP units for stabilizing the power grid," in *Papers of the 28th European Biomass Conference*, 2020.
- [5] C. Dittmer, J. Krümpel and A. Lemmer, "Modeling and Simulation of Biogas Production in Full Scale with Time Series Analysis," *Microorganisms*, vol. 9, p. 324, Februar 2021.
- [6] C. Dittmer, J. Krümpel and A. Lemmer, "Power demand forecasting for demand-driven energy production with biogas plants," *Renewable Energy*, vol. 163, pp. 1871-1877, 2021.
- [7] H. Qaljenu, „Auswirkungen von Fehlern in der Prognose vom Strombedarf auf das Energiemanagement von KWK-Anlagen,“ Masterthesis, Hochschule Reutlingen, 2020.
- [8] Universität Hohenheim, „Versuchsstation Agrarwissenschaften, Lindenhöfe,“ 2020. [Online]. Available: <https://versuchsstation.uni-hohenheim.de/lindenhoefe>. [Zugriff am 7 Februar 2022].
- [9] Energieagentur Ravensburg gGmbH, „Energie- und Klimaschutzkonzept des Landkreises Ravensburg,“ 2015. [Online]. Available: [https://www.rv.de/site/LRA-RV/get/params\\_E-710420199/11193598/2015\\_03\\_17\\_EKK%20LK%20RV\\_mit\\_EPAP.pdf](https://www.rv.de/site/LRA-RV/get/params_E-710420199/11193598/2015_03_17_EKK%20LK%20RV_mit_EPAP.pdf). [Zugriff am 7 Februar 2022].
- [10] K. Klein, R. Langner, D. Kalz, S. Herkel and H.-M. Henning, "Grid support coefficients for electricity-based heating and cooling and field data analysis of present-day installations in Germany," *Applied Energy*, vol. 162, pp. 853-867, 2016.
- [11] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), [Online]. Available: <https://www.fnr.de/>. [Zugriff am 7 Februar 2022].