

# Bedarfsgerechte Steuerung dezentraler Energiesysteme am Beispiel der Kraft-Wärme-Kopplung

Patrick Haase\*, Bernd Thomas

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

**Kurzfassung:** Die bedarfsgerechte Steuerung dezentraler thermischer Energiesysteme, wie Kraft-Wärme-Kopplungs- (KWK-) Anlagen und Wärmepumpen, kann einen entscheidenden Beitrag zur Deckung bzw. Reduktion der Residuallast leisten und so für eine Verringerung der konventionellen Reststromversorgung und den damit einhergehenden Treibhausgasemissionen sorgen. Dafür wurde an der Hochschule Reutlingen in mehrjähriger Forschungsarbeit ein prognosebasierter Steuerungsalgorithmus entwickelt. Gegenstand dieses Beitrags bilden neben der Vorstellung eben jenes Steuerungsalgorithmus auch dessen praktische Umsetzungsvarianten: Eine auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) rein lokal ausführbare Version sowie eine Webservice-Anwendung für den parallelen Betrieb mehrerer Anlagen – ausgehend von einem zentralen Server. Erprobungen am KWK-Prüfstand der Hochschule Reutlingen bestätigen die zuverlässige Funktionsweise des Algorithmus in den verschiedenen Umsetzungsvarianten. Gleichzeitig wird der Vorteil der bedarfsgerechten Steuerung gegenüber dem, insbesondere im Mikro-KWK-Bereich standardmäßig vorliegenden, wärmegeführten Betrieb in Form einer Steigerung der Eigenstromdeckung von bis zu 27 % aufgezeigt. Neben der bedarfsgerechten Steuerung bedient der entwickelte Algorithmus zudem noch ein weiteres Anwendungsgebiet: Den vorhersagbaren KWK-Betrieb, der beispielsweise in Form täglicher Einspeiseprognose im Rahmen des Redispatch 2.0 eingefordert wird. Die Vorhersage des KWK-Betriebs ist dabei auf zwei Weisen möglich: Als erste Option kann der wärmegeführte Betrieb direkt über den Algorithmus abgebildet und prognostiziert werden. Eine andere Möglichkeit stellt wiederum die bedarfsgerechte Steuerung der Anlage dar; der berechnete optimale Fahrplan entspricht dabei gleichzeitig der Betriebsprognose des KWK-Geräts. Damit ist der entwickelte Steuerungsalgorithmus in der Lage, auf unterschiedliche Weisen zum Gelingen der Energiewende beizutragen.

**Keywords:** Bedarfsgerechte Steuerung, Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), Webservice, Redispatch 2.0

## 1 Einleitung

Durch den zunehmenden Ausbau der volatilen Energieerzeugung im Zuge der Energiewende bedarf es vermehrt verschiedener Instrumente für den Erhalt der Versorgungssicherheit im elektrischen Verbundnetz. Die Kopplung mit flexiblen und netzdienlich steuerbaren Erzeugungseinheiten im Wärmesektor – insbesondere mit Kraft-Wärme-Kopplungs- (KWK-) Geräten und Wärmepumpen – bietet hierbei großes Potenzial. Voraussetzung dafür ist allerdings die optimale Ausrichtung der Anlagen am Strombedarf. Auch der Gesetzgeber fordert diesen

am Strombedarf orientierten Anlagenbetrieb unter dem Stichwort „flexible Betriebsweise“ ein [1]; z.B. durch die Absenkung der förderfähigen Betriebsstunden im KWK-Gesetz (KWKG).

Denkbar sind dabei verschiedene Umsetzungsvarianten. Eine Möglichkeit stellt die direkte Ausrichtung des Betriebs am Strombedarf bzw. an der Stromerzeugung dar, ungeachtet des Wärmebedarfs. Nachteile dieser Methode sind die Gefahr einer hohen Startanzahl der thermischen Erzeugungseinheit sowie einer geringeren Effizienz aufgrund unvollständiger Wärmenutzung bzw. Wärmebereitstellung. Einen anderen Ansatz stellt die modulierende Betriebsweise dar, um den Betrieb der Anlagen auf den aktuellen Verbrauch abzustimmen. Hierbei sind jedoch höhere Wartungskosten und eine geringere Effizienz aufgrund geringerer Teillastwirkungsgrade zu erwarten. Durch die typischerweise am Wärmeverbrauch orientierte Modulation liegt zudem keine optimale Ausrichtung am Strombedarf vor. Als Alternative zu den beiden genannten Möglichkeiten wird an der Hochschule Reutlingen seit mehreren Jahren an einer intelligenten Steuerung für thermische Erzeugungsanlagen geforscht [2 – 6], die als „bedarfsgerecht“ oder auch „stromoptimiert“ bezeichnet wird.

Entgegen der standardmäßig wärme- bzw. temperaturgeführten Betriebsweise verschiebt die bedarfsgerechte Steuerung die Betriebszeiten bewusst in Zeiträume mit hohem Strombedarf (KWK-Optimierung) bzw. hoher Stromerzeugung (Wärmepumpen-Optimierung) und passt sich damit den Gegebenheiten im elektrischen Energiesystem an. Zur Sicherstellung des Effizienzvorteils von KWK-Anlagen gegenüber der konventionellen Stromerzeugung wird die erzeugte Wärme dabei auch weiterhin vollständig genutzt. Um diese bedarfsgerecht optimierte Kopplung mit dem Stromsektor bei gleichzeitiger Deckung des Wärmebedarfs unter Gewährleistung der maximalen Effizienz der Geräte umzusetzen, ist ein Energiespeicher in Verbindung mit einem intelligenten Speichermanagement erforderlich. Der Energiespeicher dient der zeitlichen Entkopplung der Strom- und Wärmebereitstellung und verleiht damit thermischen Erzeugungseinheiten wie KWK-Geräten und Wärmepumpen die notwendige Betriebsflexibilität, die lediglich durch die Kapazität des Energiespeichers begrenzt ist. Da diese Anlagen zur Vermeidung des Taktbetriebs in aller Regel ohnehin mit einem Wärmespeicher ausgestattet sind, kann dieser in einfacher Weise zusätzlich die Aufgabe der zeitlichen Entkopplung übernehmen. Die Kombination mit einem elektrischen Speicher ist ergänzend möglich. Das intelligente Speichermanagement wird durch einen an der Hochschule Reutlingen entwickelten, auf Prognosen basierenden Algorithmus umgesetzt, auf den in *Kapitel 2* näher eingegangen wird.

Neben der Funktionsweise des bedarfsgerechten Steuerungsalgorithmus liegt das Hauptaugenmerk in vorliegender Abhandlung auf der praktischen Umsetzung der Steuerung. Zwar existieren in der Literatur verschiedene Möglichkeiten und eine Vielzahl an mathematischen Ansätzen zur Flexibilisierung von Energiesystemen (vgl. [7 – 11]), in der realen Anwendung sind allerdings im KWK-Bereich typischerweise Systeme zum strompreisgeführten Betrieb und im Wärmepumpen-Bereich typischerweise Kombinationen von Wärmepumpe, Photovoltaik-Anlage und Batteriespeicher ohne vorausschauendes Speichermanagement umgesetzt [12]. Ersteres kommt in der Regel nur für KWK-Anlagen im MW-Leistungsbereich aufgrund hoher Umsetzungskosten in Frage; bei letzterem wird, aufgrund der Umsetzung des Batteriespeichers als meist passives, nicht prognosebasiertes Element, nur ein begrenztes Optimierungspotenzial genutzt. Vorliegende Veröffentlichung zeigt daher, neben der Beschreibung der bedarfsgerechten Steuerung, auch konkrete Möglichkeiten zur praktischen Umsetzung auf.

## 2 Methodik

In diesem Kapitel werden die Funktionsweise des Steuerungsalgorithmus und dessen praktische Umsetzungsvarianten genauer beleuchtet.

### 2.1 Steuerungsalgorithmus

Der für die bedarfsgerechte Steuerung entwickelte Algorithmus berechnet auf Basis von historischen Verbrauchsdaten und aktuellen Anlagedaten einen optimierten Fahrplan für den Betrieb einer thermischen Erzeugungseinheit, die Teil eines mehr oder weniger komplexen Energiesystems ist. Denkbar sind hierbei verschiedene Kombinationen. Als Basis-komponenten kommen ein KWK-Gerät, das auch als Blockheizkraftwerk (BHKW) bezeichnet wird, oder eine Wärmepumpe jeweils in Verbindung mit einem Wärmespeicher in Frage, wobei auch die Steuerung von modulierenden Geräten möglich ist. Dieses Basissystem ist flexibel erweiterbar; beispielsweise durch ein zweites BHKW, einen Zusatzkessel, einen Batteriespeicher, eine Photovoltaik-Anlage oder auch eine Solarthermie-Anlage. In dieser Abhandlung liegt der Schwerpunkt auf der Steuerung eines KWK-Geräts in Verbindung mit einem Wärmespeicher; das dazugehörige Steuerungsprinzip ist in *Abbildung 1* dargestellt. Wie zu erkennen, wird auf Basis der von der KWK-Anlage bereitgestellten Speichertemperaturen der jeweilige Energieinhalt des Wärmespeichers errechnet. Parallel dazu werden auf Basis von historischen Verbrauchsdaten Prognosen für den Strom- und Wärmebedarf im versorgten Gebäude erstellt. Beides dient anschließend der Fahrplannerstellung zur Berechnung des optimalen Fahrplans, der an die KWK-Anlage zurückgesandt und dort umgesetzt wird. Die einzelnen Blöcke werden im Folgenden näher beleuchtet; für weiterführende Informationen sei auf Thomas et al. (2017) [3] und Haase et al. (2021) [5] verwiesen.

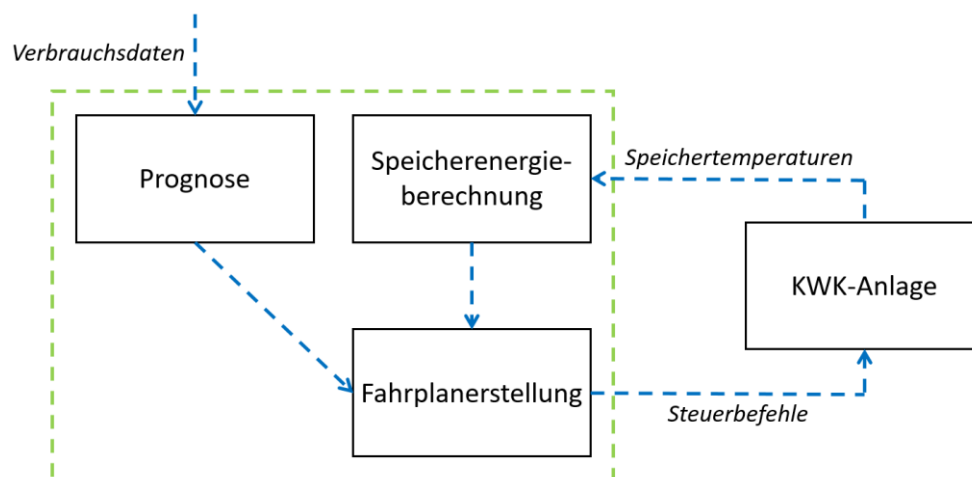


Abbildung 1 – Schematische Darstellung des bedarfsgerechten Steuerungsprinzips

#### 2.1.1 Speicherenergieberechnung

Zu Beginn der Berechnung muss zunächst der tatsächliche Speicherfüllstand des Wärmespeichers bekannt sein. Dieser wird in der Regel über die aktuellen Speichertemperaturen bestimmt, indem der Wärmespeicher entsprechend der Anzahl an Temperatursensoren in Schichten unterteilt wird. Jede Schicht besitzt dabei eine eigene Temperatur. Über die Volumenanteile kann so auf den Energieinhalt im Speicher geschlossen werden.

### 2.1.2 Prognose

Unter Berücksichtigung des Rechenaufwands hat sich die naive Prognose als geeignete Vorhersagemethode erwiesen. Aus den Verbrauchsdaten der Vortage wird dabei auf den Bedarf der Folgetage geschlossen [13, 14]. Für die Erfassung der Verbrauchsdaten sind auslesbare Strom- und Wärmemengenzähler als Hardwarekomponenten an der Anlage erforderlich. Da auslesbare Stromzähler in aller Regel vorhanden sind bzw. in naher Zukunft nachgerüstet werden müssen, fällt hier kein zusätzlicher Aufwand an. Sind keine Wärmemengenzähler vorhanden bzw. dessen Nachrüstung zu aufwändig, besteht die Möglichkeit, den Wärmeverbrauch über die Änderung der Speichertemperaturen zu bestimmen. Dies setzt jedoch voraus, dass der Energieinhalt des Wärmespeichers ausreichend genau erfasst wird, wobei zumeist mehr als die standardmäßig zwei oder drei Temperatursensoren notwendig sind. Zudem müssen die erzeugten thermischen Energiemengen in jedem Zeitschritt bekannt sein.

### 2.1.3 Fahrplanerstellung

Die Fahrplanerstellung basiert auf einem stochastisch-heuristischen Verfahren, dem sogenannten Monte-Carlo-Verfahren. Hierbei werden aus einer gewissen Anzahl an zufälligen Lösungen unter Berücksichtigung diverser Randbedingungen, wie z.B. den Mindestbetriebs- und Mindestruhezeiten des KWK-Geräts sowie den Speichergrenzen des Wärmespeichers, potenzielle Lösungen bzw. Fahrpläne erzeugt. Bei einem Vergleich dieser Lösungen wird der „beste“ Fahrplan hinsichtlich einer frei wählbaren Zielgröße (z.B. Eigenstromdeckung, Residuallastdeckung oder auch Strompreisoptimierung) bestimmt. Dieses Prinzip ist in *Abbildungen 2a* grafisch dargestellt. Aufgetragen ist der Ladezustand des Wärmespeichers über der Zeit. Die grauen Kurven im Hintergrund bilden die potenziellen Fahrpläne ab, während die grüne Kurve dem „besten“ Fahrplan, in diesem Fall hinsichtlich der Zielgröße „Eigenstromdeckung“, entspricht. Zum Vergleich ist der wärmegeführte Betrieb in Form der orangefarbenen Kurve abgebildet, der insbesondere im Mikro-KWK-Bereich noch immer Stand der Technik ist. Dabei wird das KWK-Gerät ungeachtet des Strombedarfs erst eingeschaltet, sobald der Wärmespeicher vollständig entladen ist (blau-gestrichelte Linie) und erst wieder abgeschaltet, sobald der Wärmespeicher vollständig geladen ist (rot-gestrichelte Linie).

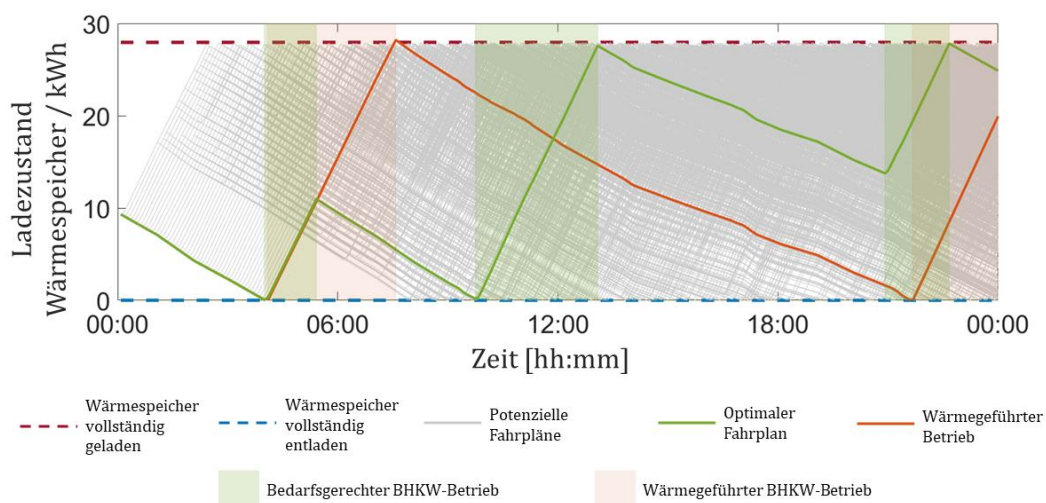


Abbildung 2a – Ladezustand des Wärmespeichers für alle potenziellen Fahrpläne (grau), den besten Fahrplan (grün) und den wärmegeführten Betrieb (orange) für einen beispielhaften Tag

Ein großer Vorteil der Monte-Carlo-Methode stellt, neben der geringen Anforderung an die Rechenleistung, die einfache Implementierung weiterer Nebenbedingungen dar; z.B. die Begrenzung der Startvorgänge der Erzeugungseinheit oder die Minimierung der Betriebszeit des Zusatzkessels. Für eine grafische Darstellung der Unterschiede zwischen bedarfsgerechtem und wärmegeführtem BHKW-Betrieb sind die zu *Abbildung 2a* zugehörigen Deckungen des Stromverbrauchs für den bedarfsgerechten Betrieb (*Abbildung 2b*) und den wärmegeführten Betrieb (*Abbildung 2c*) dargestellt. Während der bedarfsgerechte Betrieb die Lastspitzen des elektrischen Verbrauchsprofils (gelb) zuverlässig abdeckt (grüne Fläche unter der Stromlastprofilkurve), entstehen eventuelle Deckungen im wärmegeführten Betrieb (orangefarbene Fläche unter der Stromlastprofilkurve) rein zufällig.

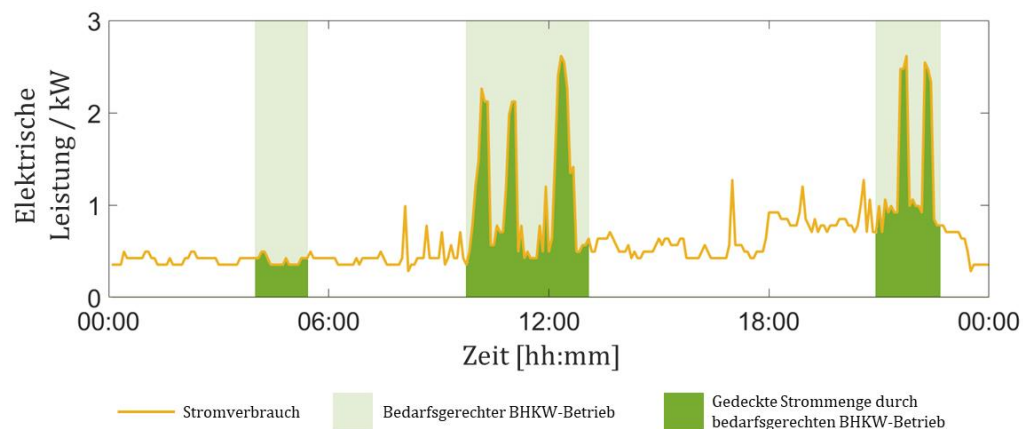


Abbildung 2b – Deckung des Stromverbrauchs bei bedarfsgerechtem BHKW-Betrieb für einen beispielhaften Tag

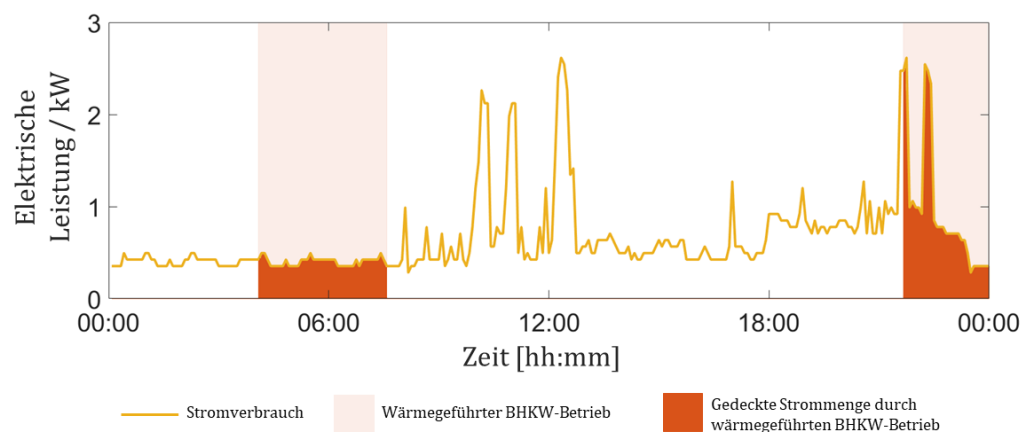


Abbildung 2c – Deckung des Stromverbrauchs bei wärmegeführtem BHKW-Betrieb für einen beispielhaften Tag

## 2.2 Umsetzungsvarianten

Zur praktischen Anwendung der Steuerung stehen zwischenzeitlich zwei Umsetzungsvarianten zur Verfügung, die in *Abbildung 3* an einer KWK-Anlage, angelehnt an den KWK-Prüfstand der Hochschule Reutlingen, schematisch dargestellt sind. Eine Möglichkeit bietet die rein lokale Umsetzung auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS); eine weitere Möglichkeit stellt eine über das Internet aufrufbare Service-Anwendung dar. Beide Umsetzungsvarianten werden im Folgenden näher erläutert.

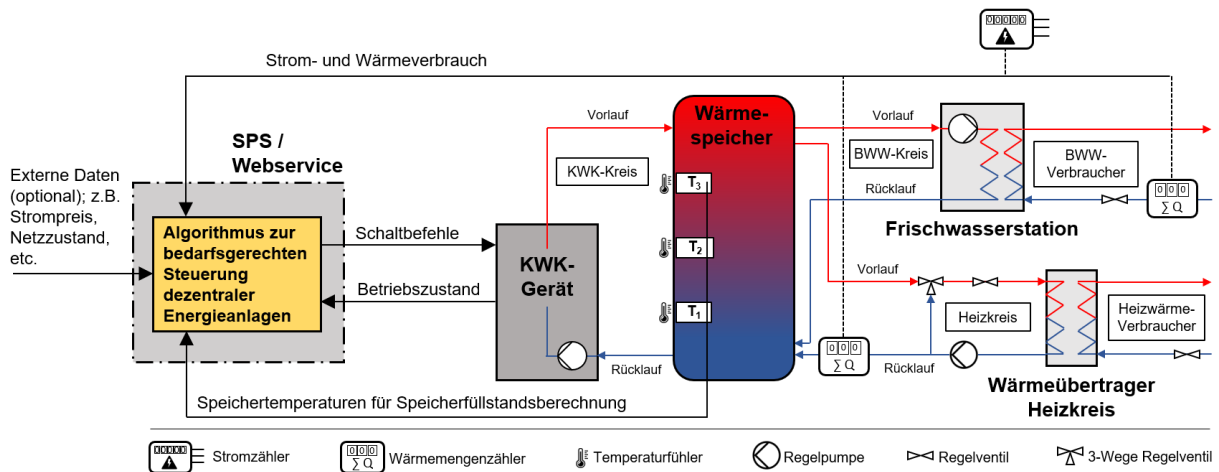


Abbildung 3 – Umsetzung der Steuerung an einer beispielhaften KWK-Anlage

### 2.2.1 SPS

Für die Ausführung der bedarfsgerechten Steuerung auf einer SPS wurde der ursprünglich in MATLAB entwickelte Steuerungsalgorithmus in eine CoDeSys-Version übersetzt. Zur praktischen Erprobung wurde diese CoDeSys-Version auf einer WAGO-SPS am KWK-Prüfstand der Hochschule Reutlingen implementiert. Denkbar wäre ebenfalls die direkte Implementierung auf dem internen Steuergerät des KWK-Geräts, womit die Notwendigkeit einer zusätzlichen Steuerbox entfällt. Aufgrund der geringen Rechenleistungsanforderung der Monte-Carlo-Methode ist auch auf Geräten mit geringerer Hardwareausstattung eine effiziente und schnelle Fahrplanberechnung möglich. Ein großer Vorteil der SPS-Anwendung ist die geringere Anforderung an die Datenübertragung und Datenspeicherung hinsichtlich Sicherheitsprotokollen und Datenschutz aufgrund der rein lokalen Umsetzung.

### 2.2.2 Webservice

Für die Umsetzung der bedarfsgerechten Steuerung als Service-Anwendung wurde eine internetbasierte Lösung entwickelt, mit dem Ziel, mehrere (beliebig viele) Energiesysteme zentral über dieselbe Steuerung optimiert betreiben zu können. Das Prinzip der Service-Anwendung ist in *Abbildung 4* schematisch dargestellt. Als Schnittstelle zwischen der Energieanlage und dem auf einem zentralen Server ausgeführten und in eine Python-Version übersetzten Steuerungsalgorithmus fungiert ein Webservice in Verbindung mit einer Datenbank als Back-End und eine Web-App als Front-End. Der Webservice greift dabei aus Sicherheitsgründen nicht direkt auf die Anlagensteuerung zu. Stattdessen erfolgt die Datensendung bzw. die Datenverarbeitung stets aktiv auf Anlagenseite. Dies kann beispielsweise über ein Steuerprogramm auf dem internen Steuergerät der Erzeugungseinheit, über eine zusätzliche Steuerbox oder über ein bereits vorhandenes Leitsystem umgesetzt werden. Als Standardkommunikationsweg zum Datenaustausch dient eine RESTful API; die Daten werden dabei über Hypertext Transfer Protocol (HTTP) - Methoden ausgetauscht. Der Datenaustausch ist über ein Transport Layer Security (TLS) - Protokoll verschlüsselt. Als Alternativen zur RESTful API stehen zusätzlich eine E-Mail-Kommunikation sowie der Datenaustausch über einen File Transfer Protocol (FTP) - Server zur Verfügung. Die Web-App erlaubt dem Benutzer das Anlegen und Verwalten von Energiesystemen. Die Authentifizierung erfolgt hierbei über JSON Web Tokens. Der Webservice ebenso wie die Web-App sind in TypeScript geschrieben, als Datenbankmanagementsystem liegt eine PostgreSQL zu Grunde.



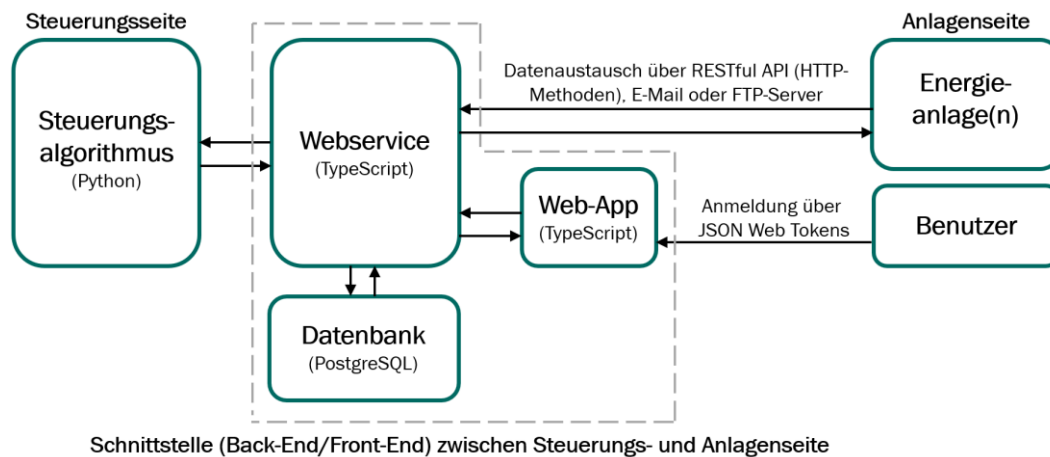


Abbildung 4 – Schematisches Prinzip der Webservice-Anwendung

### 2.3 Erprobung

Der Steuerungsalgorithmus wurde unter möglichst realistischen Bedingungen in drei Entwicklungsstadien am KWK-Prüfstand der Hochschule Reutlingen ausführlich erprobt. Als Grundlage dienten gemessene Verbrauchsdaten von Strom, Heizwärme und Brauchwarmwasser (BWW) zweier Einfamilienhäuser. Für die Erprobung der prinzipiellen Funktionsweise und Robustheit des Algorithmus wurde dieser zunächst in der MATLAB-Version im Hardware-in-the-Loop (HiL) Verfahren getestet [5]. In einem zweiten Schritt wurde die rein lokale SPS-Umsetzung in Form der CoDeSys-Version auf deren praktische Funktionsfähigkeit auf einer WAGO-SPS untersucht. Eine letzte Versuchsreihe bestand in der Erprobung der webbasierten Umsetzung des Algorithmus in der Python-Version. In allen drei Entwicklungsstadien arbeitet der Algorithmus mit großer Robustheit und steuert das KWK-Gerät zuverlässig.

## 3 Ergebnisse

Wie zuvor angedeutet, haben umfangreichen Tests am KWK-Prüfstand der Hochschule Reutlingen gezeigt, dass der Steuerungsalgorithmus in der Lage ist, ein Energiesystem unter realistischen Bedingungen zuverlässig und optimiert zu betreiben. Unter der Zielgröße „Optimierung der Eigenstromdeckung“ werden die Laufzeiten des KWK-Geräts soweit möglich in Phasen mit hohem elektrischen Bedarf gelegt. Dies ist qualitativ in *Abbildung 5* veranschaulicht. Die gelbe Kurve bildet den prognostizierten Strombedarf ab, während die rote Kurve dem tatsächlichen Stromverbrauch entspricht. Hierbei zeigt sich die gute Eignung der naiven Prognose; lediglich einzelne Lastspitzen werden nicht vorhergesagt. Die blaue Kurve stellt die erzeugte elektrische Leistung des KWK-Geräts dar, wobei die Lastspitzen des prognostizierten Lastprofils gut abgedeckt werden. Im Vergleich dazu deckt das KWK-Gerät im wärmegeführten Betrieb (grüne Kurve) Lastspitzen nur teilweise und rein zufällig ab. Die schwarzgestrichelte Kurve stellt den vom Algorithmus berechneten optimalen Fahrplan dar, dem das KWK-Gerät mit hoher Genauigkeit folgt. Das verzögerte Einschalten am Ende des dritten Tages demonstriert die Überlagerung der bedarfsgerechten Steuerung durch das interne Steuergerät, wodurch ein sicherer Betrieb zu jeder Zeit garantiert ist. Die interne Steuerung mit all ihren Sicherheitsfunktionen läuft dabei durchgehend mit höchster Priorität im Hintergrund und greift bei Notwendigkeit ein; in diesem Fall aufgrund einer zu hohen Rücklauftemperatur in das KWK-Gerät, unter anderem hervorgerufen durch Abweichungen in der Wärmeprognose.

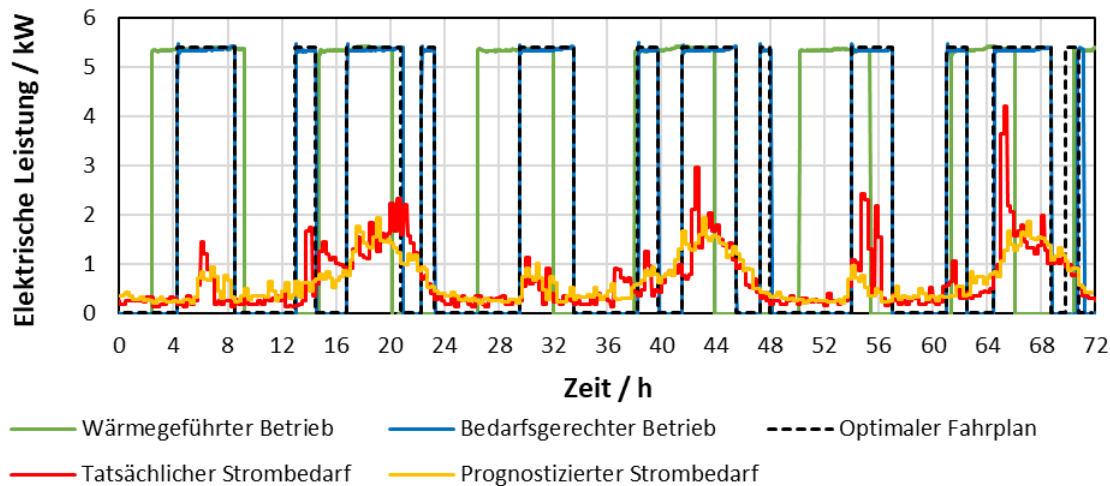


Abbildung 5 – Deckung des Stromverbrauchs bei bedarfsgerechtem (blau) und wärmegeführtem (grün) Betrieb

In den durchgeführten Versuchen über einen Zeitraum von drei Tagen konnte die Eigenstromdeckung um bis zu 27 % gegenüber dem wärmegeführten Betrieb gesteigert werden, wobei das BHKW zur Deckung des Wärmeverbrauchs rund die Hälfte der Zeit in Betrieb war. In *Abbildung 6* sind die Ergebnisse für unterschiedliche Randbedingungen grafisch abgebildet. Neben der Variation der zugrunde liegenden Lastprofile wurde auch die Speichergöße variiert. Zudem wurden die Versuche sowohl mit naiver als auch mit „perfekter“ Prognose (tatsächlicher und prognostizierter Bedarf sind identisch) durchgeführt. Als Vergleichsbasis dient der wärmegeführte Betrieb, der eine Eigenstromdeckung von 52 % (Haus 1) bzw. 54,5 % (Haus 2) erreicht. Bei den vorliegenden Randbedingungen kann im besten Fall (perfekte Prognose, großer Speicher, Lastprofil Haus 2) die Eigenstromdeckung durch den bedarfsgerechten Betrieb auf 69,5 % gesteigert werden.

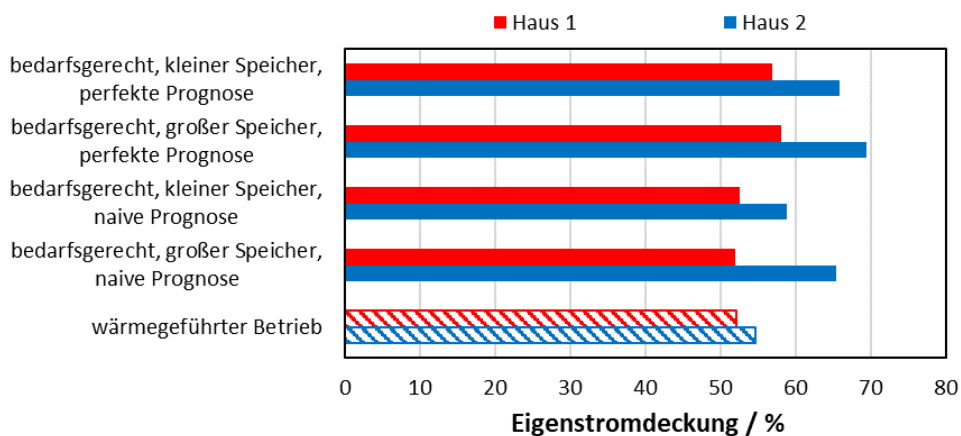


Abbildung 6 – Eigenstromdeckung der durchgeführten Tests bei unterschiedlichen Randbedingungen

Wie sich zeigt, ist das Optimierungspotenzial von drei Einflussgrößen entscheidend abhängig: Dem Verlauf des elektrischen Lastprofils, der effektiven Speicherkapazität und der Prognosegüte der Bedarfsdaten. Allgemein gilt, ein elektrisches Lastprofil mit ausgeprägten Lastspitzen und einer geringen Grundlast birgt ein größeres Potenzial im Vergleich zu einem Profil mit nur wenig ausgeprägten Lastspitzen [5, 15]. Zudem bringen eine größere effektive Speicherkapazität und eine bessere Prognosegüte ein höheres Optimierungspotenzial mit sich.



## 4 Weitere Einsatzmöglichkeiten – Redispatch 2.0

Neben der bedarfsgerechten Anlagensteuerung ermöglicht der entwickelte Algorithmus auch die Vorhersage des KWK-Betriebs, die der Gesetzgeber z.B. in Form von täglichen Einspeiseprognozen im Rahmen des Redispatch 2.0 für Netzplanungsprozesse einfordert. Die Betriebsvorhersage kann dabei durch den Algorithmus auf zwei Weisen erfolgen.

Zum einen kann der zukünftige (wärmegeführte) KWK-Betrieb direkt berechnet werden. Im Gegensatz zur bedarfsgerechten Steuerung wird dabei keine Betriebsoptimierung vorgenommen, sondern lediglich die vorhandene Anlagensteuerung abgebildet. Ausgegeben wird der prognostizierte KWK-Betrieb in Form einer Zeitreihe, die z.B. in das Netzengpassmanagement eines Verteilnetzbetreibers einfließen kann; die aktive Ansteuerung der Energieanlage entfällt dabei. Die erzielbare Prognosegüte ist stark von der vorhandenen Messtechnik und der Prognosegüte der Verbrauchsdaten abhängig. Im Idealfall wird der Wärmeverbrauch direkt über Wärmemengenzähler gemessen; eine Ableitung aus der Änderung der Speichertemperaturen ist bei ausreichend großer Anzahl an Temperatursensoren ebenfalls denkbar. *Abbildung 7* und *8* veranschaulichen anhand eines realen Energiesystems, bestehend aus zwei KWK-Geräten, die Auswirkung der Prognosegenauigkeit des Wärmebedarfs auf die Vorhersagegenauigkeit des KWK-Betriebs. Der Prognosehorizont beträgt dabei 72 h. *Abbildung 7* zeigt den prognostizierten KWK-Betrieb mit perfekter Wärmebedarfsprognose (tatsächlicher und prognostizierter Wärmebedarf (gestrichelte und transparente rote Kurve in oberer Diagrammhälfte) sind identisch) und stellt damit das erreichbare Optimum dar. Die prognostizierten KWK-Betriebszeiten in der unteren Diagrammhälfte (gelbe und blaue transparente Kurve) stimmen dabei gut mit den tatsächlichen Laufzeiten (gelbe und blaue gestrichelte Kurve) überein.

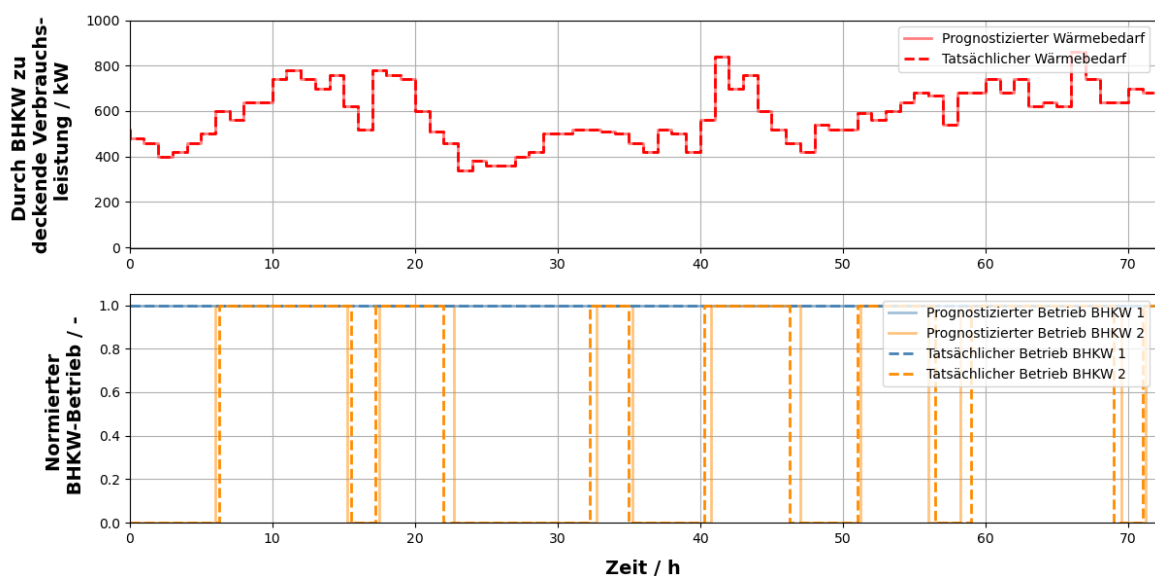


Abbildung 7 – Prognostizierter KWK-Betrieb mit perfekter Wärmebedarfsprognose

In *Abbildung 8* ist der gleiche Vorhersagezeitraum dargestellt; allerdings basierend auf der naiven Prognose, die in diesem Fall insbesondere in den ersten 24 h stärkeren Abweichungen unterliegt (vgl. tatsächlicher und prognostizierter Wärmebedarf (gestrichelte und transparente rote Kurve) in oberer Diagrammhälfte). Als Folge weichen in der unteren Diagrammhälfte die tatsächlichen Betriebszeiten des zweiten KWK-Geräts (gelbe gestrichelte Kurve) teils deutlich von den prognostizierten Laufzeiten (gelbe transparente Kurve) ab.

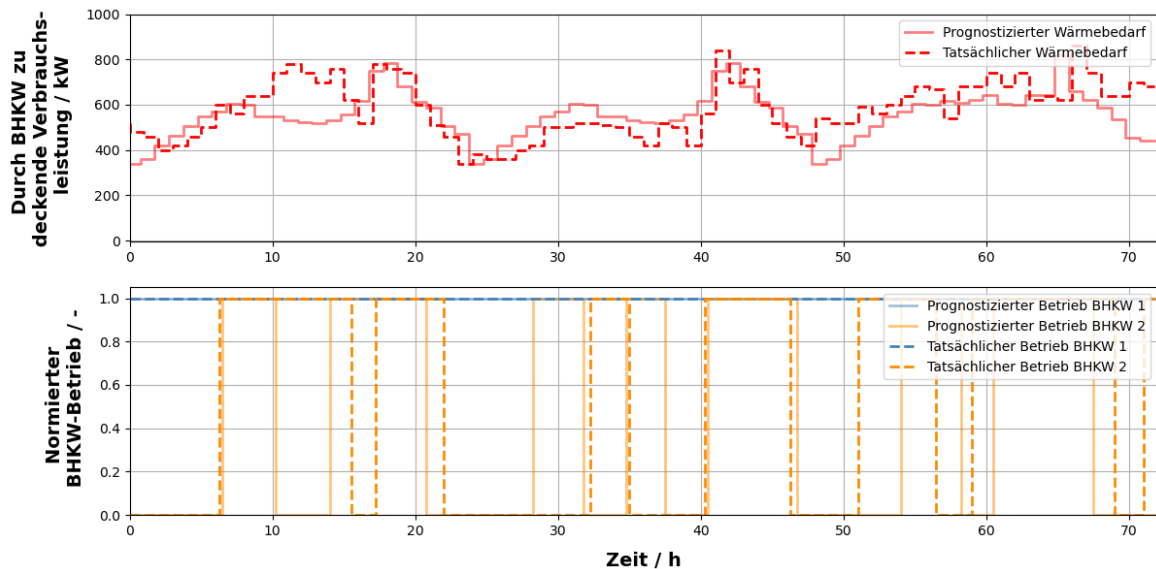


Abbildung 8 – Prognostizierter KWK-Betrieb mit naiver Wärmebedarfsprognose

Eine andere Möglichkeit die Vorhersageanforderung zu erfüllen, stellt die Steuerung der Anlage im bedarfsgerechten Betrieb dar. Der dabei berechnete optimale Fahrplan entspricht gleichzeitig der Vorhersage des KWK-Betriebs. Diese Variante bringt zwei Vorteile mit sich: Zum einen wird das Energiesystem hinsichtlich einer Zielgröße optimiert betrieben, zum anderen liegt aufgrund der erzielbaren hohen Fahrplantreue eine hohe Prognosegenauigkeit vor.

## 5 Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassend betrachtet ermöglicht der entwickelte Algorithmus die netzdienliche Integration dezentraler Energiesysteme in das elektrische Verbundnetz. Die Steuerung der Anlagen erfolgt zuverlässig und kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Neben der Umsetzung als rein lokale SPS-Variante existiert eine webbasierte Service-Anwendung, über die mehrere Anlagen parallel gesteuert werden können. Neben der bedarfsgerechten Steuerung ermöglicht der Algorithmus zudem die Vorhersage des KWK-Betriebs, die z.B. im Rahmen des Redispatch 2.0 für Netzplanungsprozesse genutzt werden kann.

Hardwaretechnisch ist der Mehraufwand für Anlagenbetreiber gering. Neben den standardmäßig bereits im Wärmespeicher vorhandenen Temperatursensoren und einem auslesbaren Stromzähler, werden lediglich Wärmemengenzähler zur Erstellung der thermischen Prognose benötigt. Alternativ kann auch über die Temperaturänderung im Wärmespeicher auf den thermischen Verbrauch geschlossen werden. Um die Abweichung jedoch in Grenzen zu halten, sind mehr als die standardmäßig zwei oder drei Temperaturstützstellen erforderlich. Softwaretechnisch muss je nach Umsetzungsvariante entweder der gesamte Steuerungsalgorithmus (SPS-Version) oder aber eine geeignete Schnittstelle zum Datenaustausch (Webservice-Version) auf Anlagenseite programmiert bzw. geschaffen werden.

Auf diese Weise können thermische Energieerzeugungsanlagen systemdienlich optimiert betrieben werden, um so zum Gelingen der Energiewende beizutragen und den Weg zu einer nachhaltigen Energieerzeugung mitzugestalten. Zu diesem Zweck wird der Algorithmus aktuell an verschiedenen Anlagen im Feld getestet und erprobt. Dabei stehen sowohl die bedarfsgerechte Steuerung als auch die Anwendungen im Rahmen von Redispatch 2.0 im Fokus.

## 6 Referenzen

- [1] Bundesnetzagentur, „Flexibilität im Stromversorgungssystem“, Diskussionspapier 2017.
- [2] Thomas, B., Toradmal, A., „Intelligente Steuerung dezentraler Energieversorgungssysteme“, Ingenieurspiegel, Public Verlagsgesellschaft und Anzeigenagentur mbH, Bingen, Ausgabe 4, 2016, ISSN 1868-5919, S. 38-39.
- [3] Widmann, C., Lödige, D., Toradmal, A., Thomas, B., „Enabling CHP units for electricity production on demand by smart management of the thermal energy storage“, Applied Thermal Engineering, 114 (2017), S. 1487-1497, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.065.
- [4] Kemmler T., Maier R., Widmann C., Thomas B., „Using a thermal energy storage to provide flexibility for heat pump optimization control with rapid control prototyping and SG ready standard“, Reutlingen 2019.
- [5] Haase, P., Thomas, B., „Test and optimization of a control algorithm for demand-oriented operation of CHP units using hardware-in-the-loop“, Applied Energy 294 (2021) 116974, doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116974.
- [6] Haase, P., Thomas, B., „Flexible KWK – aber wie?“, heizungsjournal, Heizungs-Journal Verlags GmbH, ISSN 0722-690X, 56. Jahrgang (2021) Nr. 7-8, S. 38-41.
- [7] Ferrari L., Esposito F., Becciani M., Ferrara G., Magnani S., Andreini M., et al., „Development of an optimization algorithm for the energy management of an industrial Smart User“, Applied Energy 2017;208:1468–86.
- [8] Lashkar Ara A., Mohammad Shahi N., Nasir M., „CHP economic dispatch considering prohibited zones to sustainable energy using self-regulating particle swarm optimization algorithm“, Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Electrical Engineering 2019;44(12):1-18.
- [9] Frison L., Kleinstück M., Engelmann P., „Model-predictive control for testing energy flexible heat pump operation within a Hardware-in-the-Loop setting“, Journal of Physics Conference Series 2019;1343(1):012068.
- [10] Wille-Hausmann B., Erge T., Wittwer C., „Decentralised optimisation of cogeneration in virtual power plants“, Solar Energy 2010;84(4):604–11.
- [11] Wolfrum P., Kautz M., Schäfer J., „Smart operation of CHP units“, IFAC Proceedings Volumes 2012;45(21):61–6.
- [12] Urbansky, F., „Eine effiziente Kombination – Wärmepumpe, Sonnenstrom und Batteriespeicher“, tab Fachmedium der TGA-Branche, 01/2018, Bauverlag, Gütersloh.
- [13] Hyndman R., Athanasopoulos G., „Forecasting: Principles and Practice“, 2nd ed. Melbourne (Australia): OTexts; 2018.
- [14] Heimgaertner F., Sachs T., Menth M., „ClassCast: A tool for class-based forecasting“, Proceedings of the 19th international GI/ITG conference on measurement, modelling and evaluation of computing systems, 2018.
- [15] Thomas, B., Haase, P., Schneider, D., „Stromoptimierter Betrieb von KWK-Anlagen – Einfluss des elektrischen Lastprofils“, BWK Energie., VDI Fachmedien, Ausgabe 5-6, 2021, S. 34-37.