

STROMBEDARFSORIENTIERTER BETRIEB EINER KWK-ANLAGE ALS WEBSERVICE – STEUERUNG EINER REALEN ANLAGE

Bernd Thomas¹, Günther Garbe², Daniel Hämmerle²

¹: Hochschule Reutlingen, Alteburgstraße 150, 72762 Reutlingen, Tel.: +49 7121 271-7041, email: bernd.thomas@reutlingen-university.de

²: Stadtwerke Altensteig, Jahnstraße 13, D-72213 Altensteig, www.stadtwerke-altensteig.de email: stadtwerke@altensteig.de

Kurzfassung: Infolge der zunehmenden Elektrifizierung des gesamten Energiesystems u.a. durch den Einsatz elektrischer Wärmepumpen und die Elektromobilität kommt der Deckung der elektrischen Residuallast eine immer wichtigere Bedeutung zu, um auch zukünftig eine verlässliche und sichere Stromversorgung aufrechtzuerhalten. An dieser Stelle können KWK-Anlagen einen wichtigen Beitrag leisten, da sie dezentral einsetzbar sind und eine hohe Flexibilität sowie eine bessere Effizienz im Vergleich zur konventionellen Stromerzeugung besitzen. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass KWK-Anlagen nicht mehr klassisch wärmegeführt, sondern am Strombedarf orientiert betrieben werden.

An der Hochschule Reutlingen ist zu diesem Zweck ein entsprechender strombedarfsorientierter Steuerungsalgorithmus entwickelt worden, der bereits verschiedentlich an Labor- und Feldtestanlagen erprobt sowie in der Literatur vorgestellt wurde. Dieser Algorithmus ist mittlerweile als Webservice im Einsatz und steuert eine KWK-Anlage im Realbetrieb. Konkret werden damit die Betriebszeiten des KWK-Gerätes anhand einer Prognose des Börsenstrompreises in die Phasen der höchsten Preise verlagert. Damit ist implizit das Ziel der Residuallastdeckung erfüllt, denn zu Zeiten geringer PV- und Windstromerzeugung treten die maximalen Strompreise auf. In Folge der erreichten hohen Fahrplanteue kann auf diese Weise zudem die Stromerzeugung der KWK-Anlage sehr genau vorhergesagt und an den Netzbetreiber z.B. im Rahmen von Redispatch 2.0 gemeldet werden, was zur weiteren Absicherung des Stromsystems dienlich ist.

In dem Beitrag werden die Ansteuerung der KWK-Anlage und die Ergebnisse aus dem praktischen Betrieb vorgestellt. Dazu wird zunächst nochmals die zugrunde liegende Algorithmik erläutert. Darauf aufbauend kommen die webbasierte Umsetzung der Steuerung, der Aufbau der KWK-Anlage sowie die Schnittstellen zum Datenaustausch zur Sprache. Im Ergebnisteil wird der tatsächliche Anlagenbetrieb mit dem berechneten Fahrplan und mit dem Strompreissignal verglichen, um sowohl die hohe Fahrplanteue als auch die am Strompreis orientierte Fahrweise der KWK-Anlage zu verdeutlichen und zu belegen.

Keywords: Residuallastdeckung, strombedarfsorientiert, Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), Webservice, Redispatch 2.0

1 Einleitung

Im Zuge der Energiewende zeichnet sich eine grundlegende Transformation des Energiesystems in Form eines Übergangs von brennstoffbasierten Technologien hin zu rein elektrischen Varianten ab. Diese Entwicklung erfolgt vor dem Hintergrund, dass die

erneuerbare Stromerzeugung primär auf Basis von PV- und Windkraftanlagen im Vergleich zu anderen Erzeugungsarten von erneuerbarer Sekundärenergie ein ungleich höheres Ausbaupotenzial bietet. Praktisch ablesbar ist dieser Trend anhand des verstärkten Einsatzes elektrischer Wärmepumpen im Wärmesektor und der Elektromobilität im Verkehrssektor.

Dabei drängt sich jedoch zunehmend die Frage auf, wie eine verlässliche Stromversorgung sichergestellt werden kann insbesondere zu Zeiten, in denen die PV- und Windkraftanlagen den Bedarf witterungsbedingt nicht komplett decken können. Auf kurzzeitige Abweichungen zwischen Stromangebot und Strombedarf wird man mit Stromspeichern reagieren können. Längere Perioden dieser Art müssen dagegen mit anderen Methoden der Stromerzeugung überbrückt werden – man spricht hier von Residuallastdeckung. Für diesen Zweck sind konventionelle Technologien wie die Gasturbine aber auch die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) im Gespräch, wobei letztere aufgrund der parallelen Wärmenutzung eine deutlich bessere Gesamteffizienz aufweist und damit zu bevorzugen ist. Zur Erreichung der angestrebten Klimaneutralität muss dabei der Übergang auf erneuerbare Brennstoffe wie beispielsweise Biomethan oder Wasserstoff erfolgen.

Während die Gasturbine als reiner Stromerzeuger nahezu beliebig ein- oder ausgeschaltet werden kann, muss bei der Ansteuerung einer KWK-Anlage aufgrund der parallelen Wärmeerzeugung die Deckung des Wärmebedarfs im Blick behalten werden. Das bedeutet, dass hier eine intelligente Algorithmik zum Einsatz kommen muss, die eine bedarfsgerechte Stromerzeugung mittels der KWK bei gleichzeitig vollständiger Wärmenutzung ermöglicht. An der Hochschule Reutlingen ist ein entsprechender Steuerungsalgorithmus seit mehreren Jahren in der Entwicklung, über den bereits verschiedentlich berichtet wurde, u.a. auf dem letzten Energiesymposium 2022 [1,2]. Aktuell befindet sich dieser Algorithmus im Alltagseinsatz und steuert eine KWK-Anlage im Realbetrieb anhand des Börsenstrompreises, was im weiteren Verlauf ausführlich beschrieben wird.

2 Stand der Technik

Klassisch werden KWK-Anlagen, insbesondere im kleineren Leistungsbereich bis zu einigen 100 kW_{el}, nach wie vor wärmegeführt, d.h., am Wärmebedarf orientiert betrieben. Das bedeutet konkret, dass das KWK-Gerät anläuft, wenn der zugehörige Wärmespeicher entladen ist, und entsprechend abgeschaltet wird, wenn der Wärmespeicher vollständig geladen ist. Der Ladezustand des Speichers wird dabei über Temperaturfühler erfasst, die auf verschiedenen Höhen am Wärmespeicher angebracht sind. Zudem wurden KWK-Anlagen in der Vergangenheit auf die Deckung der thermischen Grundlast mit jährlichen Volllastbetriebsstunden von 5.000 und mehr ausgelegt, was kaum Spielraum für eine flexiblen, am Strombedarf orientierten Betrieb lässt. Letzterem wird in Deutschland mittlerweile über das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) entgegengewirkt, das mit dem Kohleausstiegsgesetz [3] im Jahr 2020 derart geändert wurde, dass die förderfähigen Volllastbetriebsstunden einer KWK-Anlage auf zunächst 5.000 Stunden gedeckelt wurden, wobei dieser Deckel stufenweise auf 3.500 Stunden bis zum Jahr 2025 abgeschmolzen wird. Mit einer weiteren Änderung des KWKG, die im Rahmen des Gesetzes zur Einführung einer Strompreisbremse [4] Ende 2022 erfolgt ist, ist diese Regelung verschärft worden, in dem die förderfähigen Volllastbetriebsstunden einer KWK-Anlage bis zum Jahr 2030 nun stufenweise weiter auf 2.500 abgesenkt werden. Auf diese Weise soll die notwendige Flexibilität erreicht werden, so

dass KWK-Anlagen nach Möglichkeit nur noch dann betrieben werden, wenn der von ihnen generierte elektrische Strom über die Stromerzeugung PV- und Windkraftanlagen hinaus tatsächlich benötigt wird.

Zu diesem Zweck wird aber zusätzlich ein Ansatz zur Steuerung der Anlagen benötigt, der primär am Strombedarf orientiert ist und nicht mehr klassisch die reine Wärmeführung verfolgt. Dabei muss jedoch sichergestellt werden, dass die vom KWK-Gerät erzeugte Wärme nach wie vor vollständig genutzt wird, da ansonsten der Effizienzvorteil der KWK verschwindet. Man spricht hier vom stromorientierten oder stromoptimierten Betrieb und nicht vom stromgeführten Betrieb, da in diesem Fall der Fokus vollständig auf der Stromerzeugung liegt und in Kauf genommen wird, dass die erzeugte Wärme zumindest teilweise über einen Notkühler an die Umgebung abgegeben wird. Aus diesem Grund nimmt der Wärmespeicher im stromorientierten Betrieb eine zentrale Rolle ein, in dem er die zu Zeiten der Stromerzeugung vom KWK-Gerät parallel abgegebene Wärme aufnimmt und speichert, so dass sie zu einem späteren Zeitpunkt genutzt werden kann. Damit wird sofort klar, dass die Möglichkeit zur stromorientierten Betriebsweise einer KWK-Anlage direkt mit der Kapazität des Wärmespeichers verknüpft ist. Je größer der Wärmespeicher ist, desto flexibler kann die Anlage betrieben werden. Zudem wird aber auch deutlich, dass der Wärmespeicher die Grenzen für den stromorientierten Betrieb einer KWK-Anlage vorgibt. Wenn der Wärmespeicher vollständig beladen ist, muss das KWK-Gerät abschalten, um die Wärmeabgabe an die Umgebung z.B. über einen Notkühler zu vermeiden; ebenso muss das KWK-Gerät eingeschaltet werden, wenn der Wärmespeicher vollständig entladen ist, um die Deckung des Wärmebedarfs sicherzustellen. Zentrales Element einer am Strombedarf orientierten Steuerung für eine KWK-Anlage ist somit ein intelligentes Wärmespeichermanagement.

An dieser Stelle sei kurz angemerkt, dass die zuvor über den Wärmespeicher beschriebene Funktionalität auch durch einen Batteriespeicher erbracht werden kann. Da aber Wärmespeicher ohnehin Bestandteil einer KWK-Anlage sind, um z.B. ein zu häufiges Takten des KWK-Gerätes zu vermeiden, und da insbesondere bei den benötigten größeren Kapazitäten Batteriespeicher nach wie vor deutlich teurer im Vergleich zu Wärmespeichern sind, wird von dieser Möglichkeit aktuell noch kein Gebrauch gemacht.

Modelle zur stromoptimierten Steuerung einer KWK-Anlage in Verbindung mit einem Wärmespeicher sind verschiedentlich in der Literatur zu finden. Dabei kommen teilweise lineare Optimierungsmethoden (MILP) [5-7], teilweise nicht-lineare Methoden [8,9] und auch generische Algorithmen [10] zum Einsatz. Im Fokus steht zumeist die Entlastung oder Stützung des elektrischen Netzes durch den gezielten Betrieb der KWK-Anlage, wobei häufig die Minimierung der Energiekosten als Zielgröße für die Optimierung dient. Letzteres ist erforderlich, um neben dem elektrischen System auch die Wärmeerzeugung und -verteilung der KWK-Anlage angemessen zu berücksichtigen. Eine gute Grundlagenübersicht findet sich in der Dissertation von Wehmhörner [11]. In letzter Zeit liegt in der Literatur ein besonderes Augenmerk auf dem optimalen Einsatz von KWK-Anlagen in Verbindung mit Wärmenetzen [12,13], und vor dem Hintergrund des notwendigen Übergangs auf erneuerbare Brennstoffe zum Antrieb von KWK-Anlagen sind Konzepte zum flexiblen Anlagenbetrieb zur Residuallastdeckung auch vermehrt im Bereich der Biogas-KWK anzutreffen [14,15].

In den zuvor genannten Ansätzen sind die Optimierungsmodelle ohne Ausnahme in der Simulation angewendet und getestet worden. D.h., die KWK-Anlagen wurden lediglich in Modellen betrachtet - teilweise unterfüttert mit realen Lastdaten. Im vorliegenden Beitrag wird dagegen die Anwendung eines stromorientierten Algorithmus an einer KWK-Anlage im Realbetrieb beschrieben. Zu diesem Zweck ist der Algorithmus auf einem Server zusammen mit einer Datenbank und einem Webservice implementiert, und die Kommunikation mit der realen Anlage erfolgt über eine Anwendungsprogrammierschnittstelle (Web-API). Dementsprechend werden im Folgenden neben der grundlegenden Funktion des Optimierungsalgorithmus die KWK-Anlage vor Ort sowie deren Ansteuerung und die Ergebnisse aus dem praktischen Anlagenbetrieb im stromorientierten Modus vorgestellt.

3 Materialien und Methoden

3.1 Der stromorientierte Optimierungsalgorithmus

Wie in Abbildung 1 dargestellt, setzt sich der stromorientierte Optimierungsalgorithmus im Wesentlichen aus drei Blöcken zusammen. Es ist zu erkennen, dass der Algorithmus prognosebasiert arbeitet, und im Prognoseblock werden die Daten zur Bestimmung der erforderlichen Wärme- und Stromerzeugung in der KWK-Anlage bereitgestellt. Zu diesem Zweck wird der Wärmebedarf basierend auf Vergangenheitswerten, die mit Daten einer aktuellen Wettervorhersage korrigiert werden, über eine naive Prognose in 1-Stundenwerten vorausberechnet. Die Stromerzeugung der KWK-Anlage wird an einer Prognose des Börsenstrompreises, der in ¼-Stundenwerten von einem externen Dienstleister bezogen wird, orientiert. Alternativ könnten hier ähnlich wie bei der Vorhersage des Wärmebedarfs Vergangenheitswerte für den Strombezug im Objekt oder im Areal oder auch Daten zur Auslastung des elektrischen Netzes eingespeist werden.

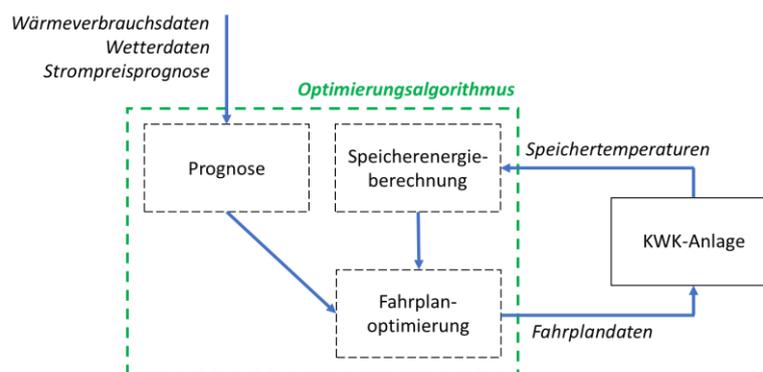


Abbildung 1 – Schematische Darstellung des stromorientierten Steuerungsprinzips

Der Block Speicherenergieberechnung dient der Bestimmung des Energieinhaltes im Wärmespeicher auf Basis der Speichertemperaturen, die von der KWK-Anlage übermittelt werden. Zusammen mit den Daten aus dem Prognoseblock wird daraufhin die Berechnung des optimalen Fahrplans im Block Fahrplanoptimierung vorgenommen. Zielgröße für die Optimierung ist die Maximierung des Erlöses aus der Stromeinspeisung auf Basis der zuvor erstellten Strompreisprognose, und die Optimierungsrechnung folgt mit dem Monte-Carlo-Verfahren einer stochastisch-heuristischen Methode. Dafür werden zunächst eine große Anzahl zufälli-

ger Fahrpläne erstellt, die sich jeweils anhand frei definierbarer Randbedingungen am praktischen Betrieb der KWK-Anlage orientieren, so dass die Umsetzbarkeit eines jeden Fahrplans gewährleistet ist. Auf diese Weise können z.B. Mindestbetriebs- und Mindestruhezeiten des KWK-Geräts oder die Grenzen des Ladezustandes im Wärmespeicher berücksichtigt werden. Danach wird für jeden Fahrplan die Zielgröße berechnet und der beste Fahrplan ausgewählt, der abschließend zurück an die KWK-Anlage gesendet wird. Vorteile des Monte-Carlo-Verfahrens sind u.a., dass keine Beschränkung auf lineare Zusammenhänge besteht. Weiterhin können Randbedingungen in einfacher Form und nahezu beliebig hinzugefügt werden; so ist es beispielsweise auch möglich, Pareto-Optimierungen durchzuführen, bei denen eine weitere Zielgröße in der Optimierung mitgeführt wird. Im vorliegenden Fall wird dies genutzt, um bei der Maximierung des Stromerlöses parallel die Anzahl der Starts des KWK-Gerätes nicht unerwünscht stark anwachsen zu lassen.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, ist über die genaue Ausprägung und Umsetzung des Steuerungsalgorithmus und insbesondere der Fahrplanoptimierung bereits verschiedentlich in der Literatur berichtet worden, so dass für weiterführende Informationen auf diese Quellen verwiesen wird [1,2,16]

3.2 Die reale KWK-Anlage

Die gesteuerte reale KWK-Anlage wird bei den Stadtwerken in Altensteig¹ betrieben, und sie ist klassisch aufgebaut mit einem KWK-Gerät, einem Pufferspeicher und einem Zusatzkessel (siehe Abb. 2). Das KWK-Gerät weist Nennleistungen von 50 kW elektrisch und 100 kW thermisch auf, und der Zusatzkessel besitzt eine thermische Nennleistung von 570 kW. Beide Geräte werden mit Erdgas betrieben. Das KWK-Gerät wird im An-/Aus-Betrieb ohne Leistungsmodulation gefahren, da die elektrische Effizienz des Gerätes im Teillastbetrieb abnimmt und da der Teillastbetrieb zu erhöhten Wartungskosten bezogen auf die erzeugte elektrische Energie führt. Der Wärmespeicher ist als horizontaler Zylinder mit einem Volumen von 13 m³ ausgeführt. Gut zu erkennen sind die fünf Temperatursensoren, die auf unterschiedlichen Höhen angebracht sind und aus deren Messwerten der Energieinhalt des Speichers berechnet wird, wie im Abschnitt zuvor beschrieben.

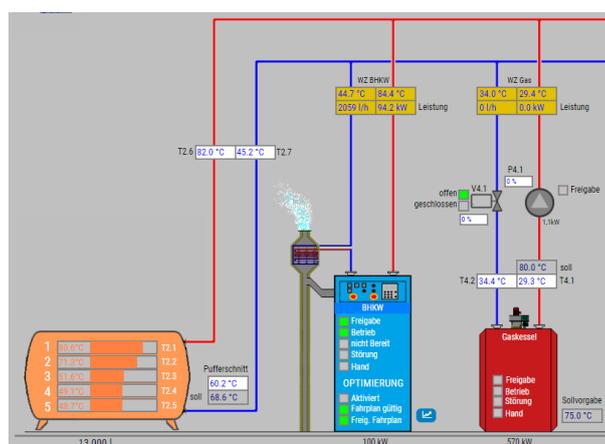


Abbildung 2 – Schema der KWK-Anlage

¹ <https://www.stadtwerke-altensteig.de/>

Bei dem von der KWK-Anlage mit Wärme versorgten Gebäude handelt es sich um ein kombiniertes Wohn- und Geschäftshaus, das zudem über einen größeren Veranstaltungsraum verfügt. Die letztgenannte Nutzung hat zur Folge, dass der Heizwärmebedarf des Gebäudes starken Schwankungen unterliegt, je nachdem ob Veranstaltungen durchgeführt werden oder nicht. Dies zeigt die folgende Abbildung 3, in der die Tageswärmebedarfe über der jeweiligen mittleren Tagestemperatur für den Zeitraum vom 17.2. – 25.11.2023 aufgetragen sind. Auffällig sind die starken Schwankungen während der Heizperiode, also bei geringeren Außentemperaturen. Bei einer Außentemperatur von beispielsweise 7°C schwankt der Tageswärmebedarf zwischen etwa 4.000 und 7.200 kWh. Dieses Verhalten erschwert die Prognose des Wärmebedarfs, was im weiteren Verlauf dieses Beitrags nochmals aufgegriffen wird.

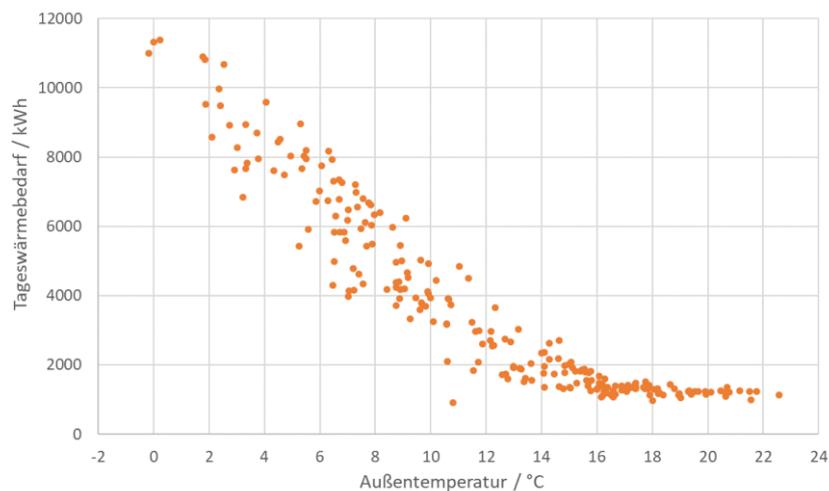


Abbildung 3 – Tageswärmebedarfe des versorgten Gebäudes in Abhängigkeit der Außentemperatur für den Zeitraum vom 17.2. – 25.11.2023

3.3 Anbindung der KWK-Anlage an den Optimierungsalgorithmus

Wie bereits eingangs angedeutet, ist die Anbindung der KWK-Anlage an den Optimierungsalgorithmus über einen Webservice ausgeführt, und der Datenaustausch erfolgt über das Internet mit Hilfe von Anwendungsprogrammierschnittstellen (Web-APIs). In Abbildung 4 ist diese Anbindung schematisch dargestellt. Die KWK-Anlage sendet die aktuellen Anlagendaten in Form der Temperaturen des Wärmespeichers und des Betriebszustands des KWK-Gerätes sowie der Vergangenheitswerte des Wärmeverbrauchs im Gebäude per Web-API an den Webservice. Ebenso werden die weiteren benötigten Daten wie die Strompreisprognose und die Wettervorhersage an den Webservice übertragen. (Wie in Abb. 4 vermerkt, sind auch alternative Übertragungsmethoden per email oder FTP-Server möglich.) Der Webservice schreibt alle Daten zunächst in die angebundene Datenbank. Zu einer vorab festgelegten Uhrzeit triggert der Webservice den Optimierungsalgorithmus, der daraufhin alle erforderlichen Daten aus der Datenbank einliest, den optimalen Fahrplan berechnet und diesen wieder in der Datenbank ablegt. Abschließend holt sich die KWK-Anlage diesen Fahrplan über die Web-API vom Webservice ab und übernimmt ihn in die eigene Steuerung.

Wichtig ist an dieser Stelle anzumerken, dass immer die KWK-Anlage aktiv auf den Webservice zugreift. Im umgekehrten Fall müsste der Webservice auf die KWK-Anlage zugreifen, was aus Sicherheitsgründen von den Anlagenbetreiber häufig nicht gewünscht ist.

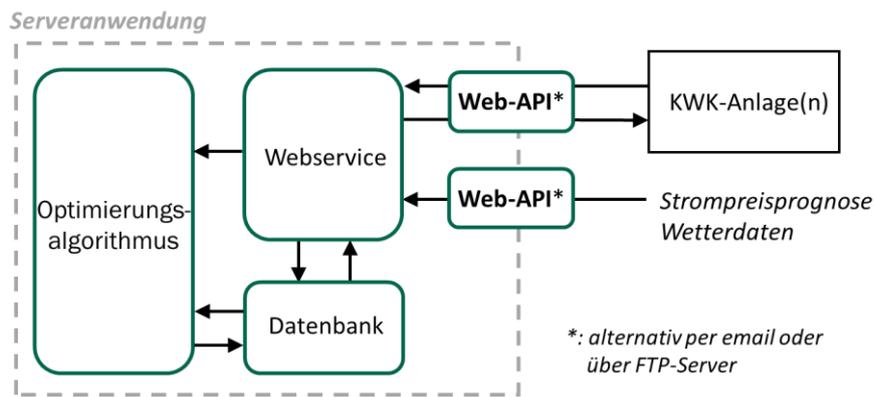


Abbildung 4 – Schematische Darstellung der Anbindung der KWK-Anlage an den Optimierungsalgorithmus

Weiterhin ist zu erwähnen, dass hinter dem Konzept der Internetanwendung die Intention steckt, nicht nur eine KWK-Anlage singular anzu steuern, sondern eine größere Zahl von Anlagen zu steuern. Aus diesem Grund ist auch die Datenbank implementiert; sie garantiert, dass die Daten für jede verbundene Anlage separat und strukturiert abgelegt werden.

3.4 Zeitlicher Ablauf der Anlagensteuerung

Der Fahrplan wird für einen Zeitraum von 24 Stunden von 0:00 bis 24:00 Uhr in $\frac{1}{4}$ -Stunden-Intervallen erstellt. Dementsprechend besteht ein Fahrplan aus 96 Einträgen, die entweder den Wert 1 (KWK-Gerät in Betrieb) oder den Wert 0 (KWK-Gerät außer Betrieb) aufweisen. Die Strompreisprognose wird ebenfalls in 96 $\frac{1}{4}$ -Stundenwerten für den gleichen Zeitraum 0:00 bis 24:00 Uhr empfangen. Die Wärmebedarfsprognose wird auch für diesen Zeitraum erstellt; hier beträgt das zeitliche Intervall aber 1 Stunde, so dass nur 24 Prognosewerte errechnet werden. Hintergrund für diese gröbere Rasterung ist zum einen die thermische Trägheit des Gebäudes, die keine feinere Auflösung erfordert. Zum anderen besitzt die Wärmebedarfsprognose aufgrund der in Abschnitt 3.2 angesprochenen stärkeren Schwankungen des tatsächlichen Wärmebedarfs eine systembedingte Ungenauigkeit, die sich bei feinerer zeitlicher Auflösung nur verstärken würde.

Zuerst wurde die Berechnung des optimierten Fahrplans wenige Minuten vor 0:00 Uhr vorgenommen, so dass der Fahrplan rechtzeitig vor der Umsetzung von der Anlage abgeholt und auf der Steuerung des KWK-Gerätes implementiert werden konnte. Im Laufe des Projektes hat sich aber ergeben, dass mit der Fahrplanerstellung ein weiterer Nutzen erreichbar ist, in dem der Fahrplan zusätzlich zur Anmeldung der Stromerzeugung der KWK-Anlage beim Netzbetreiber im Rahmen von Redispatch 2.0 verwendet werden kann. Dies ist deshalb möglich, weil sich herausgestellt hat, dass die KWK-Anlage dem Fahrplan über weite Zeiträume sehr gut folgt – was im nächsten Abschnitt anhand von Messdaten belegt wird. Somit stellt der Fahrplan eine gut verwendbare und zudem sehr genaue Prognose für die Stromerzeugung der KWK-Anlage dar. Da die Abgabe dieser Prognose an den Netzbetreiber jeweils am Vortag bis 10:00 Uhr am Vormittag erfolgen muss, sind der Datenaustausch und die Berechnung des optimierten Fahrplans entsprechend vorverlegt worden, wie Abbildung 5 zeigt.

Es ist zu erkennen, dass jeweils um 9:40 Uhr die aktuellen Daten in Form von Speichertemperaturen, Betriebszustand des KWK-Gerätes und Wärmeverbrauchswerten an

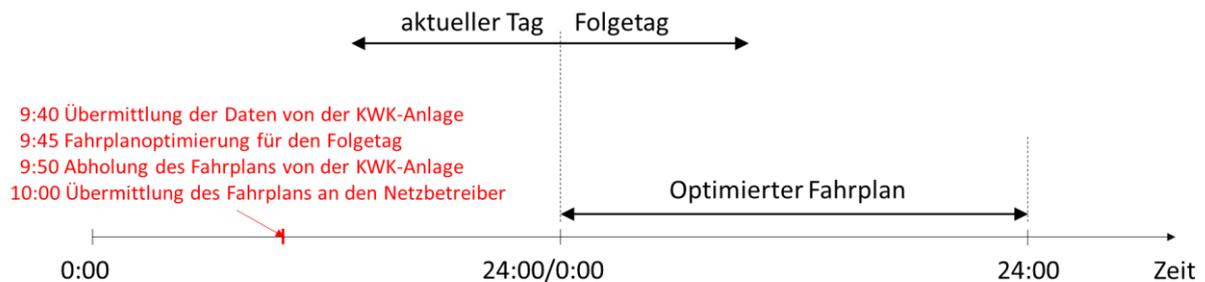


Abbildung 5 – Zeitlicher Ablauf von Datenaustausch und Fahrplanberechnung

den Webservice übermittelt werden. Die Strompreisprognose liegt zu diesem Zeitpunkt ebenfalls vor. Auf Basis dieser Daten wird um 9:45 Uhr der optimale Fahrplan für den Folgetag berechnet und um 9:50 Uhr von der KWK-Anlage vom Webservice abgeholt, so dass um 10:00 Uhr die Übermittlung dieses Fahrplans an den Netzbetreiber vorgenommen werden kann. Zu diesem Zeitpunkt wird die KWK-Anlage noch nach dem am Vortag optimierten Fahrplan betrieben; der neu berechnete Fahrplan tritt erst ab 0:00 Uhr des Folgetags in Kraft.

Es sei angemerkt, dass die zeitliche Staffelung in 5 Minutenschritten von 9:40 bis 9:50 Uhr rein willkürlich erfolgt ist. Die Datenübertragung sowie die Fahrplanoptimierung an sich laufen wesentlich schneller ab, so dass die zeitliche Taktung deutlich verkleinert werden könnte. Somit besteht in dieser Hinsicht keine Einschränkung mit Blick auf das Ziel, eine größere Anzahl von Anlagen gleichzeitig anzusteuern.

4 Ergebnisse

Während die Datenaufzeichnung an der KWK-Anlage bereits im Februar 2023 begonnen hat und die Steuerung wenig später in Betrieb genommen wurde, erfolgte die Steuerung mit Fahrplananmeldung gemäß des zuvor in Abb. 5 gezeigten Zeitplan ab Sommer 2023. Für die Ergebnisdarstellung werden im Folgenden eine Betriebswoche im Spätsommer und eine im Herbst herangezogen, und das Augenmerk wird sowohl auf das Optimierungsziel, den KWK-Betrieb in die Zeiträume der hohen Strompreise zu verlagern, als auch auf die Fahrplantreue gerichtet.

Dementsprechend zeigt Abbildung 6 den Betrieb des KWK-Gerätes vom 18.9. bis 26.9.2023. Die blaue Rechteckkurve zeigt den Betriebszustand des KWK-Gerätes, der jeweils zwischen 0 (Aus) und 1 (An) wechselt. Infolge des geringen Wärmebedarfs in der Sommerzeit, sind die täglichen Laufzeiten des KWK-Gerätes gering, und sie betragen nur wenige Stunden. Anhand der in oranger Farbe hinterlegten Kurve für den Börsenstrompreis in diesem Zeitraum ist aber gut zu erkennen, dass das KWK-Gerät dennoch nahezu ausschließlich zu den Zeiten der Strompreisspitzen in Betrieb ist und damit wie gewünscht den maximalen Erlös im Hinblick auf die Vergütung des eingespeisten Stroms erreicht.

In Abbildung 7 ist der Betrieb des KWK-Gerätes zusammen mit dem Fahrplansignal aufgetragen, und es sofort zu erkennen, dass das KWK-Gerät dem Fahrplan vollständig gefolgt ist. Dies wurde bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, und anhand von Abbildung 7 wird nun deutlich, warum das Fahrplansignal bestens geeignet ist, um den Betrieb des KWK-Gerätes und damit die Stromerzeugung der KWK-Anlage beim Netzbetreiber im Vorfeld im Rahmen von Redispatch 2.0 anzumelden. Damit ist der Doppelnutzen des strombedarfsorientieren

Betriebs der KWK-Anlage belegt: Mit Hilfe der implementierten Steuerung gelingt es sowohl, den Erlös der Anlage mit Blick die Stromeinspeisung zu maximieren, als auch eine sehr gute zeitliche Vorhersage der mit der Anlage erreichbaren Stromerzeugung an den Netzbetreiber im Rahmen von Redispatch zu melden.

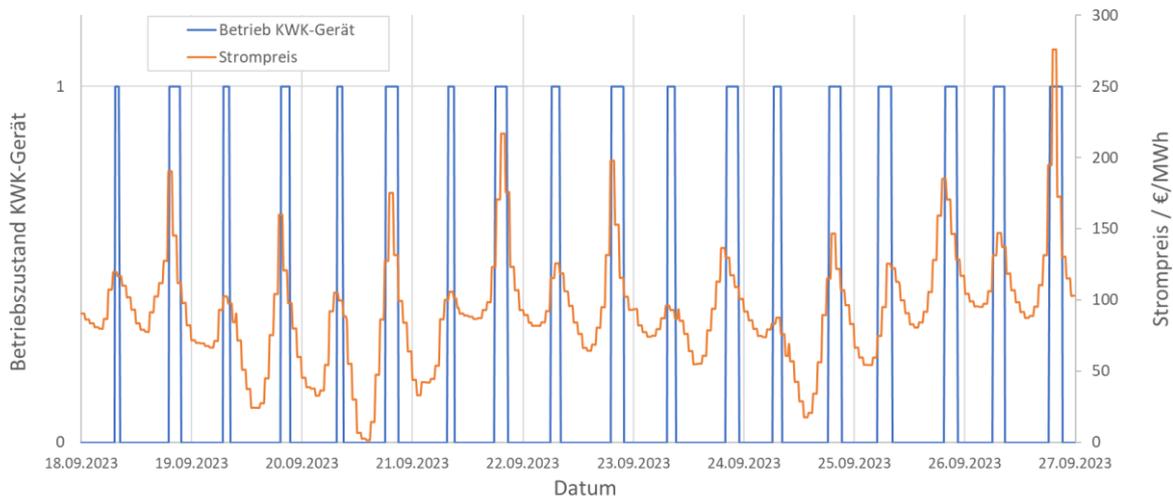


Abbildung 6 – Betriebszeiten des KWK-Gerätes und Verlauf des Strompreises in der Zeit vom 18.9.-26.9.2023

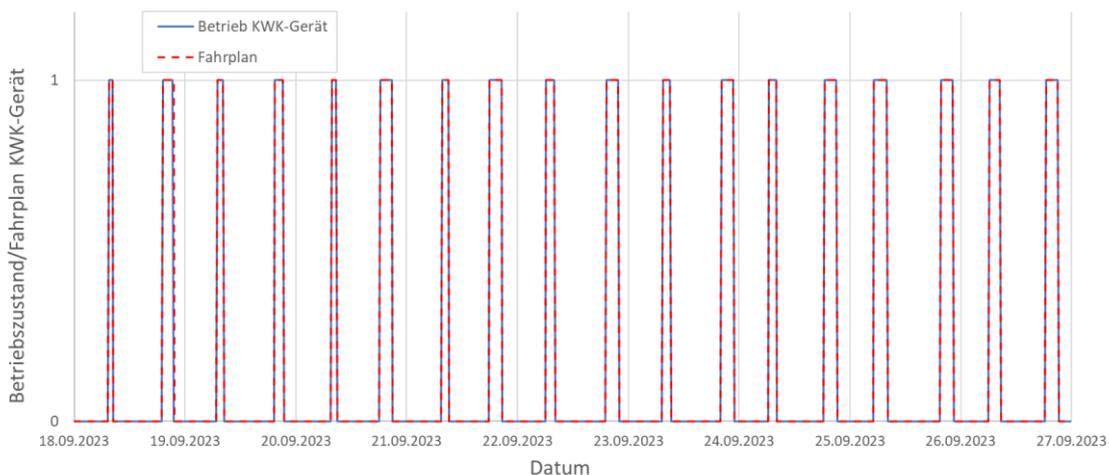


Abbildung 7 – Betriebszeiten des KWK-Gerätes und Fahrplansignal in der Zeit vom 18.9.-26.9.2023

Der Betrieb im Herbst bestätigt diese Ergebnisse, wie die beiden folgenden Abbildungen 8 und 9 zeigen. Aufgrund der geringeren Außentemperaturen und des damit erhöhten Heizwärmebedarfs sind nun aber die täglichen Betriebszeiten des KWK-Gerätes länger. Aus Abbildung 8 ist zu erkennen, dass die Betriebszeiten des KWK-Gerätes wiederum sehr gut mit den Spitzen der Kurve für den Börsenstrompreis korrelieren. Es wird allerdings auch deutlich, dass das KWK-Gerät teilweise und kurzzeitig zusätzlich eingeschaltet werden muss, um den Wärmebedarf zu decken.

Abbildung 9 verdeutlicht die ebenfalls sehr gute Fahrplanteue des KWK-Gerätes in diesem Zeitraum, wobei im Vergleich zu den vorher in Abbildung 7 gezeigten Ergebnissen für den Sommer teilweise leichte Abweichungen vom Fahrplan zu beobachten sind. Diese Abweichungen treten in beiden Richtungen auf. Gleich zu Beginn des Zeitraums am 22.10. sieht

man z.B., dass das KWK-Gerät früher abschaltet als nach Fahrplan vorgegeben. Ursache ist ein zu diesem Zeitpunkt bereits vollständig geladener Wärmespeicher, der einen Weiterbetrieb des KWK-Gerätes nicht mehr erlaubt. Umgekehrt sind am 24.10. und am 28.10. jeweils kurze Betriebszeiten des Zusatzkessels erkennbar. Hier ist die Ursache ein vollständig entladener Wärmespeicher, der das Anfahren des Zusatzkessels erforderlich macht.

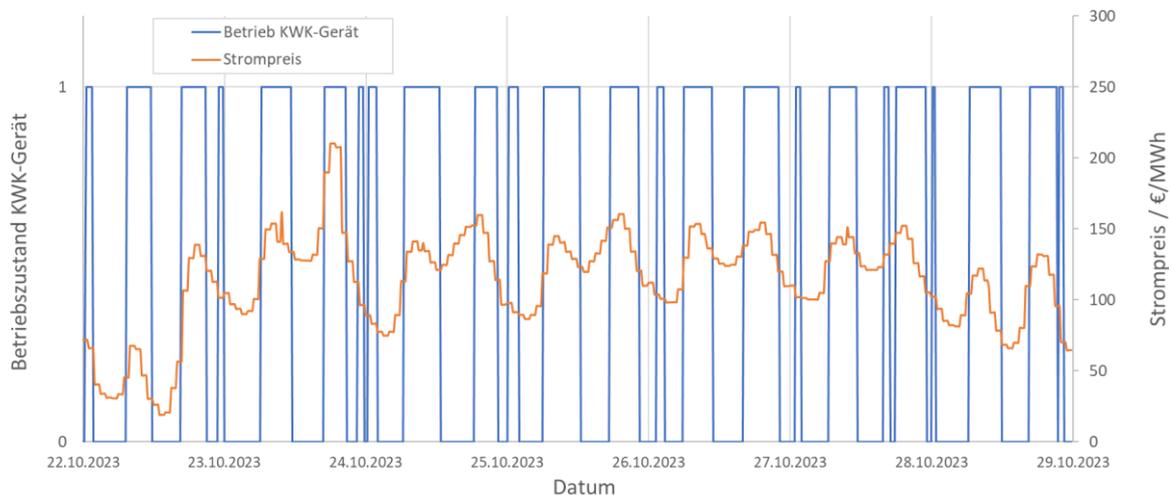


Abbildung 8 – Betriebszeiten des KWK-Gerätes und Verlauf des Strompreises in der Zeit vom 22.10.-28.10.2023

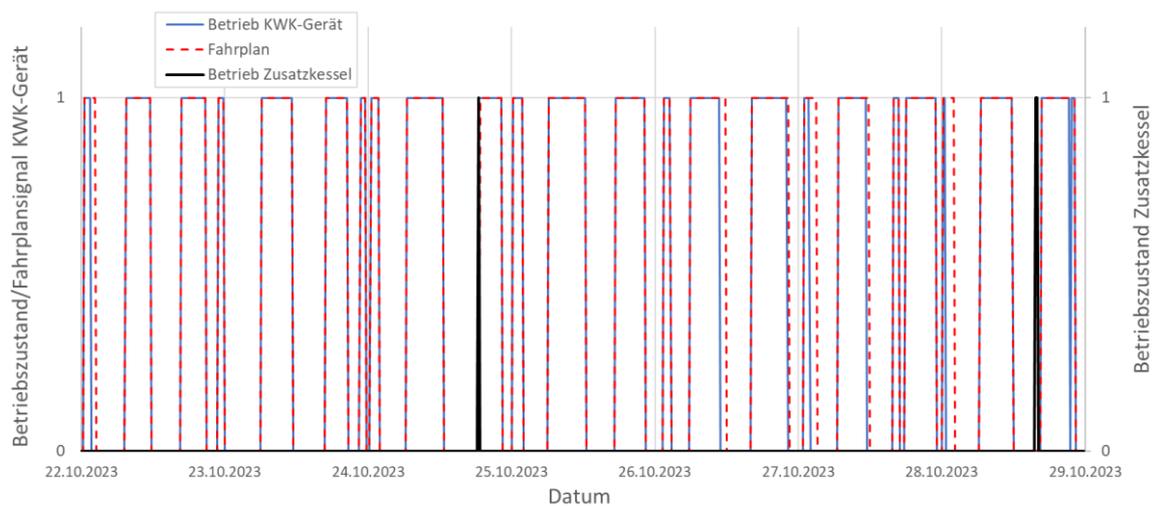


Abbildung 9 – Betriebszeiten des KWK-Gerätes, Fahrplansignal und Betriebszustand des Zusatzkessels in der Zeit vom 22.10.-28.10.2023

Diese Abweichung vom Fahrplan sind in der fehlerbehafteten Prognose des Wärmebedarfs begründet. Wenn der tatsächliche Wärmebedarf geringer ausfällt als prognostiziert, ist der Wärmespeicher früher beladen als vom Algorithmus berechnet, und das KWK-Gerät muss bereits kurz vor dem Fahrplansignal abschalten. Wenn, im anderen Fall, der Wärmebedarf höher ausfällt als vorhergesagt, dann wird der Wärmespeicher stärker entladen im Vergleich zur Berechnung, was im Einzelfall das kurzzeitige Anlaufen des Zusatzkessels bedingt.

Derartige Abweichungen werden sich nie vollständig vermeiden lassen, insbesondere bei stark schwankendem Wärmebedarf wie im vorliegenden Fall, was in Abschnitt 3.2. anhand von

Abbildung 3 verdeutlicht wurde. Es ist jedoch wichtig festzuhalten, dass dies keinerlei negative Auswirkungen weder auf den Anlagenbetrieb noch auf den Komfort mit Blick auf die Wärmedeckung hat. Dies wird ermöglicht, weil der Steuerungsalgorithmus, wie bereits eingangs erläutert, immer nur zwischen den festen Grenzen wirkt, die durch die Kapazität des Wärmespeichers vorgegeben sind. Wenn der Wärmespeicher vollständig entladen ist, greift die interne Steuerung der KWK-Anlage und veranlasst, dass der Zusatzkessel anläuft, um den Komfort der Bewohner mit Blick auf die Wärmeversorgung sicherzustellen. Wenn im anderen Fall der Wärmespeicher vollständig beladen ist, bewirkt die interne Steuerung, dass das KWK-Gerät über die interne Steuerung abschaltet, um das Gerät vor Überhitzung zu schützen.

5 Fazit

Mit dem Einsatz an einer realen KWK-Anlage konnte die Praxistauglichkeit des an der Hochschule Reutlingen entwickelte Algorithmus zum strombedarfsorientierten Betrieb von KWK-Anlagen gezeigt werden. Sowohl die hohe Fahrplantreue als auch die sehr gute Ausrichtung des Betriebs des KWK-Gerätes an den Strompreisspitzen konnten in der Praxis nachgewiesen werden. Darin vereinen sich mehrere Vorteile: Zum einen lässt sich der Betrieb der KWK-Anlage damit an den Erfordernissen des Strommarktes ausrichten. Dies steht im Einklang mit dem eingangs formulierten Ziel der Residuallastdeckung, da die Residuallast eng mit dem Strompreis korreliert. Alternativ könnten andere Signale wie die Netzbelastung oder die Einspeiseleistung erneuerbarer Stromerzeugung als Zielgröße für die Optimierung herangezogen werden. Dabei stellt der am Strompreis orientierte Betrieb der KWK-Anlage für den Betreiber momentan die wirtschaftlich gesehen bestmögliche Variante dar, was als wichtige Voraussetzung für die Umsetzung derartiger Steuerungssysteme anzusehen ist. Zum anderen wirkt sich die hohe Fahrplantreue äußerst positiv auf die Berechenbarkeit und damit auf die Stabilität der Stromversorgung aus, da die Stromerzeugung der KWK-Anlage unter Einsatz des vorgestellten Steuerungsalgorithmus sehr genau vorhergesagt werden kann.

Ein weiterer Aspekt, der die Akzeptanz derartiger Steuerungen unterstützen sowie deren Implementierung vereinfachen soll, ist die Anbindung der KWK-Anlagen über das Internet. In dieser Form entsteht an den Anlagen vor Ort einzig ein überschaubares Maß an Programmieraufwand, in dem die Web-APIs zur Kommunikation mit dem Server und die Übertragung des optimierten Fahrplans auf das KWK-Gerät eingerichtet werden müssen. Hier ist es von Vorteil, wenn die Anlagen bereits mit einem Leitsystem oder einer zentralen Leitstelle, z.B. im Rahmen der Fehlermeldung, verbunden sind. Die kostspielige Installation von Hardwarekomponenten vor Ort, wie die Installation von zusätzlichen Sensoren oder Steuerboxen, sind dagegen nicht erforderlich.

Vor diesem Hintergrund wird angestrebt, weitere KWK-Anlagen an den Steuerungsalgorithmus anzubinden und diese zukünftig nicht mehr wärmegeführt, sondern wie vom Energiesystem gefordert am Strombedarf orientiert zu betreiben.

6 Referenzen

- [1] Haase, P., Thomas, B.: „Bedarfsgerechte Steuerung dezentraler Energiesysteme am Beispiel der Kraft-Wärme-Kopplung“, Tagungsband 17. Symposium Energieinnovation, 16.-18.02.2022, Graz/Austria

- [2] 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
- [3] Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr. 37, ausgegeben zu Bonn am 13. August 2020, „Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (Kohleausstiegsgesetz)“
- [4] Bundesgesetzblatt Jahrgang 2022 Teil I Nr. 54, ausgegeben zu Bonn am 23. Dezember 2022, „Gesetz zur Einführung einer Strompreisbremse und zur Änderung weiterer energierechtlicher Bestimmungen“
- [5] Majic, L., Krzelj, I., Delimar, M.: “Optimal scheduling of a CHP system with energy storage”, 36th International Convention on Information & Communication Technology Electronics & Microelectronics (MIPRO), Croatia; 2013
- [6] Wille-Hausmann B, Erge T, Wittwer C. Decentralised optimisation of cogeneration in virtual power plants. Solar Energy 2010;84(4):604–11
- [7] Yang, Z., Pu, Y., Liu, H., Ni, M.: „Optimal home energy management strategy considering integrated demand response“, 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2020
- [8] Wolfrum, P., Kautz, M., Schäfer, J.“ „Smart Operation of CHP Units“, IFAC Proceedings Volume 45(21), pp. 61-66, 2012
- [9] Elsidio, C., Bischì, A., Silva, P., Martelli, E.: “Two-stage MINLP algorithm for the optimal synthesis and design of networks of CHP units”, Energy, Elsevier, Volume 121, pp. 403–426, 2017
- [10] 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, Elsevier, Volume 208, pp. 1468–1486, 2017
- [11] Wehmhörnèr, U.: “Multikriterielle Regelung mit temperaturbasierter Speicherzustandsbestimmung für Mini-KWK-Anlagen”, Dissertation, Techn. Universität München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2012
- [12] De Lorenzi, A., Gambarotta, A., Morini, M., Saletti, C.: “Robust control of a cogeneration plant supplying a district heating system to enable grid flexibility”, 100RES 2020 – Applied Energy Symposium (ICAIE), E3S Web Conf., Volume 238, 2021
- [13] Fesefeldt, M., Capezzali, M., Bozorg, M., Karjalainen, R.: “Impact of Heat Pump and Cogeneration Integration on Power Distribution Grids Based on Transition Scenarios for Heating in Urban Areas”, Sustainability, MDPI, Volume 15(6), 2023
- [14] Li, L., He, D., Jin, J., Yu, B., Gao, X.: “Multi-Objective Load Dispatch Control of Biomass Heat and Power Cogeneration Based on Economic Model Predictive Control”, Energies, MDPI, Volume 14(3), 762, 2021
- [15] Asadzadeh, S.M., Andersen, N.A.: “A predictive dynamic model of a smart cogeneration plant fuelled with fast pyrolysis bio-oil“, JournalJournal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Volume 10(4), 2022
- [16] 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, Elsevier, Volume 114, pp. 1487-1497, 2017