

Konzeptentwicklung zur bedarfsgerechteren Strom- und Wärmekopplung von Abfallheizkraftwerken unter Einbindung von verschiedenen Speichertechnologien

Michael Nolte und Patrick Lagodny

1.	Technische Grundlagen.....	406
2.	Konzeptaufbau und Randbedingungen	408
3.	Fahrweise des Speichers	410
4.	Wirtschaftlichkeit und optimale Speichergröße	415
5.	Zusammenfassung und Ausblick	417
6.	Literatur.....	418

Die Energieversorgung in Deutschland hat aufgrund der Energiewende und dem damit verbundenen kontinuierlichen Ausbau der Energiegewinnung aus regenerierbaren Quellen (vor allem aus Wind und Sonne) in den letzten Jahren erheblich an Komplexität zugenommen. Die wesentlichen Auswirkungen sind sinkende Strompreise an der Börse sowie die Forderung nach einer hohen Flexibilität bei der Erzeugung und Lieferung von Energie in Form von Strom und Wärme. Denn zu Spitzenbedarfszeiten müssen von Kraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) innerhalb kurzer Zeit bzw. im Extremfall sogar gleichzeitig sowohl hohe Wärme- als auch Stromleistungen bereitgestellt werden, wenn erneuerbare Energien wie Sonne und Wind aufgrund vorherrschender Witterungsbedingungen temporär nicht zur Verfügung stehen. Die Möglichkeit einer gleichzeitig hohen Wärme- und Stromerzeugung ist jedoch mit einer konventionellen Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) nicht gegeben. Daher müssen KWK-Anlagen bei gleichzeitig anfallenden Spitzenbedarfszeiten für Wärme und Strom aufgrund von Wärmebereitstellungspflichten in der Regel vermehrt Wärme bereitstellen und zugleich auf Stromeinkünfte verzichten.

Im umgekehrten Fall müssen Kraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung innerhalb kurzer Zeit zwar weiterhin hohe Wärme- aber keine Stromleistungen bereitstellen, wenn ein plötzliches Überangebot an erneuerbaren Energien wie Sonne und Wind aufgrund vorherrschender Witterungsbedingungen temporär zur Verfügung steht. Die Möglichkeit einer ausschließlichen Wärmeerzeugung ohne parallele Stromerzeugung ist jedoch mit einer konventionellen Kraft-Wärme-Kopplung ebenfalls nicht gegeben. Daher müssen KWK-Anlagen bei Spitzenbedarfszeiten für Wärme und gleichzeitig fehlendem Strombedarf aufgrund von Wärmebereitstellungspflichten in der Regel trotzdem Strom erzeugen und ins öffentliche Stromnetz einspeisen, obwohl dieser gar

nicht benötigt wird. Dieser Strom wird auch als sogenannter Zwangsstrom bezeichnet. Beide Extremfälle, d.h. sowohl ein plötzliches Unterangebot als auch Überangebot an erneuerbarer Energie schränkt den Betrieb von KWK-Anlagen deutlich ein und erfordert somit eine hohe Betriebsflexibilität.

Eine solche Betriebsflexibilität ist jedoch für Abfallverbrennungsanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung, deren Entsorgungsaufgabe im Vordergrund steht, generell nicht realisierbar. Um trotzdem eine bedarfsgerechte und zugleich kostenoptimierte Strom- und Wärmeabgabe zu erreichen, kann der Einsatz von Wärmespeichern oder auch Stromspeichern helfen. Der Einsatz von speziellen Speichern bietet die Möglichkeit, die Wärme- und Strombereitstellung einer Abfallverbrennungsanlage zeitlich zu entkoppeln und die Flexibilität einer Abfallverbrennungsanlage mit KWK-Kopplung zu steigern. Dadurch kann trotz einer konstant hohen Auslastung einer Abfallverbrennungsanlage aufgrund eines Entsorgungsauftrages zusätzlich eine deutlich erhöhte Wirtschaftlichkeit erzielt werden. Gleiches gilt auch für vergleichbare Anlagentypen mit KWK-Kopplung wie beispielsweise Biomasseheizkraftwerke.

1. Technische Grundlagen

Eine thermische Abfallbehandlungsanlage für Siedlungsabfälle dient in erster Linie einer sicheren und zugleich umweltgerechten Entsorgung von kommunal anfallendem Hausabfall und hausabfallähnlichem Gewerbeabfall. Durch die Nutzung der bei der

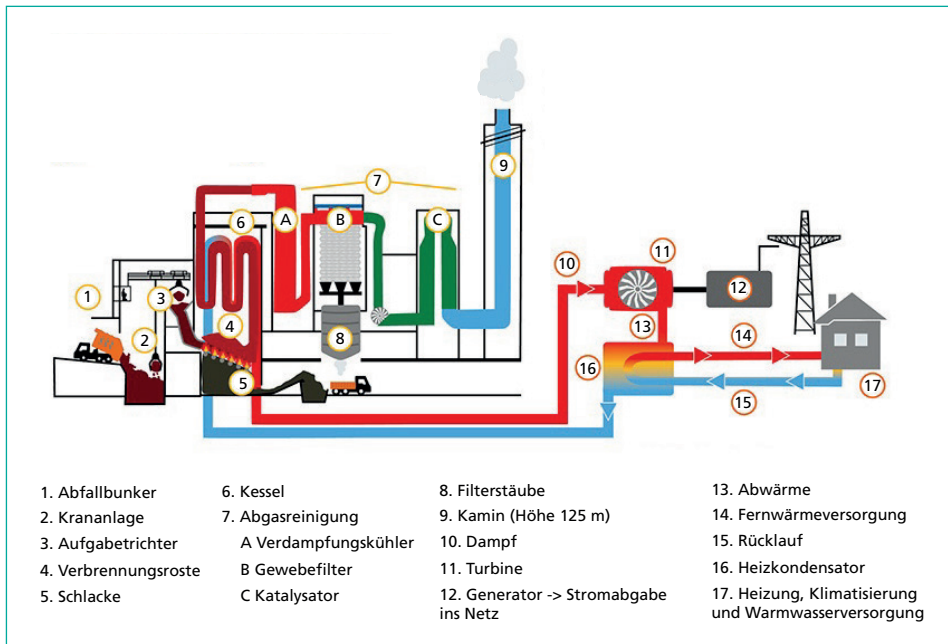


Bild 1: Schematische Darstellung eines Abfallheizkraftwerkes mit KWK zur Nah-/Fernwärmeversorgung

Quelle: N.N.: Saubere Energie aus Restabfall – Wie Müll zu Strom und Fernwärme wird. In: TWL-Kurier, Ludwigshafen, April, 2017.

Abfallverbrennung entstehenden und auf den Wasser-Dampf-Kreislauf des Kessels übertragenen thermischen Energie entsteht durch Energieumwandlung in einem der Turbine nachgeschalteten Generator als zusätzliches Nebenprodukt Strom. Bei gleichzeitiger Realisierung einer Kraft-Wärme-Kopplung kann aus der Turbine außerdem auch Wärme als Nebenprodukt ausgekoppelt werden. Um umliegende Firmen mit Wärme in Form von Prozessdampf und/oder Heißwasser zu versorgen, liegen Abfallheizkraftwerke daher sehr häufig in Gewerbe- oder kleineren Industriegebieten. Bild 1 zeigt den schematischen Aufbau eines solchen Abfallheizkraftwerkes mit Kraft-Wärme-Kopplung zur Nah- oder Fernwärmeversorgung.

Die bei der thermischen Abfallbehandlungsanlage anfallenden Nebenprodukte Strom und Wärme bedingen sich jedoch gegenseitig, so dass nur mit Hilfe von speziellen Wärme- oder Stromspeichern eine zeitliche Entkopplung der Wärme- und Strombereitstellung möglich ist. Umfangreiche STEAG-interne Untersuchungen in [2] haben ergeben, dass bei den Wärmespeichern vor allem sensible Warmwasserspeicher (Bild 2) und bei Stromspeichern vor allem elektrochemische Speicher (Bild 3) für einen Einsatz in Abfallheizkraftwerken geeignet sind.

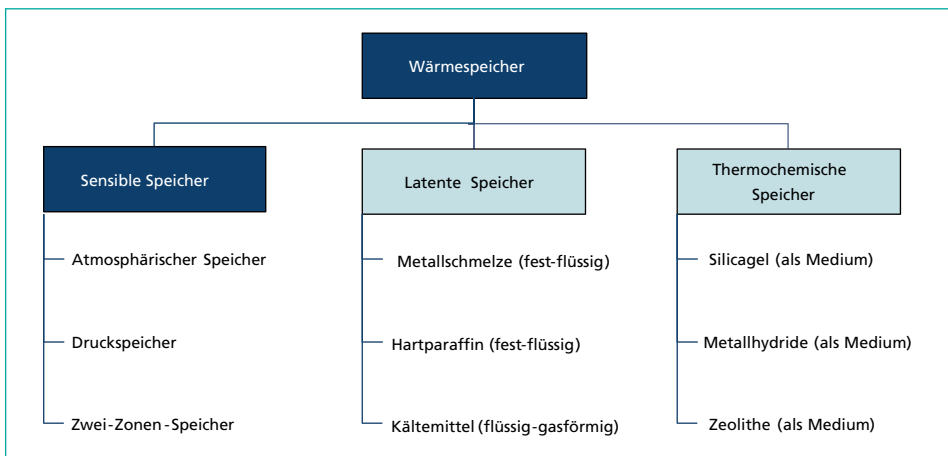


Bild 2: Übersicht über Wärmespeicher

Zu den sensiblen Warmwasserspeichern zählen atmosphärische Warmwasserspeicher, Druckspeicher sowie Zwei-Zonen-Speicher. Den größten Vorteil dieser Technologie bietet das eingesetzte Wärmefördermedium Wasser, da es dasselbe Medium ist, das auch in Fernwärmenetzen eingesetzt wird. Außerdem weist das Wärmefördermedium Wasser eine hohe Wärmekapazität auf und erfordert keine besonderen Zusatzanforderungen wie beispielsweise Flüssigsalzspeicher. Es ist sowohl aus toxikologischer als auch aus umwelttechnischer Sicht als ungefährlich zu bewerten. Die Technologie der sensiblen Warmwasserspeicher gilt zudem als sehr ausgereift und ist daher besonders gut für einen Einsatz in Fernwärmenetzen geeignet. Die folgenden Betrachtungen beruhen im Wesentlichen auf der Nutzung von zwei-Zonen-Speichern, wobei prinzipiell auch andere sensible Warmwasserspeicher möglich wären.

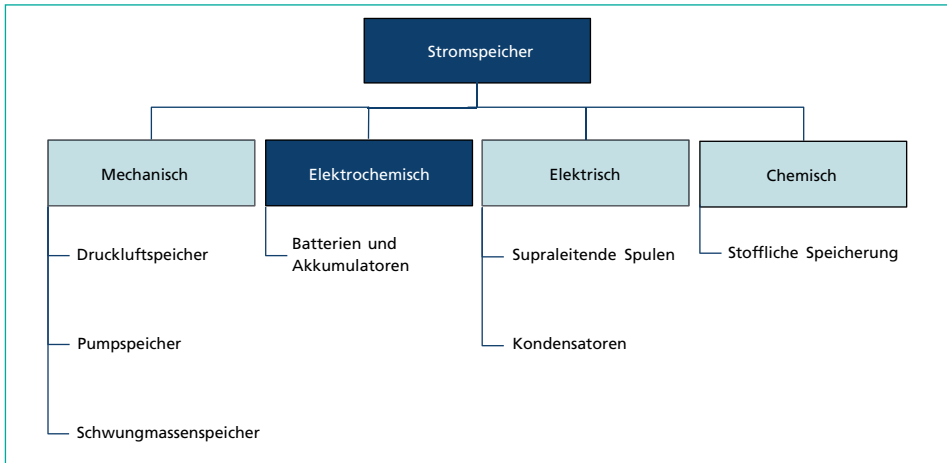


Bild 3: Übersicht über Stromspeicher

Zu den elektrochemischen Stromspeichern hingegen zählen Batterien und Akkumulatoren wie beispielsweise Lithium-Ionen-Batterien. Die größten Vorteile dieser Technologie sind in der schnellen Verfügbarkeit und den verhältnismäßig geringen Umwandlungsverlusten zu sehen. Aufgrund der bereits umfangreich gesammelten Erfahrungen der STEAG GmbH im Bereich der Batteriespeicher zur Bereitstellung von Primärregelenergie zwecks Sicherung der Netzstabilität und der Systemsicherheit in [1, 3] (Einsatz von 6 x 15 MW Batteriespeicher, verteilt auf sechs Kraftwerksstandorte in Deutschland) werden elektrochemische Stromspeicher in Form von Lithium-Ionen-Batterien auch als besonders gut geeignete Stromspeicher für Anwendungen in Abfallheizkraftwerken gesehen. Andersartige Stromspeicher wie beispielsweise Schwungmassenspeicher oder supraleitende Spulen sind aufgrund des geringen Wirkungsgrades wie auch der limitierten Speicherdauer nicht geeignet für eine Anwendung als Stromspeicher im Kraftwerksbereich.

2. Konzeptaufbau und Randbedingungen

Das hier dargestellte Konzept einer bedarfsgerechteren Strom- und Wärmeauskopplung von Abfallheizkraftwerken basiert auf einer weitgehend zeitlichen Entkopplung von Wärme- und Strombereitstellung mit Hilfe von Speichertechnologien. Je nach Situation der erzielbaren Strompreise am EEX-Markt (European Energy Exchange Market) soll durch Nutzung der installierten Speichertechnologie eine kostenoptimierte Strom einspeisung ins öffentliche Stromnetz erfolgen, ohne dabei die Wärmeanforderungen seitens des Nah-/Fernwärmenetzes negativ zu beeinflussen. Folglich soll einerseits bei unwirtschaftlichen Strompreisen vermehrt der im Abfallheizkraftwerk integrierte Speicher beladen werden, um dadurch weniger Strom ins öffentliche Stromnetz einzuspeisen. Andererseits soll bei wirtschaftlich lukrativen Strompreisen am EEX-Markt der im Abfallheizkraftwerk integrierte Speicher vermehrt entladen werden, um dadurch mehr Strom ins öffentliche Stromnetz einzuspeisen. Beide Varianten sollen zu wirtschaftlich attraktiven Mehrerlösen des Abfallheizkraftwerkes führen.

Zwecks Konzeptrealisierung sind ein Wärme- oder Stromspeicher sowie gleichzeitig eine kosten- und bedarfsoptimierte Fahrweise des Speichers notwendig. Um eine solche kosten- und bedarfsgerechte Speicherfahrweise zu ermöglichen, wurde ein spezielles Excel-basiertes Berechnungstool entwickelt, das relevante Anlagenparameter, Strom- und Wärmepreise wie auch standortabhängige Randbedingungen für die Wärmeversorgung berücksichtigt. Von besonderer Bedeutung sind dabei vor allem Betriebsdaten zum Wasser-Dampf-Kreislauf und zur Turbine des zu betrachtenden Abfallheizkraftwerkes wie beispielsweise:

- Wasser-Dampf-Parameter (Druck und Temperatur),
- Turbinenart (Entnahmekondensations- oder Gegendruckturbine),
- Stufenanzahl der Turbine (Hoch-, Mittel-, Niederdruckteile),
- Anzapfstellen zur Wärmeauskopplung und
- erforderlicher Mindestmassenstrom für die letzte Turbinenstufe.

Sollten möglicherweise einzelne für das Modell relevante Betriebsparameter fehlen oder nicht bekannt sein, so können diese mit Hilfe der von STEAG entwickelten Simulationssoftware Epsilon® Professional, einem universellen Planungswerkzeug für thermodynamische Kreislaufprozesse, durch schematische Abbildung der Anlage ermittelt werden. Gleichzeitig kann die Simulationssoftware auch zum Plausibilitätscheck einzelner übermittelter Parameter dienen (z.B. Verhältnis Stromerzeugung zu Wärmeauskopplung).

Weitere relevante Parameter, die das Berechnungstool berücksichtigt, sind Strom- und Wärmepreise. Um eine realitätsgetreue Abbildung der Fahrweise des Speichers bezüglich des Be- und Entladevorganges generieren zu können, werden reale Strombörsenpreise der Strombörse EEX zu Grunde gelegt. Die Vergütung der Wärme hingegen ist über die Stromverlustkennziffer definiert, was bedeutet, dass der ausgekoppelte Teil der Wärme entsprechend dem Stromanteil vergütet wird, der durch Wärmeauskopplung nicht erzeugt werden kann. Die Erlöse durch die Wärmeauskopplung gleichen somit die Stromerlöse aus, die durch Wärmeauskopplung verloren gehen. Negative Strompreise hingegen werden im Modell gleich null gesetzt.

Neben den relevanten Anlagenparametern sowie den Strom- und Wärmepreisen werden außerdem folgende standortabhängige Randbedingungen für die Wärmeversorgung des Nah-/Fernwärmenetzes im Berechnungstool berücksichtigt:

- Vor- und Rücklaufparameter des Nah-/Fernwärmenetzes (Temperatur) und
- Art der Wärmeversorgungspflichten in Abhängigkeit der Jahreszeit.

Da das Abfallheizkraftwerk aufgrund seiner sehr hohen Volllastbetriebsstundenzahl als Grundlastwärmeversorger angesehen wird, wird die zu liefernde Wärmemenge im Berechnungstool bisher konstant in Abhängigkeit der Jahreszeit angesetzt.

3. Fahrweise des Speichers

Ausgehend von den zuvor beschriebenen Randbedingungen wird für die Bestimmung einer kosten- und bedarfsoptimierten Fahrweise eines Wärme- wie auch Stromspeichers unter Berücksichtigung der folgenden Aspekte ein sogenannter Grenzpreis im Berechnungsprogramm ermittelt:

- Strompreis (EEX-Börsenpreis),
- maximale Speicherbeladungsleistung und -entladungsleistung sowie
- Wärmeanforderung seitens des Nah-/Fernwärmenetzes.

Die maximale Speicherbeladungsleistung bzw. -entladeleistung sowie die Wärmeanforderung seitens des Nah-/Fernwärmenetzes sind dabei jeweils Konstanten, die von der Größe des integrierten Speichers bzw. von der Jahreszeit abhängen. Lediglich der Strompreis, d.h. der EEX-Börsenpreis ist eine fluktuierende Größe im Berechnungstool. Unter Berücksichtigung bereits vergangener EEX-Börsenpreise wird für den sogenannten Grenzpreis daher ein fester oder ggf. auch dynamischer Mittelwert über einen gewissen Zeitraum angesetzt und um einen spezifischen Korrekturfaktor erweitert, der speicherspezifische Größen berücksichtigt. Dazu zählen beispielsweise die Be- und Entladungszeiten bzw. die Be- und Entladungskapazitäten, die durch

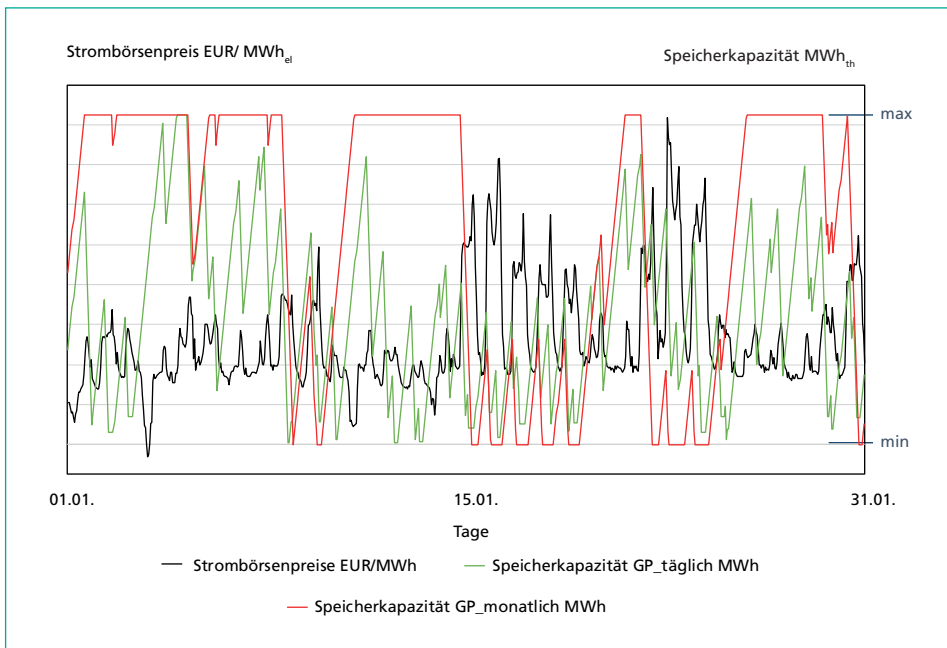


Bild 4: Darstellung der mit Hilfe des Berechnungsprogramms simulierten Speicherzyklen eines Wärmespeichers in Abhängigkeit der Grenzpreisberechnung und der Annahme einer konstanten Wärmeanforderung seitens des Nah-/Fernwärmenetzes beispielhaft für den Wintermonat Januar 2017

spezifische Wärmeanforderung seitens des Betreibers des Nah-/Fernwärmenetzes bestimmt werden. Der rechnerisch ermittelte Grenzpreis im Berechnungsprogramm bestimmt jeweils den Zeitpunkt des Auslösens eines Be- oder Entladungsvorganges des Speichers.

In Bild 4 sind die mit Hilfe des Berechnungsprogramms simulierten Speicherzyklen eines Wärmespeichers in Abhängigkeit der Grenzpreisberechnung und der Annahme einer konstanten Wärmeanforderung seitens des Nah-/Fernwärmenetzes beispielhaft für einen Wintermonat dargestellt. Die rote Kurve markiert dabei die Speicherzyklen auf Basis eines Grenzpreises, der sich anhand eines dynamischen Mittelwertes der EEX-Strombörsenpreise aus dem vergangenen letzten Monat ergibt. Die grüne Kurve hingegen markiert die Speicherzyklen auf Basis eines Grenzpreises, der sich anhand eines dynamischen Mittelwertes der EEX-Strombörsenpreise aus dem vergangenen letzten Tag ergibt. Zusätzlich zeigt die schwarze Kurve die realen Strompreise der EEX-Strombörse.

Danach ist deutlich zu erkennen, dass die Ermittlung des Grenzpreises einen wesentlichen Einfluss auf die Anzahl und Dauer einzelner Speicherzyklen hat. Je kürzer der Berücksichtigungszeitraum für die Ermittlung des Grenzpreises ist, desto häufiger findet eine Be- und Entladung des integrierten Wärmespeichers statt, d.h. desto besser wird die Ausnutzung des berücksichtigten Wärmespeichers. Dadurch können auch kleinere witterungsbedingte Schwankungen des EEX-Börsenpreises berücksichtigt werden, die zu einem häufigeren Einsatz des Wärmespeichers führen und somit die Wirtschaftlichkeit bei einer Konzeptrealisierung verbessern.

Ähnlich verhält es sich beim Einsatz eines Stromspeichers. Bild 5 zeigt analog zum vorherigen Bild 4 die mit Hilfe des Berechnungsprogramms simulierten Speicherzyklen eines Stromspeichers in Abhängigkeit der Grenzpreisberechnung und der Annahme einer konstanten Wärmeanforderung seitens des Nah-/Fernwärmenetzes beispielhaft für einen Wintermonat. Dabei wurde anhand der Stromverlustkennziffer die eingesetzte Stromspeichergröße so groß gewählt, dass die Speichergröße bezüglich der maximalen Energieaufnahmemenge der Größe des vorherigen Wärmespeichers entspricht. Die rote bzw. blaue Kurve markiert somit wieder die Speicherzyklen auf Basis eines Grenzpreises, der sich anhand eines dynamischen Mittelwertes der EEX-Strombörsenpreise aus dem vergangenen letzten Monat (rot) bzw. aus dem vergangenen letzten Tag (blau) ergibt. Zusätzlich zeigt die schwarze Kurve wieder die realen Strompreise der EEX-Strombörse.

Danach ist deutlich zu erkennen, dass die Ermittlung des Grenzpreises auch bei einem Stromspeicher Einfluss auf die Anzahl und vor allem die Dauer einzelner Speicherzyklen hat. Die Unterschiede sind jedoch im Vergleich zu einem Wärmespeicher (Bild 4) verhältnismäßig gering. Trotzdem gilt auch bei einem Stromspeicher, dass bei einem kürzeren Berücksichtigungszeitraum für die Ermittlung des Grenzpreises eine etwas bessere Ausnutzung des berücksichtigten Stromspeichers erfolgt.

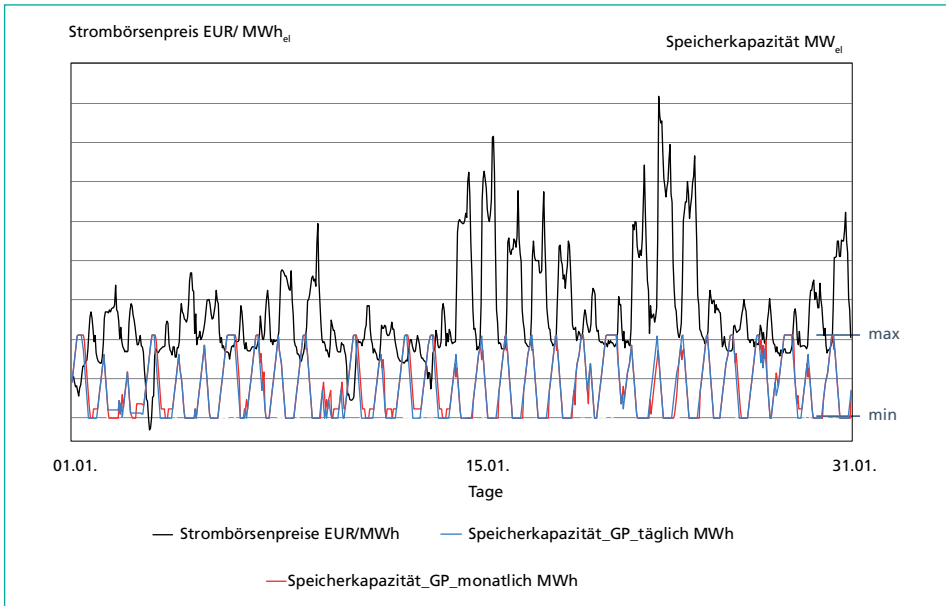


Bild 5: Darstellung der mit Hilfe des Berechnungsprogramms simulierten Speicherzyklen eines Stromspeichers in Abhängigkeit der Grenzpreisberechnung und der Annahme einer konstanten Wärmeanforderung seitens des Nah-/Fernwärmenetzes sowie eines Zusatztrafos für die Stromauskopplung beispielhaft für den Wintermonat Januar 2017

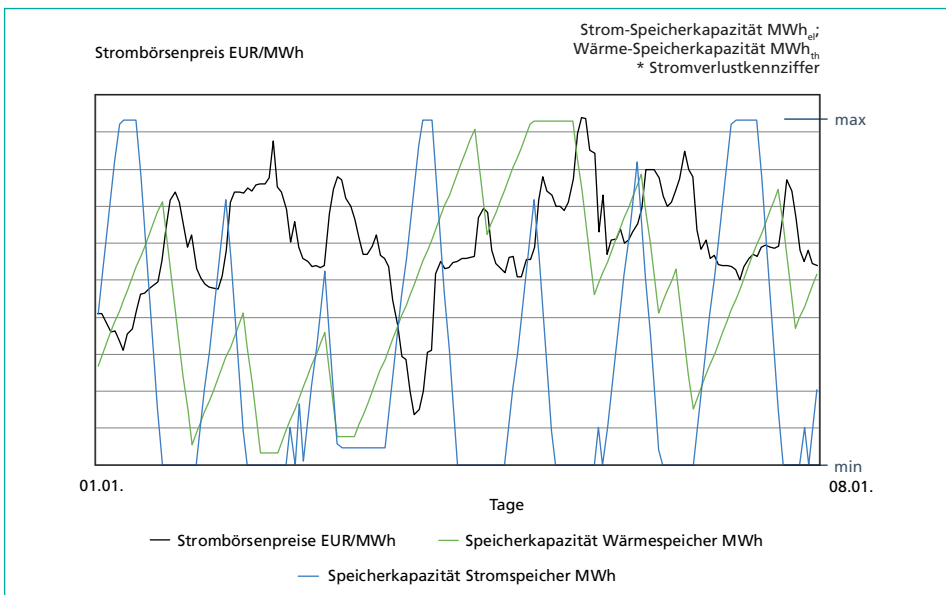


Bild 6: Darstellung der mit Hilfe des Berechnungsprogramms simulierten Speicherzyklen eines Wärmespeichers im Vergleich zu einem Stromspeicher in Abhängigkeit der Grenzpreisberechnung und der Annahme einer konstanten Wärmeanforderung seitens des Nah-/Fernwärmenetzes beispielhaft für den Wintermonat Januar 2017

Das Bild 6 zeigt schließlich einen direkten Vergleich der mit Hilfe des Berechnungsprogramms simulierten Speicherbeladungszyklen und -entladungszyklen zwischen einem Wärmespeicher (grüne Kurve) und einem Stromspeicher (blaue Kurve) basierend auf gleiche maximale Energieaufnahmemengen von Wärme- und Stromspeicher. Zwecks besserer Vergleichbarkeit der Speicherzyklen wurde die Kurve des Wärmespeichers zusätzlich noch mit der Stromverlustkennziffer multipliziert und die Darstellung insgesamt zeitlich auf einen Zeitraum von sieben Tagen begrenzt.

Danach sind deutliche Unterschiede in der Simulation der Be- und Entladungszyklen von Strom- und Wärmespeichern erkennbar. Im Vergleich zum Wärmespeicher findet beim Stromspeicher eine deutlich bessere Ausnutzung des Speichers statt, d.h. unter Berücksichtigung des gleichen Zeitraumes für die Grenzpreisermittlung findet bei einem Stromspeicher deutlich häufiger eine Be- und Entladung statt als bei einem Wärmespeicher. Dadurch können bei einem Stromspeicher auch höhere Mehrerlösen durch das integrierte Speichersystem erzielt werden als bei einem Wärmespeicher. Die Hauptursache dafür liegt in der Berücksichtigung von speicherspezifischen Kenngrößen bei der Berechnung des Grenzpreises. So sind beispielsweise die Be- und Entladungszyklen von Stromspeichern deutlich kürzer zu sehen als die von Wärmespeichern, wodurch Stromspeicher deutlich flexibler und häufiger genutzt werden können.

Dieser Aspekt wird auch in dem folgenden Bild 7 deutlich, in der die vom Berechnungsprogramm bestimmten Auslösungsvorgänge von Be- und Entladungen eines Wärme- und Stromspeichers in Abhängigkeit vom Strombörsenpreis und Grenzpreis

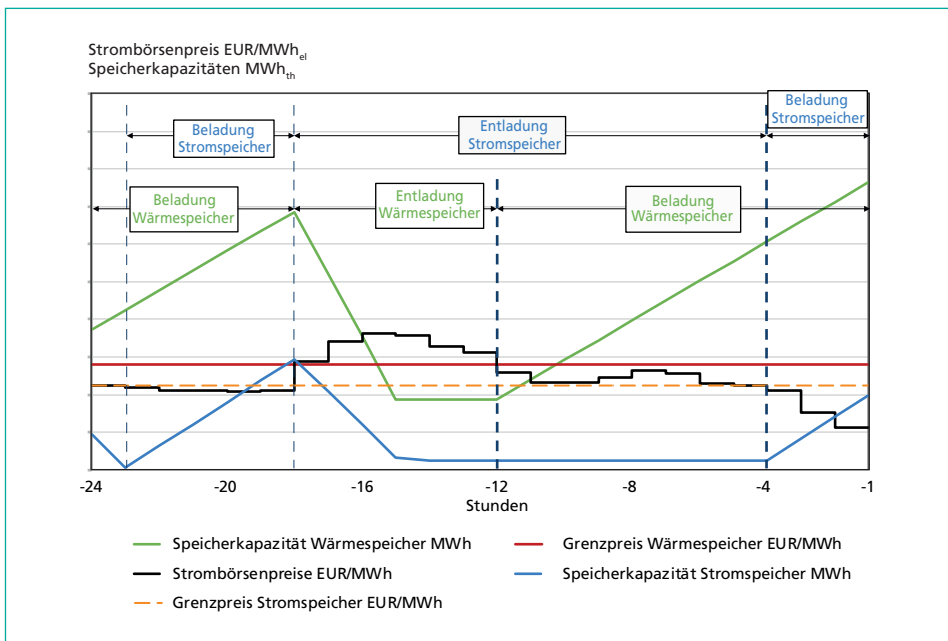


Bild 7: Beispielhafte Darstellung der vom Berechnungsprogramm bestimmten Auslösungsvorgänge einer Be- und Entladung eines Wärme- und Stromspeichers in Abhängigkeit vom Strombörsenpreis (hier: Stundenmittelwerte) und Grenzpreis

dargestellt sind. Die schwarze Kurve zeigt dabei erneut die EEX-Strompreise als feste Stundenmittelwerte der vergangenen 24 Stunden, d.h. der Zeitpunkt Null markiert den momentanen Zeitpunkt. Die grüne Kurve markiert die Speicherzyklen eines Wärmespeichers, die blaue Kurve die Speicherzyklen eines Stromspeichers. Beide Kurven basieren auf einem separat ermittelten Grenzpreis (rot durchgezogene Linie für Wärmespeicher; orange gestrichelte Linie für Stromspeicher), der sich mit Hilfe des Berechnungsprogramms anhand eines dynamischen Mittelwertes der EEX-Börsenpreise aus dem vergangenen Tag ergibt.

Danach wird vom Berechnungsprogramm allgemein ein Beladungsvorgang ausgelöst, wenn der EEX-Börsenpreis den Grenzpreis schneidet und unter den Grenzpreis fällt (Wärmespeicher: vor etwa 12 h; Stromspeicher: vor etwa 4 h). Der Beladungsvorgang dauert dann solange an, solange der Strombörsenpreis unterhalb des Grenzpreises bleibt oder der Speicher vollständig geladen ist. Durch das Beladen des Speichers ergibt sich die Möglichkeit, bei unwirtschaftlichen Strompreisen weniger Strom ins öffentliche Stromnetz einzuspeisen, während gleichzeitig die Wärmeanforderungen seitens des Nah-/Fernwärmenetzes weiterhin vollständig erfüllt werden. Ein Entladungsvorgang hingegen wird ausgelöst, wenn der EEX-Börsenpreis den Grenzpreis schneidet und über den Grenzpreis ansteigt (Wärme-/Stromspeicher: vor etwa 18 h). Der Entladungsvorgang dauert dann wieder solange an, solange der Strombörsenpreis oberhalb des Grenzpreises bleibt oder der Speicher bis zu einem festgelegten Minimum entladen ist. Durch das Entladen des Speichers ergibt sich die Möglichkeit, bei wirtschaftlichen attraktiven Strompreisen mehr Strom ins öffentliche Stromnetz einzuspeisen, während gleichzeitig die Wärmeanforderungen seitens des Nah-/Fernwärmenetzes weiterhin vollständig erfüllt werden. Sowohl der Wärmespeicher wie auch der Stromspeicher werden jedoch zum Schutz des Speichers nicht vollständig entladen. Der Wärmespeicher wird nicht vollständig entladen, damit die Grenzschicht zwischen der warmen und der kalten Zone innerhalb des Speichers erhalten bleibt. Der Stromspeicher wiederum wird nicht vollständig entladen, damit die Spannung nicht unter die Entladeschlussspannung (Tiefentladung) absinkt. Beide Varianten würden den jeweiligen Speicher erheblich schädigen, indem Wirkungsgrad und Lebensdauer deutlich sinken.

Wie die bisherigen Darstellungen belegen, weisen Stromspeicher deutliche Vorteile in der möglichen Fahrweise eines Speichers auf. Unter der Annahme, dass gleiche maximale Energieaufnahmemengen von Wärme- und Stromspeicher vorliegen, können Stromspeicher deutlich flexibler betrieben und damit deutlich besser ausgelastet werden, was insgesamt höhere erzielbare Erlöse ermöglichen würde. Die prinzipielle Fahrweise eines Wärme- wie auch Stromspeichers kann dabei grundsätzlich mit dem Fahrplan eines konventionellen Kohlekraftwerkes bzw. eines virtuellen Kraftwerkes verglichen werden. Danach werden einzelne Kraftwerk vom sogenannten Lastverteiler anhand von Bedarfskurven mit Einsatzzeiten und -leistungen in Form eines Fahrplanes eingesetzt. Diese Fahrpläne berücksichtigen in der Regel auch die Strompreise aus dem *Day-Ahead-Markt* und dem *Intra-Day-Markt* der EEX-Strombörse, die auf witterungsabhängige Prognosen zukünftiger Strompreise beruhen. Obwohl bisher nur vergangene Strompreise der EEX-Strombörse im Berechnungsprogramm berücksichtigt

wurden, können prinzipiell auch Strompreisprognosen aus dem *Day-Ahead-Markt* bzw. aus dem *Intra-Day-Markt* der EEX-Strombörse integriert werden. Dieses stellt ein Optimierungspotenzial für das Berechnungsprogramm dar, um die Ergebnisse einer bedarfsgerechteren Strom- und Wärmeauskopplung von Abfallheizkraftwerken noch weiter zu verbessern.

4. Wirtschaftlichkeit und optimale Speichergröße

Bei der Ermittlung der Wirtschaftlichkeit dieses Konzeptansatzes zur bedarfsgerechteren Strom- und Wärmeauskopplung von Abfallheizkraftwerken unter Einbindung von verschiedenen Speichertechnologien wurde die Annuitätsmethode unter projekt-typischen Randbedingungen zu Grunde gelegt. Die Annuität pro Periode beschreibt dabei den Anteil, der jährlich mindestens erwirtschaftet werden muss, um eine Investition inklusive der gewünschten Investitionsverzinsung decken zu können. Grundvoraussetzung für eine Wirtschaftlichkeit sind jedoch erkennbare positive Effekte auf der Erlösseite. Folglich wurde anhand der zuvor dargestellten Betriebsfahrweise des Speichers ermittelt, in wie fern die Höhe der Speicherkapazität einen Einfluss auf die erzielbaren Mehrerlöse hat. In Bild 8 sind daher zunächst die erzielbaren Mehrerlöse in Abhängigkeit zur Größe eines Wärmespeichers dargestellt. Zusätzlich sind die zu tätigen Investitionen in Form der Annuitäten mit wie auch ohne Förderung durch das Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWKG) dargestellt.

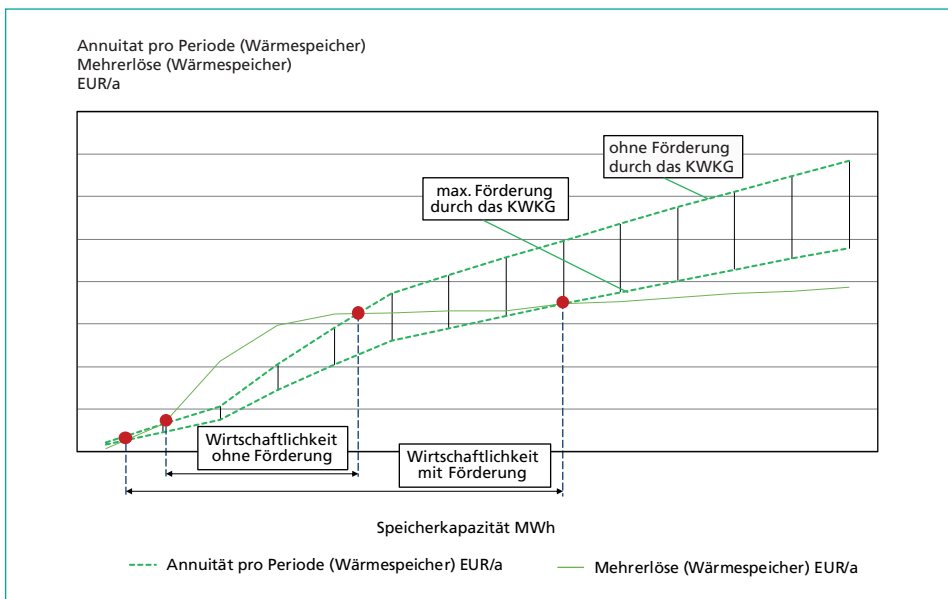


Bild 8: Erzielbare Erlöse beim Einsatz unterschiedlicher Speichergrößen/Speicherkapazitäten für einen Wärmespeicher im Vergleich zu den Annuitäten sowohl mit als auch ohne Förderungen durch das KWKG-Gesetz

Danach ist deutlich zu erkennen, dass es für einen Wärmespeicher Speichergrößen bzw. Speicherkapazitäten gibt, bei denen die erzielbaren Mehrerlöse aufgrund der zuvor dargestellten Fahrweise des Wärmespeichers und den gewählten Randbedingungen über der Annuität liegen. Folglich kann für einen Wärmespeicher eine Wirtschaftlichkeit dieses Konzeptansatzes in Abhängigkeit der gewählten Randbedingungen dargestellt werden. Aus dem Bild ist auch zu entnehmen, dass für eine wirtschaftliche Darstellbarkeit dieses Konzeptansatzes vermutlich nicht einmal eine Förderung nach dem KWK-Gesetz erforderlich wäre. Eine zusätzliche KWK-Förderung würde die Wirtschaftlichkeit allerdings weiter verbessern und die Größe des einsetzbaren Wärmespeichers deutlich flexibler gestalten. Da die erzielbaren Mehrerlöse mit linear zunehmender Speichergröße jedoch nur degressiv zunehmen, ist die Wirtschaftlichkeit bezüglich der einsetzbaren Speichergröße bzw. -kapazität limitiert. Ab einer bestimmten Größe des Wärmespeichers werden aufgrund der dargestellten Speicherfahrweise dieses Konzeptansatzes die zusätzlich zu erzielenden Mehrerlöse nicht mehr ausreichen, um die mit der Speichergröße ebenfalls steigenden Investitionskosten zu deckeln. Folglich gibt es für diesen Konzeptansatz auf Basis der dargestellten Betriebsfahrweise eines Wärmespeichers und den zu treffenden Randbedingungen ein Optimum bezüglich der Speichergröße bzw. -kapazität, das ebenfalls mit Hilfe des Berechnungsprogramms ermittelt werden kann. Bild 9 zeigt das ermittelte Optimum der Speichergröße bzw. -kapazität eines Wärmespeichers in Abhängigkeit von der Betriebsfahrweise eines Wärmespeichers und den zu treffenden Randbedingungen.

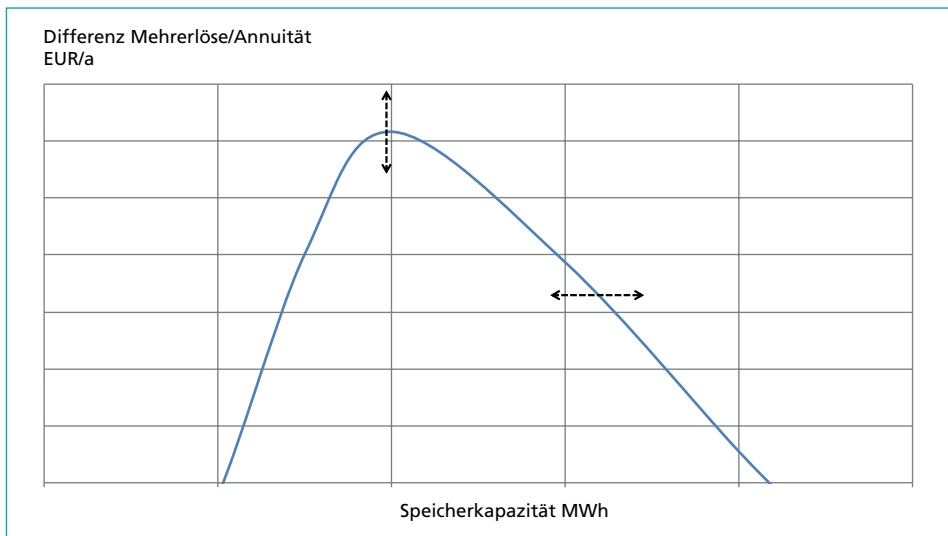


Bild 9: Ermittlung des Optimums der Speicherkapazität eines Wärmespeichers in Abhängigkeit von der Betriebsfahrweise eines Wärmespeichers und den zutreffenden Randbedingungen

Die Lage des dargestellten Optimums kann sich in Abhängigkeit der vorhandenen Prozessparameter des Abfallheizkraftwerkes und den gewählten Randbedingungen aus Kapitel 2 sowohl vertikal als auch horizontal verschieben.

Analog zum Wärmespeicher zeigt Bild 10 die erzielbaren Mehrerlöse in Abhängigkeit zur Größe eines Stromspeichers inklusive der zu tätigen Investitionen in Form der Annuitäten.

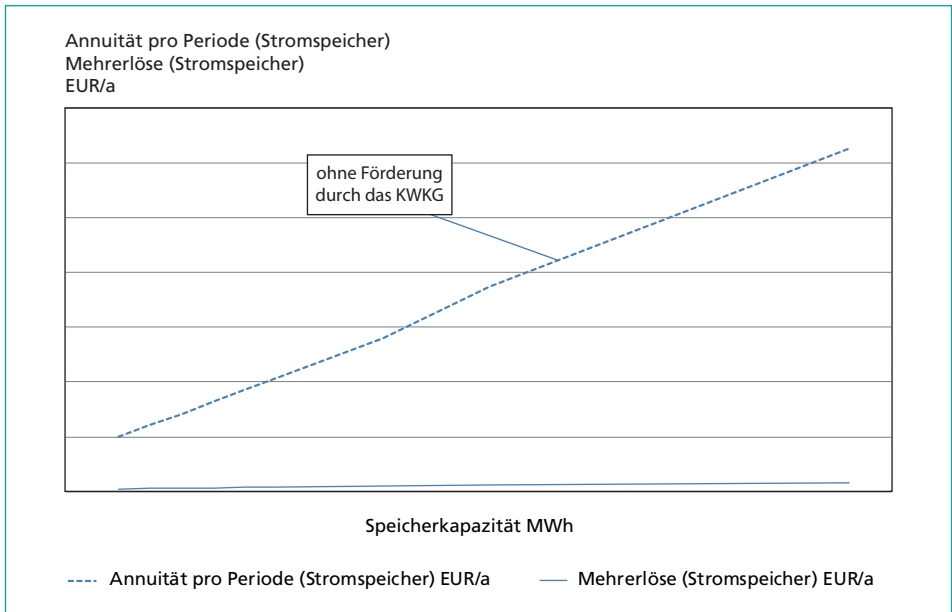


Bild 10: Erzielbare Erlöse beim Einsatz unterschiedlicher Speichergößen/Speicherkapazitäten für einen Stromspeicher im Vergleich zu den Annuitäten sowohl mit als auch ohne Förderungen durch das KWKG-Gesetz

Danach ist deutlich zu erkennen, dass es im Gegensatz zum Wärmespeicher für einen Stromspeicher hingegen keine Speichergößen bzw. Speicherkapazitäten gibt, bei denen die erzielbaren Mehrerlöse aufgrund der zuvor dargestellten Fahrweise des Stromspeichers und den gewählten Randbedingungen über der Annuität liegen. Folglich kann für einen Stromspeicher keine Wirtschaftlichkeit dieses Konzeptansatzes in Abhängigkeit der gewählten Randbedingungen dargestellt werden, obwohl die möglichen Mehrerlöse eines Stromspeichers aufgrund einer flexibleren Speicherfahrweise über denen eines Wärmespeichers liegen würden. Die Hauptgründe dafür sind vor allem in den deutlich höheren Investitionskosten und der deutlich geringeren Lebensdauer eines Stromspeichers in Form eines Batteriespeichers im Vergleich zu einem Wärmespeicher zu sehen. Die Entwicklung von Großbatteriespeichern ist somit noch nicht ausgereift genug, um mit Wärmespeichern für den dargestellten Anwendungsbereich konkurrieren zu können.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag zeigt, dass mit Hilfe des dargestellten Konzeptes eine bedarfsgerechtere Strom- und Wärmeauskopplung aus Abfallheizkraftwerken wirtschaftlich möglich ist, wenn ein Wärmespeicher sowie eine kosten- und bedarfsoptimierte Betriebsfahrweise

des Speichers kombiniert werden. Dafür wurde ein spezielles Excel-basiertes Berechnungstool entwickelt, das relevante Anlagenparameter, Strom- und Wärmepreise wie auch standortabhängige Randbedingungen für die Wärmeversorgung berücksichtigt.

Simulationen mit dem Berechnungsprogramm auf Basis realer Strompreise am EEX-Markt belegen, dass mit Hilfe eines Wärmespeichers nicht nur deutliche Mehrerlöse erzielt werden können, sondern gleichzeitig auch eine Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit der gewählten Randbedingungen darstellbar ist. Dafür wäre vermutlich nicht einmal eine Förderung nach dem KWK-Gesetz erforderlich. Gleichzeitig wäre das entwickelte Berechnungsprogramm in der Lage, anlagen- und standortspezifisch eine optimale Speichergröße für einen zu integrierenden Wärmespeicher zu ermitteln. Durchgeführte Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zeigen allerdings auch, dass Stromspeicher aufgrund zu hoher Investitionskosten und einer zu geringen Lebensdauer wirtschaftlich grundsätzlich nicht für eine derartige Anwendung geeignet sind.

Bisher basiert das Konzept mit dem eigens dafür entwickelten Berechnungsprogramm lediglich auf Simulationen unter Berücksichtigung vergangener Strompreise am EEX-Markt. Eine praktische Anwendung steht allerdings noch aus. Der nächste Schritt wäre dementsprechend eine auf dem dargestellten Berechnungsprogramm basierende Softwareentwicklung mit praktischer Umsetzung an einem realen Abfallheizkraftwerk oder einer vergleichbaren Anlage mit Kraft-Wärme-Kopplung durch Integration eines Wärmespeichers in die vorhandene Anlagentechnik und der neuen Software in das vorhandene Prozessleitsystem der Anlage. Für die anschließende Programmausführung und Fahrplangestaltung sollten dann reale Strompreise aus dem *Day-Ahead-Markt* und aus dem *Intra-Day-Markt* der EEX-Strombörse herangezogen werden. Gleichzeitig könnte mit Hilfe der zu integrierenden Berechnungssoftware auch die dafür optimale Speichergröße ermittelt werden.

6. Literatur

- [1] Karalis, C.: Speicher als Bindeglied im Optimierungsnetzwerk – Batterie-Systeme im Zusammenspiel mit erneuerbaren & konventionellen Anlagen. Innovationsforum Energiewende, Essen, 04. Mai, 2017
- [2] Lagodny, P.: Technische und wirtschaftliche Machbarkeitsanalyse zur Optimierung des Betriebs einer thermischen Abfallbehandlungsanlage durch Einsatz von Speichertechnologien. Bachelorarbeit, STEAG Energy Services GmbH, Essen/Universität Duisburg-Essen, Januar, 2018
- [3] Lehmann, D.; Deeskow, P.; Mühl, M.; Yilmaz, H.: Optimized Operation of Large Scale Battery Systems – Experiences, New Opportunities and Big Data. Electrify Europe, Wien, 19-21 June, 2018.
- [4] N.N.: Saubere Energie aus Restabfall – Wie Müll zu Strom und Fernwärme wird. In: TWL-Kurier, Ludwigshafen, April, 2017.

Ansprechpartner



Dr.-Ing. Michael Nolte

STEAG Energy Services GmbH

Projektleiter

Energy Technologies – Plant & Process Engineering

Rüttenscheider Straße 1-3

45128 Essen, Deutschland

+49 201 801 - 2854

Michael.Nolte@steag.com