

# Dynamische Simulation von Gas- und Dampfturbinenkraftwerken mit Kraft-Wärmekopplung

**Jens Hinrich Prause\*, Moritz Hübel, Dr.-Ing. Jürgen Nocke,  
Prof. Dr.-Ing. habil. Egon Hassel**

FVTR GmbH, Joachim-Jungius-Straße 9, 0049/3814059665  
jens.prause@fvtr.de, www.fvtr.de  
Universität Rostock, Albert-Einstein-Straße 2, 18057 Rostock, Deutschland

## **Kurzfassung:**

Die Stromeinspeisung konventioneller thermischer Kraftwerke muss auf die momentane Stromeinspeisung aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen reagieren. Der Wärmebedarf variiert je nach Jahreszeit, Tageszeit und äußeren Bedingungen.

Bei Kraftwerksanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung treffen diese beiden Prozesse aufeinander. Wenigstens bei Kraftwerken mit Gegendruckturbinen ist die Entkopplung der Prozesse, dem der elektrischen und der thermischen Energiebereitstellung, schwierig. Eine Möglichkeit diese Entkopplung voranzutreiben ist die Aufstellung thermischer Speicher. Besondere Fragestellungen ergeben sich in Bereichen, in denen beide Prozesse stark divergieren. Thermische Speicher können dazu beitragen, die Abweichung weiter zu steigern und somit den effektiven Einsatz des Kraftwerks zu gewährleisten. Bedingungen, die zur Abschaltung des Kraftwerks führen würden, müssen verhindert werden.

Ein Beispiel bietet das Szenario der Aufforderung zur Erbringung von positiver Regelleistung. Hier muss instantan der Kühlmassenstrom der Stromerzeugungsanlage steigen, wenn sich dieser aufgrund eines geringen Wärmebedarfs am unteren Grenzwert befindet. Ist dies z.B. aufgrund räumlicher Distanz nicht ohne weiteres möglich, kann die Integration eines thermischen Speichers sinnvoll und notwendig sein.

Rechentechisch können verschiedenste Varianten, angefangen bei Aufstellungsorten über Speicherdimensionen bis hin zu unterschiedlichen Einsatzszenarien hinsichtlich ihrer Effektivität und Wirkung überprüft werden. Dafür stellt die Simulationssoftware Dymola ein Werkzeug dar.

Der Vergleich eines drucklosen thermischen Speichers mit einem druckbehafteten thermischen Speicher ergab, dass beide Methoden geeignet sind Kraftwerken zusätzlichen Spielraum in ihrer Fahrweise zu gewährleisten. Aufgrund eines signifikant geringeren erforderlichen Umlaufmassenstromes und einer damit einhergehenden Senkung der Pumpenanforderung ist die Implementierung eines druckbehafteten Speichers vorzuziehen.

**Keywords:** GuD, thermische Speicher, Simulation, Kraft-Wärme-Kopplung

## 1 Einleitung

Durch die Verständigung der Vertragspartner der Weltklimakonvention im Jahr 2010, die globale Erwärmung auf weniger als 2 °C gegenüber dem Niveau vor Beginn der Industrialisierung zu begrenzen, gilt es anthropogene Störungen auf das Klimasystem zu vermeiden [1]. Um dieses Ziel zu erreichen, steht die Dämpfung des signifikanten Anstieges der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre im Vordergrund. Konventionelle Kraftwerke emittieren CO<sub>2</sub>. Deshalb wird in der Bundesrepublik Deutschland - begünstigt durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz - der Anteil regenerativer Energiequellen an der elektrischen Energie stetig ausgebaut. Da die Speicherung elektrischer Energie bislang nur in ungenügendem Maße möglich ist, müssen konventionelle Kraftwerke in sonnen- und windarmen Zeitperioden die Differenz zwischen Leistungsbedarf und Angebot ausgleichen. Diese wird als Residuallast bezeichnet. Auf Seiten der konventionellen Kraftwerke sind diese Leistungsschwankungen eher als langfristige Schwingungen zu betrachten. Zudem sind Frequenzabweichungen instantan, sekunden- bzw. minutenschnell auszugleichen. Dafür wird den Kraftwerken ein Maximum an Flexibilität abverlangt. Gleichzeitig müssen Kraftwerke mit angeschlossener Kraft-Wärmekopplung ihren Wärmeversorgungsauftrag erfüllen. Ohne eine intelligente Implementierung geeigneter Speichersysteme ist dieser Widerspruch, zwischen den sich oftmals gegenläufig verhaltenden Strom- und Wärmebedarfen, nicht aufzulösen. Um geeignete Varianten herauszufiltern, Parameterstudien durchzuführen oder Lebensdauerverluste der Anlage durch eine flexible Fahrweise abzuschätzen, lassen sich komplexe dynamische Systeme rechentechnisch abbilden. Ein probates Werkzeug ist die Simulationssoftware *Dymola* (*Dynamic Modeling Laboratory*) [2].

## 2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel sollen sowohl der bereits skizzierte Widerspruch, zwischen Strom- und Wärmemarkt, als auch einige grundlegende thermodynamische Prozesse und ihre Modellansätze erläutert werden. Das Simulationstool *Dymola* basiert auf thermodynamischen Gleichungssystemen. Prozesse und Systeme werden hier durch Bilanz-, Zustands- und Wärmetransportgleichungen beschrieben. Neben der Gleichungsansicht existiert eine grafische Benutzeroberfläche, die die Handhabung deutlich vereinfacht.

### 2.1 Strom- & Wärmebedarf

Blickt man auf Bedarfskurven von Wärme und Strom, so können Parallelen gezogen werden. Im Jahresgang ist deutlich zu erkennen, dass sowohl der Wärmebedarf im Sommer abnimmt, als auch der Strombedarf, zumindest wenn man Daten konventioneller Kraftwerke miteinander vergleicht. Dies liegt an der erhöhten Stromeinspeisung von Photovoltaikanlagen in das elektrische Verbundnetz. Schaut man genauer auf die Daten so zeigen diese, dass ein hoher Strombedarf keine Garantie für einen hohen Wärmebedarf darstellt. Deshalb versuchen Kraftwerksbetreiber diese Prozesse in einem gewissen Maße zu entkoppeln.

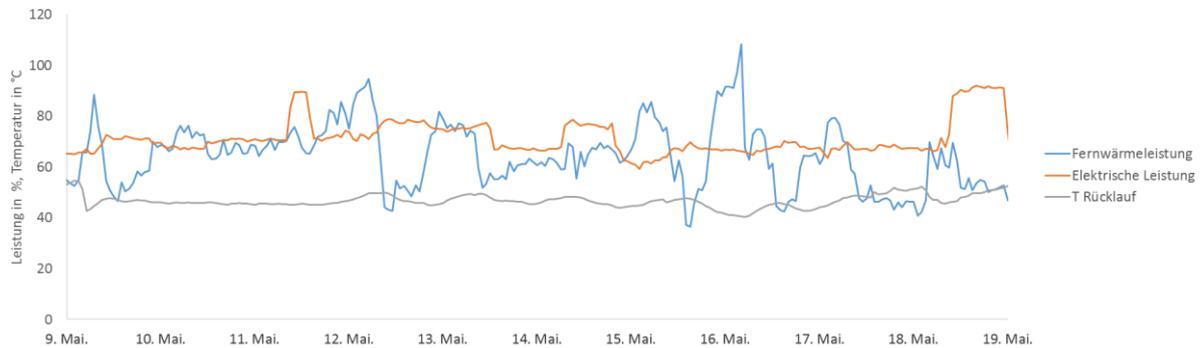


Abbildung 1: Exemplarische elektrische und Wärmeleistung

Abbildung 1 zeigt einen beispielhaften Verlauf der elektrischen und der Fernwärmeleistung eines Kraftwerks mit einer Kondensationsturbine. Zu erkennen ist die Notwendigkeit beide Prozesse möglichst unabhängig voneinander zu betreiben. Die Fernwärmerücklauftemperatur gibt Aufschluss über den Wärmebedarf. Das in Abbildung 2 abgebildete  $P\dot{Q}$ -Diagramm zeigt, dass bei Anlagen, welche mit einer Kondensationsturbine ausgestattet sind, dies in einem relativ guten Bereich möglich ist. Kraftwerke mit einer Gegendruckturbine können ihre Fahrweise hingegen nur entlang einer Geraden im  $P\dot{Q}$ -Diagramm anpassen. Hier besteht die Möglichkeit der Entkoppelung beider Leistungen in der Integration von Speichersystemen, wobei die Speicherung thermischer Energie wesentlich leichter fällt als die Speicherung elektrischer Energie.

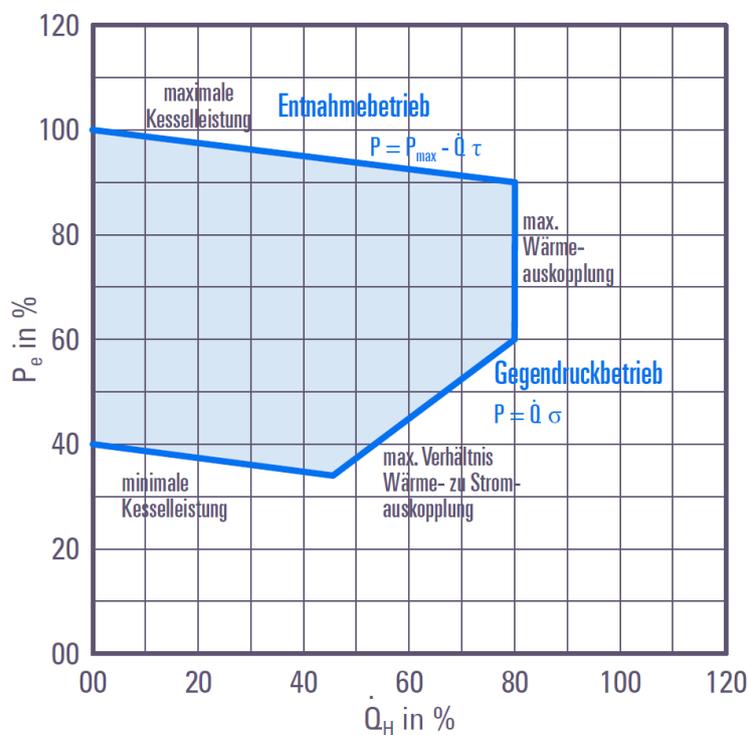


Abbildung 2: schematisches  $P\dot{Q}$ -Diagramm [3]

## 2.2 Modellansatz

*Dymola* basiert auf der textuellen, quelloffenen Beschreibungssprache *Modelica*. *Dymola* ist eine grafische Entwicklungsplattform mit deren Hilfe technische Geräte wie Pumpen, Behälter, Ventile oder Turbinen miteinander verknüpft werden können. Auf Grundlage dieser Verknüpfungen werden die Erhaltungssätze angewendet, um jeweils den Austrittszustand zu berechnen, der für das nächste Objekt den Eintrittszustand darstellt. Mit der Verknüpfung der Objekte wird der *Modelica* Quelltext automatisch erzeugt. Vorhandenes Modellierungswissen wird in Bibliotheken bereitgestellt. Die für dieses bestehende Modell hauptsächlich genutzte Bibliothek ist die *Thermal Power Library* [4]. Sie stammt von *Modelon* und ist speziell entwickelt, um thermische Kraftwerke zu modellieren und dynamisch zu simulieren. Folgende Erhaltungssätze kommen hierbei in der angegebenen Weise zur Anwendung:

- Massenbilanz

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \quad (2.1)$$

- Energiebilanz, wobei die äußeren Energien  $E_a$  vernachlässigt werden. Dies ist zu vertreten, weil die zeitliche Änderung der äußeren Energien gegenüber der zeitlichen Änderung der inneren Energie sehr klein ist

$$\frac{dU}{dt} + \frac{dE_a}{dt} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_i h_i + \dot{Q} + \dot{W}_t \quad (2.2)$$

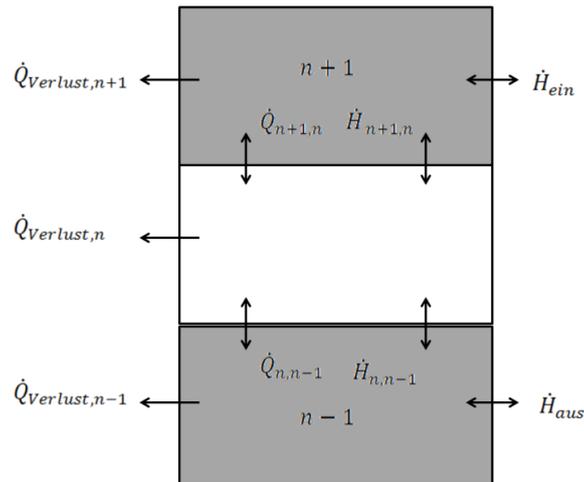
Prinzipiell lässt sich durch den Impulserhaltungssatz der Druckverlust bei der Durchströmung eines Rohres charakterisieren. Da die Lösung der Impulserhaltung sehr rechenaufwendig ist, wird der Druckverlust als Produkt von Massenstrom und eines Rohrreibungskoeffizienten berechnet.

Bei den Turbinenmodellen werden Wirkungsgrade berücksichtigt. Die Energiebilanz stellt sich wie folgt dar (vgl. Gleichung 2.3), wobei der Index  $\alpha$  den Eintrittszustand und  $\omega$  den Austrittszustand beschreibt. Der Index  $s$  steht für isentrop:

$$\dot{W}_t = \eta_{mechanisch} \dot{m} (h_\omega - h_\alpha) \quad (2.3)$$

Dabei ergibt sich die Austrittsenthalpie bei bekannten Eintritts- und Austrittsdruck über die Austrittsenthalpie bei isentroper Expansion.

$$h_\omega = h_\alpha + \eta_{isentrop} (h_\alpha - h_{\omega s}) \quad (2.4)$$



**Abbildung 3: Speichermodell**

Anzumerken bleibt, dass stoffspezifische Daten, wie die Reaktionsenthalpien, Molmassen, Zustandsgrößen, sowie spezifische Wärmekapazitäten in einer Stoffdatenbank gespeichert sind.

*Dymola* löst für jeden Zeitschritt die genannten Erhaltungssätze und bilanziert jedes Objekt einzeln. Dies können zum Beispiel Pumpen, Überhitzer, Turbinen oder Brennkammern sein. Ausnahmen können Zweiphasenbehälter bilden, wie zum Beispiel das Modell der Dampftrommel. Hier wird entlang der Phasengrenze bilanziert, sodass für dieses Objekt 2 Bilanzgleichungssysteme existieren. Für die zu behandelnde Thematik ist der Modellansatz eines thermischen Speichers besonders hervorzuheben.

Das Speichermodell ist aus Komponenten der *Buildings Library* [5] zusammengesetzt. Durch seinen Aufbau in  $n$  Segmente lässt der Speicher eine Temperaturschichtung zu, welche durch den eintretenden Dichteunterschied durchbrochen wird. Neben den Enthalpieströmen, welche in den Speicher hinein oder aus dem Speicher heraustreten, wird ein Wärmestrom zwischen den Segmenten und von jedem Segment an die Umwelt berechnet.

Wärmeübergangskoeffizienten und Umgebungstemperaturen sind in das Modell einzugeben. Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau eines thermischen Speichers mit drei Segmenten. Dieses Modell basiert ausdrücklich nicht auf einer perfekten Durchmischung. Eintrittstemperaturen eines zulaufenden Massenstromes sind dementsprechend primär für das 1. Segment entscheidend. Abhängig vom Massenstrom und der Eintrittstemperatur stellt sich erst nachrangig eine Mischungstemperatur ein. Das Speichermodell kann sowohl bei Umgebungs- als auch bei anderen Druckniveaus eingesetzt werden.

### 3 Kraftwerksmodell & -simulation

Beim modellierten Kraftwerk handelt es sich um ein Gas- und Dampfturbinenkraftwerk. Wärme wird aus der Anlage ausgekoppelt, die exergetischen Verluste minimieren sich dadurch. Dazu ist die Dampfturbine als Gegendruckturbine realisiert.

Das speziell auf dieses Kraftwerk zugeschnittene Computermodell besteht aus ca. 100 Objekten (z. B. Gasturbine, Speisewasserbehälter, Wärmeübertrager), ca. 1000 Parametern (z. B. Geometrien, Nominaldruckverluste, Wärmeübergangskoeffizienten) und ca. 2000 Variablen (z. B. Temperaturen, Drücke, Leistungen).

Dadurch ergibt sich ein aussagekräftiges Tool, mit dessen Hilfe Potentiale verschiedenster flexibilisierungs- und wirkungsgradsteigernder Maßnahmen und Effekte anstehender Retrofits vorherbestimmt werden können. Das Modell wurde innerhalb eines Jahres entwickelt. Zur Lösung des numerischen Gleichungssystems wird der Solver *Differential-Algebraic System Solver (DASSL)* genutzt. Das Modell simuliert durchschnittlich ca. 20-mal schneller als Echtzeit.

Um die Genauigkeit des Modells zu prüfen wurde eine Validierung durchgeführt. Dazu diente der Abgleich der simulierten Werte und Parameterverläufe mit Messdaten. Diese werden von den Kraftwerksbetreibern zur Verfügung gestellt. Einige der wichtigsten Kraftwerksgrößen sind in den nachfolgenden Diagrammen gegenüber gestellt. Grundlage der in den Diagrammen aufgezeigten Verläufe ist jeweils ein Lastsprung der Gasturbine, eine sich anschließende Haltezeit und ein Wiederabfallen der Gasturbinenleistung. Das modellierte Kraftwerk arbeitet nach dem Gleitdruckprinzip. Deshalb sind viele Parameter im Kraftwerk abhängig von der Gasturbinenleistung. Sie folgen mit einer dem System immanenten Trägheit.

Abweichungen zwischen den validierten Kurven können sich aus folgenden Gründen ergeben:

- Nicht vollständig implementierte Leittechnik
- Die zu schnelle Reaktion der Simulationen auf eine Gasturbinenleistungsänderung kann an noch nicht enthaltenen Speichermassen innerhalb des aktuellen Modellumfanges liegen
- Die Messungen im Kraftwerk, können teilweise fehlerbehaftet sein

Insgesamt ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung, sodass das Modell für weitere Studien herangezogen werden kann.

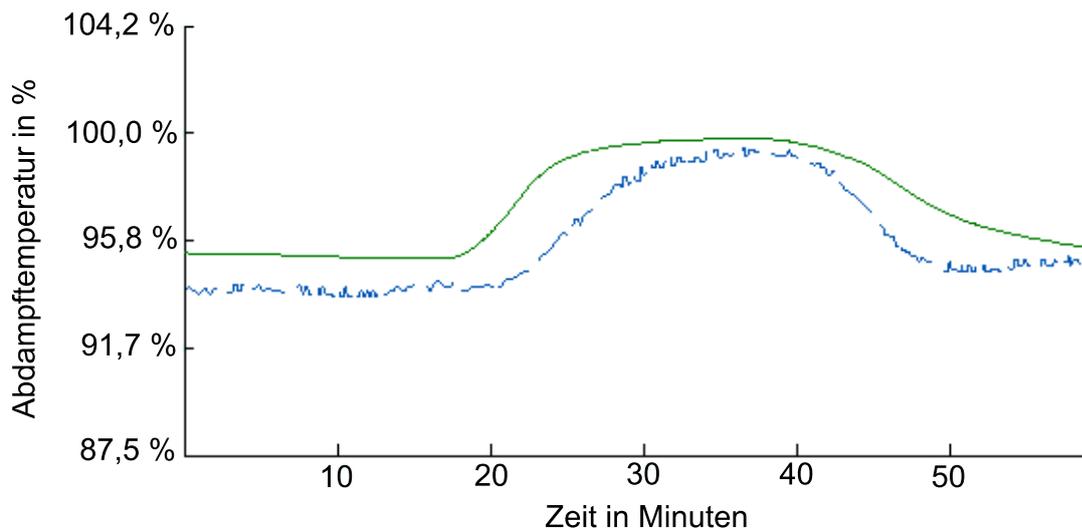
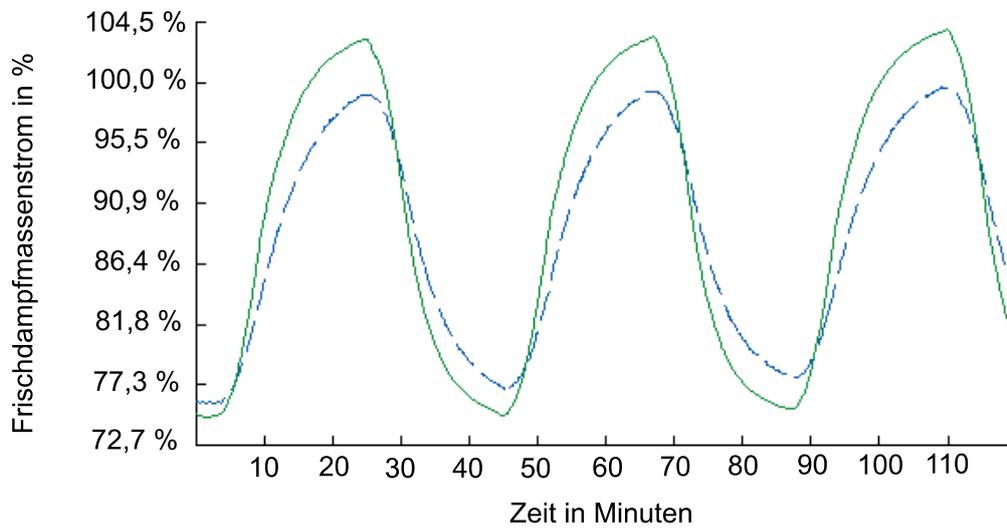
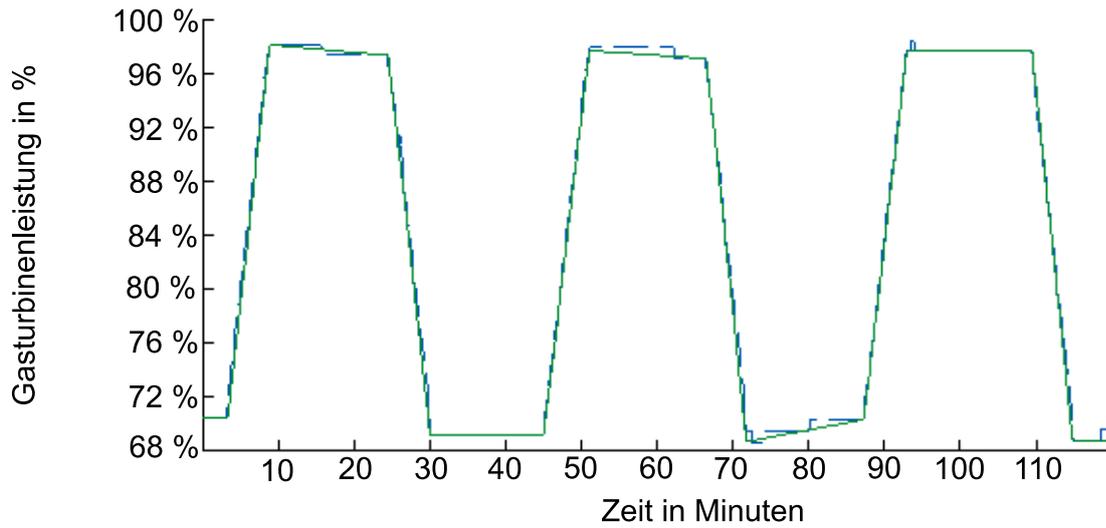


Abbildung 4: Gasturbinenleistung, Dampfmassenstrom & Abdampfdruck

— Simulation  
- - - Messung

## 4 Speicher

Um die Bereitstellung von elektrischer und thermischer Energie zu entkoppeln, kann die Integration eines thermischen Speichers notwendig werden. Zusätzliche Bedeutung erlangt die Speicherintegration bei folgendem Gedankenexperiment: Während einer Periode geringer Wärmenachfrage wird aufgrund der Fernwärmenetzeffizienz der Heiznetzmassenstrom auf ein Minimum reduziert. Dieser Umstand hat eine geringe Kühlleistung am Heizkondensator zur Folge. Die daraufhin abfallende Dampfturbinenleistung wird aus 2 Gründen akzeptiert:

- erstens, da die Dampfturbine einen im Vergleich zur Gasturbine nur untergeordnete Größe bei der Stromproduktion darstellt und
- zweitens, weil der erzielte Strompreis für wärmegeführte Gaskraftwerke, die Kosten einer ineffizienten Betriebsweise nicht aufwiegt.

Nimmt das Kraftwerk zusätzlich am Regelleistungsmarkt teil, so kann die Aufforderung zur Bereitstellung positiver Sekundärregelleistung spontan erfolgen. Dieser Vorgang wird per Ferneingriff bewerkstelligt. Eine Erhöhung der Gasturbinenleistung erfordert wiederum einen höheren Kühlungsbedarf. Die Anhebung des Heiznetzmassenstromes, der zur Kühlung dient, kann unter Umständen aufgrund einer fehlenden direkten Kopplung des Heiznetzes mit dem Kraftwerk oder der räumlichen Distanz nicht in der geforderten Zeit bewerkstelligt werden. Die Folge wäre somit die Auslösung von Abschaltbedingungen, die Anlage würde automatisch heruntergefahren. Die Erbringung der Regelleistung und die Deckung des Wärmebedarfs wären nicht mehr sicherzustellen und Vertragsstrafen würden drohen.

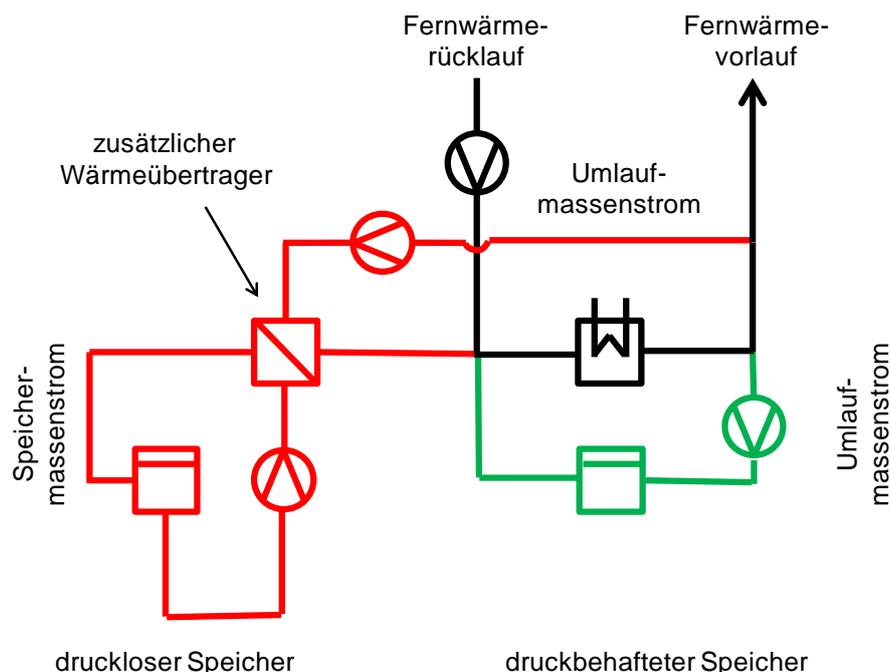


Abbildung 5: Prinzipskizze Varianten thermischer Speicher

Wesentlich schnellere Reaktionszeiten im Fernwärmenetz würden erreicht, bei der Implementierung eines Puffersystems nahe der Kraftwerksanlage. Zur Potentialabschätzung wurde oben genanntes Szenario mit dem bestehenden Modell simuliert. Untersucht wurden zwei Aufstellungsvarianten eines thermischen Speichers. Zum einen die Implementierung eines drucklosen thermischen Speichers, welcher durch einen zusätzlichen Wärmeübertrager in das Kraftwerkssystem integriert ist und zum anderen die Variante eines druckbehafteten Speichers als Bestandteil des Fernwärmenetzes. Ob eine der Möglichkeiten marktwirtschaftliche Vorteile gegenüber der jeweils anderen hat, ist hierbei nicht entscheidend. Vielmehr sollen die Varianten dahingehend überprüft werden, ob sie in der Lage sind, das oben skizzierte Szenario wirksam abzumildern und somit das Abschalten der Anlage verhindern können. Abbildung 5 zeigt als Prinzipskizze die wärmetechnische Schaltung mit den wichtigsten verfahrenstechnischen Bauteilen (Rot: Variante eines drucklosen Speichers; Grün: Variante eines druckbehafteten Speichers).

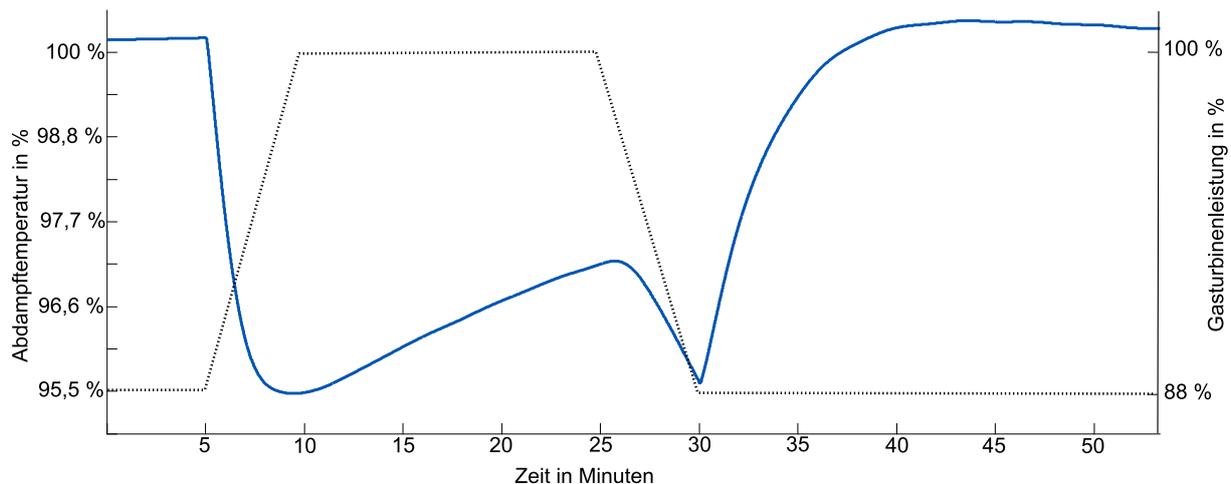
### **Druckloser Thermischer Speicher**

Bei der Erbringung positiver Sekundärregelleistung wird Heiznetzwater aus dem Vorlauf des Heiznetzes mittels einer Umlaufpumpe entnommen und über einen zusätzlichen Wärmeübertrager geführt. Dort wird der Massenstrom von einem zweiten Wassermassenstrom, dem Speichermassenstrom, gekühlt und vor den Heizkondensatoren wieder in das Heiznetz eingespeist. Durch dieses Verfahren wird der Kühlmassenstrom in dem Heizkondensator erhöht. Als Annahme wurde die Speichergröße auf 2000 m<sup>3</sup> festgelegt. Der Tank arbeitet unter Umgebungsdruckbedingungen. Die Geometrie des zusätzlich benötigten Wärmeübertragers war über alle Simulationsszenarien konstant.

Es ergaben sich viele Simulationsszenarien um ein möglichst großes Einsatzspektrum der Kraftwerksanlage abzubilden. Die Simulationsszenarien unterscheiden sich hinsichtlich des durchgeführten Gasturbinenlastsprunges, so wurde die Leistung von 71 %, 80 %, 88 % und 96 % auf 100 % der Gasturbinenleistung erhöht, ebenso variierte die Heiznetzrücklauf-temperatur. Der Heiznetzmassenstrom war zu Beginn eines jeden Simulationsszenarios so angepasst, dass die Abschaltkriterien der Anlage gerade nicht berührt wurden. Folglich wären diese während eines Lastsprunges ohne die Integration eines Speichers verletzt worden.

Abbildung 6 zeigt einen exemplarischen Verlauf der Abdampf-temperatur. Sobald die Gasturbinenleistung ansteigt, wird durch die Umlaufpumpe ein höherer Massenstrom durch die Heizkondensatoren geleitet. Dieser erhöhte Kühlmassenstrom bewirkt das Absinken der Abdampf-temperatur trotz steigender Gasturbinenleistung. Fördert die Pumpe den voreingestellten Massenstrom, so schlägt die weiter steigende Gasturbinenleistung auch auf die Abdampf-temperatur durch – sie steigt ebenfalls. Wird die positive Sekundärregelleistung anschließend wieder zurückgefahren, so sinkt auch die Abdampf-temperatur. Bei Abschalten der Umlaufpumpe und damit einhergehender Reduzierung des Umlaufmassenstromes steigt diese erneut. Dieser Effekt kann durch das spätere und langsamere Abschalten der Pumpe abgemildert werden.

Die maximale Aufladetemperatur des thermischen Speichers von 100 °C, aufgrund der Siedetemperatur, stellt einen klaren Nachteil dar.

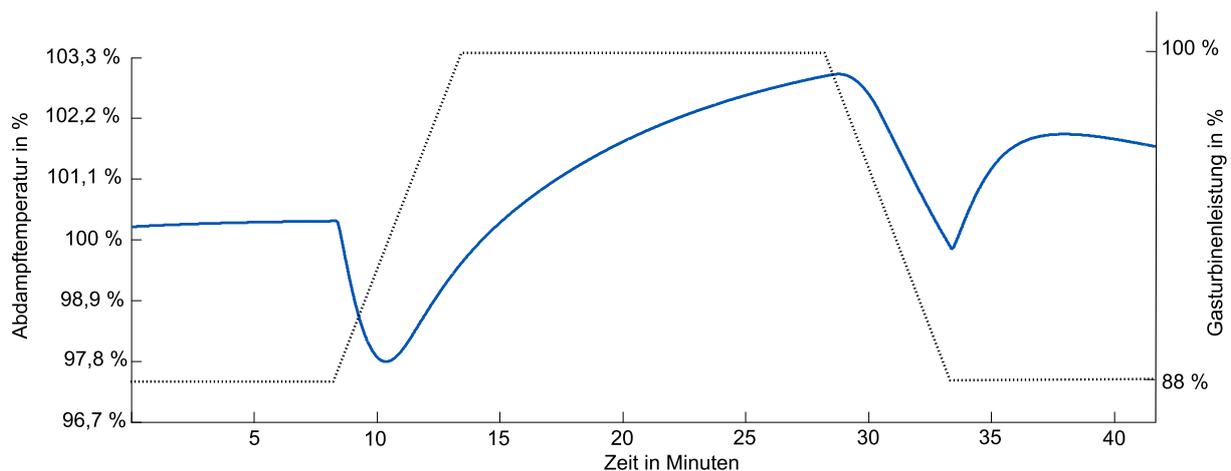


**Abbildung 6: Exemplarischer Verlauf der Abdampftemperatur mit einem drucklosen Speicher bei einer Lastamplitude von 12 %**

Die Simulationen zeigen deutlich, dass die Implementierung eines drucklosen Speichers prinzipiell dazu geeignet ist, Auswirkungen in Form einer Verletzung eines Ausfallkriteriums entgegenzuwirken.

### **Druckbehafteter Thermischer Speicher**

Die Integration eines thermischen druckbehafteten Speichers stellt die zweite Variante dar. Dadurch, dass bei dieser Variante ein wesentlich geringerer Umlaufmassenstrom ausreicht, um die Abschaltkriterien einzuhalten, kann das Volumen des Speichers wesentlich verkleinert werden. In der Simulation ist der Speicher 120 m<sup>3</sup> groß, damit ist er um 94 % kleiner dimensioniert als das drucklose Pendant. Darin liegt natürlich eine gewisse Kostenerleichterung, andererseits kann ein zu klein dimensionierter Speicher schnell an die Beladungsgrenzen stoßen. Im Betrieb müsste dem Rechnung getragen werden, indem bei der Aufforderung zur Erbringung positiver Regelleistung weitere, längerfristige Maßnahmen zur Erhöhung des Heiznetzmassenstromes ergriffen werden müssten. Die Simulationsszenarien sind identisch zu den oben genannten. Der Unterschied liegt in der Integration des Speichers. Dieser ist direkt in das Fernwärmenetz integriert, sein Inhalt ist folglich auf demselben Druckniveau wie das Fernwärmenetz. Steigt die Leistung des Kraftwerks wird eine Pumpe angetrieben, die für einen höheren Massenstrom durch die Heizkondensatoren sorgt. Zum Beginn der Simulation ist der Speicher mit Wasser von 50 °C beladen. Dieses Temperaturniveau kommt dem Kühlmedium nun direkt zu, ohne den Umweg eines Wärmeübertragers. Beladen wird der Speicher mit Wasser aus dem Fernwärmeverlauf, welches dort entnommen wird. Der Verlauf der in Abbildung 7 aufgezeigten Abdampftemperatur ist dem in Abbildung 6 sehr ähnlich. In diesem Fall steigt die Temperatur sogar über das Ausgangsniveau an. Werden dadurch die Abschaltkriterien verletzt, so wurde die Pumpenleistung zu niedrig gewählt.



**Abbildung 7: Exemplarischer Verlauf der Abdampftemperatur mit einem druckbehafteten Speicher bei einer Lastamplitude von 12 %**

Mit steigendem Druck erhöht sich die Siedetemperatur, deshalb kann der Speicher bei dieser Variante mit einem höheren Temperaturniveau gespeist werden. Dieser Umstand erleichtert die sinnvolle technische Nutzung. So kann es zum Beispiel gut zu einem späteren Zeitpunkt, an welchem ein erhöhter Wärmebedarf vorhanden ist, in das Fernwärmenetz eingespeist werden.

## 5 Zusammenfassung

Sowohl durch die Variante eines drucklosen Speichers, als auch durch die eines druckbehafteten Speichers lassen sich grundsätzlich sehr ähnliche Wirkungen erzielen. Wärmeleistung und elektrische Leistung können durch die Integration thermischer Speicher voneinander unabhängiger gemacht werden. Deutlich zeigt sich auch der Einfluss auf wichtige Abschaltparameter. Durch die Simulation lässt sich eine Vielzahl von Szenarien abhandeln und anschließend analysieren, sodass die Anlage so ausgelegt werden kann, dass eine Notabschaltung bei Sekundärregelgriffen ausgeschlossen werden kann.

Bei der Problemstellung der Entkopplung der Bereitstellung von Fernwärmeleistung und elektrischer Leistung ergibt sich eine große Anzahl an Freiheitsgraden. Diese zielen vor allem auf die angebotene Regelleistungsamplitude, den Wärmebedarf, die Speicher-geometrie, die umlaufenden Massenströmen und ihre jeweiligen Temperaturen ab.

Bei Vergleich des Einsatzes eines druckbehafteten und eines drucklosen Wärmespeichers zeigen die Simulationsergebnisse, dass die Integration eines druckbehafteten Speichers vorzuziehen ist. Ein bis zu 10-fach kleinerer Umlaufmassenstrom im Vergleich zu der Lösung eines drucklosen Speichers kann das gleiche Ergebnis erzielen. Damit kann eine Pumpe wesentlich geringerer Leistung eingesetzt werden.

Es zeigt sich, dass die dynamische Simulation thermischer Kraftwerke einschließlich angekoppelter Fernwärmesysteme, für die Optimierung des Betriebs von KWK-Anlagen sinnvolle Lösungen ergeben kann.

## Literaturangaben

- [1] - IPCC. (2013). *Intergovernmental Panel on Climate Change; Fifth Assessment Report, AR5*. New York: United Nations Organisation.
  
- [2] - Ziems, C., Meinke, S., Nocke, J., Weber, H., & Hassel, E. (2012). *Kraftwerksbetrieb bei Einspeisung von Windparks und Photovoltaikanlagen*. Rostock: VGB.
  
- [3] - Hansen, U. (2009). Skript Kraftwerksanlagen, Kapitel 5 Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung. Rostock: Universität
  
- [4] - Modelon. (2016). <http://www.modelon.com/products/modelica-libraries/thermal-power-library/>
  
- [5] - University of California. (2016). <http://energy.gov/eere/buildings/downloads/modelica-buildings-library>