

# ABBILDUNG DES FEUERRAUMS VON DAMPFKRAFTWERKEN IM RAHMEN VON APC-APPLIKATIONEN

Dominik Schlipf<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (Universität Stuttgart), Stuttgart 70569, Germany,

dominik.schlipf@ifk.uni-stuttgart.de

## 1. Einführung und Zielsetzung

Die europäische Energielandschaft befindet sich in einem starken Wandel. Die Bestrebungen hin zu einer klimafreundlichen Energieerzeugung zeigen sich in vielen verschiedenen Studien und Förderprogrammen. Ziel der Europäischen Union ist es, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß bis zum Jahre 2020 um 20% zu reduzieren. Diese Bestrebungen werden an zukünftige Kraftwerksgenerationen steigende Anforderungen stellen, welche auch die Prozessleittechnik betreffen [1]. Hier werden vermehrt fortschrittliche Regelkonzepte eingesetzt werden. Dabei stehen modellbasierte Ansätze, sogenannte "Advanced Process Control"-Ansätze (APC) im derzeitigen Forschungsinteresse [2].

Die mathematischen Prozessmodelle für diese APC-Konzepte können in zwei Teilbereiche getrennt werden. Auf der einen Seite der "Wasser-Dampf"-Teil, der in bisherigen Betrachtungen zu diesem Thema im Fokus stand, und auf der anderen Seite der "Feuerraum", der vor allem stationär sehr gut erforscht ist. Im Rahmen von APC-Konzepten wird der Feuerraum aber bisher meist nur sehr einfach über lineare Kennlinien abgebildet [3].

Um eine weitere Verbesserung der APC-Konzepte zu erreichen, soll in diesem Forschungsvorhaben gezeigt werden, wie ein einfaches Prozessmodell des Feuerraums hergeleitet werden kann. Dabei wird zunächst von der bereits erprobten, detaillierten Simulation des Feuerraums ausgegangen. In einem zweiten Ansatz soll versucht werden, über Messung aus der Wasser-Dampfseite das Verhalten des Feuerraums abzubilden.

## 2. Detaillierte Feuerraumsimulation

Im ersten Schritt wird versucht über eine direkte Simulation die Situation im Feuerraum nachzubilden. Als Ausgangspunkt dienen dabei die Erfahrungen mit detaillierten Feuerraumsimulationen die am Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik gemacht wurden.

### 2.1. Ausgangspunkt

Bei der detaillierten Feuerraumsimulation wird zunächst der eigentliche Feuerraum in verschiedene Zellen unterteilt. Innerhalb dieser Zellen werden verschiedene Bilanzgleichungen gelöst. Je größer die Anzahl der Zellen, desto genauer können die Bedingungen im Feuerraum abgebildet werden. Eine größere Anzahl an Zellen bedeutet aber auch eine größere Rechenzeit bzw. benötigte Rechenkapazität. Es wird untersucht, in wie weit sich ein sehr detailliertes Modell eines Feuerraums vereinfachen lässt, damit innerhalb eines überschaubaren Rechenaufwands immer noch plausible und ausreichend genaue Informationen über die Wärmeverteilung im Feuerraum getroffen werden können.

Mit der detaillierten, stationären Feuerraumsimulation werden im Normalfall Aussagen über das Verhalten einer Vielzahl von verschiedensten Größen, wie Sauerstoffverteilung, Schadstoffkonzentration oder Strömungsverläufe gemacht [4]. Bei der Reduktion des Modells werden diese Größen nicht betrachtet, da für eine APC-Applikation nur die Wärmeverteilung auf die verschiedenen Heizflächen eine Rolle spielt.

Das der folgenden Untersuchung zu Grunde liegende detaillierte Modell besteht aus 10,3 Millionen Zellen. Auf einem Supercomputer des Hochleistungsrechenzentrums der Universität Stuttgart (NEC-SX8) benötigt dieses Modell eine Rechenzeit von 25,5 Stunden um auf einer stationären Lösung zu konvergieren.

## 2.2. Modellreduktion

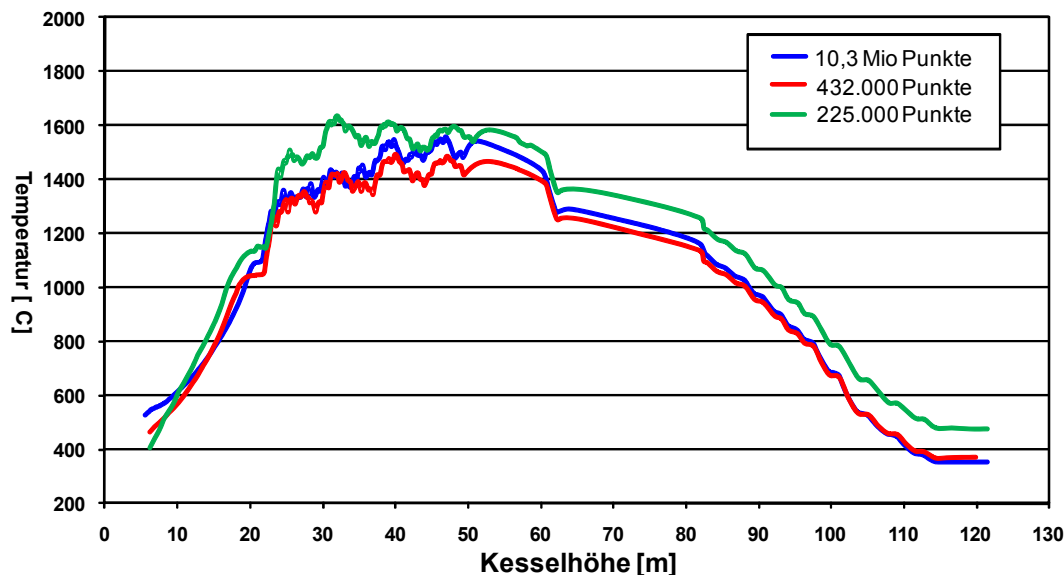
Um die Rechendauer des Ausgangsmodells spürbar zu verkleinern, wird die Anzahl der Zellen mit denen der Feuerraum abgebildet wird stark verkleinert. Damit trotzdem keine großen Veränderungen in der Genauigkeit der Temperaturverteilung auftreten, ist es wichtig, diese Reduktion an der richtigen Stelle vorzunehmen. Tabelle 1 zeigt die Reduktion der Zellenzahl, abhängig vom jeweiligen Ort.

Man erkennt deutlich, dass vor allem im Bereich der Brenner die Zellenzahl überproportional verkleinert wurde. Dies hängt damit zusammen, dass eine hohe Auflösung der Brenner in erster Linie für die genaue Schadstoffbildung benötigt wird. Im Konvektivteil hingegen, der für die Wärmeverteilung wichtig ist, wurde eine geringere Reduktion der Zellenzahl gewählt.

**Tabelle 1: Aufteilung der Zellen auf die einzelnen Bereiche des Feuerraums**

Gebiet	Brenner	Hauptgebiet	Konvektivteil	Gesamt
Detailliert	3,1 Mio	7,0 Mio	200.000	10,3 Mio
Reduziert	82.000	331.000	19.000	432.000
Reduktion auf	2,6 %	4,7 %	9,5 %	4,3%

Als Kriterium für die Genauigkeit der Vereinfachungen soll die Temperaturverteilung über die Höhe des Feuerraums dienen. Dies zeigt die Abbildung 1.



**Abbildung 1: Verlauf Temperatur über Feuerraumhöhe bei unterschiedlicher Zellenzahl**

Sinkt die Zellenzahl unter 432.000 Zellen, verändert sich das Temperaturprofil zu stark um noch einen Vergleich mit der ursprünglichen Simulation ziehen zu können. Im hier vorliegenden Fall muss also ein Modell mit etwa 432.000 Zellen gewählt werden.

## 2.3. Ergebnis

Das so reduzierte Modell lässt sich auf einem 2,8 GHz-Prozessor mit einer Rechenzeit von unter 4 Stunden rechnen. Diese Rechenzeit macht es unmöglich diesen Ansatz "online" in eine APC-Applikation zu integrieren.

Durch die Reduktion des Modells und der Möglichkeit die Simulation auf einem Cluster-System durchzuführen ergibt sich allerdings die Möglichkeit, ein wesentlich detaillierteres Kennfeld zu erstellen, als die bisher eingesetzte lineare Kennlinie. Durch Variation der Stellgrößen kann so für jeden Betriebsfall, den die APC-Applikation ansteuern soll, eine Wärmeverteilung berechnet werden, auf die dann von der Applikation aus zugegriffen werden kann.

Ein beispielhaftes Kennfeld könnte dann zum Beispiel für die Größen "Kohlemenge" und "Primärluft" eine Temperaturverteilung zur Verfügung stellen. Die Anzahl der zu berechnenden Fälle ergibt sich dabei aus der Einteilung der Eingangsgrößen.

So soll beispielsweise die Kohlemenge im Bereich von 20%-100% variiert werden. Dabei soll eine Abstufung in 1%-Schritten erfolgen, es ergeben sich also 80 verschiedene Fälle. Zu jeder Kohlemenge gibt es eine nominelle Primärluftmenge, die hier im Bereich von -10% bis 10% verschoben wird, wieder mit 1%-Schritten. Es ergeben sich dadurch 1600 verschiedene Simulationsfälle, die jeweils simuliert werden müssen um eine dazu passende Temperaturverteilung zu erhalten.

Auf einem Cluster-Rechner des Hochleistungsrechenzentrum der Universität Stuttgart (NEC Nehalem-Cluster) mit 700 Knoten würde dieses Kennfeld drei Berechnungsläufe mit jeweils 3,7 Stunden benötigen, es wäre also in etwa 11 Stunden erstellt.

Diese Felder sind dabei nicht auf zwei Dimensionen beschränkt, es können auch mehr Eingangsgrößen gewählt werden, was aber auch eine größere Anzahl an Simulationen bedingt.

## 2.4. Zwischenfazit

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass durch die Reduktion einer detaillierten Feuerraumsimulation kein Modell erarbeitet werden kann, welches direkt in ein APC-Konzept eingebunden werden kann. Dazu kann das Modell nicht weit genug reduziert werden, um in angemessener Rechenzeit gelöst werden zu können. Der Umweg über ein Kennfeld ist somit weiterhin nötig, der ursprüngliche Kennlinienansatz wird aber deutlich aufgewertet.

## 3. Beobachteransatz basierend auf Wasser-Dampfseitigen Messungen

Um ein direkt "online" einsetzbares Modell zu erhalten, wird im nächsten Schritt untersucht, in wie weit die Messwerte aus der Wasser-Dampfseite genutzt werden können. Sie sind in einem Kraftwerk zahlreich vorhanden. Über einen Beobachter-Ansatz und ein vereinfachtes Modell der Wärmeaufnahme in einem Überhitzer soll versucht werden genauere Informationen über den Feuerraum zu erhalten.

### 3.1. Beobachteransatz

Der Grundansatz bei dem Aufbau eines Beobachters ist die Rekonstruktion von nichtmessbaren Größen mit Hilfe von messbaren Größen und einem Prozessmodell. Würde ein perfektes Modell des Prozesses vorliegen, könnte durch eine Integration der Prozesseingangsgrößen in eine dynamische Simulation auf die nichtmessbaren Größen geschlossen werden. Da das Prozessverhalten allerdings durch Störungen oder eine nicht exakte Modellierung vom simulierten Verhalten abweichen kann, wird eine zusätzliche Regelstruktur, der sogenannte Beobachter, aufgebaut, der korrigierend in das Modell eingreift. Die Aufgabe des Beobachters ist dabei, die Differenz aus simulierten und gemessenen Größen, den sogenannten Beobachterfehler ( $e_{Obs}$ ), zu Null zu bringen. Ein solcher Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.

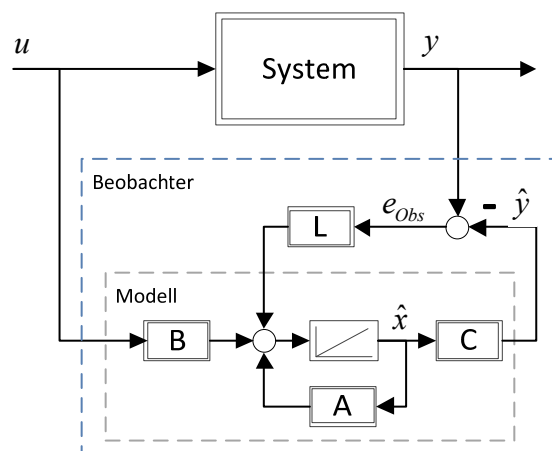


Abbildung 2: Allgemeiner Aufbau eines Beobachters

Wie in Abbildung 2 ersichtlich ist, wird der Beobachterfehler mit der Beobacherverstärkung  $L$  multipliziert und dann auf das lineare Modell aufgeschaltet. Für das Verhalten des Beobachterfehlers gilt damit

$$\dot{e}_{Obs}(t) = (A - LC)e(t).$$

Durch eine passende Wahl von  $L$  kann damit sichergestellt werden, dass der Beobachterfehler immer asymptotisch stabil abklingt, ein beobachtbares Modell vorausgesetzt [5].

Für den Aufbau der Beobacherverstärkung gibt es mehrere Verfahren, in dieser Untersuchung kommt ein Kalman-Filter zur Anwendung, mit dem beim Aufbau der Beobacherverstärkung explizit ein Messrauschen berücksichtigt werden kann, welches bei den verwendeten Messungen quasi immer anliegt [6].

### 3.2. Modellbildung

Für den Beobachteransatz muss nun noch ein vereinfachtes Modell für den Überhitzer erstellt werden. Das Modell sollte dabei möglichst linear sein, damit der Entwurf über das Kalman-Filter möglich ist. Als erstes einfaches Modell wird die Energieaufnahme in einem Überhitzer über die Reihenschaltung von zwei Verzögerungen 1. Ordnung ( $PT_1$ ) realisiert. Die Wärme aus dem Feuerraum dient jeweils zu 50 % als Eingang für diese Verzögerungen. Die Modellierung mit Hilfe von Enthalpien erlaubt es, hier einen linearen Zusammenhang aufzustellen, der bei der Modellierung über die Temperatur nicht gegeben wäre. Abbildung 3 zeigt den sich ergebenden Modellaufbau.

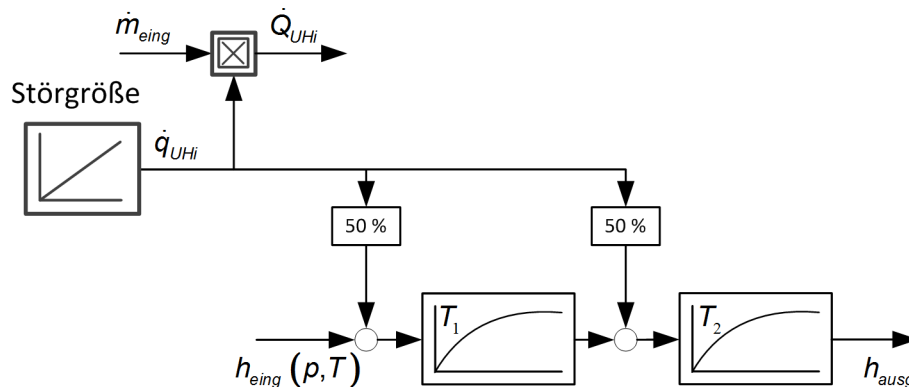


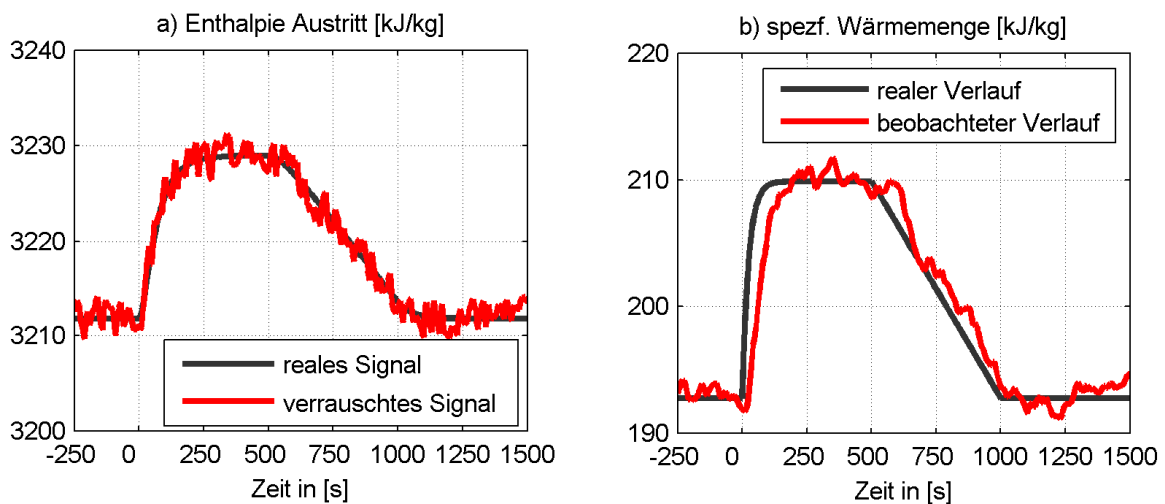
Abbildung 3: Modellierung eines Überhitzers

Da mit dem hier vorgestellten Beobachter Rückschlüsse auf die spezifische Wärme aus dem Feuerraum gezogen werden sollen, wird diese als Störgröße explizit in das Modell übernommen. Da keine Aussagen über diese Störung getroffen werden können, wird diese ohne externen Eingang modelliert. Der Beobachter wird aber bei einem anstehenden Beobachterfehler den Zustand der Störgröße verändern und dadurch Aussagen über die aufgenommene, spezifische Wärme geben. Über die Multiplikation mit dem Massenstrom, welcher durch den Überhitzer strömt, kann dann der absolute Wärmestrom berechnet werden, der vom Überhitzer aufgenommen wird.

### 3.3. Simulationsergebnisse

Die Funktionsweise des Beobachters soll zunächst an einer einfachen Simulation überprüft werden. Dazu wird das in Abbildung 3 erstellte Modell mit einem definierten Verlauf für die spezifische Wärmemenge simuliert. Diese besteht aus einem verzögerten Sprung und einer anschließenden negativen Rampe (siehe Abbildung 4b). Um das Verhalten des Beobachters bei einem verrauschten Messsignal analysieren zu können, wird dem Modellausgang  $h_{ausg}$  ein mittelwertefreies weißes Rauschen überlagert, welches das Eingangssignal für den Beobachter bildet, dargestellt in Abbildung 4a.

Wie im beobachteten Verlauf in Abbildung 4b für die Störgröße zu erkennen ist, kann der Beobachter die aufgenommene Wärmemenge richtig abschätzen. Der Einfluss des Messrauschens kann durch den Beobachter minimiert, allerdings nicht komplett unterdrückt werden.



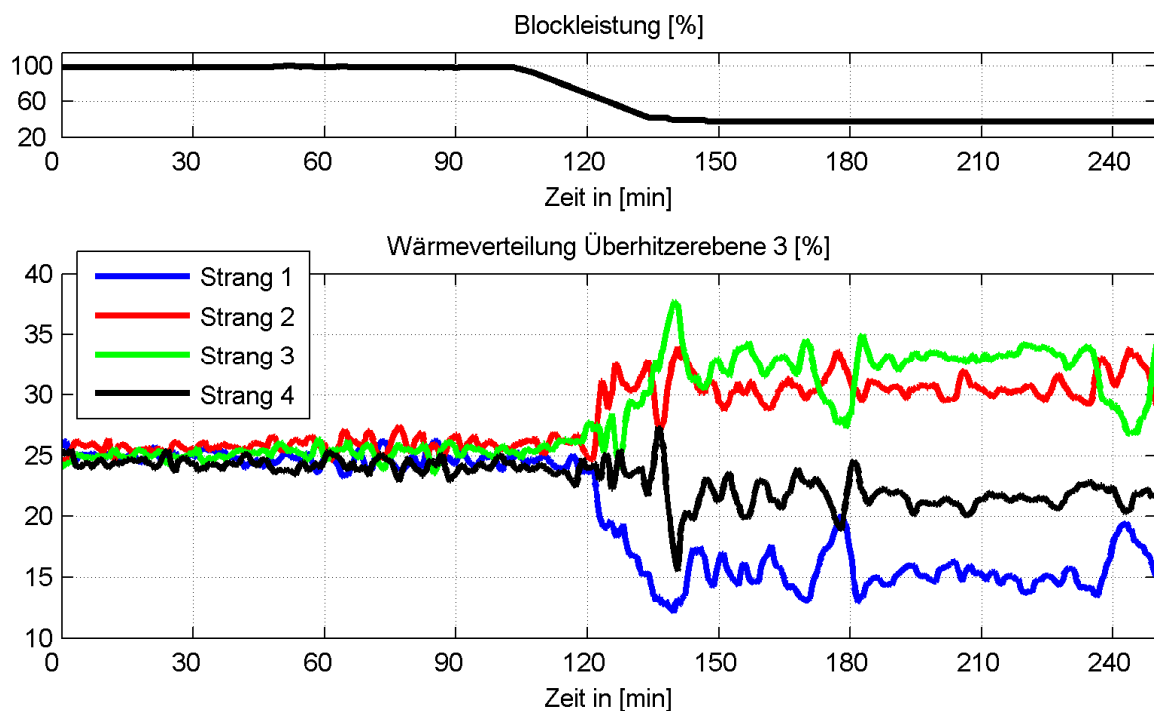
**Abbildung 4: Simulierte und beobachtete Verläufe der aufgenommenen spez. Wärmemenge**

Die Simulationsergebnisse zeigen dass mit dem verwendeten Modell direkte Rückschlüsse auf die aufgenommene Wärmemenge aus dem Feuerraum gezogen werden können. Das verwendete Modell bildet dabei die Prozessdynamik im Überhitzer nur sehr einfach ab, da hier nur die generelle Anwendbarkeit gezeigt werden soll. Über eine weitere Verfeinerung des Modells könnten noch genauere Ergebnisse erzielt werden.

### 3.4. Ergebnisse mit realen Messdaten

Um die Anwendbarkeit des Beobachter an einem realen Prozess zu zeigen, wurden Messwerte eines großen Steinkohlekraftwerks ausgewertet. Die Anlage verfügt über drei Überhitzerebenen, die sich in jeweils vier unterschiedliche Stränge aufteilen, die sich zwar auf derselben Höhe aber an unterschiedlichen Position im Feuerraum befinden. Zu jedem Strang liegen eigene Temperatur und Durchflussmessungen vor, es kann also für jeden Strang ein einzelner Beobachter erstellt werden.

In Abbildung 5 werden die beobachteten Anteile die die einzelnen Stränge an der gesamten aufgenommenen Wärme haben für einen Lastwechsel gezeigt.



**Abbildung 5: Beobachtete Wärmeverteilung für einen Lastwechsel von 100 % auf 40 %**

Wie im Verlauf deutlich zu sehen ist, liegt im Vollastbereich (Zeitbereich von 0 bis ca. 100 min) eine fast perfekte Gleichverteilung der Wärme auf die vier Überhitzerstränge vor. Wie schon bei

der Untersuchung anhand von Simulationsdaten im Kapitel 3.3, erkennt man auch in diesem Zeitbereich den Einfluss des Messrauschens. Mit dem Lastwechsel und der sich dadurch veränderten Situation im Feuerraum (weniger Brenner im Betrieb) erkennt man eine deutlich Verschiebung der Wärmeverteilung. Die in der Mitte des Feuerraums liegenden Stränge 2 und 3 nehmen gegenüber den wandnahen Strängen 1 und 4 wesentlich weniger Wärme auf. Dieser Effekt tritt allerdings nicht sofort auf, sondern erst bei etwa 60 % der Nennleistung, dem Zeitpunkt an dem einzelne Brenner abgeschaltet werden.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Ansätze untersucht mit deren Hilfe Aussagen über die Verhältnisse im Feuerraum eines konventionellen Dampferzeugers getroffen werden können. Mit der numerischen Strömungssimulation wurde untersucht, inwieweit ein bereits bestehendes Kraftwerksmodell reduziert werden kann, um mit vertretbarem Rechenaufwand akzeptable Ergebnisse zu erreichen. Die Untersuchungen zeigen, dass eine Reduktion möglich ist, allerdings weiterhin ein erheblicher Rechenaufwand bleibt, der eine direkte Einbindung in APC-Applikationen verhindert. Über den Umweg eines Kennfeldes können die Ergebnisse aber eingebunden werden.

Im zweiten Teil wurde mit Hilfe eines Störgrößenbeobachters und den auf der Wasser-Dampfseite vorhandenen Messwerten auf die Situation im Feuerraum zu schließen. Anhand eines stark vereinfachten Modells konnte gezeigt werden, dass ein solcher Beobachter auch mit verrauschten Messsignalen arbeiten kann. Anhand von Messdaten einer Brennebene konnte die Anwendbarkeit des Konzeptes gezeigt werden. Der Beobachteransatz kann direkt in eine APC-Applikation eingebunden werden, es bestehen keine Einschränkungen in der Rechenzeit. Allerdings fehlt dem Beobachteransatz der "Blick nach vorne". Da die Schätzungen der Wärme auf Messdaten beruhen, können nur Aussagen über den aktuellen Zustand getroffen werden.

Beide Methoden können im Rahmen von APC-Applikationen eine Anwendung finden. Während mit Hilfe der numerischen Simulation Aussagen für prädiktive Applikationen, wie beispielsweise eine auf Trajektorien basierte Vorsteuerung, generiert werden können, wird der Beobachteransatz seine Anwendung eher bei Applikationen die im Zustandsraum ausgelegt wurden finden.

Da diese Untersuchungen nicht nur auf konventionelle Kraftwerke beschränkt sein muss, zeigen aktuelle Forschungsthemen im Bereich der Concentrating Solar Power (CSP)-Kraftwerke mit Direktverdampfung. Hier wurde ein Beobachter entwickelt, der aufgrund von Wasser-Dampfseitigen Messungen die solare Einstrahlung als Störgröße abschätzt und diese einem Zustandsregler zur Verfügung stellt.

##### *Veröffentlichungen*

Teile dieser Arbeit wurden auf dem 3. Workshop "Leittechnische Optimierung von konventionellen Dampfkraftwerksblöcken" am 21.10.2010 in Stuttgart vorgestellt.

Teile dieser Arbeit gingen in die Veröffentlichung "Model Based Controller Design for a Steam Drum in Linear Fresnel CSP-Plant using direct evaporation" ein, die auf der SolarPACES 2012 im September 2012 präsentiert wird.

#### 5. Literatur

- [1] **Forschungszentrum Jülich IEF-STE (2010):** Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung, Fossil basierte Kraftwerkstechnologien, Wärmetransport, Brennstoffzellen
- [2] **Treuer, Scheffknecht, Wendelberger, Meerbeck (2009):** Neuer Ansatz zur Dampftemperaturregelung, 41. Kraftwerkstechnischen Kolloquium Dresden
- [3] **VDI/VDE-Richtlinie 3508 (2003):** Blockregelung von Wärmekraftwerken, Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin
- [4] **Schneider, Risio, Schnell, Hein (1994):** Numerical Simulation of Reacting Flows in Coal Fired Utility Boilers Using a Domain Decomposition Method, Proc. 2nd European Comp. Fluid Dyn. Conf, S. 823-830
- [5] **Hippe, Wurmthaler (1985):** Zustandsregelung, Springer Verlag, Berlin
- [6] **Lunze (1996):** Regelungstechnik 1, Springer Verlag, Berlin