

Optimize^{IT}

BoilerMax

Modellprädiktive Regelung zur optimierten Anfahrt von Dampferzeugern

Manfred Rode, Rüdiger Franke, Klaus Krüger

Die Verbindung von modellbasierten regelungstechnischen Konzepten und Informationstechnologie bietet neue Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz und Produktivität in vielen Bereichen der Industrie. Dies gilt besonders für die Stromerzeugung, wo die Dampferzeugung zum Betrieb von Turbinen ohne Automatisierung nicht möglich ist. Hier bietet eine solche Verbindung eine ideale Basis, um steigende Anforderungen hinsichtlich der lebensdauerverkürzenden Wärmespannungen und des Energieverbrauchs während der möglichst kurzen Anfahrt zu erfüllen.

Ein von ABB entwickelter nichtlinearer modellbasierter prädiktiver Mehrgrößenregler (NMPC) ist in der Lage, diese Anforderungen unter Berücksichtigung zahlreicher Beschränkungen zu erfüllen. Der beschriebene NMPC ist der erste seiner Art, der in einem Großkraftwerk mit ca. 700 MW_{el} erfolgreich im Einsatz ist. Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass die Lösung aufgrund ihrer Universalität auch auf andere Probleme mit ähnlichen Anforderungen übertragbar ist.

Die heutige IT-basierte Automatisierungstechnik ist eine ideale Basis, um moderne modellbasierte regelungstechnische Lösungskonzepte für den praktischen Einsatz zu erschließen. Damit lässt sich eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen, für die in der konventionellen Leittechnik bisher ein enormer Aufwand notwendig war.

Modellbasierte regelungstechnische Konzepte sind ein Ansatz für leistungsfähige und zielgerichtete automatisierungstechnische Lösungen. Ihre Praxistauglichkeit zeigt sich in Form einer neuen Qualität der Automatisierung, die der Industrie einen bedeutenden Mehrwert bietet.

Kontrolliertes Anfahren von Dampferzeugern

BoilerMax wurde entwickelt, um sämtliche Vorteile, die sich aus der Symbiose von modellbasierter Regelungstechnik und Informationstechnologie ergeben, für die Dampferzeugung in Großkraftwerken umzusetzen. Das neue System basiert auf der dynamischen Optimierung und einem daraus abgeleiteten speziellen regelungstechnischen Verfahren, der nichtlinearen modellbasierten prädiktiven Regelung (NMPC). Ein dynamisches mathematisches Modell, in diesem Fall eines Dampferzeugers, ermöglicht es *BoilerMax*, vorausschauend zu agieren. Damit ist man in der Lage, Anforderun-

gen zu erfüllen, die weit über die Möglichkeiten der konventionellen, klassischen Regelung hinausgehen. Die hier behandelte optimierte Anfahrt eines Dampferzeugers unter Berücksichtigung maximal zulässiger Wärmespannungen in kritischen dickwandigen Bauteilen ist eine solche erweiterte Anforderung.

Das beschriebene System wird in einem Großkraftwerk eingesetzt und ist die erste erfolgreiche Anwendung eines NMPC zum Anfahren von Dampferzeugern dieser Größenordnung. Dank ihrer breiten Funktionalität lässt sich die Lösung leicht für den Einsatz in anderen Bereichen mit ähnlichen Anforderungen anpassen.

Das Problem bei Dampferzeugern

Vom Prinzip her kann man einen Dampferzeuger mit einer Kaffeemaschine vergleichen. Wasser wird von einer niedrigen auf eine hohe Temperatur erwärmt. Während dies bei der Kaffeemaschine meist durch elektrische Stromwärme geschieht, verwendet man in vielen Großkraftwerken hierfür Kohle, Gas oder Öl.

Den Feuerraum, in dem der Brennstoff verbrannt wird, kann man sich wie ein leeres Hochhaus vorstellen. Bei einer Grundfläche von etwa 30 m x 25 m hat er eine Höhe von ca. 130 m. Er ist an den Wänden mit Tausenden von armdicken Stahlrohren mit dem Gewicht von einigen tausend Tonnen ausgekleidet. Die üblichen Temperaturen im Brennraum liegen im Bereich von 600 – 1100°C. Der produzierte Dampfmassestrom erreicht Werte über 2000 t/h, bei einer Temperatur von etwa 520°C sowie einem Druck von ca. 150 bar.

Die Rohre, die den Dampf aus dem Brennraum leiten, werden in den so genannten Sammlern zusammengeführt. Diese sind während der Anfahrt extrem hohen thermischen Belastungen ausgesetzt, die schließlich zu Materialer-

müdung führen. Dies macht die Sammler zu einem erheblichen Kostenfaktor für den Betrieb der Anlage. Tatsächlich können die Kosten für den Austausch eines Überhitzer-Sammlers leicht den Preis eines mittleren Einfamilienhauses übersteigen. Durch eine kontrollierte und optimierte Anfahrt können die auftretenden Wärmespannungen minimiert und somit erhebliche Kosteneinsparungen erzielt werden.

Dampferzeugung in Großkraftwerken

Um die Vorteile von *BoilerMax* besser beurteilen zu können, ist es wichtig, das Funktionsprinzip eines großen Dampferzeugers zu verstehen. Die blauen und roten Linien in **1** geben den Wasser/Dampf-Kreislauf wieder, die schwarz gezeichneten Eingänge versorgen *BoilerMax* mit den nötigen Informationen über das Geschehen im realen Dampferzeuger. Die magentafarbenen Ausgänge stellen die optimierten Steuergrößen dar, die den unterlagerten Reglern als Sollwerte aufgeschaltet werden.

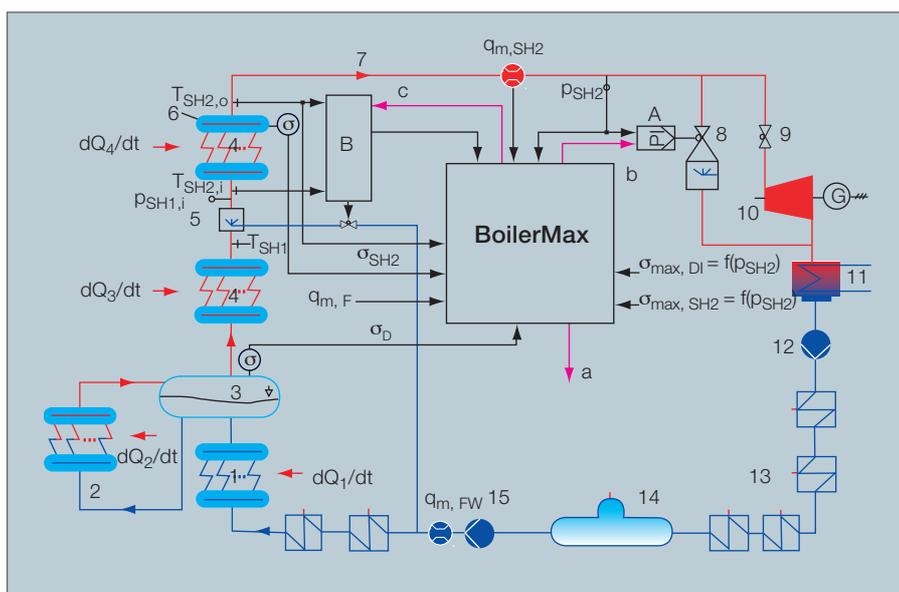
In einem so genannten Ekonomiser wird das Speisewasser vorgewärmt. Der sich anschließende Verdampfer erzeugt so genannten Satt- oder auch Nassdampf,

der anschließend überhitzt werden muss. Dies geschieht in Überhitzereinheiten, von denen in der Abbildung nur zwei dargestellt sind. In realen Kraftwerken sind viele solcher Überhitzer (z. B. 20 Stück) vorhanden, die strangweise angeordnet sind. Zwecks Temperaturregelung sind einigen davon Einspritzkühler vorgelagert. Am Ein- und Austritt der Überhitzer befinden sich die besonders wärmespannungsrelevanten Komponenten, die Sammler. Sie führen die vielen Rohre aus dem Brennraum zusammen und sammeln den Dampf der kleineren Rohre.

Die Dampfströme der letzten Überhitzerstufen werden zusammengefasst und über eine so genannte Frischdampfleitung der Hochdruck-Umleitstation (HDU) zugeführt, die parallel zur Hochdruckturbinen angeordnet ist. Solange der Dampf die Betriebswerte noch nicht erreicht hat – also während der Anfahrt – wird er über die HDU in den Kondensator eingeleitet. Der kondensierte Dampf wird dann über verschiedene Vorwärmer und den Speisewasserbehälter wieder dem Ekonomiser zugeführt. Damit ist der Wasser/Dampf-Kreislauf geschlossen. Im Normalbetrieb – also nach der

1

Prinzipbild eines Dampferzeugersystems mit überlagertem *BoilerMax*-System



- 1 Ekonomiser
 - 2 Verdampfer
 - 3 Trommel
 - 4 Überhitzer
 - 5 Einspritzkühler
 - 6 Sammler
 - 7 Frischdampfleitung
 - 8 Hochdruck-Umleitstation (HDU)
 - 9 Hochdruck-Turbinenventil
 - 10 Turbine
 - 11 Kondensator
 - 12 Kondensatpumpe
 - 13 Niederdruck-Vorwärmer
 - 14 Speisewasserbehälter
 - 15 Speisewasserpumpe
- A Frischdampf-Druckregler
B Überhitzer-Temperaturregelung
a Brennstoffmassenstrom-Führungsgröße
b Überhitzer-Temperatur-Führungsgröße
c Frischdampfdruck-Führungsgröße

2

Die Überhitzer-Sammler mit ihren 6,4 cm dicken Stahlrohren sind besonders wärmspannungsempfindlich.



Anfahrt – strömt der Dampf durch das Turbinenventil auf die Turbine. Die HDU bleibt in diesem Fall geschlossen.

Das Verhalten des Dampferzeugers lässt sich in Form eines dynamischen mathematischen Modells mittels thermodynamischer Zusammenhänge beschreiben. Detaillierte Beschreibungen hierzu lassen sich in der Literatur finden [1]. Die Kunst besteht darin, das Modell des Dampferzeugers so zu formulieren, dass es zum einen das Systemverhalten genügend genau wiedergibt und zum anderen in

endlicher Zeit berechenbar bleibt. Letzteres ist insbesondere im Hinblick auf Echtzeitanwendungen, wie sie in der Automatisierungstechnik üblich sind, von besonderer Bedeutung.

Der Anfahrvorgang

Bei der Anfahrt eines Dampferzeugers unterscheidet man drei Haupttypen:

- Kaltstart – hier wurde der Feuerraum zuvor kalt gefahren, z. B. zur Durchführung von Wartungsarbeiten.
- Warmstart liegt vor, wenn das Kraftwerk etwa 30 – 50 h vom Netz war.

- Von Heißstart spricht man, wenn bereits nach 4 – 30 h Stillstand wieder angefahren wird.

Allen drei Anfahrtstypen ist gemeinsam, dass während des Stillstands das Feuer im Brennraum aus ist.

Früher wurden große Kraftwerke überwiegend im Grundlastbetrieb gefahren und waren das ganze Jahr über am Netz. Infolge des deregulierten Strommarktes und des Stromhandels hat sich das Einsatzkonzept mehr zum Mittellastbetrieb verschoben. Dies hat häufigeres An- und Abfahren zur Folge – vorwiegend an Wochenenden. Hierdurch spielen Anfahrverluste eine deutlich größere Rolle als bei reiner Grundlast.

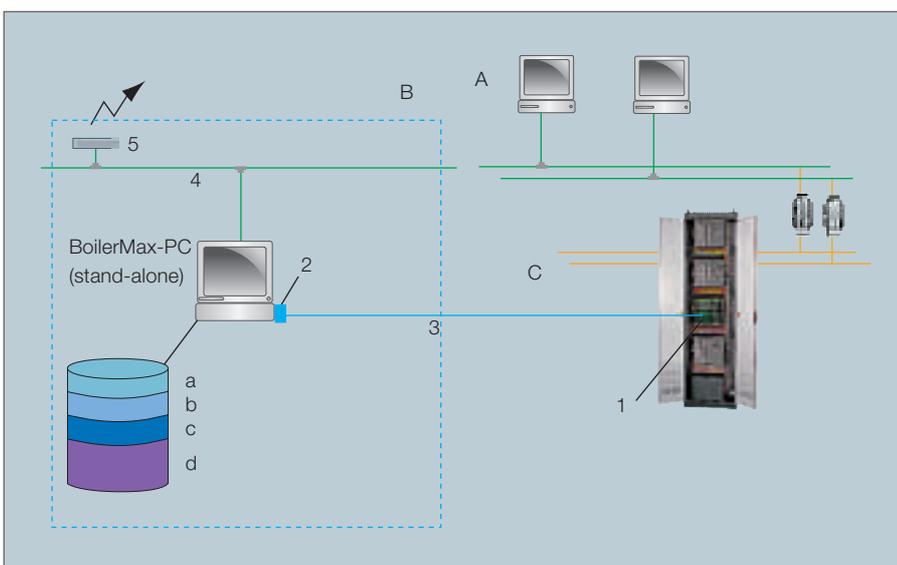
Problemabgrenzung

Was macht nun speziell die Anfahrt von großen Dampferzeugern so problematisch? Im Wesentlichen sind es drei Punkte:

- Aufgrund von Temperaturänderungen entstehen zwangsläufig Temperaturgradienten in den Metallrohren. Diese führen zu Wärmespannungen in den Rohren, insbesondere in den Sammlern [2]. Zu hohe Wärmespannungen können die Lebensdauer der Sammler

3

Beispielhafte Einbindung von *BoilerMax* in eine bestehende Leittechnik



- | | |
|---|------------------------------------|
| 1 | PROFIBUS-DP-Master Baugruppe |
| 2 | PROFIBUS-DP-Slave PC-Einsteckkarte |
| 3 | PROFIBUS-DP Verbindungskabel |
| 4 | PC-Applikationsnetzwerk |
| 5 | Modem |
| A | Warte |
| B | Wartenebenenraum |
| C | Leittechnikraum |
| a | OPC-Server (PROFIBUS-DP) |
| b | OPC-Client |
| c | Echtzeitumgebung |
| d | <i>BoilerMax</i> -Anwendung |

verkürzen. Dies hat gravierende Rückwirkungen auf die Rentabilität eines Kraftwerks.

- Der Dampferzeuger ist systemtheoretisch ein Mehrgrößensystem. Über die beiden Steuergrößen Brennstoff-/Luftmassenstrom und HDU-Stellung wird die Ausgangsgröße Dampfmassenstrom mit den beiden Dampfparametern Druck und Temperatur beeinflusst. Der Zusammenhang zwischen den Steuergrößen und dem Systemausgang Dampfmassenstrom einschließlich Druck- und Temperaturzustand ist stark nichtlinear. Hierfür verantwortlich sind die von Druck und Temperatur abhängigen Größen Dampfdichte und Energieinhalt. Hinzu kommt der nichtlineare Zusammenhang zwischen Dampfdruck und -massenstrom.
- Während der Anfahrt entstehen dem Betreiber, da kein Strom produziert werden kann, ausschließlich Kosten. Da im ersten Teil einer Anfahrt üblicherweise Öl oder Gas als Primärbrennstoff verwendet wird, sind diese Kosten besonders hoch. Oft muss dabei zusätzlich Fremddampf zugeführt werden. Einnahmen können erst verbucht werden, wenn Strom ins Netz gespeist wird.

massenstrom und HDU-Ventilstellung zu berechnen, um den Dampf von seinem Anfangszustand in den gewünschten Endzustand – den Betriebspunkt – zu bringen. Gleichzeitig ist sie in der Lage, vorgegebene Beschränkungen mit zu berücksichtigen – eine Fähigkeit, die anderen Ansätzen überwiegend fehlt.

Formulierung des Problems

Im Folgenden ist das Optimierungsproblem für die beschriebene Applikation als optimales Steuerungsproblem formuliert:

$$J = \int_{t=0}^{t_f} \left[\frac{[T_{LS}(t) - T_{set}]^2}{w_T^2} + \frac{[p_{LS}(t) - p_{set}]^2}{w_p^2} + \frac{[q_{mLS}(t) - q_{m,set}]^2}{w_{q_m}^2} \right] dt \rightarrow \min_{q_{mF}(t), Y_{HPB}(t)}$$

sodass

$$\dot{x}(t) = f[x(t), q_{mF}(t), Y_{HPB}(t)], \quad x(0) = \bar{x} \quad (1)$$

$$q_{mF,min} \leq q_{mF} \leq q_{mF,max}, \quad \dot{q}_{mF,min} \leq \dot{q}_{mF} \leq \dot{q}_{mF,max} \quad (2)$$

$$0 \leq Y_{HPB}(t) \leq 100\% \quad (3)$$

$$-\Delta T \leq \Delta T_x(t) \leq \Delta T \quad (4)$$

In das zu minimierende quadratische Gütefunktional J gehen die Abweichungen von den Zielsollwerten (Index «set»)

des Frischdampf (Index «LS») für Temperatur T , Druck p und Massenstrom q_m ein. Über Wichtungsterme w besteht die Möglichkeit, Temperatur, Druck und Dampfmassenstrom entsprechend der betrieblichen Erfordernisse zu wichten. Die Minimierung des Gütefunctionals liefert unter Verwendung des dynamischen Modells (1) und der Einhaltung der vorgegebenen Beschränkungen (2) – (4) den optimalen Verlauf der Steuergrößen (Brennstoffmassenstrom q_{mF} ; HDU-Ventilstellung Y_{HPB}), um das Optimierungsziel zu erreichen.

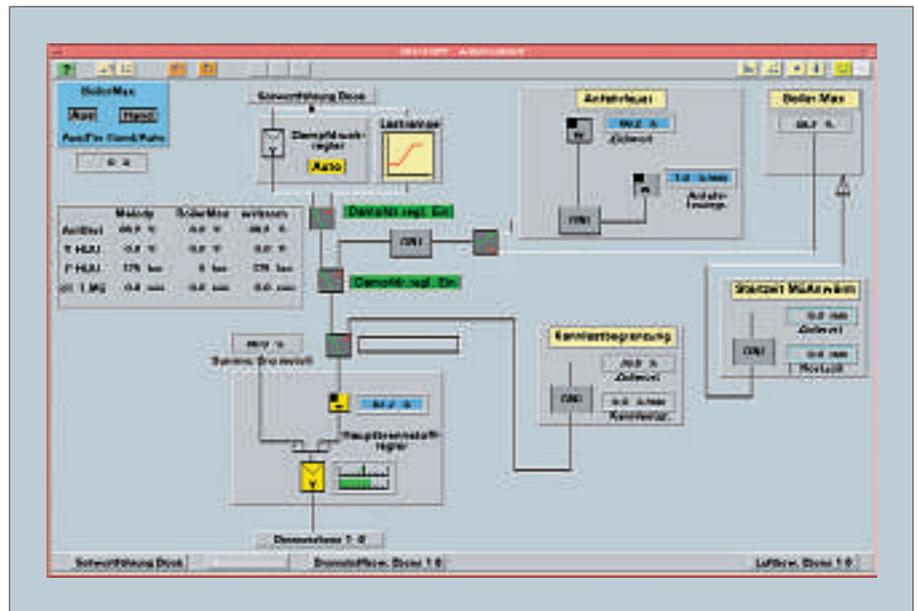
Neben den bereits erwähnten einzuhaltenden Beschränkungen bezüglich der Wärmespannungen in verschiedenen

Problemlösung mittels dynamischer Optimierung

Konventionell werden vorwiegend zwei Strategien angewendet. Entweder wird ein Sicherheitsabstand zu den Wärmespannungsgrenzen eingehalten oder Grenzverletzungen werden in Kauf genommen. Um auf der sicheren Seite zu sein, werden dabei die Wärmespannungsgrenzen überwiegend konservativ gewählt.

Unter Verwendung eines dynamischen mathematischen Modells des Dampferzeugersystems lassen sich weitere, leistungsfähigere Strategien aufzeigen. Hierzu muss das Modell die erwarteten Wärmespannungen jedoch genügend genau nachbilden.

Ein vielversprechender Lösungsansatz ist die Verwendung der dynamischen Optimierung. Sie ermöglicht es, optimale Verläufe der Steuergrößen Brennstoff-/Luft-



Anlagenteilen (4) treten in der Praxis eine Vielzahl weiterer Beschränkungen auf, die berücksichtigt werden müssen. So dürfen z.B. die Steuergrößen ($q_{mF_{min}}$, Y_{HPB}) nicht beliebige Werte annehmen (2), (3) und können sich nur mit vorgegebenen maximalen Gradienten ändern (2). Der Öl-Brennstoffeintrag q_{mF} ist abhängig von der Anzahl verfügbarer Brenner. Ebenfalls muss ein minimaler Brennstoffeintrag sichergestellt sein, um eine sichere Verbrennung und Mindestaufwärmung zu gewährleisten. Der Übergang vom Öl- auf das Kohlefeuer ist abhängig von der Verfügbarkeit der Kohlemöhlen. Diese wiederum hängt von der Vorwärmluft und deren Temperatur ab. Die Brennraumtemperatur ist zur Vermeidung von Rohrüberhitzungen abhängig vom Dampfmassenstrom zu führen. Diese und ähnliche Beschränkungen lassen sich einfach und übersichtlich bei der Minimierung des Gütefunktional berücksichtigen. In den resultierenden optimierten Steuergrößen sind sie somit bereits eingearbeitet. Dies ist ein großer Vorteil gegenüber konventionellen Lösungen, bei denen Änderungen in den Begrenzungen oft mit umfangreichen Funktionsplanänderungen in der Leittechnik verbunden sind.

Transparentes Steuerungskonzept

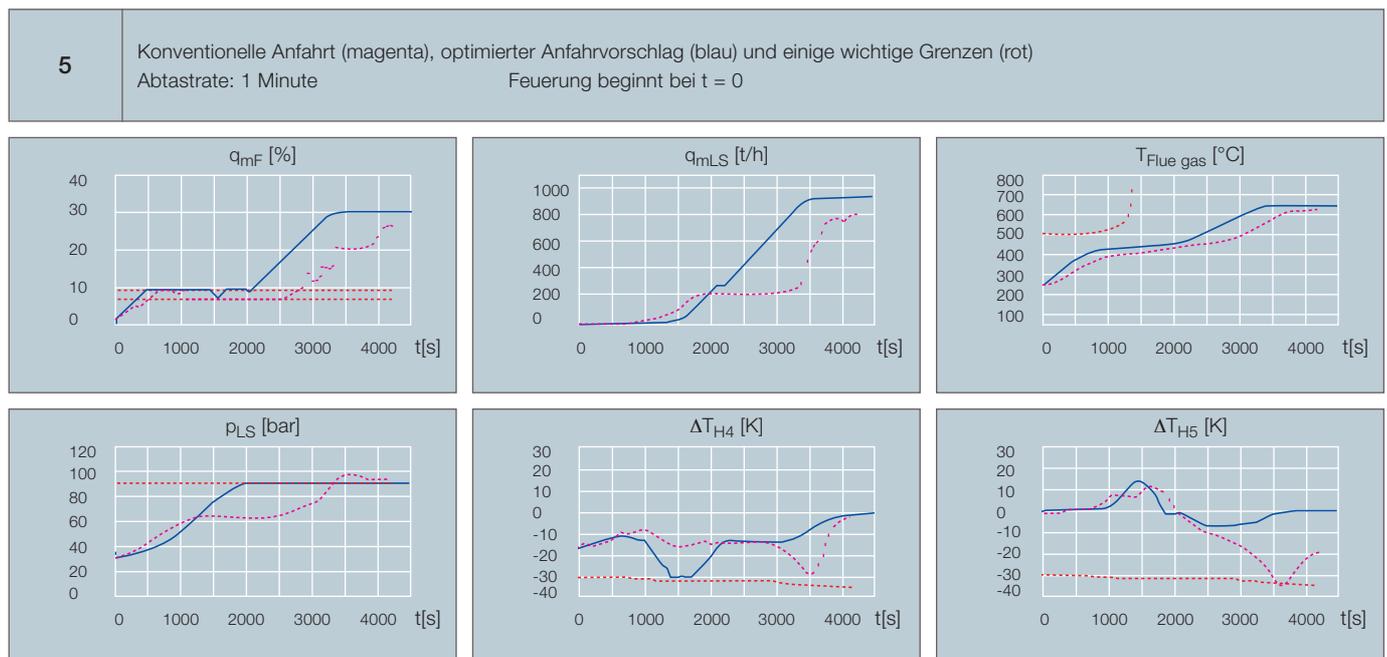
Dementsprechend übersichtlich zeigt sich die automatisierungstechnische Struktur der Lösung. In dem in 1 mit *BoilerMax* bezeichneten Block wird die Lösung des optimalen Steuerungsproblems berechnet. Hierzu wird der Block mit den notwendigen Signalen wie Wärmespannungen, Drücken, Temperaturen und Ventilstellungen aus dem Dampferzeugersystem versorgt. Die berechneten optimierten Steuergrößen werden den unterlagerten konventionellen Reglern als Sollwerte aufgeschaltet. Diese bereits vorhandenen Regelungen bleiben zweckmäßigerweise weiterhin erhalten. Nach erfolgter Anfahrt sind andere übergeordnete Regler für deren Sollwertvorgabe zuständig.

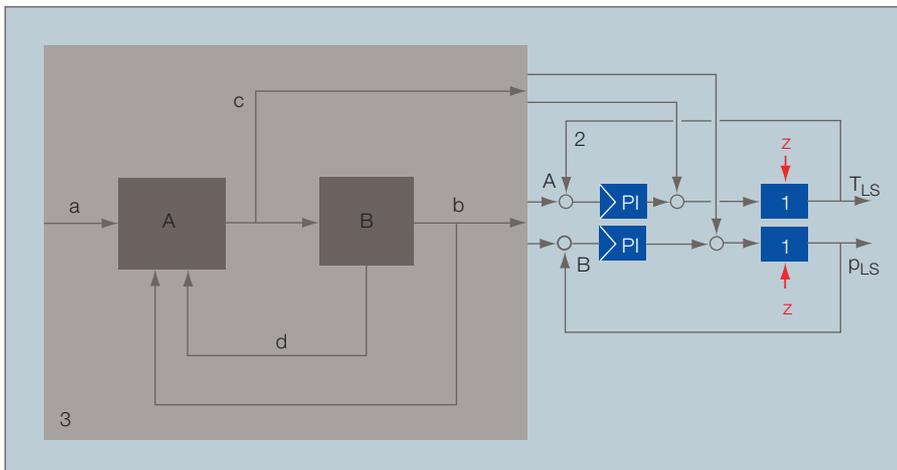
Aus zwei Gründen macht es Sinn, für den Optimierungslöser einen eigenen Rechner vorzusehen. Zum einen ist die Optimierung wegen der vorausschauenden Berechnung sehr rechenzeitintensiv und zum anderen vereinfacht sich damit die Einbindung in bestehende Automatisierungen, falls eine Standardkommunikation verwendet wird.

Die Ankopplung von *BoilerMax* erfolgt über OPC, einem Standardprotokoll zum

Lesen und Schreiben von Prozesswerten. In der Pilotrealisierung wurde zusätzlich eine PROFIBUS-Anbindung realisiert 3. Das Leitsystem (Distributed Control System – DCS) kommuniziert über die PROFIBUS-Schnittstelle mit *BoilerMax*. Hierdurch ist die echtzeitmäßige Einbindung von *BoilerMax* sichergestellt. *BoilerMax* übergibt im 5-Sekunden-Takt die errechneten Sollwertverläufe an die unterlagerten Regler für Brennstoffmassenstrom, HDU-Stellung und HDU-Druck. Die beispielhafte Einbindung der Optimierung in die Bedienstation (Maestro) des bestehenden Leitsystems ist in 4 zu sehen.

An dieser Stelle bietet es sich an, den Verlauf einer konventionellen Anfahrt (magentafarbene Punkte in 5) mit dem einer optimierten Anfahrt mit *BoilerMax* (blaue Linien) zu vergleichen. In beiden Fällen handelt es sich um eine Anfahrt nach etwa siebenstündiger Netztrennung. Aus Sicht der Anlagenfahrer ist die konventionelle Anfahrt ausgesprochen gut. Der optimierte Verlauf der Steuergrößen wurde unter den gleichen Anfangsbedingungen wie bei der konventionellen Anfahrt berechnet. Es ist deutlich zu sehen, dass die von *BoilerMax* optimierten Steuergrößen sowohl die Wärme-





- 1 Dampferzeugersystem
- 2 konventionelle Regelung
- 3 *BoilerMax*/NMPC

- A Optimierer
- B Dampferzeugermodell

- a Zielwertvorgaben
- b Führungswerte für unterlagerte Regelungen
- c Vorsteuergrößen
- d innere Größen
- z unbekannte Störungen

spannungsgrenzen einhalten als auch die Anfahrzeit verkürzen und somit die Anfahrphase insgesamt verbessern.

Einige wichtige Begrenzungen sind in **5** in rot eingezeichnet. Beim Brennstoffeintrag q_{mf} (für Heizöl) handelt es sich dabei um den sicherzustellenden Mindesteintrag von 6,5% und den maximal erlaubten Öleintrag von 9%. Bei der Feuerraumtemperatur $T_{Flue\ gas}$ ist die obere Grenze (500°C bei Dampfstrom Null) in Abhängigkeit des Dampfstroms dargestellt. Der Frischdampfdruck p_{LS} soll den Zielwert von 90 bar nicht überschreiten. In den Bildern ΔT_{H4} und ΔT_{H5} sind die vom Dampfdruck abhängigen maximal erlaubten Temperaturgradienten eingezeichnet.

Drei Punkte sprechen im vorliegenden Fall für die optimierte Anfahrzeit. Die für die Turbinenzuschaltung relevanten Prozesszielwerte für Frischdampfdruck und -massenstrom sind schneller erreicht als im konventionellen Fall. Die Turbine kann bereits 15 Min. (ca. 20%) früher ans Netz genommen werden. Die Zeitpunkte der maximalen Wärmespannungen liegen im optimierten Fall im Bereich der feiner zu regulierenden Ölbefuerung und nicht in der Kohlebefuerung. Bei der konventionellen Anfahrzeit musste wegen der Gefahr einer Wärmespan-

nungsverletzung in ΔT_{H5} die Zuschaltung der dritten Kohlemühle verzögert und eine Verletzung des Frischdampfdruck-Grenzwertes in Kauf genommen werden.

NMPC als Erweiterung der dynamischen Optimierung

Neben der beschriebenen gesteuerten Anfahrstrategie unterstützt *BoilerMax* auch eine geregelte Anfahrzeit. Voraussetzung für die gesteuerte Lösung ist, dass die optimierten Steuergrößen wie berechnet auf den Dampferzeuger wirken können. Im ungestörten Fall wird dies zutreffen. Anders sieht es aus, wenn während der Anfahrzeit mit unvorhersehbaren Störungen wie einem Brennerausfall zu rechnen ist. In diesem Fall müsste nach Eintreten der Störung eine erneute Optimierung durchgeführt werden, da die Ausgangslage der vorherigen Optimierung nicht mehr zutrifft. Die nach der Störung neu optimierten Steuergrößen berücksichtigen die infolge der Störung vorliegenden neuen Gegebenheiten. Führt man die Optimierung zyklisch durch, so ist sie in der Lage, ständig auf Änderungen oder Störungen im Dampferzeugersystem zu reagieren. Die optimale Steuerung wird damit zur optimalen Regelung. In regelungstechnischer Terminologie spricht man in diesem Zusammenhang vielfach von einem modellbasierten prädiktiven Regler

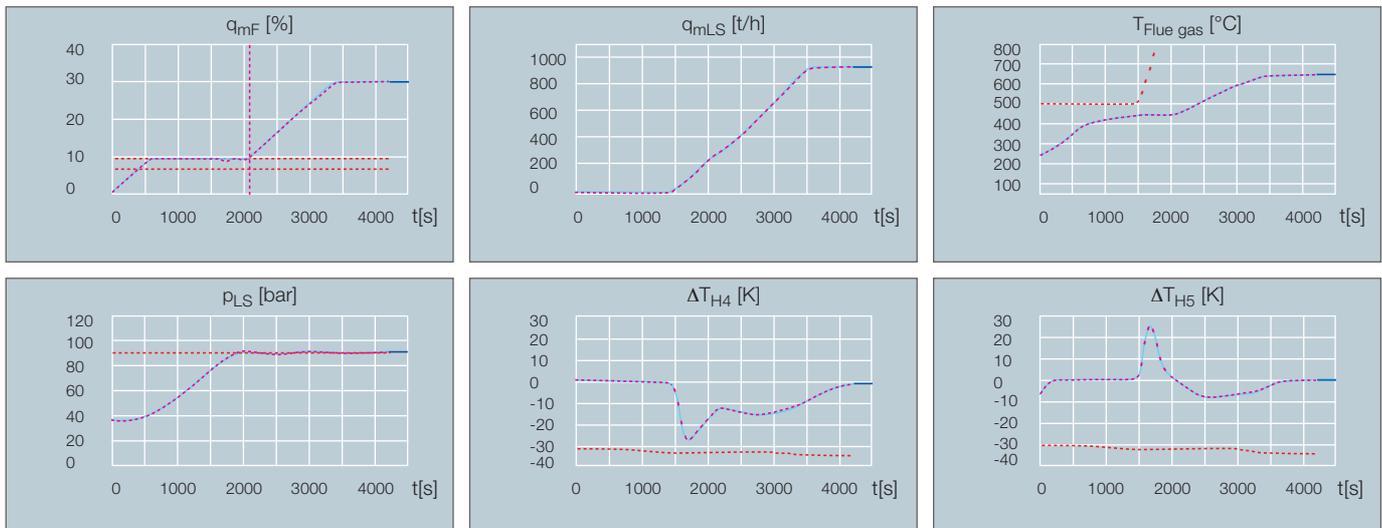
(MBPC oder auch MPC). Da es sich bei dem der Optimierung zugrunde liegenden dynamischen mathematischen Dampferzeugermodell um ein nichtlineares Modell mit mehreren Ein- und Ausgängen handelt, nennt man diese Art von Regler einen nichtlinearen modellprädiktiven Mehrgrößenregler (NMPC).

BoilerMax beherrscht beide Betriebsweisen – die einmalige Optimierung der Steuergrößen für eine vollständige Anfahrzeit (gesteuert) wie auch die wiederholte Optimierung in Form eines NMPC (geregelt) **6**.

Neue Maßstäbe für Dampferzeuger

Regelungen mit dieser prädiktiven Funktionsweise haben sich u. a. in der petrochemischen Industrie bewährt. Dort sind es vorwiegend lineare MPC, die zum Einsatz kommen. Für diese Art von Anwendungen bietet ABB den 3dMPC an.

Im Falle der Dampferzeuger musste auf einen nichtlinearen MPC zurückgegriffen werden. Gegenüber einem linearen MPC bestehen hier besondere Anforderungen hinsichtlich des Optimierungslösers und des Systemmodells. So musste beispielsweise die sehr nichtlineare Wasserdampf-tafel berücksichtigt werden. Und um trotz des anfallenden enormen Rechenaufwands bei der Optimierung die Echtzeit



einhalten zu können, war eine besonders innovative Lösung erforderlich [3].

7 zeigt die Ergebnisse einer Anfahrt mit dem neu entwickelten *BoilerMax* im NMPC-Modus. Im Vergleich zur konventionellen Anfahrt in 5 ist auch hier zu sehen, dass die Wärmespannungsgrenzen eingehalten werden und trotzdem eine schnellere Anfahrt möglich ist.

Überträgt man das Ergebnis (900 t/h Dampf nach ca. einer Stunde Anfahrt) in vereinfachter Form auf das anfangs erwähnte Beispiel der Kaffeemaschine, so bedeutet dies, dass die Kaffeemaschine bereits nach der Dauer eines Wimpernschlags ihre Betriebstemperatur erreicht haben müsste – und das ohne kaputt zu gehen.

Reduzierte Anfahrkosten

BoilerMax ist zurzeit in einem Kohlekraftwerk mit ca. 700 MW elektrischer Leistung im Einsatz, das durchschnittlich 150 Mal im Jahr ab- und angefahren wird. Man geht davon aus, dass mit der installierten Lösung eine 10 %ige Einsparung in den Anfahrkosten sowie die Einhaltung der Wärmespannungsgrenzen ausgewählter kritischer Bauteile erzielt werden kann. Während man bei der konventionellen Lösung zufrieden war, wenn die Wärmespannungen die Grenzwerte nicht deutlich überschritten, sollen mit *BoilerMax* diese Grenzwerte möglichst genau eingehalten werden, um die Lebensdauer der Anlage nicht negativ zu beeinflussen.

Manfred Rode

Dr. Rüdiger Franke

ABB Corporate Research
DE-68526 Ladenburg
Deutschland
manfred.rode@de.abb.com
ruediger.franke@de.abb.com

Dr. Klaus Krüger

ABB Utilities GmbH
DE-68309 Mannheim
Deutschland
klaus.krueger@de.abb.com

Literaturhinweise

- [1] A. W. Ordys, et al: Modelling and Simulation of Power Generation Plants. Springer-Verlag, Heidelberg, 1994.
- [2] K. Krüger, et al: Optimization of boiler start-up using a nonlinear boiler model and hard constraints. Proc of 15th Int Conf on Energy, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2002), July 3–5, Berlin, vol II, 1310–1318.
- [3] R. Franke, et al: Nonlinear model predictive control optimized start-up of steam boilers. Proc of GMA Congress 2003, VDI-Bericht no. 1756, 295–302.