

Kraftwerkstechnik 2014
(Tagungsband des Kraftwerkstechnischen
Kolloquiums, Dresden)
Saxonia Verlag, 2014, S. 231-241

Optimierung des Anfahrvorgangs eines Steinkohlekraftwerks

Autor: Dr. Hendrik Lens
STEAG Energy Services GmbH

Optimierung des Anfahrvorgangs eines Steinkohlekraftwerks

Dr. Hendrik Lens

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.1 Wirtschaftliche Gründe für eine Optimierung des Anfahrvorgangs	1
1.2 Grundsätzlicher Ablauf des Anfahrvorgangs eines Steinkohlekraftwerks	2
2. Optimierungspotential	3
2.1 Wartezeiten.....	4
2.2 Feuerleistung.....	4
2.3 Dampferzeugung	4
3. Anfahrprogramm.....	4
4. Anfahrführung	5
4.1 Begrenzung der Spannungen in den dickwandigen Bauteilen.....	5
4.2 Druckführung.....	6
5. Umsetzung und Ergebnisse	7
6. Zusammenfassung.....	9
7. Quellen	10

1. Einleitung

1.1 Wirtschaftliche Gründe für eine Optimierung des Anfahrvorgangs

Der Energiemarkt in Europa und insbesondere in Deutschland ist in den vergangenen Jahren starken Änderungen unterworfen. Der wachsende Anteil erneuerbarer Energie hat wesentlichen Einfluss auf die Strompreise an der Börse und damit auf die Auslastung der konventionellen Kraftwerke.

Insbesondere hat der typische Verlauf des Strompreises über den Tag sich verändert. Der Strompreis und sein Verlauf sind aber entscheidend dafür, wie ein Kraftwerk betrieben wird. Abbildung 1 zeigt beispielhaft den Preisverlauf über eine Woche im März 2014. Man kann erkennen, dass es keine Preisspitze zur Mittagszeit mehr gibt, sondern vielmehr eine ausgeprägte Senke. Diese ist durch die hohe Einspeisung von Solarenergie in dieser Woche bedingt. In Abbildung 2 zeigt sich außerdem, dass ein solcher Preisverlauf nicht nur sporadisch für einzelne Zeiträume auftritt, sondern auch im Mittelwert sichtbar ist. Aufgrund der niedrigeren Nachfrage sind die Preise an Wochenenden und Feiertagen außerdem nochmals deutlich niedriger. Gleichzeitig zeigen die eingezeichneten Preisspannen jedoch auf, dass auch deutlich höhere und niedrigere Preise – bis hin zu negativen Preisen – als im Mittel aufgetreten sind.

Die Folge für Steinkohlekraftwerke ist, dass sich Zeiten, in denen sich der Betrieb der Anlage lohnt, mit Zeiten zu niedriger Preise abwechseln. Dies führt bei Anlagen, die nicht wärmgeführt sind, zu häufigeren Ab- und Anfahrvorgängen als in der Vergangenheit. Prognosen für die Zukunft lassen eine weitere Zunahme dieses Trends erwarten [1].

Es ist daher für einen Kohlekraftwerksbetreiber notwendig, den Anfahrvorgang möglichst effizient durchzuführen. Diese Optimierung des Anfahrvorgangs ist eine von verschiedenen technischen Maßnahmen, um die Wirtschaftlichkeit von Steinkohlekraftwerken unter den derzeitigen Marktbedingungen zu verbessern [2].

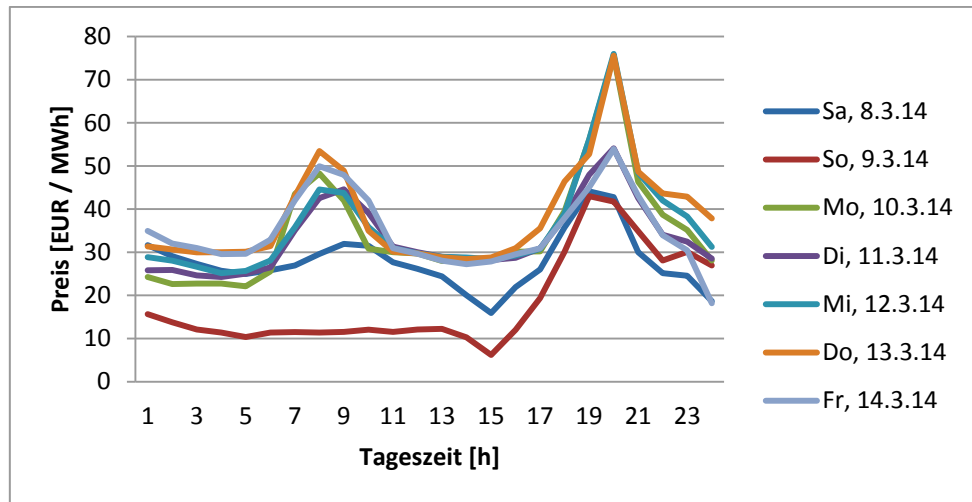


Abbildung 1: EPEX Spotmarktpreise für Stundenprodukte für den Zeitraum 8. bis 14. März 2014.
Datenquelle: [2]

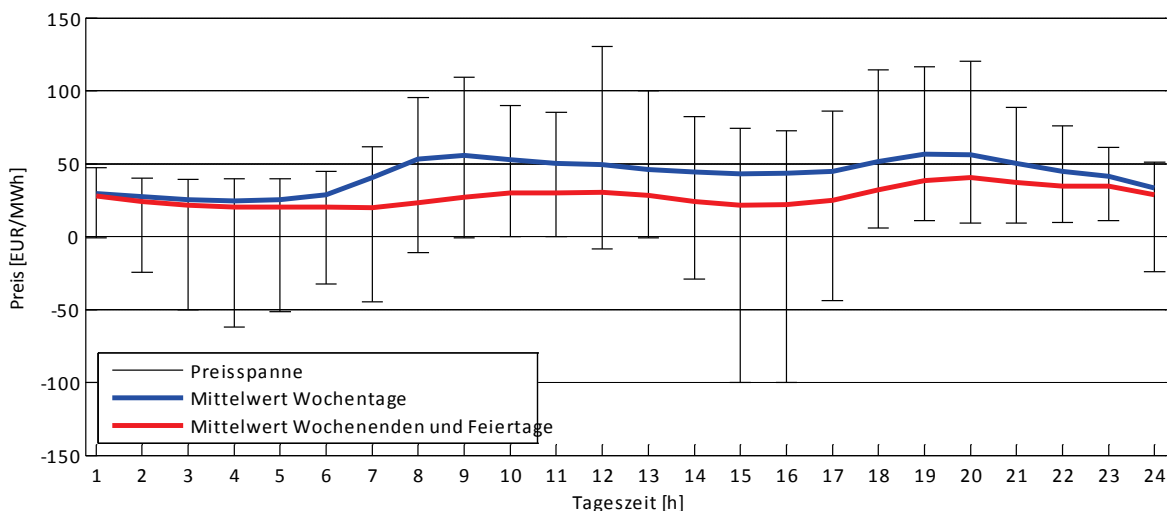


Abbildung 2: Gemittelte EPEX Spotmarktpreise für Stundenprodukte für das Jahr 2013.
Datenquelle: [2]

1.2 Grundsätzlicher Ablauf des Anfahrvorgangs eines Steinkohlekraftwerks

Das Ziel der Anfahr eines Kraftwerks ist die Überführung der Prozessgrößen von ihrem Ausgangszustand auf die jeweiligen Sollwerte, die für den Leistungsbetrieb des Kraftwerks vorgesehen sind. Dabei geht es insbesondere um Temperatur, Druck und Massenstrom des Frischdampfs.

Das Anfahren eines Bestandskraftwerks geschieht typischerweise nur teilautomatisiert. Zunächst werden die nötigen Voraussetzungen geschaffen. Dazu zählen beispielsweise die Herstellung des Vakuums im Kondensator, die Inbetriebnahme der Kondensatpumpen, die Ölversorgung, Hilfsdampfversorgung, und die Inbetriebnahme von weiteren, bereits zu Beginn der Anfahrt benötigten Nebenanlagen.

Danach wird der Kessel gefüllt und die Umwälzpumpe in Betrieb genommen. Nach der Belüftung des Kessels kann dann die Feuerung eingeschaltet werden. Dazu werden manuell Ölbrenner in Betrieb genommen, die Wärmeleistung ergibt sich dann aus der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner. Diese wird schrittweise, in der Regel nach Anweisung aus dem Betriebshandbuch, erhöht. Dabei wird die HDU (Hochdruckumleitstation) in Abhängigkeit der Startart (kalt, warm oder heiß) auf eine feste Stellung gefahren. Die Dampfproduktion erhöht sich und im Kessel wird Druck aufgebaut. Zusätzlich steigen die Dampftemperaturen.

Der Anfahrvorgang des Kessels ist abgeschlossen, sobald die folgenden Größen ihren Sollwert erreicht haben:

- Frischdampfdruck: Der Sollwert ist normalerweise ein fester Wert, ggf. abhängig von der Startart.
- Frischdampftemperatur: Der Sollwert hängt von den Temperaturen der Turbinenwelle und des Turbinengehäuses ab. Dieser wird auch als ‚Wunschtemperatur der Turbine‘ bezeichnet.
- Frischdampfmassenstrom: Falls vorhanden, ist dies in der Regel ein fester Wert und entspricht dem minimalen Dampfstrom, der für das Anstoßen und Beschleunigen der Turbine gefordert wird.

Daraufhin kann die Turbine angestoßen werden, d.h. der Frischdampf wird nicht mehr vollständig über die HDU umgeleitet sondern anteilig durch die Turbine geführt und beschleunigt diese. Je nach verwendeter Turbine und Startart benötigt diese noch längere Zeit, bis sie auf maximale Leistung hochgefahren werden kann. Die zulässigen Last- und Temperaturänderungen werden durch den Turbinenhersteller vorgegeben und durch den Turbinenregler in der Regel automatisch eingehalten. Darüber hinaus produziert das Kraftwerk in dieser Anfahrphase der Turbine bereits Strom, weshalb sich aus Betreibersicht hier zunächst eher wenig wirtschaftliches Optimierungspotential ergibt. In diesem Beitrag wird der Anfahrprozess deshalb mit Erreichen der Synchronisation als abgeschlossen betrachtet.

2. Optimierungspotential

Die Kosten einer Anfahrt hängen im Wesentlichen vom Verbrauch der Brennstoffe ab, die vor der Synchronisation der Turbine und der Erzeugung elektrischer Leistung eingesetzt werden. Insbesondere die verbrauchte Menge Öl oder Gas ist von hoher Bedeutung, da diese Brennstoffe deutlich teurer sind als Steinkohle.

Die Anfangsbedingungen einer Anfahrt sind im Wesentlichen gekennzeichnet durch die Temperatur und den Druck im Kessel sowie die Temperatur der Turbine. Diese klingen während des Stillstands mit der Zeit langsam zu den Umgebungsbedingungen ab. Daher wird die Anfahrt klassischerweise in drei Kategorien eingeteilt: Kalt-, Warm- und Heißstart. Für diese Kategorien sind im Betriebshandbuch verschiedene Vorgaben für das manuelle Anfahren enthalten. Diese grobe Einteilung wird dem großen Bereich möglicher Anfangsbedingungen jedoch nur unzureichend gerecht. Die Erfahrung zeigt außerdem, dass manuell durchgeführte Anfahrten eine teils starke

Streuung bezüglich Kosten und Dauer aufweisen, sogar bei ähnlichen Anfangsbedingungen. Jeder Bediener hat einen unterschiedlichen Erfahrungsstand und eine leicht unterschiedliche Art, eine Anfahrt durchzuführen. Eine gute Automatisierung reduziert diese Streuung und verbessert damit die Reproduzierbarkeit und senkt die durchschnittlichen Kosten einer Anfahrt.

Im Folgenden werden die einzelnen Optimierungspotentiale genauer betrachtet. Die Details, wie diese Potentiale gehoben werden können, folgen in Kapitel 3 und 4. Grundsätzlich gilt natürlich, dass das konkrete Optimierungspotential einer Anlage stark von ihrem Ist-Stand abhängt.

2.1 Wartezeiten

Eine fehlende Automatisierung führt in den Anlagen in der Regel zu längeren Anfahrzeiten, da im Anfahrvorgang längere Wartezeiten entstehen als nötig. Mit einer Automatisierung können die Wartezeiten minimiert werden.

Um die Anfahrt zum optimalen Zeitpunkt beginnen zu können, ist es erforderlich, dass der Anfahrvorgang reproduzierbar ist. Dies bedeutet, dass ähnliche Anfangsbedingungen zu ähnlichen Anfahrten führen sollten. Wenn die benötigte Zeit mit ausreichender Genauigkeit bekannt ist, können auch folgende Optimierungspotentiale gehoben werden:

- Erhöhter Energieverbrauch durch Wartezeit vor der Synchronisation wenn die benötigten Dampfparameter schon erreicht sind
- Erhöhter Eigenbedarf durch zu frühe Inbetriebnahme von Nebenanlagen

2.2 Feuerleistung

Wie in Kapitel 4.1 näher beschrieben, wird die Anfahrt durch thermische Spannungen in dickwandigen Bauteilen wie Sammlern begrenzt. Während jede Anfahrt solche Spannungen verursacht, ergibt sich aus der Kesselauslegung ein bestimmtes Maß an zulässigen Spannungen, bei dem frühzeitiger Verschleiß ausgeschlossen werden kann.

Da die thermischen Spannungen verzögert auf die Wärmeleistung reagieren, ist es sehr schwierig, die Grenzen von Hand einzuhalten. Eine manuelle Anfahrt ist aus diesem Grund entweder konservativ, oder die zulässigen Temperaturdifferenzen werden überschritten. Mit einer Anfahrführung ist es möglich, die Begrenzungen auszunutzen, ohne sie zu überschreiten.

2.3 Dampferzeugung

Die HDU (Hochdruckumleitstation) bietet ebenfalls Potential zur Anfahr Optimierung. Jeglicher Dampf, der während der Anfahrt produziert und durch die HDU in Richtung Kondensator geleitet wird, ist aus energetischer Sicht verloren, da seine gesamte Exergie über den Kühlkreislauf als Abwärme abgegeben wird. Um Brennstoff und damit Kosten zu sparen ist es sinnvoll, nur so viel Dampf zu produzieren, wie für den Druckaufbau und das Aufwärmen der Anlage benötigt wird. Dies geht mit einer geänderten Fahrweise der HDU einher.

3. Anfahrprogramm

Das Anfahrprogramm übernimmt die Aufgabe, während des Startvorgangs einzelne Aggregate und Funktionsgruppen so in Betrieb zu nehmen, dass sie rechtzeitig zur Verfügung stehen, wenn sie gebraucht werden, aber nicht zu früh. Für das Anfahrprogramm wird ein bestimmter Punkt als Beginn des Anfahrvorgangs definiert, wie beispielsweise das Befüllen des Kessels. Alle notwendigen

Handlungen vorab, die weiterhin manuell durchgeführt werden, werden vor dem Start des Anfahrprogramms über entsprechende Freigabebedingungen geprüft.

Das Anfahrprogramm wird dann als Schrittkette in der Leittechnik implementiert. Wichtig ist, dass dieses Programm auf Störungen, wie beispielsweise nicht zündende Brenner oder zusätzliche manuelle Maßnahmen, korrekt reagiert.

Ein wesentlicher Punkt für das Anfahrprogramm und die Minimierung von Wartezeiten ist der erforderliche Paradigmenwechsel: während in der Vergangenheit der Fokus auf die Verfügbarkeit und rechtzeitige Synchronisation lag, ist es zur Kostenminimierung erforderlich, das Risiko einer verspäteten Synchronisierung einzugehen. Wenn während der Anfahrt eine Störung auftritt, sind nun keine Wartezeiten mehr vorhanden, die als Puffer dienen könnten.

4. Anfahrührung

4.1 Begrenzung der Spannungen in den dickwandigen Bauteilen

Beim Anfahren werden die Kesselbauteile, die mit Dampf in Berührung kommen, aufgewärmt. Dabei entstehen im Material Temperaturdifferenzen, die mit mechanischen Spannungen einhergehen. Diese thermischen Spannungen werden überlagert durch innendruckabhängige Spannungen. Die thermischen Spannungen sind umso ausgeprägter, je dicker die Wandstärke der Bauteile ist, da das Aufwärmverhalten der Bauteile mit steigender Dicke träger wird. In Bezug auf den Aufwärmvorgang während der Anfahrt werden deshalb die dickwandigen Bauteile, wie beispielsweise die HD-Sammler, betrachtet.

Direkt abhängig von der Amplitude der Spannungen ist die sogenannte Wechselbeanspruchung der Bauteile, die zu deren Erschöpfung führt. Im Rahmen einer Bauteilauslegung oder -nachrechnung kann auf der Grundlage der Bauteilgeometrie und einer bestimmten Anzahl von An- und Abfahrten eine zulässige Wechselbeanspruchung bestimmt werden. Die kumulierte Erschöpfung der dickwandigen Bauteile kann mit einem Online-Monitoring-System überwacht und über längere Zeit ausgewertet werden [4].

Das Regelwerk schreibt vor, die thermische Spannung proportional zur Differenz zwischen der Innenwandfläche und der integralen mittleren Wandtemperatur zu berechnen, siehe beispielsweise Abschnitt 13.4.7 in [5]. Aus der zulässigen Wechselbeanspruchung ergibt sich für jedes Bauteil ein Zusammenhang $f(p)$, der die zulässige Temperaturdifferenz in der Wand in Abhängigkeit des Drucks beschreibt:

$$\Delta\vartheta = \vartheta_m - \vartheta_i < f(p)$$

Eine Aufgabe der Anfahrührung ist es demnach, das Einhalten dieser Bedingung sicherzustellen.

Die Temperaturdifferenzen können, wie in Abbildung 3 dargestellt, gemessen oder aus der Mediumtemperatur unter Berücksichtigung des Wärmeübergangs und der instationären Wärmeleitungsvorgänge in der Wand berechnet werden. Eine Berechnung hat folgende Vorteile gegenüber einer Messung:

- Es entsteht kein zusätzlicher Verzug durch den verbleibenden Steg bei der Innenwandtemperaturmessung sowie durch die Trägheit der Temperaturmessungen. Ein solcher Verzug ist regelungstechnisch sehr ungünstig.

- Eine Schwächung des Bauteils durch zusätzliche Bohrungen entfällt.
- Die dynamische Genauigkeit der Differenz zweier Temperaturmessungen ist meist ungenügend. Wenn beide Messungen nicht das gleiche zeitliche Verhalten haben, können sehr große Fehler entstehen.
- Die stationäre Genauigkeit der Differenz kann ebenfalls schlecht sein, insbesondere dann, wenn diese einen sehr großen Messbereich haben. Eine bleibende Temperaturdifferenz von einigen Kelvin ist keine Ausnahme.
- Die Wandtemperaturmessungen können unzuverlässig sein, wenn beispielsweise Sensor und Material nicht mehr in direktem Kontakt sind.

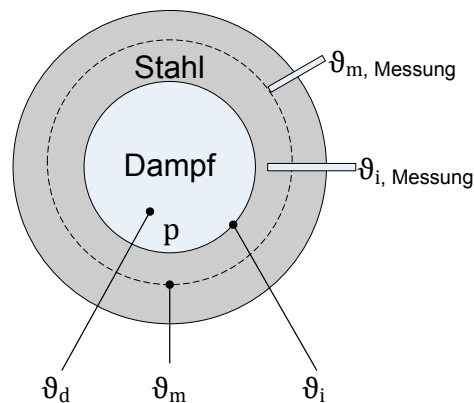


Abbildung 3: Bei der Anfahrt maßgebliche Temperaturen an dickwandigen Bauteilen. ϑ_d : Dampftemperatur, ϑ_i : Innenwandtemperatur, ϑ_m : mittlere Wandtemperatur

Statt der Temperaturdifferenz in der Wand wird manchmal auch die zulässige Änderungsgeschwindigkeit der Dampftemperatur betrachtet. Für quasistationäre Verhältnisse (d.h. konstante Änderungsgeschwindigkeit) kann eine zulässige Temperaturänderungsgeschwindigkeit so bestimmt werden, dass die Temperaturdifferenz den Minimalwert in keinem Fall unterschreiten kann. Die Temperaturänderungsgeschwindigkeit kann zwar einfach gemessen werden, ihre Verwendung als indirektes Maß für die thermischen Spannungen ist aber auch konservativ und führt zu langsameren Anfahrten. Eine Berechnung der Temperaturdifferenz ist deshalb vorzuziehen.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft einen möglichen Verlauf von zwei Frischdampftemperaturmessungen und den daraus resultierenden, berechneten Temperaturdifferenzen. Im unteren Diagramm sind der Verlauf der Temperaturdifferenzen über dem Druck und der zulässige Bereich dargestellt.

Die Anfahrührung hat nun die Aufgabe, Wärmeleistung, Einspritzungen und HDU-Stellung so zu führen, dass die thermischen Spannungen im zulässigen Bereich bleiben. Aus den thermischen Spannungen, die aus den oben genannten Gründen vorzugsweise modellgestützt berechnet werden, lässt sich ein Freibetrag, d.h. eine zulässige weitere Temperaturerhöhung, ableiten. Wenn kein Freibetrag vorhanden ist, wirkt das entsprechende Bauteil begrenzend und verhindert eine weitere Steigerung der Wärmeleistung. Die Freibeträge müssen vorausschauend auf die Stellgrößen einwirken, da die Mediumtemperatur und die Wärmespannung nur verzögert auf die Stellgrößen reagieren. Hieraus ergibt sich der Begriff *vorausschauender Freilastrechner*.

4.2 Druckführung

Um, wie oben in Abschnitt 2.3 beschrieben, den Verlust von Dampf über die HDU zu minimieren, wird die HDU zunächst geschlossen. Eine gewisse Durchströmung des Kessels ist über die Entwässerungen trotzdem sichergestellt. Sobald sich ein gewisser Druckaufbau einstellt, öffnet die

HDU bis zu einer vorgegebenen Stellung. In der Phase, bevor der Druck den Sollwert erreicht, wird die HDU im Grundsatz bei dieser Stellung belassen, da ein Druckanstieg im Gleitdruck zu einem schonenden Druck- und Temperaturenbau und einem stabilen Verhalten der Umwälzregelung führt. Rechtzeitig vor Erreichen des Sollwerts wird der Druckanstieg gebremst, damit der Druck sanft auf den Sollwert einläuft.

Dadurch, dass die HDU weiter geschlossen ist, kann der Druckaufbau mit deutlich weniger Feuerleistung erfolgen. Damit gehen auch geringere Rauchgastemperaturen einher, so dass unabhängig von ihrer Durchströmung keine unzulässig hohen Temperaturen in den Zwischenüberhitzerrohren auftreten. Als zusätzliche Sicherheitsmaßnahme zum Schutz der Zwischenüberhitzer geht zusätzlich die Rauchgastemperatur in die HDU-Regelung ein. Mit steigender Rauchgastemperatur wird die HDU so weit geöffnet, dass ein ausreichender Dampfmassenstrom zur Kühlung sichergestellt ist.

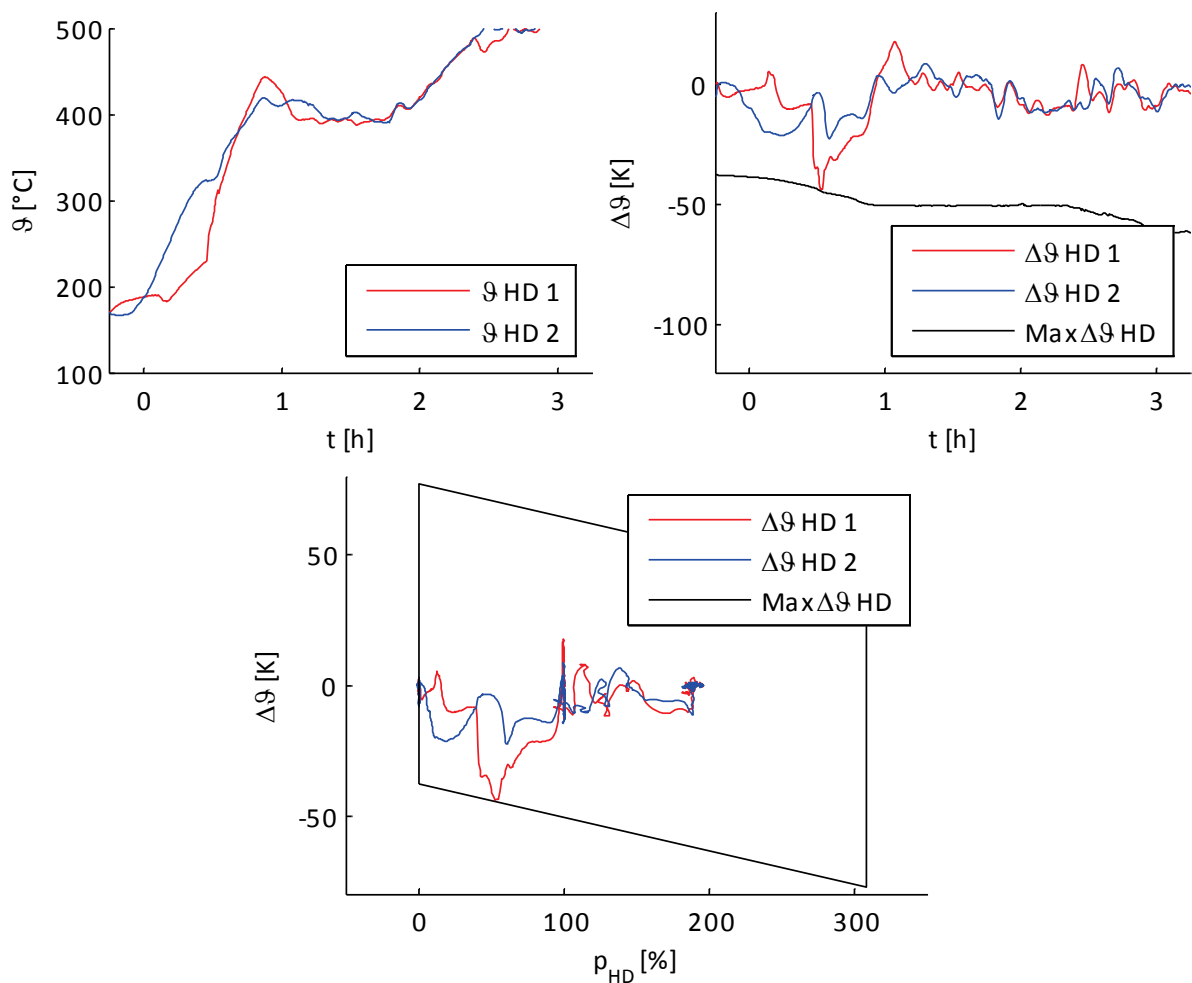


Abbildung 4: Exemplarischer Verlauf von Frischdampf Temperaturmessungen (oben links) und den daraus resultierenden, berechneten Temperaturdifferenzen über die Zeit (oben rechts) und über den Druck (unten). Die Raute umfasst den zulässigen Bereich der Temperaturdifferenzen.

5. Umsetzung und Ergebnisse

Bei der hier betrachteten Anlage handelt es sich um ein Steinkohlekraftwerk, bei dem die Wärmeleistung aus Öl niedriger als bei anderen Anlagen ist. Dafür ist es relativ früh möglich, die erste Kohlemühle zu starten.

Auf Basis der bisherigen manuellen Bedienweise wurde ein Anfahrprogramm entwickelt und implementiert, das im Wesentlichen folgenden Ablauf hat:

- Die Funktionsgruppe Wasser/Dampf wird gestartet
- Nach Einschalten der Umwälzpumpe wird die Funktionsgruppe Luft/Rauchgas gestartet. Dies stellt sicher, dass beide genannten Funktionsgruppen in etwa zur gleichen Zeit abgeschlossen sind und keine Wartezeit entsteht.
- Nach Abschluss der Belüftung werden die Ölbrenner gestartet.
- Die Anfahrführung führt die Wärmeleistung (über den Öldruck) und die HDU.
- Die erste Mühle wird vorgewärmt.
- Wenn die erforderliche Heißlufttemperatur hinter dem Luftvorwärmer erreicht ist, wird das EIN-Programm der ersten Mühle gestartet.
- Sobald die erste Kohlemühle in Betrieb ist, werden mehrere Ölbrenner abgeschaltet.
- Die Anfahrführung führt die Wärmeleistung aus Kohle und Öl, die HDU und die Einspritzungen bis die Dampfparameter erreicht sind.
- Die Turbine kann angestoßen werden.

Allein das schnellstmögliche Starten der Kohlemühle und das automatisierte Abschalten von Ölbrennern führen zu einer signifikanten Einsparung gegenüber der bisherigen Fahrweise.

Die Anfahrführung mit vorausschauendem Freilastrechner mit der in Kapitel 4 beschriebenen Funktionalität wurde auf einem Industrie-PC implementiert. Der Austausch der Mess- und Stellsignale mit dem Kraftwerksleitsystem ist prinzipiell mit einer Vielzahl an Schnittstellen möglich und geschieht in diesem konkreten Fall über eine serielle Schnittstelle.

Die Kurven in Abbildung 5 zeigen die wichtigsten Größen für zwei Kaltstarts. Der manuell, gut durchgeführte Kaltstart ist in Rot dargestellt, der automatisierte in Blau. Der Zeitpunkt Null in den Kurven entspricht dem Zeitpunkt der Zündung des ersten Brenners. Folgendes zeigt sich für die automatisierte Anfahrt:

- Ähnliche Anfangsbedingungen wie für die manuelle Anfahrt (allerdings nicht identisch, auch die Zieltemperaturen weichen etwas voneinander ab)
- Schnellerer Druckaufbau aufgrund der weiter geschlossenen HDU
- Der Öldruck ist beim manuellen Anfahrvorgang konstant, während er bei der automatisierten Anfahrt variiert wird, um die Wärmeleistung zu regeln.
- Schnellere Zurücknahme der Wärmeleistung aus Öl nach Start der ersten Kohlemühle
- 30 Minuten früheres Anstoßen der Turbine
- 30 Minuten frühere Synchronisation
- Bei beiden Anfahrten wird die zulässige Wärmespannung überschritten. Dies hängt jedoch mit dem Sprung der Temperatur von Umgebungstemperatur auf Sattedampftemperatur zusammen, wird also von der ersten Anströmung mit Dampf verursacht. Diese Beanspruchung kann physikalisch nicht verhindert werden. Im weiteren Verlauf werden die Grenzen der Wärmespannungen eingehalten.

Darüber hinaus zeigt Abbildung 6, dass der Ölverbrauch zwischen Zündung und Synchronisation um etwa 20% und der Kohleverbrauch etwa 12,5% niedriger liegen.

Wie Abbildung 7 zeigt, gilt dies nicht nur für diese einzelne Anfahrt, sondern auch im Mittel über viele Anfahrten. Durch die Anfahroptimierung wurde eine durchschnittliche Einsparung des Anfahrwärmeverbrauchs von ca. 20% erreicht.

6. Zusammenfassung

Die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen erfordern eine Flexibilisierung des Betriebs von Kohlekraftwerken. Dies schließt auch ihre Anfahrten mit ein. Bei häufigeren Anfahrten nimmt die Bedeutung deren Kosten zu. Diese können, wie in diesem Beitrag gezeigt, durch eine Automatisierung des Anfahrvorgangs mittels eines Anfahrprogramms und einer geeigneten Anfahrführung im Vergleich zu manuell durchgeführten Anfahrten deutlich gesenkt werden.

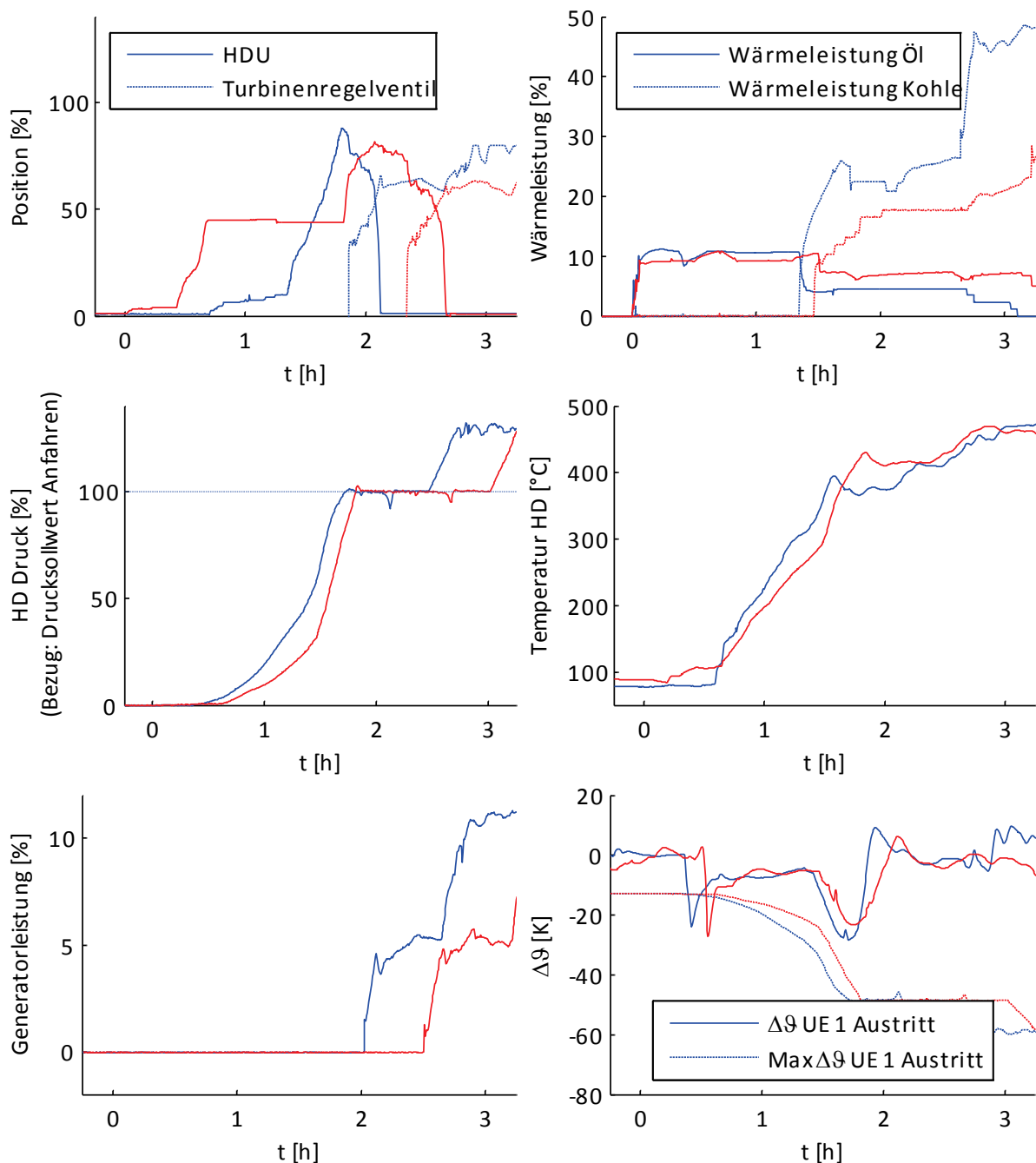


Abbildung 5: Vergleich zwischen einem manuellen Kaltstart (rot) und einem automatisierten Kaltstart (blau) eines Kohlekraftwerks. Die Anfangsbedingungen sind ähnlich, aber nicht identisch. UE 1 Austritt: Sammler am Austritt des Überhitzers 1.

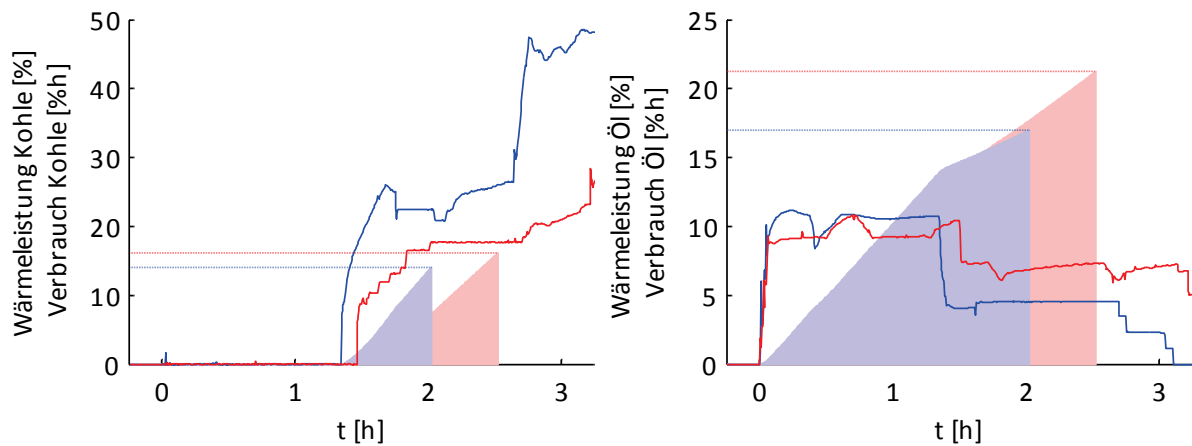


Abbildung 6: Vergleich des Brennstoffverbrauchs

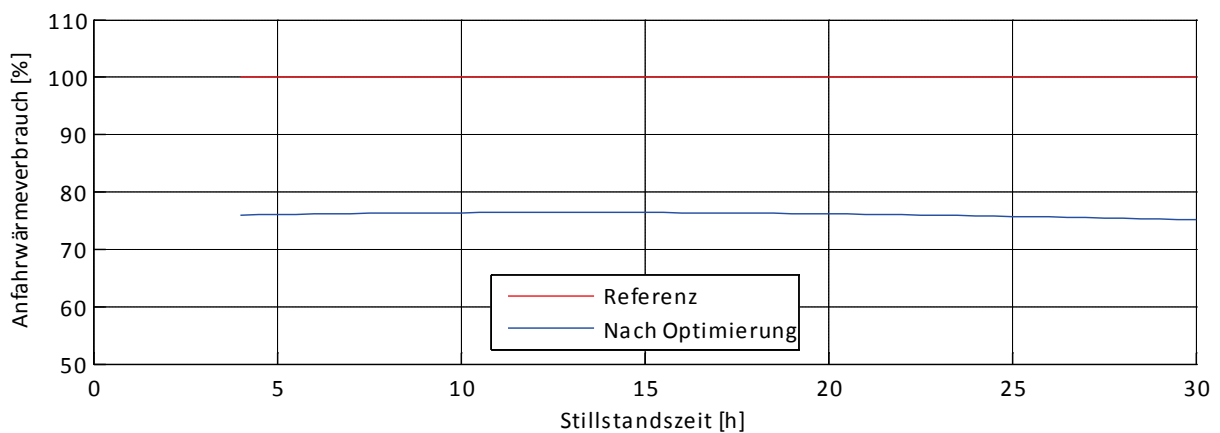


Abbildung 7: Gemittelter Vergleich über Anfahrten mit und ohne Umsetzung der automatisierten Anfahrnehmung

7. Quellen

- [1] Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), „Erneuerbare Energie braucht flexible Kraftwerke – Szenarien bis 2020, Gesamttext,“ VDE, 2012.
- [2] R. Gilgen, „Wege eines Stromerzeugers im Umgang mit der Energiewende,“ *VGB PowerTech*, pp. 38-41, 01/02 2014.
- [3] EPEX, "EPEX Spot Market Auction Data," 2014. [Online]. Available: <http://www.epexspot.com/en/market-data/auction/>. [Accessed 10 March 2014].
- [4] J. Wagner und P. Deeskow, „Trend prognosis and online diagnostics of thick walled boiler components for a flexible mode of operation,“ in *Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference*, Anaheim, California, USA, July 20-24, 2014.
- [5] DIN EN 12952-3, „Water-tube boilers and auxiliary installations – Part 3: Design and calculation for pressure parts of the boiler,“ 2012.