

Konrad S. Stadler¹, Burkhard Wolf², Eduardo Gallestey¹

¹ ABB Switzerland Ltd, Baden-Dättwil/Switzerland,

² Holcim (Deutschland) AG, Lägerdorf/Germany

Modell-prädiktive Regelung des Calcinators im Holcim Werk Lägerdorf mit dem ABB Expert Optimizer

Zusammenfassung: Eine erfolgreiche Regelung und Stabilisierung des Calcinators hängt stark mit der Abbildung der Prozesseigenschaften in das Regelkonzept ab. ABB hat mit dem Expert Optimizer System ein wirksames Instrument zur Regelung solch komplexer Prozesse. Der Einsatz von Expert Optimizer verringert die Variabilität des Prozesses und erlaubt den Betrieb in günstigeren Prozesszuständen. Resultate der erfolgreichen Inbetriebsetzung der Calcinatorregelung im Werk Lägerdorf der Holcim (Deutschland) AG werden aufgezeigt.

Model predictive control of the calciner at Holcim's Lägerdorf plant with the ABB Expert Optimizer

Summary: Successful control and stabilization of the calciner is heavily dependent on the representation of the process characteristics in the control concept. ABB has an effective instrument for controlling such complex processes in the form of the Expert Optimizer system. The use of the Expert Optimizer reduces the variability of the process and allows it to operate under more favourable process conditions. A description is given of the results of the successful commissioning of the calciner control system at the Lägerdorf plant belonging to Holcim (Deutschland) AG.

Régulation prédictive modèle du calcinateur à l'usine Holcim de Lägerdorf avec le système ABB Expert Optimizer

Résumé: Une régulation et stabilisation efficace du calcinateur dépend fortement de la représentation des caractéristiques du processus dans le concept de régulation. ABB dispose, avec le système Expert Optimizer, d'un instrument de régulation efficace de tels processus complexes. L'emploi du système Expert Optimizer réduit la variabilité du processus et permet une exploitation dans des états de processus plus favorables. Les résultats de la mise en service réussie du système de régulation du calcinateur à l'usine Lägerdorf de Holcim (Deutschland) AG sont exposés.

Control predictivo modelo del calcinador en la planta Lägerdorf de Holcim con el Expert Optimizar de ABB

Resumen: El control y la estabilización del calcinador depende en gran medida de la representación de las propiedades de proceso en el procedimiento de regulación. El Expert Optimizar de ABB es un efectivo instrumento para control de estos procesos complejos. El empleo del Expert Optimizar reduce la variabilidad del proceso y permite una operación bajo condiciones más favorables. Se describen a continuación los resultados de la exitosa puesta en marcha del sistema de control del calcinador en la planta de Lägerdorf de Holcim AG (Alemania).

1 Der Prozess im Holcim Werk Lägerdorf.

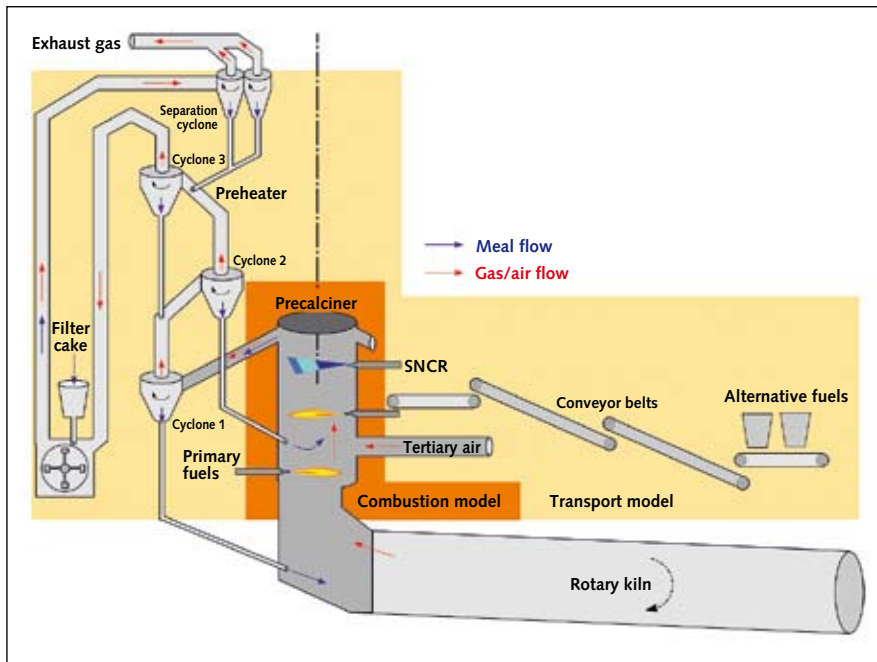
Aufgabenstellung: Calcinatortemperaturregelung.

In der Zementproduktion sind viele verschiedene Anlagekonzepte bekannt. Fast alle neueren und energieeffizienten Anlagen haben heute einen Schwebegas-Vorwärmer mit mehreren Zyklonstufen und einen Calcinator in dem die Entsäuerung ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) des Rohmehls stattfindet. Die Entsäuerung des Rohmehls im Calcinator ist ein endothermer Vorgang, für den die erforderliche Wärme teilweise aus der fühlbaren Wärme der Drehofenabgase aber größtenteils aus der Verbrennung der in den Calcinator aufgegebenen (Ersatz-) Brennstoffe bezogen wird. Am Ofen 11 in Lägerdorf wird bis zu 70 % der Wärme für die gesamte Klinkerproduktion durch

1 The process at Holcim's Lägerdorf plant

Objective: calciner temperature control

There are many different recognized plant designs in cement production. Almost all the more recent energy-efficient plants now have a suspension preheater with several cyclone stages and a calciner in which the calcination ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) of the raw meal takes place. Calcination of the raw meal in the calciner is an endothermic process for which some of the requisite heat is obtained from the sensible heat in the rotary kiln exhaust gases but the majority comes from the combustion of the (alternative) fuels fed into the calciner. In Kiln 11 at Lägerdorf up to 70 % of all the heat needed for clinker production is provided by the fuel fed into the calciner. The calcined



1 Schematische Darstellung der Systemgrenzen für die Modellierung des Calcinator-Prozesses in Lägerdorf
 1 Diagram showing the system boundaries for modelling the calciner process at Lägerdorf

Brennstoffaufgabe in den Calcinator abgedeckt. Das entsäuerte Heißmehl gelangt danach in den Drehofen, wo die eigentliche Sinterung und Klinkerbildung stattfindet.

Im Vergleich zu vielen anderen Teilprozessen in der Klinkerproduktion zeigt der Calcinatorprozess ein relativ schnelles zeitliches Verhalten. Insbesondere wenn aufgrund von relativ begrenzten Abmessungen des Drehofens (Länge bzw. Verhältnis Länge zu Durchmesser) das Heißmehl am Drehofeneinlauf zur Erreichung der gewünschten Klinkerproduktqualität (Freikalkgehalt) weitestgehend entsäuert sein muss (scheinbarer Entsäuerungsgrad > 96 %), kann bei zeitlich begrenzten schwankenden Wärmeeinträgen zum Calcinator vom Heißmehl keine zusätzliche Entsäuerungsarbeit mehr aufgenommen werden. Gerade bei Verwertung vieler verschiedener inhomogener alternativer Brennstoffe wie z. B. Destillations-Rückstände, Reifenschnitzel, Tiermehl, Dachpappe, EBS-Pellets und Fluff kommt es zu Dosierschwankungen und/oder zu Heizwertschwankungen der aufgegebenen (Ersatz-) Brennstoffe. Bei überhöhten Wärmeeinträgen kommt es zu Temperaturspitzen im Calcinator mit dem Risiko von Ansatzbildung und/oder Zyklonverstopfen. Bei verringerten Wärmeeinträgen, z. B. durch Dosier- oder Heizwertschwankungen oder durch den kompletten Ausfall einer Ersatzbrennstoffaufgabe, wird der Calcinator kalt. Das dann nicht vollständig entsäuerte Heißmehl kann später im Drehofen nicht mehr komplett zu einem Klinker mit den erforderlichen Qualitätsparametern (z. B. Freikalkgehalt < 1,5 Gew. %) fertig gebrannt werden und es kommt zu Qualitätseinbußen im Produkt. Für eine hohe gleichbleibende Klinkerqualität ist eine stabile Heißmehlentsäuerung von entscheidender Bedeutung. Diese wird durch ein stabiles Temperaturniveau im Calcinator erreicht.

Im Holcim Werk Lägerdorf besteht der Vorwärmer aus zwei Strängen (**Bild 1**, aus Übersichtlichkeit nur ein Strang dargestellt) mit je drei Zyklonstufen und einem Abscheidezyklon. Der Prozess in Lägerdorf wird mit vielen verschiedenen Brenn-

hot meal then passes into the rotary kiln where the actual sintering and clinker formation take place.

The calciner process has a relatively rapid time characteristic when compared with many of the other sub-processes in clinker production. Because of the relatively restricted dimensions of the rotary kiln (length and ratio of length to diameter) there are cases where the hot meal at the rotary kiln inlet must be very largely calcined (apparent degree of calcination > 96 %) in order to reach the required clinker product quality (free lime content). Fluctuating heat inputs of limited time span to the calciner from the hot meal may prevent further calcination work to be performed. When many different inhomogeneous alternative fuels, such as distillation residues, shredded tyres, animal meal, roofing felt, alternative fuel pellets and fluff, are being used fluctuations occur in the addition and/or calorific values of the (replacement) fuels. If the heat input is too high then temperature peaks occur in the calciner with the

risk of coating formation and/or cyclone blockages. If the heat input is reduced, e.g. due to fluctuations in the rate of addition or the calorific value of the fuel or due to complete failure of an alternative fuel feed, then the calciner becomes cold. The incompletely calcined hot meal cannot then be fully burnt in the rotary kiln to form a clinker with the required quality parameters (e.g. free lime content < 1.5 %) and loss of quality occurs in the product. Stable calcination of the hot meal is of crucial importance for high and consistent clinker quality. This is achieved by a stable temperature level in the calciner.

At Holcim's Lägerdorf plant the preheater consists of two lines (**Fig. 1**, only one line is shown for the sake of clarity), each with three cyclone stages and a separation cyclone. The process at Lägerdorf operates with many different fuels. The main fuels are coal and fluff, which are transported pneumatically and therefore have relatively short transport times. They are basically suitable as primary fuels. In addition to these up to five alternative fuels are transported to the calciner on long troughed belt conveyor systems. The transport time can be up to 6 minutes. The main control objective is to achieve a calciner temperature that is as stable as possible. This is affected not only by the heat input from the combustion of coal and alternative fuels but also by the injection of SNCR reducing agents, the meal feed rate and therefore also by the meal temperature as well as the gas flow rates.

Because of the use of alternative fuels the temperature and the combustion process in this calciner exhibit a high degree of variability. The "Advanced Process Control" methods – more precisely Model Predictive Control – are used here to stabilize the process.

2 General technical comments

2.1 What is "Advanced Process Control"?

A reliable method of raising the efficiency of a modern plant

stoffen betrieben. Hauptbrennstoffe sind Kohle und Fluff, die pneumatisch transportiert werden und damit eine relativ geringe Transportzeit haben. Diese sind grundsätzlich als Regelbrennstoffe geeignet. Dazu werden bis zu fünf alternative Brennstoffe über lange Muldengurtförderer-Bandtrassen zum Calcinator geführt. Die Transportzeit beträgt bis zu 6 Minuten. Hauptregelziel ist eine möglichst stabilisierte Calcinatortemperatur. Beeinflusst wird diese nicht nur durch Wärmeeinträge durch die Verbrennung von Kohle und alternativen Brennstoffen, sondern auch durch die Eindüsung von SNCR-Reduktionsmitteln, die Mehlmenge und entsprechend auch durch die Mehlmengen zum Calcinator sowie von Gasflussmengen und Temperaturen vom Drehofen und von der Tertiärluftleitung zum Calcinator.

Wegen der Benutzung von alternativen Brennstoffen weisen die Temperatur und der Verbrennungsprozess dieses Calcinator eine hohe Variabilität auf. Die „Advanced Process Control“-Methoden – genauer modell-prädiktive Regelung – werden hier zur Prozessstabilisierung verwendet.

2 Allgemeine technische Ausführungen

2.1 Was ist „Advanced Process Control“?

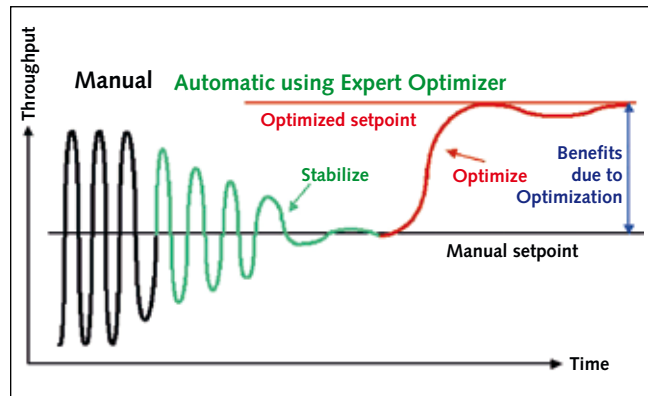
Eine sichere Methode, die Effizienz einer modernen Anlage zu erhöhen ist die Verwendung von „Advanced Process Control“ (APC). Anwendungen von APC muss man sich als „Autopiloten“ für einen Teil des Produktionsprozesses vorstellen (z. B. Drehofen oder Mühle). Die bestmögliche Regelungsstrategie wird auf einem mit der Leittechnik verknüpften Rechner implementiert und kontinuierlich angewendet. Dabei werden Taktraten benutzt, die höher sind als solche, die ein Mensch je erreichen kann. Das führt zu einer starken Reduktion der Variabilität des Prozesses. Der Prozess kann dadurch an einem optimalen Arbeitspunkt betrieben werden, also zum Beispiel bei einer maximalen Produktionsrate, bei der besten Betriebstemperatur oder bei optimalen Verbrennungsbedingungen (**Bild 2**).

Es sei hier erwähnt, dass APC kein Ersatz für die übliche Leittechnik der Anlage ist. APC ist eine Softwarelösung, die in Form einer übergeordneten Regelung verbesserte Betriebspunkte für die existierenden Regelkreise berechnet.

2.2 Was ist modell-prädiktive Regelung?

Es gibt mehrere Methoden um APC-Strategien zu entwickeln, so haben zum Beispiel bereits Fuzzy-Regelung und Neuronale Netzwerke breite Anwendung in der Zementindustrie gefunden. In den letzten Jahren beobachtet man, dass eine Technologie namens modell-prädiktive Regelung (MPC) den Status eines gut getesteten Verfahrens erobert hat.

MPC ist eines der wichtigsten Werkzeuge im Arsenal des modernen Regelungstechnikers [1]. Es basiert auf dem sogenannten „zurücktretenden Horizont“ (zu English „receding horizon“). Dabei wird eine Sequenz von in die Zukunft reichenden optimalen Aktionen unter Einbeziehung der Dynamik des Systems in dem Zeitintervall $[t, t+p]$ berechnet. Wobei t die jetzige Zeit bezeichnet und einen für die Anwendung relevanten Zeithorizont darstellt (**Bild 3**). Das erste Element der Stellgrößensequenz wird als neuer Aktuator-Sollwert dem Leitsystem übergeben. Sind neue Messungen verfügbar, wird der Algorithmus wiederholt und eine neue Sequenz berechnet.



2 Vorteil Expert Optimizer

2 The advantage of the Expert Optimizer

is to use “Advanced Process Control” (APC). Applications of APC should be pictured as “autopilots” for a part of the production process (e.g. rotary kiln or mill). The best possible control strategy is implemented and continuously applied on a computer linked with the instrumentation and control system. Clock-pulse rates are employed that are higher than those that man could ever achieve. This leads to a sharp reduction in the variability of the process and means that the process can be operated at an optimum working point, e.g. at a maximum production rate, at the best operating temperature or under optimum combustion conditions (**Fig. 2**).

It should be mentioned here that APC is not a substitute for the plant’s normal instrumentation and control technology. APC is a software solution in the form of a higher-level control system that calculates improved operating points for the existing control loops.

2.2 What is model predictive control?

There are several methods of developing APC strategies; fuzzy control and neural networks, for example, are already widely used. In recent years it has been observed that a technology called model predictive control (MPC) has become recognized as a well tested procedure.

MPC is one of the most important tools in the arsenal of the modern control engineer [1]. It is based on the “receding horizon”. A sequence of optimum actions extending into the future are calculated while incorporating the dynamics of the system in the time interval $[t, t+p]$, in which t designates the present time and p represents a time horizon that is relevant for the application (**Fig. 3**). The first element of the sequence of manipulated variables is transferred to the control system as the new actuator setpoint value. If new measurements are available the algorithm is repeated and a new sequence is calculated.

This approach can be compared with a chess player:

1. The position on the chess board is considered (measuring and assessing the state of the system).
2. A search is made for the best future moves (mathematical algorithm).
3. The first move is made (new actuator setpoint value).
4. The search is started again when the opponent has made his move (new measurement).

Die oben beschriebene Arbeitsweise kann mit einem Schachspieler verglichen werden:

1. Die Stellung auf dem Schachbrett wird betrachtet (Messen und Abschätzen des Systemzustandes).
2. Die besten Züge in die Zukunft werden gesucht (Mathematischer Algorithmus).
3. Der erste Zug wird angewendet (Neuer Aktuator-Sollwert).
4. Die Suche wird wieder gestartet, wenn der Gegner seinen Zug gemacht hat (Neue Messung).

In der Regel wird die optimale Sequenz mit Hilfe mathematischer Verfahren wie der linearen und der quadratischen Programmierung berechnet. Dies beinhaltet die Berücksichtigung von zwei Faktoren von zentraler Bedeutung:

- (i) die Optimierung der für das System entworfenen Regelgütefunktion
- (ii) den Schutz vor Zuständen die mit dem Prozess unvereinbar sind.

2.3 Die APC-Plattform Expert Optimizer

Um die hier zur Diskussion gestellte MPC-Strategie zu entwickeln und zu implementieren, wurde in diesem Projekt die Software des Expert Optimizer benutzt [2]. Zur Abbildung der Regelstrategien unterstützt der Expert Optimizer Echtzeit-Regelanwendungen und stellt so eine hochmoderne, aber robuste grafische Sprache zur Verfügung. Interaktion mit dem System wird mit Hilfe web-basierten Services sichergestellt (**Bild 4**).

Allein in der Zementindustrie hat dieses Produkt eine Referenzliste mit mehreren hundert Einträgen in den Bereichen Rohmaterialmischung, Drehofenregelung, Mühlenregelung und seit kurzem auch im Bereich der Produktionsplanung [3].

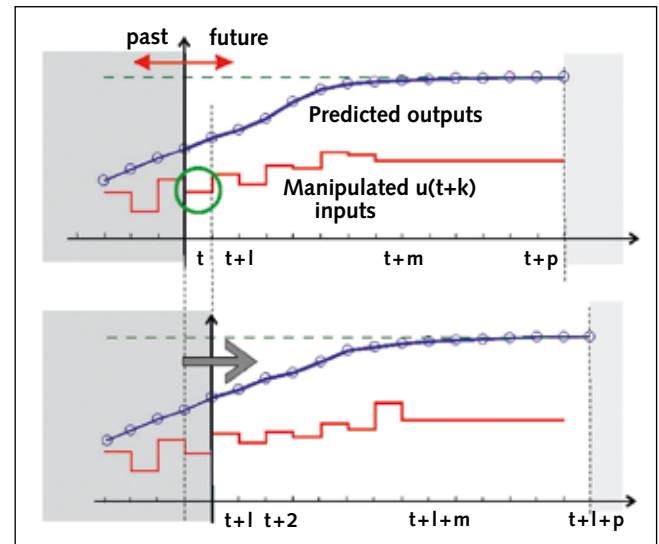
3 Modellbildung

Bei modell-prädiktiven Reglern ist das Modell ein direkter Baustein des Reglers und daher wird die Regelgüte wesentlich davon abhängen. Grundsätzlich gilt: Je genauer das Modell den realen Prozess wiedergibt, desto höhere Erwartungen kann man an die zu erreichende Reglergüte stellen. Hingegen gilt oft auch: Je genauer das Modell, desto sensibler wird ein Regler auf Prozessunsicherheiten reagieren und damit die Regelgüte negativ beeinflussen. Dazu resultieren für komplexere Modelle höhere Rechenzeiten für die Lösung der mit dem Regleralgorithmus verbundenen Optimierung. Es ist daher wichtig, die Modellbildung auf diese Kriterien abzustimmen.

Die MPC-Technologie kann – im Gegensatz zu vielen anderen Regleransätzen – Totzeiten direkt im Modell berücksichtigen und ist daher eine geeignete Methode, um solche Prozesse zu regeln.

Das Modell wird daher in ein Transport- und ein Verbrennungsmodell unterteilt. In Bild 1 sind die entsprechenden Systemgrenzen für die beiden Modelle eingezeichnet. In **Bild 5** sieht man die endgültige Form des Modells in der grafischen Sprache von Expert Optimizer.

Das Transportmodell ist im Wesentlichen die zeitdiskrete Abbildung der Totzeiten durch ein Vielfaches der Abtastzeiten. Das Verbrennungsmodell besteht aus zwei Teilen: einer Wärmebi-



3 Modell Prädiktive Regelung

3 Model predictive control

As a rule the optimum sequence is calculated with the aid of mathematical procedures such as linear or quadratic programming. This includes taking two factors of central importance into account:

- (i) Optimization of the control performance function planned for the system.
- (ii) Protection from situations that are incompatible with the process.

2.3 The APC platform for the Expert Optimizer

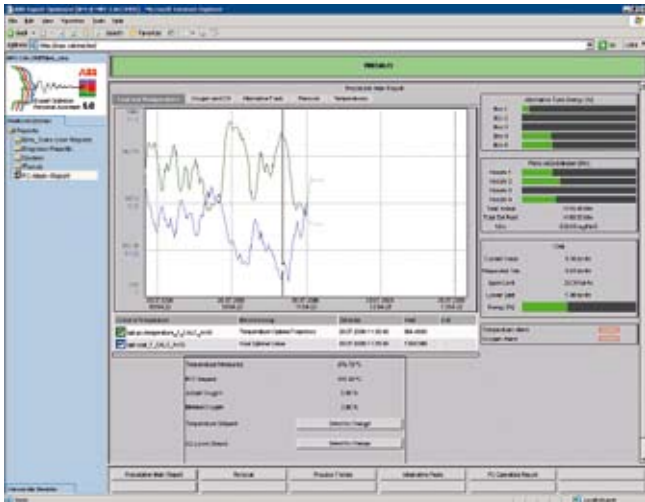
The Expert Optimizer software was used in this project to develop and implement the MPC strategy that is being discussed here [2]. The Expert Optimizer supports real-time control applications for representation of the control strategies and in this way provides a highly modern but robust graphical language. Interaction with the system is ensured with the aid of web-based services (**Fig. 4**).

This product is unique in the cement industry in having a list of several hundred completed applications in the fields of raw material mixing, rotary kiln control, mill control and, very recently, the production planning sector [3].

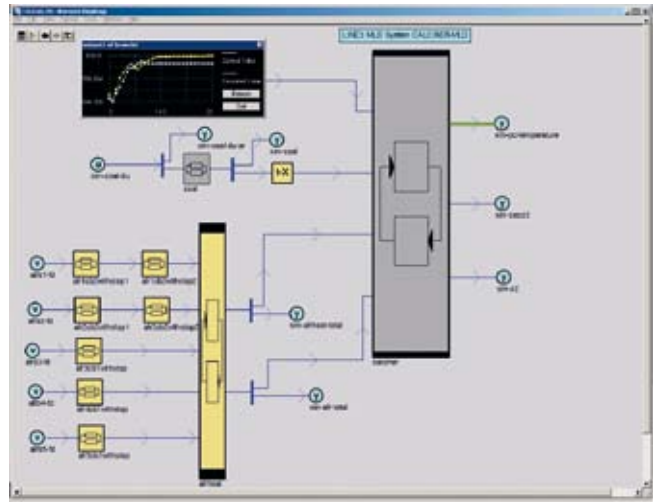
3 Modelling

With model predictive controllers the model is a direct building block in the controller, so the control performance is directly dependent on it. It is basically true that the more accurately the model reflects the real process the higher the expectations that can be placed on the control performance that can be achieved. However, it often is also true that the more accurate the model is the more sensitively does the controller react to process uncertainties and therefore have a detrimental effect on the control performance. For more complex models this results in longer calculation times for the solution of the optimization associated with the control algorithm. It is therefore important to adapt the modelling to suit these criteria.

The MPC technology can – unlike many other controller strategies – take account of lag times directly in the model, so it is a suitable method for controlling such processes.



4 Web-basierte Bedienungsoberfläche im Expert Optimizer
4 Web-based operator interface in the Expert Optimizer



5 Grafische Modellierung im Expert Optimizer
5 Graphical modelling in the Expert Optimizer

lanz und einer Sauerstoffbilanz. Die Wärmebilanz kann als $Q[k+1] = Q[k] + T_s \cdot \left(\sum_i \dot{Q}_i^*[k] - \sum_j \dot{Q}_j^*[k] \right)$ beschrieben werden. Dabei ist $Q[\cdot]$ die Wärmemenge im Vorcalcinator und $\sum_i \dot{Q}_i^*[k]$ und $\sum_j \dot{Q}_j^*[k]$ beschreiben alle Wärme- ein- und Wärmeausträge. Die Abtastzeit ist T_s . Analog dazu kann die Sauerstoffbilanz beschrieben werden.

Die Sauerstoffbilanz wird benötigt, damit der Regler auch eine Vorhersage über das Verhalten des Sauerstoffs im System machen kann. Damit kann der Regler frühzeitig den regelbaren Brennstoff anpassen, um bestmögliche Verbrennungsbedingungen zu garantieren.

Damit die Calcinatortemperatur stabil gehalten werden kann, muss die Wärmemenge konstant sein. Dies bedeutet, dass sich die Wärmeeinträge und die Wärmeausträge zu null ergänzen, i.e.

$$\sum_i \dot{Q}_i^*[k] - \sum_j \dot{Q}_j^*[k] = 0.$$

Verändert sich einer dieser Summanden, muss der regelbare Brennstoff entsprechend angepasst werden. Mit dem Transportmodell ist es nun möglich, wesentliche Veränderungen im Wärmeeintrag zum Beispiel durch die Veränderungen der alternativen Brennstoffe vorauszusagen und damit lässt sich der Regelbrennstoff möglichst optimal anpassen.

Um Unsicherheiten zu kompensieren, sind eine oder mehrere der oben erwähnten Summanden adaptiv (je einer für die Wärme- und die Sauerstoffbilanz). Diese wirken analog zu einem Integrierteil in der klassischen PID-Technik.

4 Kostenfunktionen und gewünschtes Regelverhalten

Neben dem Modell sind bei modell-prädiktiven Reglern die Kostenfunktionen entscheidend für die Einstellung des Regelverhaltens. Der Optimierungs-Algorithmus garantiert, dass möglichst niedrige Gesamtkosten entstehen. Die Kostenfunktionen „übersetzen“ nicht nur Abweichungen vom Zielwert, sondern auch Veränderungen eines Aktuators in eine Kostefunktion.

The model is therefore divided into a transport model and a combustion model. The corresponding system boundaries for the two models are indicated in Figure 1. The final form of the model can be seen in **Figure 5** in the graphical language of the Expert Optimizer.

The transport model consists essentially of the discrete-time representation of the lag times through multiples of the sampling time. The combustion model consists of two parts – a heat balance and an oxygen balance. The heat balance can be described as

$$Q[k+1] = Q[k] + T_s \cdot \left(\sum_i \dot{Q}_i^*[k] - \sum_j \dot{Q}_j^*[k] \right)$$

in which $Q[\cdot]$ is the quantity of heat in the precalciner and $\sum_i \dot{Q}_i^*[k]$ and $\sum_j \dot{Q}_j^*[k]$ describe all the heat inputs and outputs. The sampling time is T_s . The oxygen balance can be described analogously.

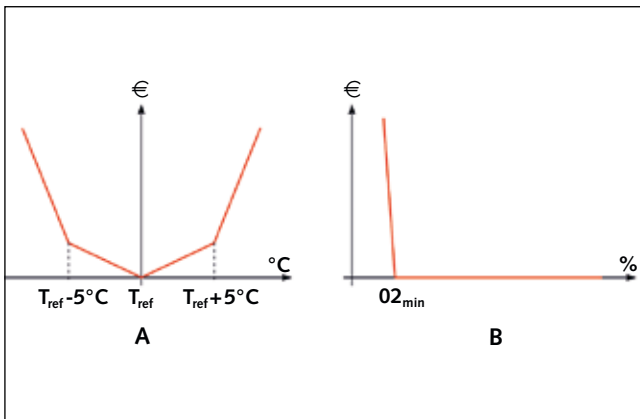
The oxygen balance is needed so that the controller can also predict the behaviour of the oxygen in the system. This means that the controller can adjust the controllable fuel in good time in order to guarantee the best possible combustion conditions.

The quantity of heat must be constant so that the calciner temperature can be kept stable. This means that the heat inputs and heat outputs cancel each other out, i.e.

$$\sum_i \dot{Q}_i^*[k] - \sum_j \dot{Q}_j^*[k] = 0.$$

If one of these summands changes then an appropriate adjustment must be made to the controllable fuel. With the transport model it is now possible to predict substantial changes in the heat input due, for example, to changes to the alternative fuels, so that the optimum adjustment can be made to the primary fuel.

One or more of these summands (one each for the heat balance and oxygen balance) are adaptive to compensate for uncertainties. This acts in a similar way to the integral component in classical PID technology.



6 Kostenfunktionen für die Zieltemperatur (T_{ref} , Grafik A) und für die Sauerstoffbegrenzung (O_{2min} , Grafik B).

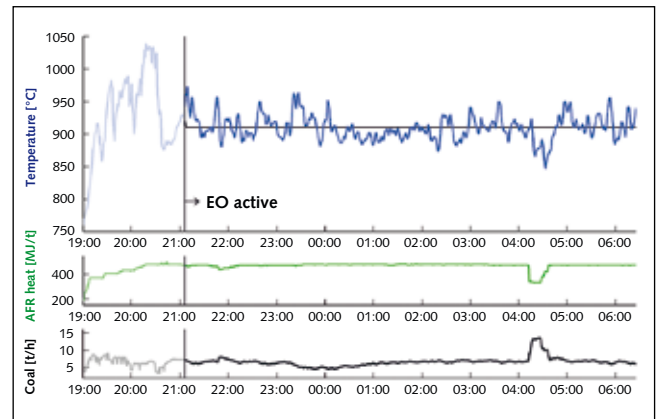
6 Cost functions for the setpoint temperature (T_{ref} , Table A) and for the oxygen limit (O_{2min}), Table B)

neinheit. Damit können verschiedene Größen miteinander in Relation gebracht werden. In **Bild 6** sind zwei Beispiele von verschiedenen verwendeten Kostenfunktionen dargestellt. Hauptziel ist eine möglichst um den Zielwert (T_{ref}) stabilisierte Calcinatortemperatur. Mit der Kostenfunktion von Tafel A in Bild 6 wird dies erreicht. Hier wird eine kleine Abweichung weniger stark penalisiert, damit wird die Unsicherheit von der Temperaturmessung berücksichtigt. Die Kostenfunktion von Tafel B hat eine sehr steile Flanke für Abweichungen unter dem vorgegebenen Mindest-Sauerstoffgehalt (O_{2min}). So wird schon nur eine kleine Abweichung sehr hohe Kosten zur Folge haben. Der Regler wird dies versuchen zu vermeiden und damit kann eine untere Sauerstoffbegrenzung eingehalten werden. Da die Kosten für das Unterschreiten im Vergleich zu den Kosten für eine Temperaturabweichung sehr hoch sind, ist es für den Regler die optimale Lösung, den minimalen Sauerstoffwert zu halten und dafür eine Temperaturabweichung zu akzeptieren. Liegt der Sauerstoff über diesem Mindestwert ergibt dies keine Kosten. Damit wird das Regelverhalten durch intuitiv einfache Kostenfunktionen und durch ein genügend genaues Modell erreicht, was die Einstellung des modell-prädiktiven Reglers auch für Mehrgrößensysteme einfach macht.

5 Resultate

Dieser MPC-Regler ist seit August im Holcim Werk Lägerdorf in Betrieb und weist relative Laufzeiten von etwa 95 % auf. **Bild 7** zeigt einen typischen Zeitverlauf, bei dem der Expert Optimizer eingeschaltet war (EO active).

Die Verbesserungen bezüglich Stabilität der Calcinatortemperatur sind signifikant. Um dies zu veranschaulichen, wurden verschiedene Perioden von mindestens 4 Stunden Dauer miteinander verglichen. Als Referenzperioden gelten zwei Zeitabschnitte (MC1, MC2), in denen der Regler ausgeschaltet war und der Leitstandsfahrer für die Regelung verantwortlich war. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, dass in dieser Zeit keine bedeutenden Störungen aufgetreten sind („Geradeausbetrieb“: Es sind keine Brennstoffe ausgefallen und es wurde auch keine Veränderung der Ofenaufgabe vorgenommen). Als Vergleichsperioden wurden drei Abschnitte ohne bedeutende



7 Typischer Zeitverlauf – Oben: Calcinatortemperatur mit Zielwert; Mitte: Errechneter Wärmeeintrag durch die alternativen Brennstoffe; Unten: Kohlemenge

7 Typical behaviour patterns with time – Top: Calciner temperature with setpoint value; Middle: Calculated heat input by the alternative fuels; Bottom: Quantity of coal

4 Cost functions and required control behaviour

In addition to the model, the cost functions are crucial in model predictive controllers for tuning the control behaviour. The optimization algorithm guarantees that the overall costs are as low as possible. The cost functions “translate” not only any deviations from the setpoint value but also any changes of an actuator into cost units. This allows a relationship to be formed between different variables. Two examples of different cost functions used are shown in **Figure 6**. The main objective is a calciner temperature that is optimally stabilized around the setpoint value (T_{ref}). This is achieved with the cost function in Table A in Figure 6. A small deviation here is not very strongly penalized, which takes account of the uncertainty of the temperature measurement. The cost function in Table B has a very steep slope for deviations below the predetermined minimum oxygen content (O_{2min}). This means that only a small deviation results in very high costs. The controller will attempt to avoid this so that it can maintain a bottom oxygen limit. The cost of falling below the setpoint is very high compared with the cost of a temperature deviation so the optimum solution for the controller is to maintain the minimum oxygen value and instead accept a temperature deviation. No costs are involved if the oxygen lies above this minimum value. This means that the control behaviour is achieved by intuitively simple cost functions and a sufficiently accurate model. This also makes it simple to set up the model predictive controller for multi-variable systems.

5 Results

This MPC controller has been in operation at Holcim’s Lägerdorf plant since August and has had relative run times of about 95 %. **Figure 7** shows typical behaviour patterns with time when the Expert Optimizer was switched on (EO active).

The improvements in the stability of the calciner temperature are significant. This was illustrated by comparing different periods of at least four hours’ duration with one another. The reference periods are two time intervals (MC1, MC2) when the controller was switched off and the control room operator was responsible for the control. Care was taken in the selection that no significant disturbances had occurred during these periods (“straightforward operation” – no fuel failures and also

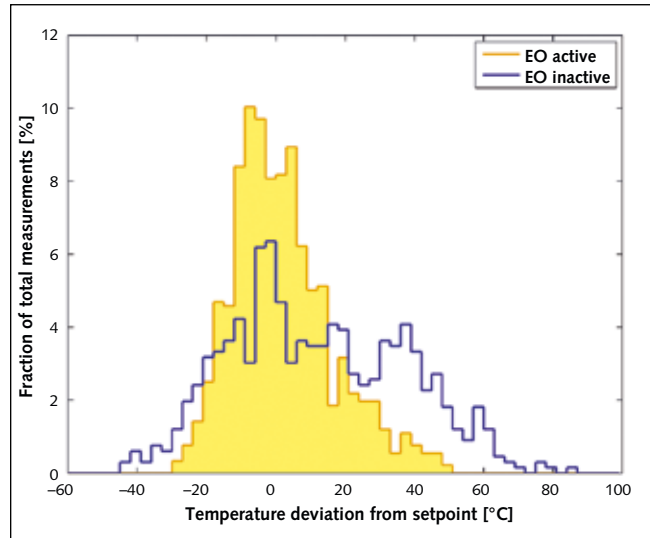
Störungen (EO1, EO2, EO3) und ein Abschnitt mit Ausfällen bei den alternativen Brennstoffen gewählt (EO4). Als einfaches Gütekriterium dient der prozentuale Anteil der Messungen, die in einem Band von $\pm 10^\circ\text{C}$, $\pm 20^\circ\text{C}$, $\pm 30^\circ\text{C}$, $\pm 40^\circ\text{C}$ um den eingestellten Zielwert angesiedelt sind ($R_{\pm 10}$, $R_{\pm 20}$, $R_{\pm 30}$, $R_{\pm 40}$). Zusätzlich wird der Mittelwert (mit Standardabweichung) der Calcinatortemperatur verwendet. Der Zielwert der Vorcalcinatortemperatur war 910°C . Das Ergebnis ist in **Tabelle 1** zusammengefasst. Im Vergleich zwischen den Abschnitten, in denen keine bedeutenden Störungen (MC1, MC2, EO1-EO3) aufgetreten sind, ist ersichtlich, dass der Regler wesentlich weniger vom Zielwert abweicht (kleinere Schwankungen und höhere Anteile in den Temperaturbändern). Obwohl in Abschnitt EO4 Störungen mit alternativen Brennstoffen aufgetreten sind, ist das Verhalten gegenüber den Referenzperioden (MC1, MC2) ebenfalls wesentlich besser.

Bild 8 zeigt die relative Verteilung des Regelfehlers über die beobachteten Abschnitte MC1 und MC2 in blau sowie EO1 bis EO3 in gelb. Wiederum sieht man deutlich, dass die Abschnitte, in denen Expert Optimizer aktiv war, der Zielwert der Calcinatortemperatur besser eingehalten wird. Zusätzlich ist die Verteilung des Regelfehlers nahe an einer Glockenkurve. Dies deutet darauf hin, dass der Regler den Prozess symmetrisch stabilisiert und das allfällige nicht im Modell erfasste Nichtlinearitäten den Prozess nicht dominant beeinflussen. Des Weiteren sieht man deutlich, dass während der manuell geregelten Abschnitte die Temperatur eher höher war. Die Leitstandfahrer in Lägerdorf hatten die Tendenz den Calcinator mit höheren Temperaturen zu betreiben, da dann insbesondere die Prozessbedingungen im Drehofen sowie die daraus resultierende Klinkerqualität sich weniger variabel verhielten. Dafür wurde in Kauf genommen, dass die höheren Calcinatortemperaturen eine niedrigere Energieeffizienz hatten und dass zusätzliche Risiken für Ansatzbildung und kapitale Zyklonverstopfer wahrscheinlicher wurden. Gründe für die Einführung der Calcinatorregelung mit Expert Optimizer waren, dass möglichst keine Temperaturspitzen im Calcinator mehr auftreten und weiterhin, dass trotz im Mittel niedrigerer Calcinatortemperaturen eine ähnliche Prozessstabilität im Drehrohr bei gleicher Klinkerqualität (Freikalkwerten) erreicht wird.

6 Fazit

In diesem Beitrag wurde eine MPC basierte Lösung für die Temperaturregelung eines mit vielen alternativen Brennstoffen getriebenen Calcinator präsentiert. Die Strategie wurde in ABB's Expert Optimizer implementiert. Die erzielten Resultate mit dem Expert Optimizer in Lägerdorf zeigen eindeutig eine bessere Regelgüte als dies die Operatoren erreichen. Das Resultat lässt sich dadurch erklären, dass das Expert Optimizer System ständig die geeignete Änderung an den Stellgrößen berechnen und vornehmen kann.

Die erzielte Regelgüte in Lägerdorf (**Bild 9**) erlaubt eine durchschnittlich tiefere Calcinatortemperatur, ohne dabei die gewünschte Klinkerqualität negativ zu beeinflussen. Das ABB Expert Optimizer System unterstützt die Prozesssteuerer nicht nur beim Stabilisieren des Prozesses, es erlaubt auch einen standardisierten Betrieb zum Schutz des Prozesses und der Ausrüstung (z. B. Feuerfestausmauerung) vor Überhitzungen. Dies hauptsächlich, weil die Leitstandfahrer zur Stabilisierung des Prozesses und der Produktqualität tendenziell immer eine hö-



8 Verteilung des Regelfehlers
8 Distribution of the control error

no changes to the kiln feed). Three intervals without significant disturbances (EO1, EO2, EO3) and one section (EO4) with disturbances in the alternative fuels were chosen as the periods for comparison. The percentages of the measurements located in bands of $\pm 10^\circ\text{C}$, $\pm 20^\circ\text{C}$, $\pm 30^\circ\text{C}$, $\pm 40^\circ\text{C}$ around the given setpoint value ($R_{\pm 10}$, $R_{\pm 20}$, $R_{\pm 30}$, $R_{\pm 40}$) serve as simple quality assessment criteria. The average value (with standard deviation) of the calciner temperature is also used. The setpoint value of the precalciner temperature was 910°C . The results are summarized in **Table 1**. In the comparison between the intervals in which no significant disturbances occurred (MC1, MC2, EO1-3). It can be seen that the controller deviates significantly less from the setpoint value (smaller fluctuations and higher percentages in the temperature bands). Although disturbances with alternative fuels occurred during interval EO4 the behaviour is also substantially better than in the reference periods (MC1, MC2).

Figure 8 shows the relative distribution of the control errors in blue for the observed intervals MC1 and MC2, and in yellow for EO1 to EO3. Again it is clear that the setpoint value for the calciner temperature was maintained better in the intervals when the Expert Optimizer was active. The distribution of the control errors is also close to a bell curve. This indicates that the controller stabilizes the process symmetrically and that any non-linearities not covered by the model do not have a dominant effect on the process. It is also clear that the temperature was somewhat higher during the manually controlled intervals. The control room operators at Lägerdorf had a tendency to operate the calciner at higher temperatures as there is then less variation in the process conditions in the rotary kiln as well as in the re-

Tabelle 1: Zusammenfassung der Resultate
Table 1: Summary of the results

Period	T mean (SD) [°C]	R±10 [%]	R±20 [%]	R±30 [%]	R±40 [%]
MC1	929.8 (21.8)	3.48	49.7	65.0	80.7
MC2	913.0 (25.2)	29.4	58.3	75.3	88.1
EO1	910.6 (15.5)	44.9	81.2	95.4	99.1
EO2	910.2 (10.9)	65.6	93.3	99.3	100
EO3	910.0 (15.9)	54.3	81.7	93.0	97.0
EO4	907.9 (17.7)	44.6	74.9	91.0	96.7



9 Holcim-Werk Lägerdorf, Ofenlinie 11
9 Holcim plant Lägerdorf, kiln line 11

here als die unbedingt notwendige Calcinator-temperatur angestrebt hatten. Die indirekten Vorteile wie kleinere Risiken von Zyklonverstopfungen und Ansatzbildung durch die durchschnittlich tieferen Calcinator-temperaturen und der Vermeidung von Temperaturspitzen lassen sich erst nach längerem Betrieb endgültig evaluieren.

Literaturverzeichnis/Literature

- [1] Bemporad, A.; Morari, M.: "Control of Systems Integrating Logic, Dynamics, and Constraints", *Automatica* 35 (1999), Nr. 3, 407–427.
[2] Castagnoli, D.; Kiener, M.; Gallestey, E.: "Cementing profitability", *ABB Review* 4/2006, 59–62.

sulting clinker quality. It was accepted that the higher calciner temperatures had a lower energy efficiency and that there were greater additional risks of coating formation and really serious cyclone blockages. The reasons for the introduction of the calciner control system with the Expert Optimizer were that as far as possible there should be no more temperature peaks in the calciner and also that the rotary kiln should achieve a similar process stability with the same clinker quality (free lime values) in spite of the lower average calciner temperatures.

6 Conclusion

This article has described an MPC-based solution for controlling the temperature of a calciner operated with many alternative fuels. The strategy was implemented with ABB's Expert Optimizer. The results achieved with the Expert Optimizer at Lägerdorf clearly show a better control performance than that achieved by the operators. The result can be explained by the fact that the Expert Optimizer can continuously calculate and carry out appropriate changes in the manipulated variables.

The control quality achieved at Lägerdorf (**Fig. 9**) makes it possible to operate at a lower average calciner temperature without any detrimental effect on the required clinker quality. The ABB Expert Optimizer system not only supports the process controller with the stabilization of the process but also allows a standardized operation to be used to protect the process and the equipment (e.g. refractory lining) from overheating. This is mainly because, in order to stabilize the process and the product quality, the control room operators had always tended to aim for a higher calciner temperature than was absolutely necessary. Final evaluation of the indirect advantages, such as smaller risks of cyclone blockages and coating formation due to the lower average calciner temperatures and the avoidance of temperature peaks, will only be possible after longer operation.

- [3] Gallestey, E.; Stothert, A.; Castagnoli, D.; Ferrari-Trecate, G.; Morari, M.: "Using model predictive control and hybrid systems for optimal scheduling of industrial processes", at - *Automatisierungstechnik* Vol. 51, Nummer 6 (2003), 285–294.