

2022.10.22

Preprint - Nur zur Information, nicht zur Veröffentlichung vorgesehen!

Control Performance Monitoring

Zustandsüberwachung von Regelkreisen in einer vorausschauenden Instandhaltung

Control Performance Monitoring (CPM) ist Condition Monitoring von Regelkreisen. Mit CPM soll der Instandhaltung ein digitales Werkzeug in die Hand geben werden, mit dem sie auch bisher in Regelkreisen nicht messbares messen und Anomalien erkennen kann.

CPM ist an Voraussetzungen in der Anlagentechnik, der Digitalisierung und der Informatik gebunden. Zum besseren Verständnis der Methode werden die einzelnen Komponenten einer typischen Temperatur-Regelung in einem Industrieofen im Zusammenwirken mit CPM dargestellt.

Der Beitrag beschäftigt sich insbesondere mit ersten Ergebnissen aus der praktischen Anwendung. Hier werden zwei Fragen untersucht: Erstens welchen Nutzen hat CPM als ergänzendes digitales Werkzeug zur Fehleranalyse und Qualitätssicherung von Regelkreisen und zweitens kann die Degeneration von Regelstrecken, beispielsweise einer Ofenwärmedämmung, mit der Hilfe von CPM gemessen werden?

Abschließend wird der Frage nachgegangen, ob bzw. wie CPM in eine automatisierte Anomalieerkennung integriert werden kann.

In der Automatisierungstechnik und Datenanalyse behandeln wir die Zustandsdiagnose von Regelungen im Gegensatz zu Steuerungen mangels geeigneter Methoden ziemlich stiefmütterlich. Das muss nicht so bleiben! In unserem letzten in Prozesswärme 07-2020 veröffentlichten Fachbeitrag „Vorausschauende Instandhaltung von Thermoprozessanlagen“ haben wir im ersten Teil über Anomalieerkennung berichtet [1]. Das in der Anomalieerkennung enthaltene Control Performance Monitoring (CPM) zur Überwachung von Regelkreisen haben wir in diesem Beitrag aber nur kurz gestreift, weil uns damals noch zu wenige Daten aus der Praxis vorlagen. Jetzt, zwei Jahre später, können wir mit Anwendungsbeispielen die ersten Ergebnisse präsentieren.

Was genau ist CPM?

CPM ist Condition Monitoring von Regelkreisen. Es ist eine für Thermoprozessanlagen noch weitgehend unbekannt Methode zur Anomalieerkennung und ein Baustein in einer vorausschauenden Instandhaltung. CPM hilft, dass bei nachlassender Leistungsfähigkeit einzelner Regelkreise rechtzeitig und an der richtigen Stelle mit Maßnahmen zur Instandhaltung eingegriffen werden kann. Die Methode als solche ist aus der Forschung [2] und Energieerzeugungstechnik [3] schon länger bekannt, war aber vor dem Zeitalter der Digitalisierung mit einem zu großen apparativen Aufwand verbunden.

Das Prinzip ist einfach: Die Qualität einer Regelung kann an der Varianz des Istwerts um den Sollwert und am Zeitverhalten zur Beseitigung einer Regelabweichung beurteilt werden. Dazu wird ein früher als gut bestimmter Zustand mit dem aktuellen Zustand verglichen. Hautaugenmerk liegt dabei auf dem Reglerstellgrad. Im CPM wird der Reglerstellgrad gemessen und daraus die Fläche unter der Kurve in einem Zeitintervall berechnet. Wenn in diesem Beitrag von CPM gesprochen wird, ist damit also immer das Integral des Stellgrads in einem Zeitintervall gemeint. In einem Diagramm wird ein einzelner CPM-Wert als Punkt in einem Koordinatensystem dargestellt.

Die Zielsetzung für CPM ist weit gespannt. Vorrangig geht es, wie vorstehend beschrieben, die Leistungsfähigkeit einer Regelung zu überwachen und Störeinflüsse frühzeitig zu erkennen. Daher auch

der Name Control (Loop) Performance Monitoring. Darüber hinaus geht es aber auch, quasi als Nebenprodukt, bisher nicht messbares messbar zu machen.

Themen

Dieser Fachbericht soll folgende Fragen beantworten:

- Für welche Regelkreise und Thermoprozessanlagen ist CPM nutzbar?
- Welche Rolle spielt die Digitalisierung?
- Welche Funktion hat CPM in einem Temperaturregelkreis?
- Wie kann CPM ein Frühindikator für sich anbahnende Störungen und Ausfälle ein Werkzeug zur Qualitätssicherung in der Instandhaltung sein?
- Kann die Degeneration von Regelstrecken, beispielsweise einer Ofenwärmedämmung, mithilfe von CPM gemessen werden?
- Kann CPM in eine automatisierte Anomalieerkennung integriert werden?

Anlagentechnik

Damit kommen wir zur ersten Frage, für welche Thermoprozessanlagen und Regelkreise CPM nutzbar ist. CPM ist prinzipiell für alle Anlagentypen und für alle Regelungen dieser Anlagen, also beispielsweise Temperatur- und C-Pegelregelungen geeignet. Genau genommen sind nur vergleichbare Betriebsbedingungen eine Voraussetzung. In Betriebshärtereien mit wiederkehrendem Produktionsprogramm und identifizierbaren Chargen ist dies in der Regel gegeben. Auch bei den beiden in diesem Fachbericht beispielhaft analysierten zweibahnigen Gasaufkohlungs-Durchstoßofenanlagen zur Wärmebehandlung von Getriebebauteilen treffen die vorgenannten Bedingungen zu. Alle Temperaturregelzonen dieser Anlagen sind mit einer Erfassung des Stellgrads ausgerüstet. Die nachfolgende Analyse ist aber auf den Hochtemperaturofen (HTO) beschränkt. Der HTO hat in beiden Anlagen eine Aufheizzone (AHZ) und zwei Aufkohlzonen (AKZ1 und AKZ2). Die installierte Heizleistung in den einzelnen Zonen ist unterschiedlich. Die Heizleistung in der Aufheizzone ist um ein Vielfaches größer als in den beiden Aufkohlzonen, in denen im Wesentlichen nur noch die Ofenwandverluste gedeckt werden müssen.

Bei einem Durchstoßofen im Taktbetrieb muss berücksichtigt werden, dass es einen taktzeit- und chargenanzahlplätze bedingten Zeitversatz gibt. D. h. eine Veränderung in der Aufheizzone wirkt sich erst mit dem Zeitversatz der Taktzeit multipliziert mit der Anzahl der Rostplätze in den nachfolgenden Aufkohlzonen aus. Diese Komplexität muss bei den nachfolgenden Ausführungen immer mitgedacht werden.

Digitalisierung von Thermoprozessanlagen

Diesem Absatz ist die Frage vorangestellt, warum CPM in ein Digitalisierungsumfeld eingebettet werden sollte und woher die Daten kommen.

Die Digitalisierung von Thermoprozessanlagen und deren Instandhaltung hat meist viele Ziele. Es geht um nicht weniger als um die Integration der Anlagen in die Fabrik der Zukunft [4] und um eine mit Daten unterstützte Instandhaltung¹. Auf dem Weg zu den beiden Zielen gibt es nicht den einen großen Wurf, es geht eher um viele kleine Zwischenschritte, besonders bei Bestandsanlagen. Der gemeinsame Nenner und Ausgangspunkt ist immer die Erfassung und Verwertung mutmaßlich nützlicher Daten. Egal ob es sich um Daten aus der Entstehungsperiode der Anlage handelt oder um Daten aus der betrieblichen Verwendung.

¹ Vorausschauende Instandhaltung, engl. Predictive Maintenance (PdM), ist kurz gesagt die Prognose der von instandhaltungsrelevanten Ereignissen auf Datenbasis.

Dabei gibt es wenigstens zwei Varianten: Die pragmatische Variante spiegelt den Stand der fortgeschrittenen Technik. Sie beinhaltet beispielsweise Daten für eine automatisierte Anomalieerkennung. Dazu werden neben den üblichen Prozessdaten, beispielsweise Temperatur, C-Pegel und Taktzeit, auch die von ausfallkritischen Baugruppen anfallenden Zustandsdaten und als Beifang auch sekundäre Daten erfasst und verwertet. Diese Variante lässt Raum für zukünftige weitere datenbasierende Analysen, setzt aber genügend Erfahrung voraus, um vorher einschätzen zu können welche Daten dies sein könnten. CPM ist ein Baustein in dieser Variante. Die große Variante erfasst ohne Rücksicht auf Aufwand und Kosten alle Daten, denen man habhaft werden kann, in der Hoffnung, dass auch die Daten dabei sein werden, die irgendwann nützlich sein könnten. Wenig überraschend, dass besonders Unternehmen, die Datenanalyse zu ihrem Geschäftsmodell gemacht haben, zu dieser Lösung raten.

Sekundärdaten

Wie schon ausgeführt, basiert CPM auf der Erfassung des Reglerstellgrads, einem typischen Beispiel für Sekundärdaten. Das sind Daten, die aus verarbeiteten Primärdaten, beispielsweise aus Soll- und Istwert hervorgehen. Sie haben meist keinen Sollwert und ihr Istwert interessiert bisher in der Regel auch niemanden. Sie haben jedoch eine Vergangenheit bzw. einen sogenannten Vorlauf oder ein Muster, anhand dem sie sich mit gegenwärtigen Daten vergleichen lassen. In über digitale Schnittstellen verbundenen elektronischen Systemen, beispielsweise Frequenzumrichtern, Thyristorstellern, Servos oder Temperaturreglern sind Sekundärdaten allgegenwärtig.

Vor gar nicht so langer Zeit haben wir bei der Erfassung und Speicherung sekundärer Daten noch von Datenfriedhöfen gesprochen, weil wir in der Verarbeitung kein angemessenes Kosten-/ Nutzenverhältnis gesehen haben. Heute sprechen wir lieber vom Datenschwungel, der zwar immer noch relativ undurchdringlich erscheint, aber mit den Möglichkeiten moderner Informatik neue, lohnenswerte Entdeckungen verspricht. Digitalisierung der Automatisierungstechnik, oft zusammen mit zusätzlichen preisgünstigen Umfeld- und Zustandssensoren, beispielsweise für Umgebungs- und Ofenwandtemperatur sind hier ein Ermöglicher und ein Treiber für Big Data und Predictive Maintenance. Genau an diesem Punkt setzt das CPM an, indem mit den fortgeschrittenen Möglichkeiten der Digitalisierung auch bisher nicht genutzte Sekundärdaten für Anomalieerkennung und Prognosen in Regelkreisen verwertet werden. In dem hier beschriebenen Beispiel sind die CPM-Daten nur Beifang. D. h. es wurden keinerlei Maßnahmen zur Verbesserung der Datenqualität getroffen, auch keine speziellen Programme zur Erfassung des Stellgrads in reproduzierbaren Betriebszuständen.

Exkurs: CPM im Regelkreis

Vorab noch ein kurzer Exkurs zur Regeltechnik, die Grundlage der Methode ist. Zum besseren Verständnis sind in **Bild 1** die einzelnen Komponenten einer Temperaturregelung mit CPM dargestellt, wie wir sie typischerweise in einem Industrieofen vorfinden.

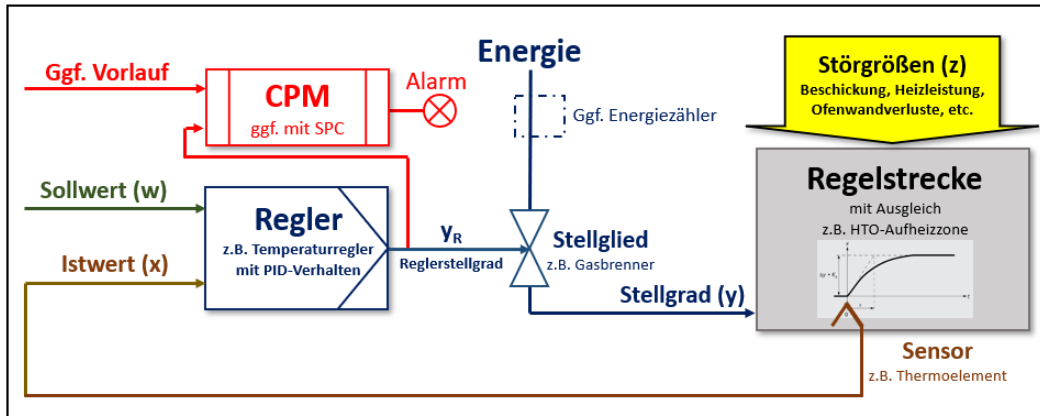


Bild 1: Temperaturregelkreis mit CPM in einem Industrieofen

Ein Regelkreis besteht aus einer Regelstrecke z. B. einer Heizzone, einem Regler, einem Stellglied z. B. einem Gasbrenner, und einem in die Regelstrecke eingebauten Sensor z. B. einem Thermoelement und einer Rückführung des Istwerts von der Regelstrecke zum Regler. Um die Regelungsaufgabe unter dem Einfluss von den meist unbekanntenen Störgrößen (z) zu erfüllen, muss der Istwert (x) gemessen mit dem Sollwert (w) verglichen und bei auftretenden Regelabweichungen mit dem Stellglied bzw. dem Stellgrad (y) nachgestellt werden. Die mit dem Stellgrad zugeführte Energie entspricht dabei der erforderlichen Energiemenge.

Eine Regelung sorgt dafür, dass der Istwert mit nur geringer Toleranz um den Sollwert aufrechterhalten wird und Störgrößen (z) so schnell, so genau und so schwingungsfrei wie möglich ausgeregelt werden. Dabei schauen wir in der Regel nur auf den am Regler angezeigten Soll- und Istwert. Nachteilig an einem Regelkreis ist daher, dass sich anbahnende Störungen so lange unentdeckt bleiben, bis die vorhandene Energiereserve nicht mehr ausreicht und der Istwert dauerhaft vom Sollwert abweicht. CPM als passiver Monitor der Reglerstellgröße (Y_R) kann in diesem Fall dabei helfen Störgrößen früher sichtbar und die potenzielle Vorwarnzeit für die Instandhaltung nutzbar zu machen.

In diesem Beitrag spielen besonders folgende Bestandteile eines Temperaturregelkreises eine Rolle:

Störgrößen

Die Bezeichnung Störgröße (z) im Schema eines Regelkreises erregt meist schon auf den ersten Blick die Aufmerksamkeit der Instandhaltung, weil die Vermeidung und Beseitigung von Störungen zu ihren wichtigsten Aufgaben gehört. Die wichtigste Störgröße in einem Industrieofen ist die Beschickung, andere häufige Störgrößen sind Veränderungen der Heizleistung z. B. Brennerstörungen oder undichte Türen. Deutlich nachrangig folgen Schwankungen der Umgebungstemperatur und anderes. Die etwas ungewöhnliche Bezeichnung einer Beschickung als Störgröße ist der Terminologie in der Regeltechnik geschuldet. Störgrößen sind solange unproblematisch, solange sie keinen negativen Einfluss auf den Thermoprozess haben, weil sie durch den Regler und Regelreserven rasch kompensiert werden. Im CPM sind Störgrößen das Äquivalent zum Stellgrad.

Es ist wichtig, eine Störung nicht mit einem Ausfall gleichzusetzen. Eine Störung ist zunächst „nur“ eine Abweichung von einer spezifizierten Funktion, aber im Kontext einer vorausschauenden Instandhaltung auch häufig ein Einflussfaktor in einer Lebensdauerprognose und Vorläufer eines Ausfalls.

Regelstrecke

Die Regelstrecke ist der Anlagenteil, in dem die Regelgröße (x) konstant gehalten wird. In diesem Fachbericht ist die Regelstrecke der bereits beschriebene gasbeheizte Hochtemperaturofen einer Durchstoßofenanlage.

Eine Temperaturregelstrecke wird in erster Linie durch ihr Zeitverhalten charakterisiert. Dazu beobachtet man die sogenannte Sprungantwort oder Übergangsfunktion (siehe kleines Diagramm in Bild 1). Sie zeigt, wie die Regelgröße, also in diesem Fall die Heizzonentemperatur auf eine sprunghafte Stellgrößenänderungen reagiert. Beim Aufheizen mit i. d. R. maximaler Heizleistung zeigt die Übergangsfunktion zuerst einen steilen Anstieg, der Gradient wird aber dann mit zunehmender Temperatur immer geringer, bis die Temperatur dann ein Maximum erreicht, um dort zu verharren. In der Sprache der Regeltechnik hat die Regelstrecke einen Ausgleich. Die Aufheizleistung muss jedoch nicht zwingend maximal sein, um einen Ausgleich zu erreichen. Bei reduzierter Heizleistung stellt sich dann der Ausgleich auf niedrigerem Temperaturniveau ein. Mit anderen Worten der Ausgleich ist von der Energiezufuhr, also auch vom Reglerstellgrad abhängig.

Entgegengesetzt ergibt sich auch eine Abkühl-Übergangsfunktion bei dauernd ausgeschalteter Heizung. Im Gegensatz zur vorgenannten Aufheizkurve ist die Abkühlkurve nur noch von den Wandverlusten und der Umgebungstemperatur abhängig. Auch die Abkühlkurve hat mit Erreichen der Raumtemperatur einen Ausgleich.

Dabei sollte man sich vor Augen halten, dass die Regelstrecke Industrieofen nicht nur ein Kästchen im Blockschaltbild ist, sondern in der Praxis ein ausgedehntes Artefakt mit mehreren Kubikmetern Rauminhalt in Tonnenschwere, indem zudem ein Taktzyklus stattfindet. Eine Wechselwirkung innerhalb dieses Raumes und mit der Umgebung benötigt daher auch längere Zeit. Aber dazu später mehr.

Regler und Stellgrad

Damit kommen wir zum zweiten Hauptelement eines Regelkreises, dem Regler. Der Regler regelt über den Stellgrad (Y_R) den Istwert (x) auf den am Regler eingestellten Sollwert (w). Der Regler soll eine Differenz zwischen Soll- und Istwert möglichst rasch beseitigen, indem er zunächst überproportional auf die Regelabweichung reagiert. Diese Funktion wird Rückführung genannt, wobei diese meist eine PID-Charakteristik hat. PID steht für Proportional-, Differential- und Integral-Anteil in der sogenannten Sprungantwort eines Reglers. Die Intensität der Anteile wird an die jeweilige Regelstrecke angepasst.

Je nach Art der Beheizung bzw. ob das Stellglied ein Magnetventil in einem Gasbrenner oder ein Thyristorsteller für eine Elektroheizung ist, wird Reglerstellgrad entweder unstetig als Pausen-Impulsverhältnis oder stetig d.h. kontinuierlich vorgegeben. Unstetig bedeutet, dass der kontinuierliche Stellgrad vom Regler in ein Pausen-Impuls-Verhältnis umgewandelt wird. Daher wird diese Regelung auch Zweipunktregelung genannt. Das Prinzip bleibt dasselbe. Egal ob der Regler stetig oder unstetig arbeitet, für das CPM bedeutend ist, dass die Fläche unter der Kurve in einem Zeitintervall (also das Integral) des Reglerstellgrads der Energiezufuhr entspricht.

Ein elektronischer Regler muss um seine vorgenannte Funktion optimal erfüllen zu können, parametrieren werden. Regler sind bei der Auslieferung vom Hersteller immer unparametriert. Die Parametrierung ist bei der Inbetriebnahme aber auch nach einem Instandhaltungsbedingten Ersatz erforderlich.

Sensor

Thermoelemente zur Messung des Istwerts sind die meist verwendeten Sensoren zur Temperaturmessung im Ofenraum [5]. Es liegt auf der Hand, dass auch der Einbauort des Thermoelements eine wichtige Rolle für die Regelung spielt, besonders in einem Durchstoßofen mit mehreren Heizzonen. Wird die Temperatur am Anfang der Heizzone gemessen, kann der Regler sehr schnell auf neu eingeschleuste Chargen reagieren, hat aber weniger Einfluss auf die Temperatur am Ende der Heizzone. Der Einbauort des Thermoelements ist also immer ein Kompromiss. In der Regel liegt ein guter Kompromiss bei 50 bis 70 % der Heizzonlänge in Durchlaufrichtung.

Ein Kompromiss ist auch die Eintauchtiefe des Thermoelements zwischen der Nähe zum Heizraum und zum Wärmebehandlungsgut. Je näher das Thermoelement am Wärmebehandlungsgut positioniert ist umso

geringer ist die Differenz zwischen angezeigtem Istwert und Temperatur am Gut, aber auch umso größer die Totzeit und die Regelschwankung. Insbesondere bei der Überprüfung und ggf. dem Ersatz eines Thermoelements muss auf die korrekte Eintauchtiefe geachtet werden.

Stellglied

Das Stellglied dosiert die Energiezufuhr je nach Stellgrad zwischen 0 und 100 Prozent, bei Heiz- und Kühlbetrieb von -100 bis +100 Prozent. Die zur Beheizung der Anlage verwendeten Rekuperator-Gasbrenner werden im unstetigen Impulsbetrieb - also ein oder aus - mit einer Minimum-Feuerstoßdauer betrieben, um einen hohen feuerungstechnischen Wirkungsgrad zu erzielen. Das Pausen-Impuls-Verhältnis des Zweipunktreglers wird in der Brennersteuerung in die Feuerstoßdauer umgerechnet.

Wird die Brennerleistung z. B. bei einer Wartung verändert, dann ändert sich auch der bisherige Stellgrad und damit die Vergleichbarkeit. Dies ist die Schwachstelle des CPM, die immer mitgedacht werden muss.

CPM-Roh- und Betriebsdaten

Nun aber zum Hauptthema des Fachberichts, den ersten Datenanalysen unseres CPM.

Entstehung der CPM-Daten

Zuerst ein Blick auf die Entstehung der CPM-Daten. In **Bild 2** wird der Istwert der drei HTO-Regelzonen im zeitlichen Zusammenhang mit dem kontinuierlichen Stellgradsignal (Y_R) auf einer gespreizten Skala für die Temperatur-Istwerte in °C und einer weiteren Skala für den Stellgrad in % auf einer sehr kleinen Zeitachse dargestellt.

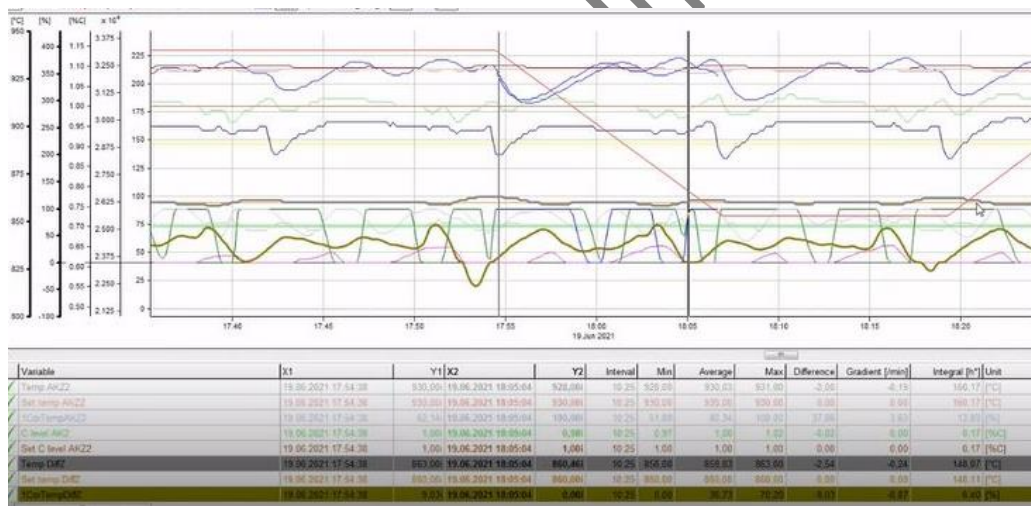


Bild 2: Entstehung der CPM-Daten (Screenshot)

(Besseres Bild erforderlich)

Nach einer Beschickung fällt die Temperatur in der Aufheizzone (TempAHZ) in Abhängigkeit des Chargenvolumens und -Gewichts ab. Es entsteht eine Regelabweichung auf die der Regler mit seiner parametrisierten Sprungantwort über seinen Stellgrad reagiert, um die Differenz wieder auszugleichen.

Im Beispiel pendelt der Stellgrad der Aufheizzone zwischen 0 und 100 Prozent. Anders die beiden Aufkühlzonen. Beim Übergang von der Aufheizzone in Aufkühlzone 1 und insbesondere von dort in Aufkühlzone 2 sind die Chargenoberflächen aber noch nicht der Kern, bereits aufgeheizt. Der Istwert am Thermoelement stimmt in beiden Zonen mit dem Sollwert überein. Auch ohne sichtbare Regelabweichung „antizipieren“ beide Regler die beiden Störgrößen Chargendurchwärmung und Ofenwandverluste mit einem von der Beschickung scheinbar entkoppelten wellenförmigen Stellgradsignal. Das volatile Auf und Ab des Stellgrads, das nur auf einer sehr kurzen Zeitachse sichtbar

ist, macht aber auch deutlich, dass längere Zeitintervalle herangezogen werden müssen, um den Energiebedarf als Fläche unter der Kurve, also den CPM-Wert, aussagekräftig darzustellen.

Ein Nutzen für die Instandhaltung ist die unmittelbare Visualisierung des Stellgrads in der quasi Oszilloskop Ansicht, beispielsweise zur Neujustierung der PID-Regelparameter nach einem Ersatz.

CPM-Rohdaten

Bild 3 zeigt die CPM-Rohdaten des zuerst analysierten Hochtemperaturofens über zwei Jahre Betriebsdauer mit knapp 17.000 Datensätzen. Jeder Datenpunkt eines Datensatzes entspricht dem Integral der Temperatur oder dem Stellgrad in einer Stunde.

Auf der rechten Seite der folgenden Excel-Charts sind die y-Achse mit der Skala für Temperatur in °C, auf der linken y-Achse die Skala für den Stellgrad in % sowie unterhalb des Charts die x-Achse mit dem gewählten Zeitbereich angezeigt. Am oberen Rand des Charts werden die Temperature der Aufheizzone (TempAHZ, hellrot), Aufkohlungszone 1 (TempAKZ1, hellgrün) und Aufkohlungszone 2 (TempAKZ2, hellblau) angezeigt. Mit Ausnahme der Betriebsunterbrechungen war der Temperatur-Sollwert in allen drei Heizzonen auf 930 °C eingestellt. Die Sollwerte sind zur besseren Übersicht nicht im Bild dargestellt.

Unterhalb der Temperatur-Istwerte werden die dazugehörigen CPM-Werte der Aufheizzone (CpmTempAHZ, rot), Aufkohlungszone 1 (CpmTempAKZ1, grün) und Aufkohlungszone 2 (CpmTempAKZ2, blau) in ihrem jeweiligen zeitlichen Verlauf dargestellt.

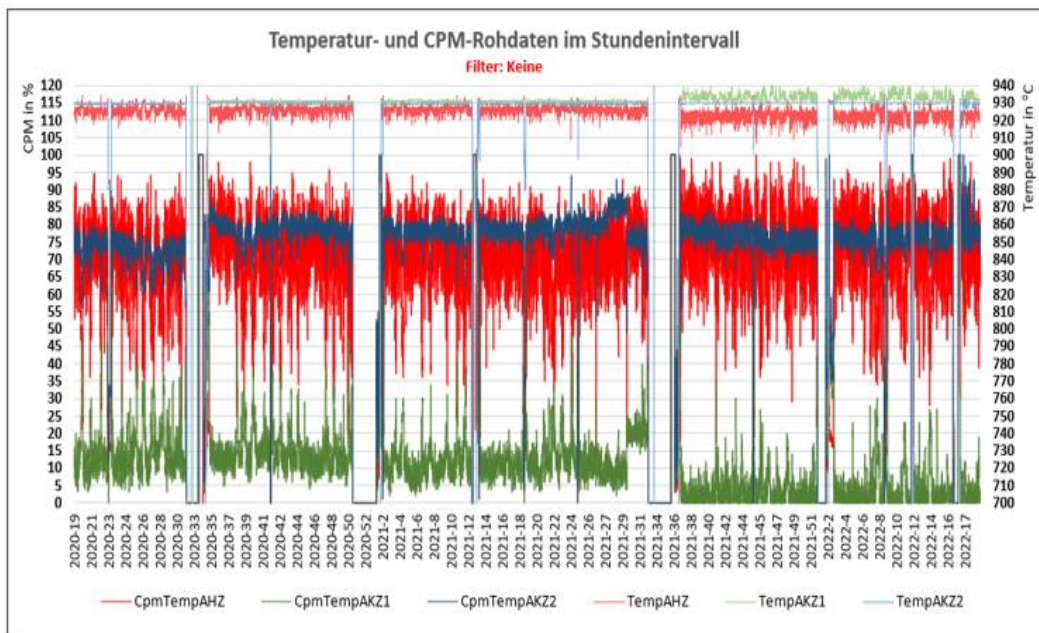


Bild 3: Temperatur- und CPM-Rohdaten

Obwohl es beim ersten Blick schwerfällt, daran zu glauben, dass aus den Daten sinnvolle Schlüsse gezogen werden können, fallen die Niveauunterschiede und Betriebsunterbrechungen gleich ins Auge. Die Datenlücken zeigen die Betriebsunterbrechungen. Längere Betriebsunterbrechungen sind mit einer geplanten Wartung, die kürzeren mit einer Betriebsunterbrechung verbunden. Die negativen Spitzen auf null im CPM-Wert hängen entweder mit dem Austausch der Thermoelemente zusammen, weil ein geöffneter Messkreis die Thermoelement-Bruchsicherung aktiviert oder aber weil die Heizung ausgeschaltet wurde.

CPM-Betriebsdaten während der Produktion

In **Bild 4** wurden mit wenigen Filtern aus den Rohdaten die CPM-Produktionsdaten extrahiert. Durch die Verdichtung des Zeitintervalls auf einen Tag und den Entfall der Stillstandszeiten wurden die Datensätze deutlich reduziert.

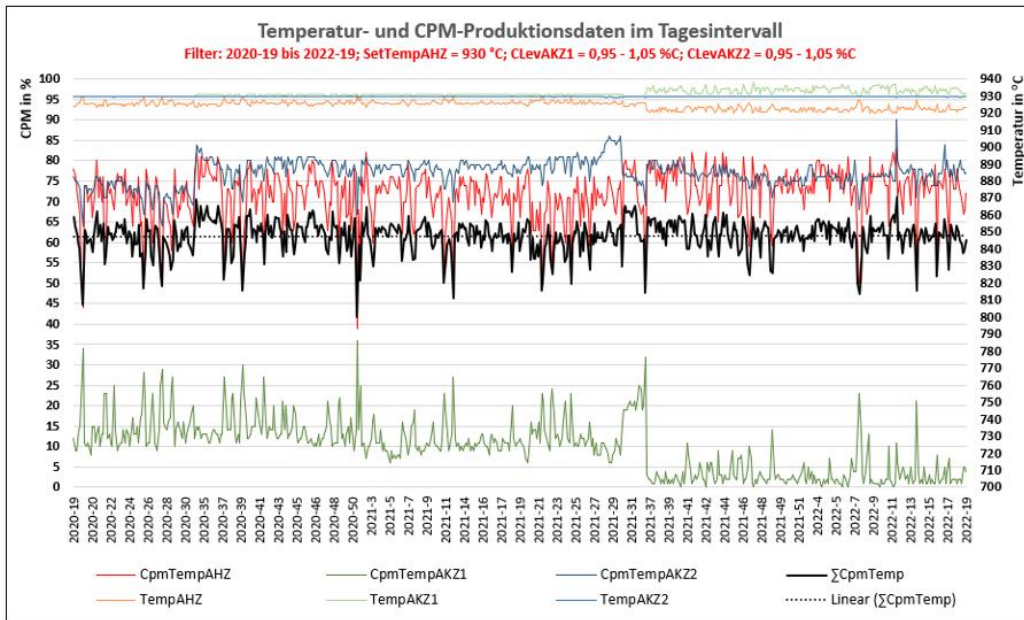


Bild 4: Temperatur- und CPM-Produktionsdaten

Ergänzend wurde eine rechnerische Datenreihe mit der gewichteten CPM-Summe der drei Heizzonen ($\Sigma\text{CpmTemp}$, schwarz) und dem zugehörigen linearen Trend hinzugefügt (gepunktete schwarze Linie). Bemerkenswert ist nun, dass die Varianz der Summe der CPM-Werte ($\Sigma\text{CpmTemp}$) deutlich geringer ist als die der einzelnen Heizzonen, weil zwischen den Heizzonen ein Ausgleich sowohl über die Temperaturstrahlung und Schutzgasatmosphäre als auch über den Chargentransport stattfindet. Auch die Varianzen der beiden Aufkohlungszone (CpmTempAKZ1 und CpmTempAKZ2) sind im Tagesintervall deutlich geringer. Der auffallende Unterschied im Stellgrad der beiden Aufkohlungszone (CpmTempAKZ1 und CpmTempAKZ2) hängt vorrangig mit der unterschiedlichen Zonenheizleistung zusammen. Die Aufheizzone (CpmTempAHZ) ist ein Sonderfall, weil sie sich durch stochastische Beladung und der damit verbundenen Überschwinger, einer engen Prozesskontrolle entzieht.

An der CPM-Summe der drei Heizzonen ($\Sigma\text{CpmTemp}$, schwarz) kann mit bloßem Auge eine Tendenz abgelesen werden, vorausgesetzt, dass es eine gibt. Mit der Excel-Funktion Steigung kann dann auch die Regressionsgerade (gepunktete schwarze Linie) als Maß für die Änderung bestimmt werden. Sofern sich ein CPM-Wert bei annähernd gleichem Chargenmix im Laufe der Zeit schleichend ändert, ist dies für die Instandhaltung ein erster Hinweis auf Degenerationserscheinungen in der Regelstrecke. Diese werden meist durch die Regelreserve ausgeglichen, sodass der Regler Fehler zunächst „vertuscht“ und ohne CPM wertvolle Zeit für Instandhaltungsmaßnahmen verloren gehen kann.

Anomalieerkennung mit CPM

Nach der Wiederinbetriebnahme nach einer Wartung ab KW2021-37 zeigt sich ein etwas anderes Bild. Die Temperatur der Aufheizzone (TempAHZ) ist nun um ca. 3 °C geringer und trotzdem ist die Temperatur in Aufkohlungszone 1 (TempAKZ1) um ca. 3 °C höher. Die Regelung der Aufkohlungszone 1 (CpmTempAKZ1) ist nun praktisch durchgehend ausgeschaltet (CPM nur noch ca. 3,4 %, also mehr als -9 % im Vergleich zu vorher).

Eine scheinbar paradoxe Situation, die erst einmal schwer erklärbar ist. Offensichtlich wurde Aufkohlungszone 1 (TempAKZ1) durch überschüssige Temperatur aus der Aufheizzone (TempAHZ) über ihren Sollwert hinaus mitgeheizt (CpmTempAKZ1 +2 % zu vorher). Die naheliegendste Erklärung dafür ist, dass bei der vorangegangenen Wartung ein neues Thermoelement in die Aufheizzone eingesetzt wurde, dass im Vergleich zu Zustand vor der Wartung etwas weniger in den Ofenraum eintaucht und damit eine etwas geringere Temperatur an der Chargenoberfläche vorspiegelt, als sie tatsächlich ist. Dieser Temperaturüberschuss wird dann von der Aufheizzone mit dem Taktzyklus in Aufkohlungszone 1 übertragen. Die konstante Summe der drei HTO CPM-Werte ($\sum \text{CpmTemp}$) lässt vermuten, dass es keine weiteren verdeckten Störgrößen gibt.

Am Istwert der drei Heizzonen ist diese Veränderung nur bei sehr genauem Hinsehen sichtbar, weil sie unterhalb der Toleranzgrenzen der Aufkohlungszone von +/- 0,5 % vom Messbereich liegt. Sie ist daher bisher auch nicht aufgefallen, bestätigt aber recht eindrücklich den Nutzen des CPM für eine Anomalieerkennung in Regelkreisen. Das wahrscheinlich bei der Wartung falsch positionierte Thermoelement hätte auch einen Schaden verursachen können, der ohne CPM nur sehr mühsam zu lokalisieren gewesen wäre.

CPM zur Messung langsamer Degradierung der Wärmedämmung

In diesem Absatz geht es um die Frage, ob CPM ein geeignetes Mittel zur Messung einer langsam fortschreitenden Degradierung der Wärmedämmung ist. Die zugrunde liegende Hypothese ist, dass sich bei einer bekannten konstanten Temperatur eine Stellgröße (y) einstellen wird, die dem Energiebedarf der Regelstrecke der Betriebsweise entspricht. Unter dieser Voraussetzung kann ein fortschreitender Energieverlust der degradierten Wärmedämmung mit CPM gemessen werden.

Die Motivation dieser Fragestellung liegt auf der Hand. Eine Neuausmauerung ist vermutlich die teuerste präventive Instandhaltungsmaßnahme einer Thermoprozessanlage, die zudem mit der Unsicherheit verbunden ist, ob sie zum derzeitigen Zeitpunkt notwendig ist. Die zwei wichtigsten Gründe für eine Neuausmauerung sind einerseits ein Nachlassen der Stabilität der Mauerung und die damit verbundene Gefahr eines Einsturzes und andererseits die nachlassende Wärmedämmwirkung, bzw. höhere Energiebedarf infolge einer langsam fortschreitenden Degradierung. Die Zustandsbeurteilung erfolgt in der Regel durch die Instandhaltung, wobei Erfahrung, aber auch Bauchgefühl eine große Rolle spielen. Eine objektive Methode zur Messung der Degradierung wäre daher ein großer Fortschritt.

Stationärer Betrieb

In der Thermodynamik wird als stationär ein Zustand bezeichnet, dessen Zustandsgrößen unabhängig von der Zeit sind. D. h. im stationären Zustand sind alle Einschwingvorgänge abgeklungen und es stellt sich eine stabile Anzeige am Messsystem ein. Das ganze System ist ungestört. Der stationäre Betrieb hat den Vorteil, dass Energieströme vergleichsweise einfach und reproduzierbar bilanziert werden können. Ein geschlossener Ofenraum ohne Beschickung, aber mit exakt geregelter Temperatur und Ofenatmosphäre, bei dem diese Bedingungen für einige Stunden zutreffen, kann als stationär bezeichnet werden.

In einem Durchstoßofen kommt ein stationärer Zustand fast nie vor, weil er im 24/7 Betrieb eine Ausnahme ist. Zu diesen seltenen Ausnahmen gehört i. d. R. ein reproduzierbarer stationärer Bereitstellungsbetrieb, für den es bei der bisher betrachteten Durchstoßofenanlage auch kein Beispiel gab. Grund dafür ist, dass, wie schon erwähnt, für die CPM-Datengewinnung keine speziellen Programme vorgesehen waren.

Die in **Bild 5** dargestellte Analyse erfolgte daher an einer anderen etwas geringer ausgelasteten Durchstoßofenanlage, was auch die andere Zeitskala und die anderen Prozessparameter erklärt.

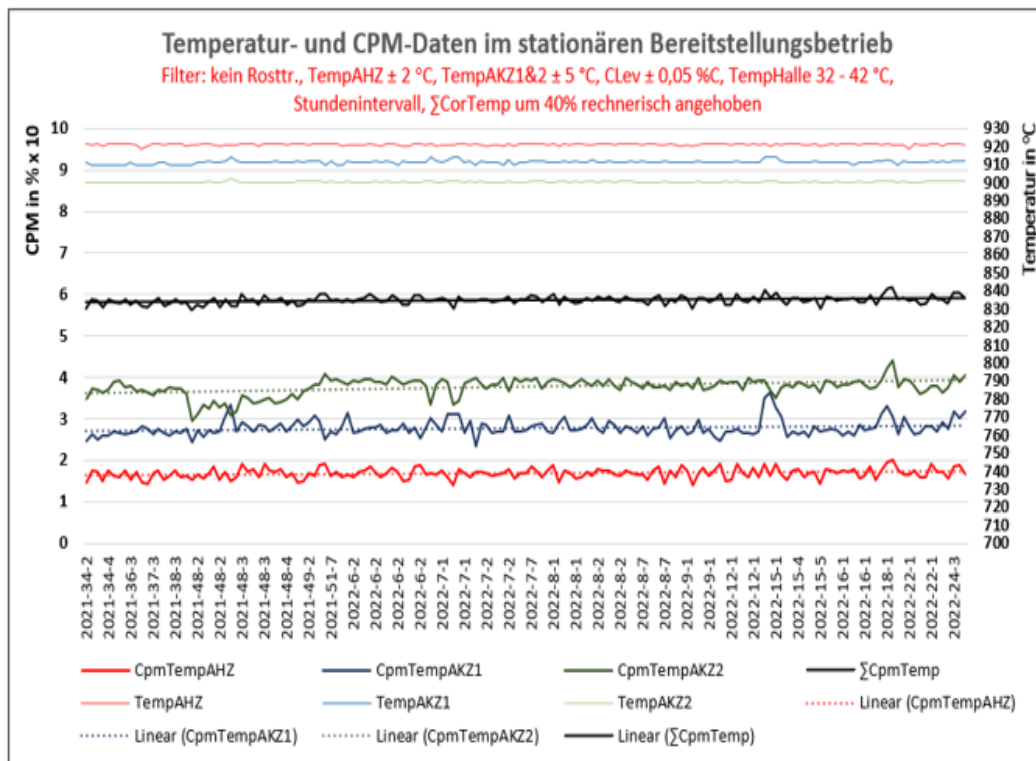


Bild 5: Temperatur- und CPM-Daten im stationären Bereitstellungsbetrieb

Für die Selektierung des stationären Betriebs wurden alle instationären Betriebszustände herausgefiltert. D. h. bei den verbleibenden Datensätzen erfolgte über einige Stunden kein Rosttransport (alle Ofentüren waren dauerhaft geschlossen), alle Prozesstemperaturen und der C-Pegel waren im eingeschwungenen Zustand auf Sollwert und auch die Umgebungstemperatur war relativ konstant. Nach der Filterung blieben dann nur noch 160 Datensätze übrig, die meist aber nicht ausschließlich auf das Wochenende fielen².

Auch im stationären Betrieb treten in allen Heizzonen immer wieder Schwingungen im CPM-Wert auf, was insbesondere mit der „scharfen“ Reglerparametrierung zusammenhängt. Da zwischen den Zonen über die Gasumwälzung und Strahlung ein Temperatúrausgleich stattfindet, kompensieren sich die Schwingungen i. d. R. in ihrer mit der Zonenheizleistung gewichteten Summe (schwarze Kurve) gegenseitig. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurde die gewichtete CPM-Summe ($\Sigma CpmTemp$) im Diagramm um 40 % angehoben. Der reale Leerwert des Ofens bzw. seine Wandverluste liegt also bei ca. 18 % der installierten Heizleistung. Die Summe der drei CPM-Werte ($\Sigma CpmTemp$) ist über den gesamten Zeitraum sehr stabil, sodass die Schwankungsbreite nur noch bei $\pm 1\%$ liegt. Über den Untersuchungszeitraum ist ein leichter Anstieg erkennbar, der eine Degradierung aber nur erahnen lässt. Dazu ist der Auswertzeitraum zu kurz und bei einer Wartung gab es dafür auch keine Indizien. Prinzipiell bestätigt wird aber die These, dass CPM im stationären Zustand für die Messung der Wärmeverluste, also auch der Degradierung der Wärmedämmung geeignet ist³.

² Dies ist auch aus der Zeitachse ersichtlich, die im Format Jahr, Kalenderwoche und Wochentag dargestellt ist.

³ An dieser Stelle muss noch angemerkt werden, dass prinzipiell die Übergangsfunktion bei der Abkühlung der Ofenanlage die beste Methode zur Messung der Degradierung der Wärmedämmung wäre, weil dann nicht nur die Beschickung, sondern auch das ganze Beheizungssystem als Störgrößen ausgeschlossen würde und im Wesentlichen nur noch die gut messbare Umgebungstemperatur als Störgröße bleibt. Dies setzt aber ein reproduzierbares Abkühlprogramm voraus, welches bei beiden Anlagen nicht gegeben war.

Automatisierte Anomalieerkennung

Mit der prinzipiellen Möglichkeit von CPM zur Anomalieerkennung in Regelkreisen stellt sich auch die Frage nach der Automatisierbarkeit. Wenn nämlich die betriebliche Instandhaltung mithilfe einer automatisierten Warnung mit mehr Vorlaufzeit erfahren kann, wann Störgrößen eine Regelung mehr als bisher beeinflussen, kann sie frühzeitige Gegenmaßnahmen einleiten. Für das Condition Monitoring der Steuerungstechnik ist hat sich die elektronische statistische Prozesskontrolle bereits in der Praxis bewährt. Es läge also nahe, dieselbe Methode auch für CPM zu verwenden. Im Produktionsbetrieb ist die natürliche Variation für SPC aber noch zu groß oder an zu viele Bedingungen geknüpft. Was also bleibt, ist die traditionelle Grenzwertüberwachung im Bereitstellungsbetrieb. Aber dies ist ja auch schon viel besser als nichts.

Zusammenfassung und Ausblick

CPM ist ein neuer Baustein im Werkzeugkasten einer digitalisierten smarten Instandhaltung die auch sekundäre Daten verwertet. Es ist ein Frühindikator, der auf sich anbahnende Probleme hinweisen kann, die zunächst durch die Regelreserve verdeckt werden.

Für eine tiefer gehende Interpretation des CPM ist dann aber eine gute Kenntnis der Anlagen notwendig, da alle Regelstrecken meist eine Reihe physikalischer Abhängigkeiten aufweisen, die nur mit Fachkunde und Erfahrung beurteilt werden können. Leider werden gerade auf Datenanalyse spezialisierte Unternehmen dieser Anforderung oft nicht gerecht, weil sie zwar mit künstlicher Intelligenz manche Abhängigkeit in den Daten aufspüren, aber deren physikalische Zusammenhänge nicht kennen und daher häufig den Normalfall zum Problem machen. Selbst mit KI-Unterstützung lassen sich viele Anomalien und kritische Muster nicht einordnen, wenn das interpretierende Fachwissen fehlt.

Man kann geteilter Meinung sein, ob CPM zur Messung der Degradierung einer Wärmedämmung geeignet ist. Bei vorschneller Kritik sollte man jedoch beachten, dass diese Funktion durch geeignete Programme zur Herbeiführung eines reproduzierbaren stationären Zustands während Produktionslücken noch wesentlich verbessert werden kann. Der zugrunde liegenden These widerspricht das bisherige Ergebnis jedenfalls nicht. So haben wir als Ausblick klar vor Augen: Wir wollen mithilfe von CPM und KI die Instandhaltung bei ihrer Entscheidung unterstützen, wann eine Wärmedämmung getauscht werden sollte.

Literatur

- [1] Steck-Winter, H., Unger, G.: Vorausschauende Instandhaltung von Thermoprocessanlagen Praxisbericht Teil 1 – Anomalieerkennung, Prozesswärme no. 07-2020, pp. 39-47, Vulkan Verlag
- [2] Harris, T.J.: "Assessment of control loop performance," Can. J. Chem. Eng., vol. 67, no. 5, pp. 856–861, 1989.
- [3] Pfeifer, B.: Control Performance Monitoring mit einer Kombination aus stochastischen und deterministischen Merkmalen. Research Gate Publications, 2005
- [4] Steck-Winter, H., Unger, G.: Thermoprocessanlagen in der Fabrik der Zukunft – Teil 1 und Teil 2. gwi - gaswärme international, vol. 64, no. 02, 2015 pp. 39-44 und vol. 64, no. 03, 2015 pp. 73-81, 2015, Vulkan Verlag
- [5] Steck-Winter, H.: Elektrische Temperaturmessung mit Thermoelementen. www.steck-winter.de/Homepage/PDF/Vortraege/Vortrag_Temperaturmessung_mit_Thermoelementen.pdf, 2013

Bilder

Bild 1: Temperaturregelkreis mit CPM in einem Industrieofen

Bild 2: Entstehung der CPM-Daten (FOCOS Screenshot)

Bild 3: Temperatur- und CPM-Rohdaten

Bild 4: Temperatur- und CPM-Produktionsdaten

Bild 5: Temperatur- und CPM-Daten im stationären Bereitstellungsbetrieb

Autor*



Dr. **Hartmut Steck-Winter**, MBA

Vormals Aichelin Service GmbH, Ludwigsburg

Tel.: +49 176 9787 3726

steck-winter@gmx.de

*) Mit freundlicher Unterstützung durch Günther Unger, Aichelin Ges.m.b.H. Mödling.

Preprint: Nur zur Information!