

Zur falschluftfreien Messung von Prozessgastemperatur und Permeabilität direkt am Sinterband wurde ein regulärer Rostwagen mit Messwertaufnehmern und kontinuierlicher Funk-Datenübertragung ausgerüstet. Der Messrostwagen bewies seine Betriebs-tauglichkeit im Dauereinsatz. Die Messdaten waren konsistent mit den Betriebsmessungen, lieferten aber erheblich tiefere Einblicke in den Prozess. Insbesondere war erstmals die direkte Messung des Permeabilitätsprofils auf dem Sinterband möglich. Ein Simulationsmodell für die Lage des Durchbrennpunktes wurde genutzt, um eine Durchbrennpunkt-Regelung zu entwerfen. Diese konnte durch die Integration von Originalbetriebsdaten für die Sinteranlage der Hüttenwerke Krupp Mannesmann GmbH (HKM) optimiert werden. Auf Basis des Modells wurde weiterhin eine optimierte Anfahrstrategie nach Stillständen entwickelt. Sowohl Regelung als auch Anfahrstrategie zeigten im betrieblichen Einsatz deutliche Verbesserungen von Produktion und Sinterqualität. Zur Optimierung der Qualitätsüberwachung wurde ein Quality Prediction Tool entwickelt, das die relevanten Qualitätsparameter in übersichtlicher Form anzeigt. Darüber hinaus wurden Vorhersagefunktionen für den Einfluss von Kokssatz, Schichthöhe und Feuchte integriert, die die Optimierung des Betriebspunktes ermöglichen.

Verbesserte Überwachung und Regelung an Sinteranlagen

Thorsten Hauck, Rolf Klima, Arnd Köfler und Bernd Träger

Improved process control of a sinter plant

Dr.-Ing. Thorsten Hauck, wissenschaftl. Mitarbeiter; *Dr.-Ing. Rolf Klima*, Abteilungsleiter, Abteilung Wärmetechnik Energiewirtschaft, Geschäftsbereich Energie- und Verfahrenstechnik, Betriebsforschungsinstitut VDEh-Institut für angewandte Forschung GmbH, Düsseldorf; *Dr.-Ing. Arnd Köfler*, Betriebschef Möllervorbereitung; *Dipl.-Ing. Bernd Träger*, Betriebsleiter Möllervorbereitung, Hüttenwerke Krupp Mannesmann GmbH, Duisburg.

In order to measure permeability and process gas temperature close to the process and free of leakage air a regular pallet was equipped with sensors and a telemetry. This measuring pallet proved its reliability in operational long-term use. The measuring data were consistent with the operational measurements but provided a far deeper insight in the process. In particular the direct measurement of the on-strand permeability profile was possible for the first time. A simulation model was used to create a burn-through point control. Integrating operational data in the model the control was optimized on the sinter plant of Hüttenwerke Krupp Mannesmann GmbH (HKM). Furthermore, the model was used to optimize the restart strategy after stoppages. The burn-through point control and the optimized restart strategy proved significant benefits on production and sinter quality in the operational use. Optimizing the quality guidance the Quality Prediction Tool was implemented. The tool displays all relevant quality data in clearly-presented diagrams and provides a prediction function for the influence of coke rate, bed height and moisture. The tool is completed by a variety of additional diagrams and tools which enable the optimization of the operational parameter.

Die konventionelle Messtechnik an Sinteranlagen ist erprobt und bewährt. Trotzdem gibt es noch einiges Verbesserungspotential. Um eine weitere Optimierung der Sinteranlagen zu ermöglichen, muss ein tieferer Einblick gewonnen werden, als die konventionellen Messtechniken bieten. Deren Messergebnisse sind häufig auf Grund großer Messflächen und langer Messintervalle ungenau oder werden durch eintretende Falschluff verfälscht. Wichtige betriebliche Größen wie das Permeabilitätsprofil der Sinterschüttung auf dem Band können bisher überhaupt nicht betrieblich gemessen werden.

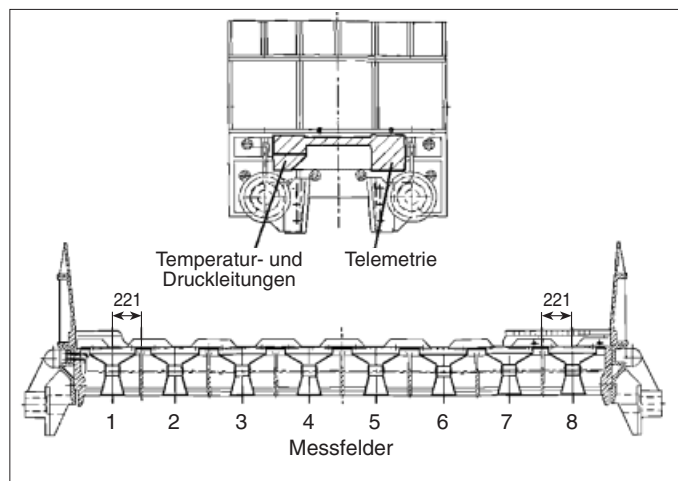


Bild 1. Technischer Aufbau des Messrostwagens
Fig. 1. Technical construction of the measuring pallet

Auch im Hinblick auf die Regelung bzw. Steuerung des Prozesses gibt es noch deutliches Verbesserungspotential. So werden Bandgeschwindigkeit und Durchbrennpunkt in vielen Anlagen noch manuell oder nur auf Basis von einfachen Modellen geregelt. Beim Start des Sinterbandes nach Stillständen dauert es häufig weit über eine Stunde, bis die Anlage wieder im optimalen Betriebspunkt läuft, sodass hohe Einbußen bei Leistung und Sinterqualität entstehen. Die Qualitätsführung des Sinterprozesses wird in den meisten Fällen manuell vorgenommen, obwohl dies auf Grund der vielen Totzeit-behafteten Ein- und Ausgangsparameter einen hohen Aufwand bedingt. Besonders in diesen Bereichen ist also eine

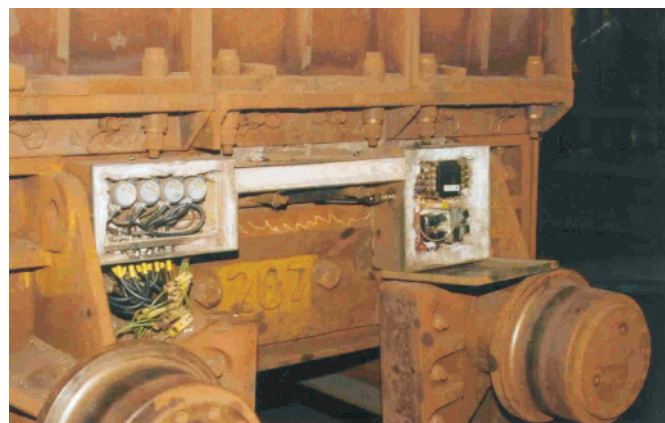


Bild 2. Instrumentierung des Messrostwagens
Fig. 2. Instrumentation of the measuring pallet

gezielte Unterstützung des Bedienpersonals und erweiterte, verbesserte Regelung erforderlich. So kann nicht nur das Betriebspersonal entlastet werden, sondern auch eine Homogenisierung des Prozesses und eine Optimierung des Betriebspunktes erreicht werden, die sich in Form von Leistungs- und Qualitätsgewinnen bezahlt machen.

Messrostwagen

Beschreibung. Mit dem Ziel einer prozessnahen und falschluffreien Permeabilitäts- und Prozessgastemperaturmessung wurde ein regulärer Rostwagen über die Breite mit acht Düsen ausgerüstet. **Bild 1** zeigt den Aufbau des Messrostwagens. In den Düsen werden die Temperatur und der Druckabfall gemessen, sodass der Volumenstrom und damit die Permeabilität bestimmt werden können. **Bild 2** zeigt ein Foto der Rostwagenwange. Die gesamte Messtechnik ist dort gut erreichbar angebracht und gewährleistet eine einfache Wartung. Von dort werden die Messdaten kontinuierlich per Funk an das Prozessleitsystem übermittelt, wo sie ausgewertet und angezeigt werden.

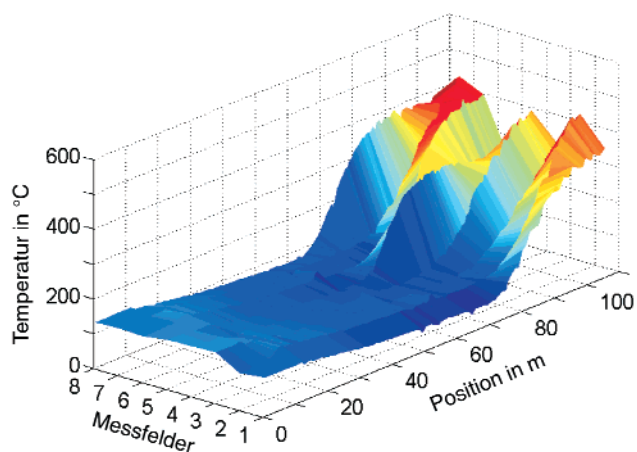


Bild 3. Darstellung der Temperaturmessung
Fig. 3. Presentation of the temperature data

Der Messrostwagen bewies über mehrere Jahre seine Zuverlässigkeit im betrieblichen Dauereinsatz. Die Messdaten sind konsistent mit den Daten der konventionellen Betriebsmesstechnik, bieten aber einen erheblich tieferen Einblick in den Prozess. So wurde in Betriebsversuchen gezeigt, dass besonders kurzfristige und lokale Ungleichmäßigkeiten und Störungen im Prozess deutlich aufgezeigt werden, obwohl sie mit der konventionellen Messtechnik gar nicht erfasst werden. **Bild 3** zeigt beispielhaft ein mit dem Messrostwagen aufgenommenes Temperaturprofil quer und längs zum Band. Die Unterschiede sowohl im Prozessfortschritt als auch im Temperaturniveau sind deutlich zu erkennen. Insbesondere ist die typische Wannenform [1] erkennbar, die eine voreilende Sinterung in den Randbereichen des Bandes anzeigt.

Messergebnisse. Die Messdaten können auf Grund der höheren Genauigkeit zur Analyse und Kalibrierung der vorhandenen Messtechnik genutzt werden. **Bild 4** zeigt das Temperaturprofil quer zum Band auf Höhe von Saugkasten 24 (von 29), gemessen im Saugkasten als durchgezogene Kurve

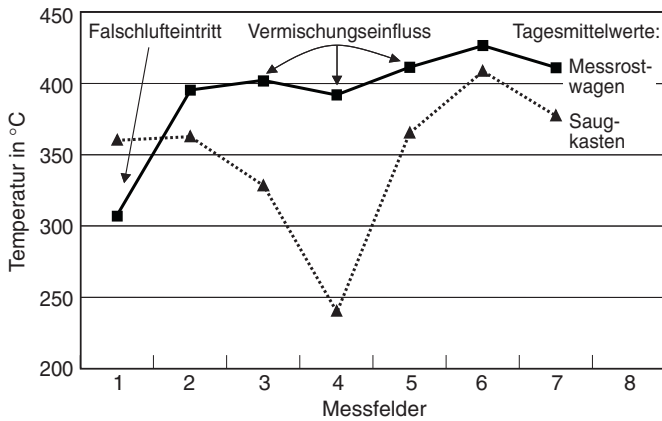


Bild 4. Temperaturprofil des Saugkastens 24 von 29
Fig. 4. Temperature profile in windbox 24 of 29

sowie gemessen am Messrostwagen als gestrichelte Kurve. An dem starken Temperaturabfall auf Messfeld 1 der Saugkastenmessung lässt sich der Anteil eintretender Falschluff zu ca. 30 % bestimmen. Während die Messrostwagendaten in der Bandmitte ein ausgeprägtes Profil zeigen, ebenen Stoff- und Wärmeaustausch zwischen den Messfeldern das Profil der Saugkastenmessung ein, sodass der gravierende Unterschied im Prozessfortschritt nicht zu erkennen ist. Das Wissen über diese Unterschiede kann das Betriebspersonal nutzen, um Störungen an der Mischgutaufgabe zu erkennen oder die Verteilung der Mischgutmenge über der Bandbreite zu optimieren.

Für die Überwachung und Optimierung von Leistung und Sinterqualität fast noch wichtiger ist aber die Messung der Permeabilität der Schüttung auf dem Band. **Bild 5** zeigt das Permeabilitätsprofil über Breite und Länge des Bandes und gibt damit eine gute Übersicht über die Strömungsverhältnisse in der Schüttung. Aus den insgesamt acht Einzelprofilen der Messfelder können Kennzahlen abgeleitet werden, die Auskunft über die Qualität von Agglomeration und Mischgutaufgabe geben. Größte Bedeutung hat dabei die Permeabilität am Bandanfang.

Die höhere Auflösung des Messrostwagens (Mrw) im Vergleich zur Betriebsmessung zeigt sich besonders eindrucksvoll, wenn die Durchbrennpunktverläufe gegenübergestellt werden. **Bild 6** zeigt als schwarze Kurve den mit Hilfe eines Modells aus vier Saugkastentemperaturen berechneten Durchbrennpunkt [2]. Der Durchbrennpunkt in den einzel-

nen Messrostwagen-Messfeldern ist als schwarzes Symbol, der Mittelwert aller Felder als rotes Symbol dargestellt. Der von dem Betriebsmodell berechnete Durchbrennpunkt wird über eine Saugfläche von ca. 60 m² bestimmt. Ein Großteil der lokalen Differenzen kann somit nicht mehr nachgewiesen werden, und die Sollwertabweichungen scheinen unter 3 % zu liegen. Die Schwankungen des Mittelwertes über alle Messrostwagen-Messfelder (entsprechend einer Fläche von 2 m²) liegen aber bereits bei bis zu 5 %. Die einzelnen Messfelder, die einer Messfläche von nur 0,25 m² entsprechen, weisen sogar Abweichungen von bis zu 12 % auf und zeigen damit das hohe Optimierungspotential des Prozesses.

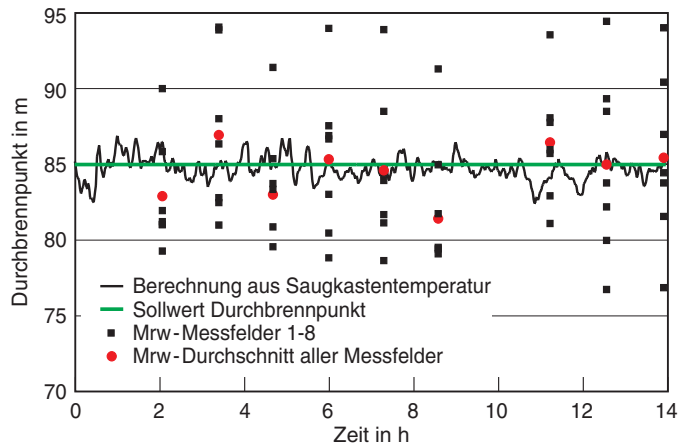


Bild 6. Zeitverlauf des Durchbrennpunktes
Fig. 6. Fluctuation of the burn-through point

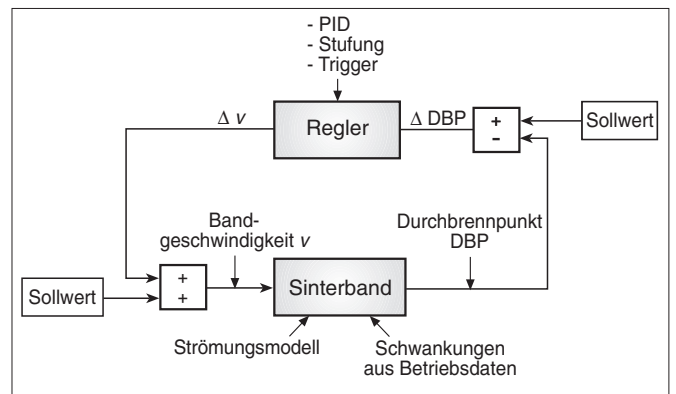


Bild 7. Simulationsmodell zum Durchbrennpunkt
Fig. 7. Simulation model of the burn-through point

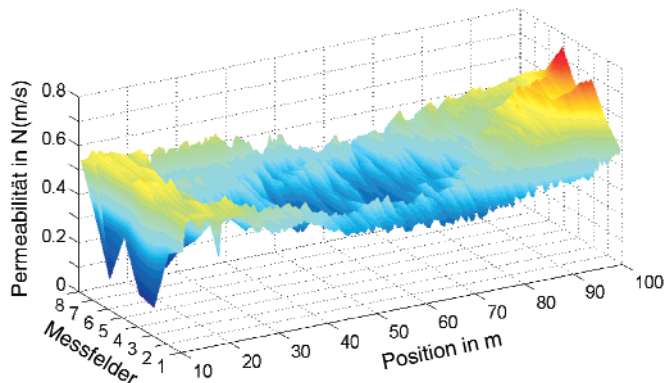


Bild 5. Darstellung der Permeabilitätsmessung
Fig. 5. Presentation of the permeability data

Simulationsmodell, Durchbrennpunktregelung und Anfahrstrategie

Simulationsmodell. Die Minimierung dieser Sollwertabweichungen ist Aufgabe der neuen Durchbrennpunktregelung. Zum Entwurf dieser Regelung wurde ein Simulationsmodell auf Basis von Matlab entwickelt, dessen Fließbild in **Bild 7** dargestellt ist. Dieses Simulationsmodell bildet nicht nur das Übertragungsverhalten des Sinterbandes ab, sondern enthält auch ein Strömungsmodell, mit dem der Einfluss des Durchbrennpunktes auf den Durchströmungswiderstand des Sinterbandes und damit auf die Sintergeschwindigkeit berücksichtigt wird. Mit Hilfe der Stabilitätsrandmethode wur-

den aus diesem Modell die grundlegenden Parameter für einen PID-Regler abgeleitet [3].

Um den Regler auf das spezifische Zeitverhalten des Durchbrennpunktes an der Sinteranlage von HKM zu adaptieren, wurden Originalbetriebsdaten als Störgröße in das Modell integriert. Auf Basis dieses kombinierten Modells wurden die Reglerparameter optimiert. Der Regler wurde um eine Stufung, einen Trigger sowie intelligente Ein- und Ausschaltkriterien ergänzt und in das Prozessleitsystem implementiert.

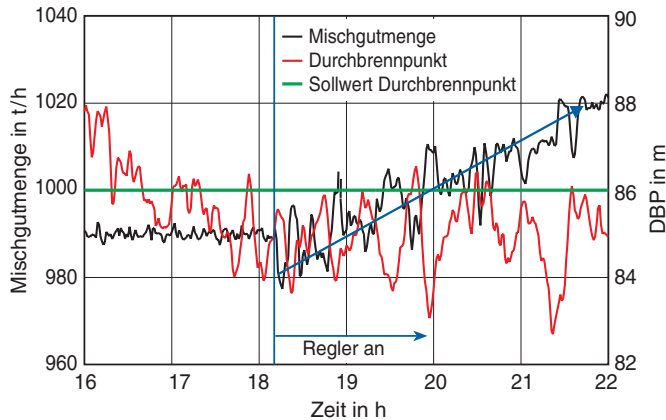


Bild 8. Betriebseinsatz Durchbrennpunktregelung
Fig. 8. Operational results of the burn-through control

Regelung. Die hervorragenden Ergebnisse, die bereits die ersten Betriebseinsätze brachten, zeigt **Bild 8**. Als schwarze Kurve ist die Mischgutmenge aufgetragen, als rote Kurve der Durchbrennpunktverlauf. An der blauen Markierung ist zu erkennen, zu welcher Zeit der Regler eingeschaltet wurde. Ab diesem Zeitpunkt erkennt man bereits qualitativ am Verlauf von Mischgutmenge und Durchbrennpunkt (DBP), dass der Regler den Bewegungen des Durchbrennpunktes gesteuert. Bei sinkendem Durchbrennpunkt wird die Mischgutmenge erhöht und umgekehrt. Die Mischgutmenge und damit die Sinterproduktion steigen dabei deutlich an. In einem 120-stündigen Betriebseinsatz konnte eine Steigerung der Produktion um mehr als 1 % nachgewiesen werden, dies entspricht einer Leistungssteigerung von etwa 50 000 t Sinter im Jahr. Eine Analyse der Qualitätsdaten ergab, dass sich Fes-

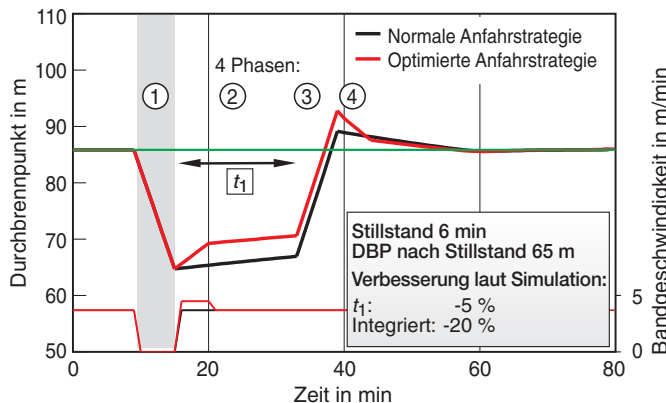


Bild 9. Simulation zur Anfahrstrategie
Fig. 9. Simulation of the restart strategy

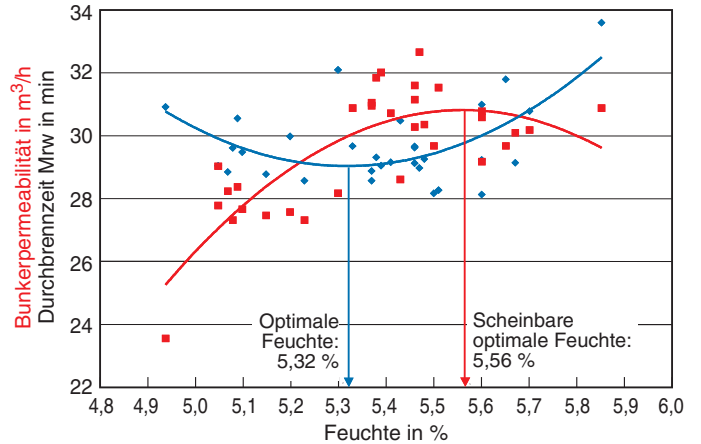


Bild 10. Versuche zum Mischgutfeuchteeinfluss
Fig. 10. Operational trials investigating the influence of the sinter mix moisture

tigkeit und Abrasion gleichzeitig verbesserten, während die übrigen Qualitätsdaten konstant blieben.

Anfahrstrategie. Das kombinierte Simulationsmodell wurde weiterhin benutzt, um die Auswirkung von Stillständen auf den Sinterprozess zu untersuchen sowie eine optimierte Anfahrstrategie zu entwickeln. **Bild 9** zeigt den berechneten Durchbrennpunktverlauf nach einem Stillstand von 6 min. Als schwarze Kurve ist darin der Durchbrennpunktverlauf eingezeichnet, der sich bei der normalen Anfahrstrategie mit konstanter Bandgeschwindigkeit ergibt.

Probleme verursacht vor allem der Zeitraum unmittelbar nach dem Wiederanfahren des Sinterbandes (Phase 2). Der Durchbrennpunkt liegt dann über längere Zeit erheblich unter dem Sollwert und verursacht damit Probleme in Bezug auf Leistung und Sinterqualität. Diese Defizite können durch

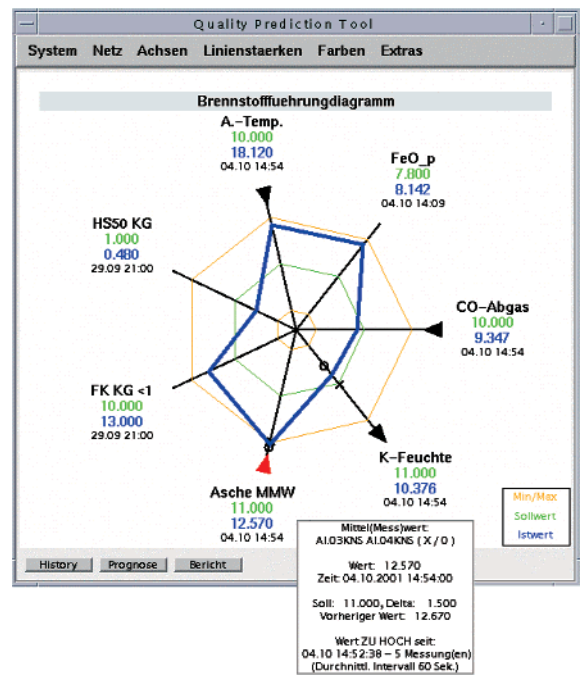


Bild 11. Bildschirmfotografie des Quality Prediction Tools
Fig. 11. Screen plot of the Quality Prediction Tool

Kennwerte quantifiziert werden. Von größter Bedeutung sind dabei die Zeit bis zum ersten Erreichen des Sollwertes (t_1) sowie die integrierte Sollwertabweichung über der Zeit t_1 , die ein Maß für die Qualitäts- und Leistungseinbuße darstellt. Als optimale Anfahrstrategie wurde ein Anfahren mit der durch die Anlage vorgegebenen maximalen Mischgutmenge über 5 min mit anschließender Drosselung auf den ursprünglichen Betriebspunkt ermittelt. Damit ergibt sich gemäß der roten Kurve in Bild 9 eine deutliche Reduktion des Durchbrennpunktdefizits nach dem Anfahren, ohne dass das Überspringen in Phase 4 wesentlich zunimmt.

Die optimierte Anfahrstrategie wurde bei einer großen Zahl an Stillständen verschiedenster Dauer getestet und die Betriebsdaten ausgewertet. Im Vergleich zur konventionellen Anfahrstrategie ergaben sich in einer großen Zahl an Betriebsversuchen deutliche Vorteile in Bezug auf alle Parameter. Insbesondere die Abweichungen vom optimalen Betriebspunkt konnten um durchschnittlich 15 % gesenkt werden. Damit wird nicht nur eine Leistungssteigerung von ca. 15000 t Sinter im Jahr erzielt, sondern auch die Sinterqualität deutlich gesteigert sowie die Staubemissionen nach Stillständen reduziert. Die Betriebsanweisung zum Anfahren nach Stillständen wurde daraufhin gemäß der neuen Strategie geändert.

Verbesserte Qualitätsführung des Prozesses

Mischgutfeuchte. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten war die Verbesserung der Qualitätsführung des Sinterprozesses. Ein zentraler Parameter bei der Einstellung der Sintermischung ist die Mischgutfeuchte. **Bild 10** zeigt die Abhängigkeit der Permeabilität des Mischgutes im Aufgabebunker von der Feuchte. Es ergibt sich die quadratische, in rot eingezeichnete Kurve mit einem Permeabilitätsmaximum [4]. In Abhängigkeit dieser Kurve wurde bisher der Betriebspunkt für die Feuchte gewählt, in der Annahme, dass Permeabilität und Sintergeschwindigkeit ein ähnliches Verhalten aufweisen. Vergleicht man die Kurve jedoch mit den blau eingezeichneten Messdaten des Messrostwagens direkt am Band, ergeben sich zwei wesentliche Erkenntnisse:

- Der Feuchte-Einfluss auf die Permeabilität im Aufgabebunker ist etwa doppelt so hoch wie der tatsächliche Einfluss auf die Sintergeschwindigkeit.
- Das tatsächliche Optimum der Sintergeschwindigkeit liegt unterhalb der Feuchte mit maximaler Permeabilität im Bunker.

Als Konsequenz konnte zwar die Feuchterege lung unverändert auf Basis der Bunkermessung vorgenommen werden. Im Gegensatz zur bisherigen Betriebsweise wird der Betriebspunkt aber nicht um ca. 0,5 %, sondern nur um 0,2 – 0,3 % unter dem Maximum gewählt. Die Leistung kann damit um ca. 1 % gesteigert werden [5].

Weitere Parameter. Neben Durchbrennpunkt, Feuchte und Rückgut muss eine große Zahl weiterer Parameter für die Qualitätsüberwachung und -regelung beachtet werden [6]. Es wurde daher in enger Kooperation mit dem Betrieb das so genannte Quality Prediction Tool entwickelt, mit dem alle relevanten Parameter übersichtlich in Form von Netzdiagrammen angezeigt werden. **Bild 11** zeigt exemplarisch eine Bildschirm-Fotografie zur Brennstoffführung. Das Dia-

gramm zeigt die aktuellen Betriebsdaten als blaue Kurve, die Tendenz als Pfeil sowie den zulässigen Betriebsbereich als braune Kurven, sodass alle relevanten Parameter und deren Status auf einen Blick erfasst werden können. Darüber hinaus bietet das Tool einen Prognosemodus, in dem der Einfluss von Änderungen der Betriebsparameter prognostiziert und angezeigt wird. Vervollständigt wird das Quality Prediction Tool von einer Vielzahl von Diagrammen und Routinen, die eine Optimierung des Betriebspunktes ermöglichen. So steht zum Beispiel eine Regressionsroutine für den Einfluss der Feuchte auf die Permeabilität zur Verfügung sowie Diagramme für die Zeitverläufe aller Parameter mit Mittelwert, Schwankungsbereich und Tendenz.

Fazit und Ausblick

Durch den Einsatz eines Messrostwagens konnte ein erheblich genauerer Einblick in den Sinterprozess gewonnen werden. Insbesondere war erstmals die betriebliche Messung der Schüttungspermeabilität direkt auf dem Band möglich. Der Messrostwagen erwies sich auch über mehrere Jahre als voll betriebstauglich.

Es wurde ein Simulationsmodell für das dynamische Verhalten des Durchbrennpunktes entwickelt. Durch die Einbindung von Betriebsdaten ermöglicht das Modell die Auslegung und Optimierung eines komplexen Durchbrennpunktreglers, sodass auf Betriebsversuche verzichtet werden kann.

Die entwickelte Durchbrennpunktregelung lief stabil im betrieblichen Dauereinsatz. Es konnten eine Leistungssteigerung und eine Verbesserung der Sinterqualität erzielt werden. Die ebenfalls mit Hilfe des Modells entwickelte Anfahrstrategie nach Stillständen ermöglicht ein schnelleres Erreichen des Betriebspunktes nach Stillständen und ermöglicht somit höhere Produktion und Sinterqualität.

Das Quality Prediction Tool unterstützt das Betriebspersonal bei der Führung des Prozesses mit maßgeschneiderten Anzeige- und Auswertungsfunktionen und erleichtert damit die Optimierung der Betriebsparameter.

In Fortführung der Arbeiten ist geplant, die Durchbrennpunktregelung auf das Verhalten der Sinteranlage mit Abgasrückführung anzupassen sowie das Quality Prediction Tool zu einem umfassenden Vorhersage- und Regelungswerkzeug für die Qualitätsführung des Sinterprozesses weiterzuentwickeln.

* * *

Für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten sei der Europäischen Gemeinschaft für Kohle und Stahl gedankt. (S 30900)

Quellen

- [1] *Wuillaume, S.; Poot, E.*: Quantification of vertical and transversal heterogeneities during sintering of iron ore on industrial sinter strands, Proc. Ironmaking Conf., 25.-28. März 1990, Detroit/USA, S. 603.
- [2] *Brauckmann, J.; Heyer, D.; Keddeinis, H.; Kukowka, H.; Stricker, K. P.; Träger, B.*: Untersuchungen zur Senkung des Energieverbrauches in einer Sinteranlage, ECSC final report EUR 10583 DE, 1986.
- [3] *Lunze, J.*: Regelungstechnik, Bd. 1 & 2, Springer Verlag, Berlin, 1996.
- [4] *Cappel, F.; Wendeborn, H.*: Sintern von Eisenerzen, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1973.
- [5] *Carter, G.A.; Rutherford, D.A.*: A heuristic adaptive controller for a sinter plant, Proc. Automation in Mining, Mineral and Metal Proc. Conf., FAC, 13.-17. Sept. 1976, Johannesburg/Südafrika.
- [6] *Huan Tian Zheng; Cai Ru Zhuo; Changsha*: The optimization of production variables in iron-ore sintering, Steel & Metals Magazine 28 (1990) Nr. 4/5, S. 297/302.