Schlussbericht zum Verbundprojekt

KMU-innovativ – Verbundprojekt Klimaschutz

Emissionsreduktion in der Steine- und Erden-Industrie durch modellbasierte Prozessoptimierung

EMREDPRO



Förderkennzeichen: 01LY1611A-D

Projektträger: DLR Projektträger

Laufzeit des Projkets: 01.01.2017 bis 30.06.2020

Verbundpartner/Autoren:

Di Matteo Fördertechnik GmbH (Di Matteo)	D. Aufderheide, L. Di Matteo, A. Elbel, M. Rodriguez, U. Strotkamp, B. Schmidt
Kima Automatisierung GmbH (KIMA A)	A. Klein, A. Boyer, Th. Bode, D. Post
Kima Process Control GmbH (KIMA P)	M. Kalkert, J. P. Meiritz, S. Sabzevari, N. Spennrath
VDZ Technology gGmbH (VDZ)	Ph. Fleiger, K. Treiber, V. Erfurt, G. Furth, R. Simon-Kuchar, E. Geibel, S. Rösch, C. Seiler, S. Schäfer

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.











vdz

Seite 2
DIMATTED



Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzo	darstellung	5
	1.1	Aufgabenstellung	5
	1.2	Voraussetzungen für die Durchführung des Projektes	6
	1.3	Planung und Ablauf des Projektes	6
	1.4	Wissenschaftliche und technische Anknüpfungspunkte	7
	1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen (außerhalb des Projektes)	7
2.	Einge	ehende Darstellung des Projektes	9
	2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzenen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	9
	2.1.1	AP1: Projektkoordination (KIMA P)	11
	2.1.2	AP2: Entwicklung Basismodell und Grundlagenmodule (KIMA P)	11
	2.1.3	AP3: Oberflächengestaltung der Anwenderoberfläche (KIMA A)	52
	2.1.4	AP4: Entwicklung/Anpassung Module Zementwerk (VDZ)	71
	2.1.5	AP5: Implementierung von Produktinnovation, Erprobung (Di Matteo)	88
	2.1.6	AP6: Erprobung und Validierung der Ergebnisse am Beispiel eines Zementwerks (VDZ)	108
	2.1.7	AP 7: Weitere Forschungsfragen und Transfer	131
	2.1.8	Fazit und Ausblick	140
	2.2	Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	140
	2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	140
	2.4	Nutzung und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschrittenen Verwertungsplans	141
	2.5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	141
	2.6	Veröffentlichungen der Ergebnisse aus dem Projekt	141
3.	Litera	aturverzeichnis	143
4.	Anha	ng	147
	4.1	Abbildungsverzeichnis	147
	4.2	Tabellenverzeichnis	151











1. Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Vor dem Hintergrund des Klimaschutzplanes der Bundesregierung und der eingeleiteten Energiewende verfolgte EMREDPRO das Ziel, ein hochfunktionales, modular aufgebautes Simulationswerkzeug für die Steine- und Erden-Industrie zu entwickeln. Mit dessen Hilfe sollten Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz und Emissionsreduktion in industriellen Prozessen realitätsnah ermittelt und vor der tatsächlichen Umsetzung erprobt werden.

Das Modell sollte am Beispiel der Zementindustrie validiert werden. Es soll so modular aufgebaut sein, dass auch andere Industrien, wie beispielsweise die Kalk- oder Gipsindustrie, dieses Tool nutzen können. Zudem soll das Werkzeug es ermöglichen, weitergehende Forschungsfragen z.B. nach stofflicher Speicherung von schwankendem Energieaufkommen (z.B. erneuerbaren Energien) zu untersuchen sowie zu einer intelligenten Regelung von Brennstoff- und Materialströmen beizutragen.

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines hochfunktionalen, modular aufgebauten, marktfähigen Simulationswerkzeugs, mit dessen Hilfe sowohl Potenziale zur Energieeinsparung als auch zur Emissionsreduzierung in industriellen Prozessen realitätsnah ermittelt und vor der tatsächlichen Umsetzung ausprobiert werden können. Es war vorgesehen, Schnittstellen einzurichten, über die werksspezifische Daten in das Modell übertragen werden können. Der Aufbau dynamischen Grundmodells kann später als Basis für eine des Regelungsund Automatisierungstechnik verwendet werden, so dass Nachbildung und reale Regelung der Werksprozesse unmittelbar ineinander greifen können, wobei das Grundmodell zunächst einmal auf Basis solider Parameter dem Verhalten realer Prozesse sehr nahe kommt, aber nicht die Realität 1:1 abbilden kann. Eine originale Nachbildung hätte den Projektrahmen gesprengt. Die Funktionsweise des dynamischen Modells soll am Beispiel der Zementindustrie erprobt und validiert und nach Projektende als innovative Dienstleistung zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Emissionsminderung in industriellen Prozessen und als Hilfsmittel zu weiteren Forschungszwecken der gesamten Steine- und Erden-Industrie angeboten werden.

Lösungsansatz

Das Simulationswerkzeug soll flexibel und modular konzipiert sein, so dass es sich auf die spezifischen Eigenheiten jeder Anlage der Steine- und Erden-Industrie adaptieren und um weitere Module ergänzen lässt. Ihm werden dazu mathematisch-physikalische Algorithmen zu Grunde gelegt. Die darauf aufbauenden Berechnungen orientieren sich – je Modellmodul – an Prozessmodellen, Fuzzy-Logik und/oder empirisch gewonnenen Daten, die in Datenbanken zur Verfügung gestellt werden.

Das Werkzeug soll drei Ebenen umfassen:

1. **Mathematisch-physikalisches Modell**: Berechnungen, die - je Modul - auf mathematischphysikalischen Prozessmodellen beruhen, nach Fuzzystrategien erstellt sind oder auf empirisch gewonnene Daten zurückgreifen, die in einer zentralen Datenbank gespeichert sind.

2. **Anlagenkonfigurator**: modular strukturierte Programmieroberfläche, deren einzelnen Module (z.B. Drehrohrofen, Kugelmühle, Dosiersysteme, Ventilator, ...) zugehörige math.-phys. Berechnungen zu Grunde liegen und die miteinander verbunden werden können.



Seite 5





3. **Leitstand**: Oberfläche, auf der Anwender "ihre" Anlage sehen, Parameteränderungen gezielt eingeben und damit unmittelbar die Auswirkungen auf den gesamten Prozessablauf und insbesondere den Energiebedarf und die Emissionen sehen können. Über eine werksadaptierte Simulation können Energieeffizienz- und Emissionsminderungstipps bereits während der Eingabe von Daten erfolgen und so das Leitstandspersonal dazu befähigen, die Anlage in einem optimalen Bereich zu fahren.

Das zu entwickelnde dynamische Werksmodell kann so konzipiert werden, dass es sowohl werksunabhängig nutzbar ist, als auch werksspezifische Daten adaptieren kann.

Für den werksunabhängigen Betrieb kann es auf empirisch fundierte Daten und Berechnungen zum Zementherstellungsprozess aufbauen, die auf der langjährigen Erfahrung des Konsortialteams beruhen.

Für den werksadaptierten Betrieb kann eine Schnittstelle vorgesehen werden, über die das Simulationswerkzeug z.B. auf die Daten aus dem Energiemanagementsystem eines Werkes zurückgreifen kann. Auf diese Weise kann es mit realen Werksdaten gespeist werden. Änderungen, Ergänzungen, Störeinflüsse von außen etc. auf den Herstellungsprozess können nachgebildet werden, ohne den eigentlichen Betrieb zu beeinflussen und kostspielige Fehlproduktion zu verursachen.

1.2 Voraussetzungen für die Durchführung des Projektes

Das Projekt wurde im Rahmen der vom Bundesminsterium für Bildung und Forschung veröffentlichten Bekanntmachung "KMU-innovativ Ressourcen- und Energieeffizienz" im Schwerpunkt "Energieeffizienz/Klimaschutz" gefördert. Die Betreuung wurde vom DLR Projektträger übernommen.

Das Projektkonsortium bestand aus den drei KMU Di Matteo Förderanlagen (Beckum), Kima Automatisierung (Gronau) und Kima Process Control (vormals Kima Echtzeitsysteme, Jülich) sowie dem Forschungsinstitut der Zementindustrie VdZ (Düsseldorf). Die Projektlaufzeit war vom 01.01.2019 bis zum 30.06.2020, wobei das letzte Halbjahr sich aus einer beantragten und genehmigten kostenneutralen Verlängerung ergab.

1.3 Planung und Ablauf des Projektes

Die Projektpartner erhielten ihre Zuwendungsbescheide im Novmeber 2016. Im Januar 2017 fand das Kick-off Meeting des Projektes bei der KIMA Process Control GmbH in Jülich statt. Im Rahmen des Kick-off Meetings wurde die Förderurkunde durch den PSt beim BMBF, Herrn Thomas Rachel (MdB), übergeben.

Die folgenden Treffen des Gesamtkonsortiums fanden halbjährlich alternierend bei den einzelnen Projektpartnern statt. Diese Treffen wurden durch bilaterale Treffen und Telefonkonferenzen in regelmäßigen Abständen ergänzt.

Das Projekt umfasste insgesamt 7 Arbeitspakete, die jeweils von einem Partner federführend durchgeführt wurden.

AP1 beinhaltete die Projektkoordination, für die KIMA P verantwortlich war. In AP2 wurde unter Führung von KIMA P eine offene Modellstruktur für die Steine- und Erden-Industrie geschaffen. Das Modell wurde auf MATLAB/Simulink-Basis programmiert. Durch die Implementierung einer



Seite 6

vdz



DIMATTED 🛞

geeigneten Schnittstelle können sowohl virtuelle als auch reale Anlagen aufgesetzt werden. Durch die Verwendung einer Soft-SPS-Ebene können auch die Verriegelungsmechanismen etc. einer realen Anlage abgebildet werden.

In AP3 wurde federführed von KIMA A eine Bedienoberfläche der Software, die eine Adaption auf unterschiedliche Anlagen und Prozessabläufe der Steine- und Erden-Industrie zulässt, gestaltet.

In AP4 wurde das in AP2 entwickelte Basismodell iterativ auf ein virtuelles Zementwerk angepasst. Dazu wurden die Hauptkomponenten eines Zementwerkes nach und nach beschrieben, zugeordnet und implementiert. Die Verantwortung für dieses AP lag beim VDZ.

Federführend durch Di Matteo erfolgte in AP5 die Erprobung des Simulationstools an einer konkreten Testumgebung, nämlich der sensorbasierten hochvernetzten Steuerung des Materialstroms zur Ersatzbrennstoffdosierung.

Schließlich wurde in AP6, unter Koordination des VDZ, die entwickelte Software an einem realen Zementwerk (Industriepartner) erprobt und validiert.

Projektbegleitend wurde das validierte Modell als Simulationswerkzeug in AP7 zur Unterstützung weiterer Forschungsfragen erprobt.

Die Softwareoberfläche wurde auf Basis der Vereinbarungen der Partner zur Außendarstellung gestaltet. Es wurden dabei zwei Bedienerzugänge geschaffen: Eine, die Parametereinstellungen zur Anpassung der Software auf ein spezifisches Werk zulassen (für Entwickler und Ausbilder) und eine, die die Parametereingabe von Störfaktoren und Änderungen am Produktionsprozess ermöglicht (für Endkunden und Trainees).

1.4 Wissenschaftliche und technische Anknüpfungspunkte

Im Rahmen des Projektes wurde auf kommerziell verfügbare und in den jeweiliegen Anwendungsgebieten weit verbreitete Software zurückgegriffen. Der Modellierungs- und Simulationsteil wurde in Matlab und Simulink der Version R2017a umgesetzt. Neben vorhandenen Bibliotheken wurde auch eigene Software in Matlab umgesetzt. Stoffliche, thermodynamische und reaktionskinetische Daten wurden aus VDZ-internen Datenbank, online FactWeb-Datenbank [1] und NIST Chemical Kinetics Database [2] verwendet. Die Anlagensteuerung wurde mit SPS Simulationssoftware aufgebaut, mit SIEMENS SIMATIC-S7 PLCSIM Advanced V15, als Programmierwerkzeug wird SIEMENS SIMATIC STEP7 Professional V15 im TIA-Portal verwendet. In den in AP5 durchgeführten Arbeiten hinsichtlich einer weiteren Optimierung des Einsatzes von alternativen Brennstoffen, wurde auf die langjährige Erfahrung bei der Auslegung, Konstruktion und Implementierung entsprechender Förderanlagen im Bereich der Zementindustrie vertraut. Die hierbei insbesondere beim Projektpartner Di Matteo vorhandene Praxiserfahrung in Bezug auf das Handling der entsprechenden Materialien stellte hierbei die Basis für eine technische Weiterentwicklung dar.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen (außerhalb des Projektes)

Spenner GmbH (Werk Erwitte)

Die Spenner GmbH hat das Projekt als Erprobungspartner über die gesamte Laufzeit unterstützt. Neben umfangreichen Daten (Prozessdaten, Labordaten, technischen Zeichnungen) wurden den Projektpartnern auch die Durchführungen von Messungen an den verfahrenstechnischen Anlagen im Zementwerk in Erwitte ermöglicht. Diese wurden durch das Personal am Standort unterstützt.



Seite 7

vdz



DIMATTED 🛞

Die Fachexperten, wie Betriebsingenieure, Schichtmeister und Leitstandsfahrer, standen zur Erprobung der Modelle, zur Bewertung der Modelle und zur Diskussion der Ergebnisse regelmäßig zur Verfügung.

Hochschule Düsseldorf (HSD)

Prof. Thomas Zielke stand in der Endphase des Projektes als Experte für Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen für Diskussionen zur Verfügung. Ausgehend von den Forschungsergebnissen dieses Projektes wurden Konzepte für die Weiterentwicklung des Simulators hin zu einem modellgestützten Digitalen Prozesszwilling entwickelt und ein weiterführendes Forschungsprojekt beantragt.

VDZ Ausschüsse und Arbeitskreise

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes sowie mögliche Anwendungsszenarien der entwickelten Simulationsumgebung wurden in den Ausschüssen und Arbeitskreisen des VDZ mit externen Fachexperten für Verfahrenstechnik, Automatisierung und Digitalisierung diskutiert. Es handelt sich um folgende Gremien: Ausschuss Umwelt und Verfahrenstechnik, Ausschuss Digitalisierung, Arbeitskreis Standardisierung von Daten im Zementwerk. Dabei wurde herausgearbeitet, wie die Ergebnisse des Forschungsprojektes langfristig für die Digitalisierung der Zementindustrie eingesetzt werden können.

LafargeHolcim Ltd. (Technology and Services, Holderbank CH)

Durch den Austausch mit Zementherstellern wurden im Laufe des Projektes weitere Möglichkeiten für den Einsatz der entwickelten Simulationsplattform evaluiert. Konkret wurde mit dem Unternehmen LafargeHolcim Ltd. der Einsatz des Simulators als "digitaler Zwilling" durchdacht. Die Basismodelle könnten dazu zukünftig mit Vorhersageanwendungen, z.B. für den Verschleiß von kritischen Anlagenteilen erweitert werden. Dieses Anwendungsszenario wurde im modularen Design der Softwarelösung berücksichtigt.



DIMATTED 🛞



2. Eingehende Darstellung des Projektes

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzenen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Der als Beispiel gewählte Prozess eines vollintegrierten Zementwerks ist komplex und es gilt eine Vielzahl von verfahrenstechnischen Grundoperation abzubilden. Vor allem der Anspruch, das erstellte Modell auch als Schulungstool für Anlagenfahrer eines solchen Werks verwenden zu können, erforderte zusätzlich die Möglichkeit der realitätsnahen Steuerung.

Um dieser großen Bandbreite an Anforderungen gerecht zu werden, wurde ein Ansatz mit 4 Ebenen verfolgt. In der ersten, grundlegenden Ebene wurde in Matlab ein Framework aufgebaut und die Grundlagenmodule implementiert. Diese Ebene eignet sich besonders für versierte Entwickler, um weitere Grundlagenmodule hinzuzufügen oder die bestehenden zu erweitern. Sie ist damit der Kern des modularen Modellansatzes. Die folgende, in Simulink umgesetzte Ebene, dient der übersichtlichen graphischen Verschaltung von, aus verschiedenen Grundlagenmodulen betehenden, Aggregaten. Für reine verfahrenstechnische Untersuchungen und Optimierungen sind diese beiden Ebenen ausreichend, da auch in Simulink eine Auswertung und Darstellung der simulierten Werte erfolgen kann. Für die darüber hinausgehenden Anforderungen, insbesondere die Schulung, werden zwei weitere Ebenen benötigt. In der dritten Ebene werden in einer Soft-SPS beispielsweise die Verriegelungsmechanismen einer realen Anlage abgebildet. Die letzte, vierte Ebene ist die Anwenderebene. Sie wurde in WinCC umgesetzt und entspricht dem Erscheinungsbild einer Leitstandsanzeige.

Ebene 1: Matlab Modellprogrammierung

Detailprogrammierung, mathematischer Modellgleichungen







DIMATTED



Ebene 2: Simulink Modellkonfiguration

Erstellen von Anlagenschaltungen Datenaustausch und Messwertanzeige



Ebene 3: Soft-SPS

Die Software SPS S7-PLCSIM Advanced bildet die Anlagensteuerung. Sie arbeitet genau wie die Steuerungstechnik in realen Anlagen, mit dem Unterschied, dass keine spezielle Hardware notwendig ist.

Es können mehrere Anlagensteuerungen gleichzeitig laufen, fertige Steuerungsprojekte können gespeichert und ohne Programmierkenntnisse geladen und gestartet werden.

Ebene 4: WinCC User-Interface

Betrieb des Modells durch den Nutzer (Parameter verändern, Messwerte anzeigen)





DIMATTED 🛞

Abbildung 1: Aufbau der Modellumgebung in vier Ebenen





2.1.1 AP1: Projektkoordination (KIMA P)

Im Projektverlauf wurden verschiedene Treffen (Kick-Off-Veranstaltung, Arbeitstreffen, Go-To-Meetings, bilaterale Absprachen, ...) der Verbundpartner durchgeführt, die in regelmäßigen Abständen bei jedem der Verbundpartner abwechselnd oder per Telefon stattfanden.

Zur Gewährleistung des Datenaustausches und der Arbeitsorganisation wurden projektinterne Plattformen (ownCloud und GitLab) aufgesetzt und allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Im Rahmen der teambasierten Software-Entwicklung hat KIMA P außerdem eine zentrale Rolle beim regelmäßigen Zusammenführen der Entwicklungsstände der verschiedenen Projektpartner übernommen.

2.1.2 AP2: Entwicklung Basismodell und Grundlagenmodule (KIMA P)

Im folgenden Teil wird zunächst das zugrundeliegende Framework beschrieben. Anschließend wird auf die zur Abbildung eines Zementwerks nötigen Grundlagenmodule eingegangen, die Erstellung der benötigten Schnittstellen und die Anwenderoberfläche werden vorgestellt. Abschließend wird auf die Verschaltung zu einer Gesamtanlage, die Modellvalidierung und die dazu nötige Beschaffung von relevanten Prozessdaten eingegangen.

2.1.2.1 Objektorientierter Ansatz (KIMA P)

Nach umfassender Evaluierung zahlreicher Implementierungsmöglichkeiten wurde ein geeigneter objektorientierter Ansatz auf Basis von Matlab und Simulink identifiziert und ausgearbeitet. Dabei werden die verschiedenen Aggregate als Matlab-Klasse implementiert, und von Simulink beliebig häufig instanziert und verschaltet. D.h. das Hauptprogramm wird auf grafische Weise von Anwendern erzeugt / angepasst, ohne dass Programmierkenntnisse nötig wären. Die Vererbung in der Klassenstruktur der Aggregate wurde nach modernen Maßstäben im Rahmen der Möglichkeiten von Matlab umgesetzt. Konkret bedeutet das, dass gemeinsame Funktionalitäten generisch in höheren (ggf. abstrakten) Klassen implementiert wurden, sodass diese dann spezifisch, in untergeordneten Klassen (bis hin zu konkreten Aggregaten) wiederverwendet werden können. Da es sich hier nur um Aggregate handelt die alle in Simulink auf ähnliche Weise verschaltet werden, werden alle Klassen von genau einer Wurzel "SystemAbstract" abgeleitet. SystemAbstract enthält die grundlegenden Funktionen, die sich alle Aggregate teilen, u.a. Simulink-bedingte technische Anforderungen sowie Schnittstellen und Basisparameter.



DIMATTED 🛞





Abbildung 2: Baumstruktur der Vererbungsklassen



2.1.2.2 BUS-Schnittstellen (KIMA P)

Sämtliche Kommunikationsverbindungen der Aggregate in Simulink wurden über Simulink-Busse realisiert. Ein Simulink-Bus gibt eine (Baum-)Struktur von zusammengehörigen Parametern sowie (Unter-)Bussen vor. Instanzen dieser Struktur werden sequentiell jeden Simulationsschritt gerichtet an das nächste Aggregat weitergegeben. Insbesondere durch die Standardisierung der Bus-Strukturen können in Simulink die Aggregate im allgemeinen beliebig miteinander verschaltet werden, und viele Verarbeitungsschritte in den Aggregaten können in höhere abstrakte Klassen ausgelagert werden. In Simulink wird eine Bus-Verbindung standardmäßig übersichtlich als Linie dargestellt, für Diagnosezwecke ist es aber dennoch möglich, einzelne Attribute zur Anzeige oder Weiterverarbeitung zu selektieren.

Folgende Busse wurden definiert:

- MainBus / FuelBus

enthält Informationen zur Feststoff- sowie Gas-Materie, u.a. Menge, Temperatur, Chemische Zusammensetzung, Partikelgrößenverteilung (auch Korngrößenverteilung genannt). Dieser Bus ist global einheitlich. Jedes Aggregat hat neben der Verkettung einen zusätzlichen "Environment"-Ausgang vom Typ MainBus, um Material welches den Prozess (ggf. ungewollt) verlässt zentral zu sammeln (z.B. für Abgase). Der FuelBus basiert auf dem MainBus, hat aber zusätzlich Brennwerteigenschaften und wird nur für ausgewählte Aggregate verwendet.

- SupportBus

dient zur Ausgabe von Fehlern, Warnungen sowie Stromverbrauch der jeweiligen Anlage. Der SupportBus ist global einheitlich und wird zentral zusammengeführt.

DisplayBus (Aggregatspezifisch)

dient optional zur Anzeige von Aggregatzuständen in Simulink – hilfreich zur Diagnose. Wo möglich werden gleiche DisplayBusse verwendet (z.B. für die Gruppe von Förderaggregaten), häufig sind die Aggregate aber so unterschiedlich, dass individuelle DisplayBusse nötig sind.

- PIcToSim / SimToPIc (Aggregatspezifisch)

dient als Ein- und Ausgabe von / zur SPS, kann aber auch ohne SPS verwendet werden. Fast alle Aggregate müssen angesteuert werden, was idR über eine SPS geschieht – dafür ist der Aggregat-Eingang "PlcToSim" erforderlich. Damit die SPS Informationen zu der Anlage erhält, ist auch die Richtung zur SPS (SimToPlc) erforderlich. Aggregate der gleichen Gruppe (z.B. Förderaggregate) teilen sich die selbe Schnittstelle; häufig sind die Aggregate aber so unterschiedlich, dass individuelle PlcToSim und SimToPlc Busse nötig sind. Alle PlcToSim und SimToPlc Busse teilen sich jedoch Basisparameter (Unter-Bus) zur Identifizierung, zeitlichen Zuordnung, Fehlerzustände, Stromaufnahme sowie Sperrzustände der Aggregate (s. auch Kapitel 2.1.3.2).

Die notwendigen Attribute in MainBus, SupportBus sowie PlcToSim und SimToPlc Bussen wurden gemeinsam von allen Projektpartnern beschlossen. DisplayBusse wurden je nach Bedarf von den Verantwortlichen definiert und implementiert, die auch das zugehörige Aggregat implementiert haben.



∨dz.



Bus Editor - Manage Bus Objects in the Base Work	kspace — 🗆 X
<u>File Edit View Options H</u> elp	
🔁 🔁 🖕 🖃 🗊 📖 🖽 🗡 🛍 🖄	Filter: by Bus Name
 DisplayTcpClientBus DisplayVerticalBucketelevator FuelBus InputAir MainBus SolidMatter(CommonMatterParameters) temperature trueDensity bulkDensity mass psd E Composition(ChemicalComposition) DustMatter(CommonMatterParameters) GasMatter(CommonMatterParameters) PlcToSimBallmillBus PlcToSimClinkergratecoolerBus Seperal(PlcToSimGeneralPurposeBus) deviceId lock state timestampSec timestampMs speciLevelSet 	Simulink.BusElement: temperature Properties Name: temperature DataType: double DataType: double DataType Assistant Mode: Built in double Data type override: I Complexity: real DimensionsMode: Fo SampleTime: -1 Minimum: Unit: K Description: Average temperature of the material of this instance Revert Help Apply

Abbildung 3: BUS-Editor

Ein Problem der gerichteten Signale in Simulink, insbesondere bei der Verwendung des MainBusses, war das Aufbrechen von Schleifen. Bei Kreisläufen musste stets ein Verzögerungselement zwischengeschaltet werden, welches die Schleife unterbricht. Dies ist zwingend erforderlich, da Simulink die einzelnen Module sequentiell in einer definierten Reihenfolge abarbeitet. Für den ersten Zeitschritt wird dann eine definierte Konstante ausgegeben. Für die folgenden Zeitschritte wird dann auf den Wert des vorigen Zeitschrittes zugegriffen. Da die zeitliche Diskretisierung auf Simulink-Ebene lediglich eine Sekunde beträgt, ist die Verzögerung zwischen den Aggregaten akzeptabel und verursacht keinen nennenswerten Fehler. Ein Beispiel für einen Kreislauf-Materialstrom (MainBus) ist die Zementmühle (s. Abbildung 4): Hier wird die Griese zum Einlauf der Zementmühle zurückgeführt.







Abbildung 4: Materialkreislauf Zementmühle. Das Verzögerungselement (1) unterbricht die Schleife vor dem Becherwerk.

2.1.2.1 SPS-Schnittstelle (KIMA P/ KIMA A)

Die SPS (PLC) ist zur Regelung / Steuerung der Aggregate nötig – sowohl im echten Werk als auch für diese Simulation. Außerdem wird über die Software WinCC über die SPS dem End-Anwender die grafische Benutzeroberfläche bereitgestellt. Neben informativen Anzeigen hat der End-Anwender hier auch die Möglichkeit, sämtliche Anlagenteile zu steuern.

Damit die Simulation genau wie das echte Werk an die SPS gekoppelt werden kann, wurden zunächst verschiedene existierende Möglichkeiten evaluiert, u.a. OPC, OPC UA und PlcSimAdvanced Simulink-Schnittstelle von Siemens. Keine dieser Technologien erfüllte alle Anforderungen bezüglich der Performance, Code-Generierung, Portabilität sowie Datenstrukturierung.

Stattdessen wurde in enger Kooperation von KIMA P und KIMA A eine proprietäre TCP/IP Kommunikation realisiert, die genau auf die Anforderungen des Projektes zugeschnitten ist. Das daraus resultierende Protokoll ist zustandsbasiert und synchronisiert jeden Simulationszeitschritt die Daten aller Aggregate. Die Datenstrukturen sind dabei direkt von den jeweiligen PlcToSim und SimToPlc Bussen abgeleitet. KimaA hat die Programmierung auf SPS- und WinCC-Seite übernommen, KIMA P hat die Gegenstelle in Simulink realisiert. Dafür wurde in Simulink eine multithreaded "CMEX S-Function" implementiert, welche beim Start den TCP-Socket zur SPS aufbaut (s.Abbildung 5). Diese S-Function ist so implementiert, dass beliebig viele Aggregate über die PlcToSim und SimToPlc Busse angeschlossen werden können, d.h. sie ist generisch und funktioniert für beliebige Simulationsmodelle via "plug-and-play". Aus praktischen Gründen hat diese S-Function zusätzlich die Fähigkeit, Fehler und Warnungen der Aggregate in Textform auszugeben (Error-Log), sowie eine Selektion und Regelung der Simulationsgeschwindigkeit (standardmäßig Echtzeit).



Seite 15





Das Verwenden der SPS ist optional – die Schnittstelle kann offline geschaltet werden, sodass die Ansteuerung der Aggregate direkt in Simulink geschieht. Dies war insbesondere während der Entwicklungsphase wichtig, da nicht alle Projektpartner Zugriff auf eine SPS haben.



Abbildung 5: Simulinkansicht der PLC-Kommunikationsschnittstelle

Um die Kommunikation mit der Darstellungsebene (WINCC) über die entwickelte PLC-Lösung (TCP/IP) in die einzelnen Teilmodelle einzubinden, musste für jedes der Modelle eine individuelle Lösung erarbeitet werden. Zur Vorbereitung wurde mit Hilfe der Projektpartner eine tabellarische Zusammenstellung (Tabelle 1) der notwendigen Daten erstellt, die vom Modell zum PLC und vom PLC ins Modell übertragen werden müssen. Die Zusammenfassung deckt sowohl bereits implementierte als auch zukünftig (vorhersehbar) notwendige Teilmodelle ab.

Tabelle 1: Tabellarische Zusammenstellung der zur Darstellungsebene übertragenen und empfangenen aggregatspezifischen Daten

Modul	Daten zum Benutzerinterface	Daten vom Benutzerinterface
Silo	Ausgabemenge, Füllstand	Ausgabemenge
Förderband	Ausgabemenge, Füllstand, Geschwindigkeit	Geschwindigkeit
Brecher	Rotationgeschwindigkeit,	Rotationgeschwindigkeit





	Ausgabemenge	
Steinbruch	Ausgabemenge	Ausgabemenge
Staubseparator	Ausgabetemperatur, Eingabedruck, Ausgabemasse Produkt/Ausschuss, Ausgangluftstrom, Rotationgeschwindigkeit, Gaszusammensetzung	Reinigungsintervalle, Trennungsgrad (bei Sichter Drehzahl, bei stat. Sichter Blätterstellung, bei E-Filter Ampere)
Gebläse	Rotationgeschwindigkeit, Ausgangsstrom, Ausgangstemperatur, Ausgangsdruck	Rotationgeschwindigkeit
Wärmetauscher	Ausgabemenge, Ausgangstemperatur	
Sichter	Rotationgeschwindigkeit	Masse des Feinguts, Masse des Grobguts
Ofen	Ausgabemenge, Rotationsgeschwindigkeit, Außenmanteltemperatur	Rotationsgeschwindigkeit
Kugelmühle	Fühlstand der Kammern, Ausgabemenge, Rotationsgeschwindigkeit, Ausgangstemperatur, Temperatur der Kugellager	Einsprühmenge des Kühlwassers, Auslöseschalter für Trainingsfehlverhalten, Rotationsgeschwindigkeit

Zur Vereinfachung der Datenübergabe und zur Verbesserung der Handhabbarkeit können die internen Nummern der Blöcke (Device ID) zentral ausgelesen und geändert werden (siehe Abbildung 6). Fehler durch Doppelbenennungen oder ungültige Einträge können so erkannt und behoben werden. Zudem wird vor Simulationsstart eine Überprüfung der Device IDs durchgeführt und Fehleinträge werden ggf. behoben.



DIMATTED 🛞



*			Device	e informatio	'n	_ □
	Device ID	Subsystem	Туре	Name	SimulationMode	Err DevID
1	12222	1	BusMerger	Main Bus Me	Code generation	
2	1361	1	SiloOutput	Feeding Silo	Code generation	
3	146	1	SiloOutput	Feeding Silo	Code generation	
4	136	1	SiloOutput	Feeding Silo	Code generation	
5	4	1	BallMill	Ball Mill	Code generation	
	Update Dat	a	CSV expo	ort		

Abbildung 6: Eingabemaske der Device IDs

2.1.2.2 Gleichungslöser und numerische Stabilität (KIMA P)

Eine wesentliche Grundvoraussetzung für die spätere Verwendung des Simulatonstools ist eine grundsätzlich stabile Simulation, welche schneller als Echtzeit zu lösen ist. Daher wurden die bisher entwickelten Finite-Differenzen-Gleichungslöser je nach Anwendungsfall weiter optimiert (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7: Schematischer Aufbau der Finite-Differenzen-Gleichungslöser



Differentialgleichungen werden dazu verwendet, die Übergangszustände, z.B. des Ofens, anzugeben. Diese Gleichungen wurden durch diskrete Gradientenfunktion abgebildet. Da die Genauigkeit dieser Gleichungen von der Diskretisierung abhängt, wurde die Implementierung ebenfalls um die Upwind-Methode (siehe Abbildung 8) erweitert, um unterschiedliche Randbedingungen zu optimieren und zu erfüllen.



Abbildung 8: Schematische Struktur der numerischen Berechnung der Finite-Differential-Gleichung nach Upwind.

Um dieses Problem zu beheben, wurde die Berechnungsmethode der Parameter, die für die Berechnung interpoliert werden, von linearer Interpolation auf "Spline" geändert. Die Berechnung der "Spline" -Interpolation ist viel flüssiger als die lineare Interpolation, da es nicht zu Oszillationen kommt. Dies führt zu einer viel stabileren numerischen Berechnung.

Die folgenden Abbildungen zeigen das Ergebnis der linearen Methode im Vergleich zur Spline-Methode zur Interpolation.







Abbildung 9: Ergebnis der linearen Methode im Vergleich zur Spline-Methode, hier am Beispiel der Festbetthöhe über der Ofenlänge

2.1.2.3 Geteilte Ressourcen (KIMA P / VDZ)

Wo immer möglich wurde versucht, Ressourcen generisch zu halten und diese an geeigneten Stellen wiederzuverwenden. Neben der Vererbung in der Klassenstruktur (siehe oben) wurden dazu zahlreiche Bibliotheksfunktionen, Bus-Strukturen sowie Initialisierungsdatensätze ausgelagert. Dazu gehören insbesondere:

- Allgemeine Element- und Materieinformationen, z.B. Spezifische Wärmekapazität abhängig von der Temperatur
- Bilder und Symbole zur Darstellung in Simulink
- Gleichungslöser
- Funktionen zur Reaktion von Materie, z.B. Kalzinierung, Verbrennung
- Funktionen zur Wärmeübertragung
- Gespeicherte Zustände / Initialisierungsdaten für Aggregate, z.B. Material eines Silos
- Simulink / Matlab bedingte technische Hilfsfunktionen, z.B. das Zusammenführen verschiedener MainBus-Instanzen

Neben diesen Ressourcen gibt es zahlreiche in Matlab implementierte Werkzeug-Funktionen für den Entwickler und Anwender, welche aber in der Hauptanwendung nicht automatisch verwendet werden. Dazu gehören Funktionen zur Generierung, Berechnung, Transformation, Speicherung und Darstellung von diversen Datensätzen.

2.1.2.4 Gas-Modell (VDZ)

Gasströme spielen als zentrales Bindeglied zwischen Prozessteilen eine wichtige Rolle in der Steine- und Erdenindustrie. Sie transportieren Materialströme durch das System, ermöglichen die Trennung des Feinguts vom Grobgut in Sichtern, liefern den notwendigen Sauerstoff für



Seite 20





Verbrennungsreaktionen und dienen dem Wärmeaustausch beim Abkühlen bzw. Erwärmen des Materials. Dabei stehen sie kontnuierlich in Wechselwirkung mit der Anlagengeometrie und den enthaltenen Feststoffen.

Gasströme werden im gegebenen System von Gebläsen generiert. Die sich einstellenden Luftvolumenströme hängen dabei von der Geometrie und dem momentanen Zustand aller im System enthaltenen Bauteile ab. Eine besondere Herausforderung an die Modellierung stellt zudem die Tatsache dar, dass im System mehrere Gebläse gleichzeitig laufen können, die sich dann gegenseitig beeinflussen. Dabei sind die einzelnen Gebläse parallel oder in Serie geschaltet und werden teilweise auch gegenläufig betrieben. Jedes Gebläse hat Auswirkungen auf alle Elemente stromaufwärts und stromabwärts. Von einer Seite zieht das Gebläse die Luft ein und schiebt sie auf der anderen Seite wieder raus. Somit kommt es vor dem Gebläse zu einer Druckreduktion und hinter dem Gebläse zu einer Druckerhöhung.

Im Modell werden die Luftströme im kompletten System betrachtet. Hierzu wird eine Anlagenkennlinie erstellt, die die Druckverluste des relevanten Systems (Subsystem) in Abhängigkeit verschiedener Volumenströme darstellt. Der Betriebspunkte wird dynamisch berechnet und stellt den Schnittpunkt der Anlagenkennlinie mit der Gebläsekennlinie dar.

Die Anlagenteile sind durch eine Vorgänger-Nachfolger-Matrix (nachfolgend Adjazenzliste) verknüpft. Diese wird während der Initialisierung automatisch erstellt und kann auch komplexe Modellstrukturen abbilden. Anhand der Verschaltungsreihenfolge, die in Adjazenzlisten hinterlegt wurde, werden die Druckverlustcharakteristiken der einzelnen Blöcke zu einer Gesamtcharakteristik zusammengefasst. Dabei folgt die Addition der Druckwiderstände dem Muster in Abbildung 10.

Serienschaltung von Strömungswiderständen:



$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3$$

Parallelschaltung von Strömungswiderständen:



$$R_{total} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \frac{1}{\sqrt{R_3}}\right)^2}$$

Abbildung 10: Einfache Verschaltung von Strömungswiderständen

Bei größeren Modellen führen die komplexeren Verschaltungen zu komplizierten Additionen der Druckcharakteristiken. Die komplexe Charakteristik wird rekursiv aufgebaut. In der Regel sollten die iterativen Algorithmen den rekursiven wegen Lesbarkeit vorgezogen werden. In diesem konkreten Fall konnte die variable Verschaltungstiefe iterativ nicht mit einem adäquaten Rechenaufwand abgebildet werden, weshalb ein rekursiver Weg gewählt wurde.



DIMATTED 🛞





Abbildung 11: Beispielhafte Verschaltung zur Ermittlung der Druckcharakteristik

In den meisten Anlagenschaltungen sind Abzweigungen in Form von T-Stücken zu finden. An dieser Stelle teilt das Gasmodell den Volumenstrom in zwei Teilströme. Die Teil-Anlagenkennlinien stromabwärts jedes T-Stücks werden bestimmt und gegeneinander gewichtet. Mit diesen Gewichtungsfaktoren kann der Volumenstrom dann geteilt werden. Es hat sich gezeigt, dass im System eine Vielzahl von Fallunterscheidungen notwendig sind. Diese können zum Beispiel sein:

- In welcher der Teil-Anlagenkennlinien sind Gebläse vorhanden und aktiv?
- Fügen sich die beiden Teil-Anlagen wieder zusammen?
- An welcher Stelle des Systems erfolgt die Zusammenführung?
- Sind Teil-Anlagen mit sehr hohem Druckverlust vorhanden (z.B. geschlossene Klappen)?

Da für eine realitätsnahe Abbildung die Luftströme im kompletten System betrachtet werden müssen, musste die Limitierung der gerichteten Kommunikation zwischen den einzelnen Blöcken in Simulink umgangen werden. Für die Gasphase wurde eine weitere Ebene der Kommunikation zwischen den Anlagenteilen aufgespannt, die für den Benutzer unsichtbar über globale Signale im Hintergrund läuft. Durch eine globale Variable kann bei der zentralen Berechnung der Anlagenkennlinie auf alle Detailinformationen aus den einzelnen Anlagenteilen zugegriffen werden.

Besonders die Zirkulation von Luftströmen, wie z.B. bei Sichtern üblich, stellt eine Herausforderung an das Gasmodell dar. Das Sichtergebläse zieht in einer solchen Schaltung einen Teil Frischluft aus der Umgebung und gibt auch einen Teil Abluft wieder an die Umgebung oder eine Entstaubung ab. Zum anderen wird die zirkulierende Luft aber vom Gebläse im Kreis gedrückt. Dies führt zu einem Konflikt in der Lösung des Gleichungssystems für den Gastransport. Im Modell wird das System an den T-Stücken virtuell abgeschnitten, um dieses Problem zu umgehen.

Zur Berechnung der Druckverluste wird angenommen, dass die Betrachtung der Luftvolumenströme als inkompressibles Medium (nach Bernoulli) hinreichend genau ist. Möglich ist dies, da die Mach-



vd7

DIMATTED 🛞



Zahl der Strömung unter 0,3 liegt [1]. Systemspezifische Modelle ergänzen die Grundgleichungen. Für Anlagenteile mit Rohrgeometrie wird der Druckverlust durch die Staubbeladung hinzugefügt [2].

$$\Delta p_s = \left(\lambda_s \cdot \frac{L}{D} + 2 \cdot \sum \Delta \frac{c}{v}\right) \cdot \mu \frac{\rho_L}{2} v^2 \tag{1}$$

Im ersten Summand wird der Einfluss des Förderguts berücksichtigt. Der zweite Summand beschreibt die Zustandsänderung durch Beschleunigung des Staubs nach Krümmern.

Druckverluste durch Sichter und Zyklone [3, p. 14, 4], sowie von Klappen [2, p. Lc9] werden in Abhängigkeit ihrer Geometrie berechnet. Der Ofenkopfdruck wird in Abhängigkeit des Falschlufteintrags [5] und der freien Querschnittsfläche bestimmt. Durch Variation der Betriebsparameter kann so die Anlagenkennline beeinflusst werden, Abbildung 12 zeigt dies am Beispiel der Änderung einer Klappenstellung.



Abbildung 12: Einfluss von Klappenstellung auf die Charakteristik des Gesamtsystems

Um die Umgebungsluft mit einer bestimmten chemischen Zusammensetzung und Temperatur dem System zur Verfügung zu stellen, werden Gaseingänge für jedes Subsystem benötigt. Diese werden direkt vom Gasmodell gesteuert. Einen Sonderfall bildet der Klinkerkühler. Neben seinen sonstigen Funktionen ist der Klinkerkühler ein Gaseingang für zwei Subsysteme: dem Strang zum Brennprozess und dem Abgasstrang. Wie in einem T-Stück wird ein Gewicht berechnet und das Gas entsprechend aufgeteilt, siehe *Abbildung 73*. Hierbei kommt es auch zur Berechnung der Temperatur, der chemischen Zusammensetzung und des Staubgehaltes der beiden Luftströme.

Im Matlab-System-Block "Fan" können verschiedene Gebläsetypen ausgewählt werden. Hier sind gemessene Gebläsekennlinien und Funktionen zur Beschreibung des Energiebedarfs der im Werk vorhandenen Gebläse hinterlegt.



Seite 23





2.1.2.5 Wärmebilanz und chemische Reaktionen (VDZ / KIMA P)

2.1.2.5.1 Wärmebilanz

Die Wärmeübertragung bildet die Basis der thermodynamischen Beschreibung des Prozesses. In jedem einzelnen Modul findet Wärmeübertragung zwischen Gasphase und der Staubphase sowie zwischen der Gasphase und dem Feststoff statt. Zusätzlich sind die Wärmeverluste über die Wand zu beachten, die von der Windgeschwindigkeit und Temperatur der Umgebung beeinflusst werden. Bei dem Wärmeleitungswiderstand wurde die Temperaturabhängigkeit der Wärmeübergangs- und Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten berücksichtigt. Eine besondere Herausforderung stellen dabei die Oberflächenbeschaffenheit und die Materialeigenschaften der einzelnen Anlagenteile dar. Die Daten der Spenner-Anlage wurden soweit bekannt in den Modellen hinterlegt. Unbekannte Parameter wurden aus der Literatur entnommen oder zunächst geschätzt. Eine weitere Anpassung kann im Rahmen weiterer Erprobungen oder bei Übertragung auf andere Anlagen erfolgen.

Während sich die Kontaktfläche zwischen Gas- und Staubphase in Abhängigkeit von der Partikelgrößenverteilung unter der Annahme einer kugelförmigen Staubkorngeometrie relativ leicht berechnen lässt, ist die Kontaktfläche zwischen Gas und Feststoff, zwischen Gas und der Wand bzw. zwischen Feststoff und der Wand aufgrund der komplexen Geometrie schwieriger zu berechnen und erforderte zusätzliche Auswertung aller vorliegenden technischen Zeichnungen.



Abbildung 13: Skizze des Strömungsverlaufs in einem Zyklon.

Ferner wurde die Verweilzeit auch in Abhängigkeit von möglichen Verläufen der Ströme in einigen Modulen anhand von Verweilzeitmodellen erfasst. Abhängig von der Geometrie bewegt sich die Strömung nicht auf dem kürzesten Weg durch die Module, siehe beispielhaft Strömung durch einen Zyklon in Abbildung 13. Die Systeme verfügen über einen so genannten "HoldUp", in dem die drei Phasen zwischengespeichert werden. Nach der entsprechenden Verweilzeit verlässt ein Teil der Materie der jeweiligen Phase das System. Der HoldUp wird als ideal durchmischt angesehen. Reaktionen und Wärmeübertragung werden in jedem Zeitschritt berechnet. Auf diesem Wege ist ein Verweilzeitverhalten implementiert. Bei Verweilzeiten unterhalb eines Zeitschrittes wird nach Formel (2) gerechnet.



Seite 24



$$T_{_{out}} = T_{_{in}} + \frac{dT}{dt} \cdot \Delta t_{_{Verweilzeit}}$$

(2)

2.1.2.5.2 Reaktionen, Verdampfung und Kondensation

Die Reaktionen innerhalb des Ofens wurden aufgrund des hohen Detailierungsgrades des Ofens gesondert ausmodelliert (siehe auch Kapitel 2.1.4.3).

Um Rechenressourcen nicht unnötig zu belasten, wurde für die Verdampfung und Kondensationsreaktionen sowie Klinkerphasenbildung in anderen Modulen ein quasi-statischer Prozess angenommen. Insbesondere ist die Verdampfung und die Kondensation von Wasser sehr wichtig, um die Trocknung und Sprühkühlung zu modellieren. Zusätzlich sind die Verdampfung und Kondensation von Alkali-, Chlor- und Schwefel-Verbindungen sowie (Schwer-) Metallen, insbesondere für die Emissionen und für die Aufkonzentrierung an bestimmten Stellen innerhalb der Prozesslinie, von besonderem Interesse. Um die Rechenzeit zu minimieren und weil die Dynamiken teilweise unbekannt sind, wird die Verdampfung bzw. Kondensation als ein guasi-statischer Prozess mit sofortigem Wechsel des Aggregatszustands betrachtet. Sobald die Verdampfungstemperatur erreicht ist, wird so viel des entsprechenden Stoffes verdampft, wie notwendig ist, um den maximalen Partialdruck des Stoffes in der Gasphase zu erreichen. Der Rest des Stoffes bleibt in der Feststoffphase und verdampft evtl. in dem nachfolgenden Anlagenteil. Damit kann eine maximal mögliche Aufkonzentration in der Gasphase modelliert werden. In der Realität ist ein wesentlich kleinerer Partialdruck in der Gasphase zu erwarten, weil die Dynamik nicht unendlich schnell abläuft und deshalb das Gleichgewicht zwischen der Gasphase und dem Feststoff evtl. nicht erreicht wird. Da wegen der Größe der Anlage das dynamische Verhalten der Verdampfung experimentell schlecht validiert werden kann, soll der maximale Grenzwert zunächst ausreichend sein. Die Kondensation wurde analog implementiert. Die Parametrisierung der Reaktionskinetiken wird in AP6 beschreiben.

Für flammenlose Verbrennung des Brennstoffs, wie sie typischerweise im Kalzinator auftritt, wurden die Reaktionen für Wasserstoff-, Kohlenstoff-, Schwefelverbrennung und Stickstoffoxide dynamisch als Gleichgewichtsreaktionen implementiert. Abhängig von der Sauerstoffkonzentration und der Temperatur sind Verbrennungsreaktionen mithilfe des Arrheniusansatzes dynamisch modelliert:

$$\alpha_1 A_1 + \alpha_2 A_2 + \dots \rightleftharpoons \beta_1 B_1 + \beta B_2 + \dots \tag{3}$$

Arrhenius-Konstante

$$k(T) = k_0 \cdot \left(\frac{T}{298 \text{ K}}\right)^n \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}}$$
(4)

DIMATTED

Stoffmengenkonzentration $c_k = \frac{n_k}{V} \ln \frac{mol}{m^3}$

$$r = k^{forw} \cdot \prod_{i=1}^{\#educts} c_{A_i}^{\alpha_i} \cdot \left(1 - \frac{\prod_{j=1}^{\#products} c_{B_j}^{\beta_j}}{K^{eq} \cdot \prod_{i=1}^{\#educts} c_{A_i}^{\alpha_i}} \right)$$
(5)

Mit diesem Ansatz lässt sich dynamisch sowohl eine nicht vollständige, flammenlose Verbrennung in einem Modul als auch eine Nachverbrennung in einem nachfolgenden Modul modellieren.



Seite 25

Zusätzlich lässt sich der thermische Zerfall von Verbindungen nachbilden, die bei höheren Temperaturen instabil und bei niedrigeren Temperaturen stabil sind, und umgekehrt. Der thermische Zerfall ist für die Berechung der NO_x-Emissionen und anderer Emissionen insbesondere bei Einsatz von alternativen Brennstoffen wichtig. Der thermische Zerfall wurde für organische Verbindungen (Dioxine und Furane), polychlorierte Biphenyle (PCB), ausgewählte polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) und BTEX (Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol) sowie ausgewählte gasförmige unorganische Verbindungen (*HCl*) als dynamische Reaktionen in eine Richtung (keine Gleichgewichtsreaktion) modelliert.

Decarbonisierung (Kalzinierungsreaktionen) Die des Kalziumkarbonats wurde als Gleichgewichtsreaktion dynamisch modelliert, um die realitätsnahe Freisetzung von Kohlenstoffdioxid Kohlenstoffmonoxid und mit Limitierung durch Partialdruck des Kohlenstoffdioxides innerhalb der Gesamtanlage nachzubilden.

Da die Berechnung aller Reaktionen in jedem Zeitschritt und in jedem Anlagenteil sehr zeitintesiv ist und die Performance stark reduziert, wird inital geprüft, ob die notwendigen Edukte verfügbar sind. Darüber hinaus sind Temperatur-Grenzwerte für die Reaktionen implementiert. Erst bei deren Überschreitung erfolgt die Berechnung.

2.1.2.6 Massenspeicher (KIMA P /VDZ)

Silos dienen zur Speicherung, Aufnahme sowie Abgabe von Materie in den und aus dem Prozess heraus. KIMA P hat mit dem Silo als eines der ersten implementierten Aggregate einen Grundstein für weitere Module gelegt, die (ggf. temporär) Materie speichern können, z.B. Förderaggregate. Alle Silos basieren auf demselben abstrakten Prinzip, werden jedoch in folgende Implementierungen unterschieden:

- **SiloOutput** hat lediglich einen Ausgang; wird mit Materie initialisiert und sitzt i.A. am Beginn des Prozesses
- **SiloInput** hat lediglich einen Eingang und füllt sich mit eingehender Materie; sitzt i.A. am Ende des Prozesses
- SiloInputOutput hat Ein- und Ausgang und sitzt im Allgemeinen zwischen zwei Prozessabschnitten, z.B. ein Klinker-Silo hinter dem Kalzinierungsprozess und vor der Zementmühle

Außerdem werden drei Arten von Silos unterschieden:

- FuelSilo dient als Aufgabe des Brennstoffes und wird den speziellen Anforderungen des FuelBusses gerecht
- GasSilo dient hauptsächlich als Aufgabe von bekannten Gasen (z.B. Umgebungsluft) in das Subsystem
- SolidSilo Standard-Silo für sämtliche Feststoffe (außer Brennstoffe)

vdz

Das abstrakte Silo speichert dabei einen Vektor von entsprechenden Materie-Bus-Instanzen (Unter-Bus von MainBus). Die Länge des Vektors ist konfigurierbar und beeinflusst, wie viele verschiedene "Schichten" an unterschiedlicher Materie in dem Silo gespeichert werden können. Wenn ein Silo gefüllt wird, wird das eingehende Material auf die oberste Schicht aufgegeben bis diese voll ist. Da eine Schicht nur einen gemeinsamen Parametersatz für die Materie hat, werden diese Parameter (z.B. Temperatur, Dichte, chemische Zusammensetzung) über einen gewichteten Mittelwert zusammengeführt (abhängig von der Menge, die bereits in der Schicht ist, und der Menge die







dazukommt). Analog wird bei der Ausgabe von Materie in den Prozess ein Teil der untersten Schicht "entfernt". Es kann auch passieren, das bei Ein- oder Ausgabe mehr als eine Schicht betroffen ist. In diesen Fällen wird für die Ausgabe jede Schicht individuell verarbeitet und am Ende ein gewichteter Mittelwert gebildet, bzw. bei der Eingabe das Material auf die Schichten nach obigem Schema verteilt. Bedingt durch diese Implementierung hat der "Boden" des Silos keine feste Position in dem Vektor, sondern bewegt sich dynamisch weiter, sobald Material ausgegeben wird.

Durch diese Vorgehensweise ist trotz diskretem Vektor eine kontinuierliche Funktion gewährleistet. Dies ist essentiell, da die Eingabemenge in das Silo nicht beeinflusst werden kann (hängt von vorgeschalteten Aggregaten ab), und die Ausgabemenge häufig in sehr kleinen Schritten verändert / angepasst werden muss (z.B. PID-Regler). Durch die Einstellungsmöglichkeit der Vektorlänge hat der Anwender so die Möglichkeit, zwischen Genauigkeit und Performance das Optimum zu wählen.

Steinbruch

Der Steinbruch stellt im weitesten Sinne ebenfalls einen Massenspeicher dar. Mit dem Steinbruchmodell wird eine Funktionalität angeboten, die die variable chemische und mineralogische Zusammensetzung des Rohmaterials im realen Steinbruch nachbildet. Das Steinbruchmodell basiert im Wesentlichen auf der Grundimplementierung einer Siloklasse mit einer erhöhten Anzahl an Speicherelementen zur Charakterisierung des Steinbruchs als Massenspeicher für das Rohmaterial. Eine definierte diskrete Abbaurate in Abhängigkeit des Abbaufortschritts im Steinbruch kann dabei im Modell eingestellt werden.

Die variable chemische Rohmaterialzusammensetzung der vier Hauptkomponenten Kalk, Silizium, Eisen und Aluminium wird im gewählten Modellansatz durch die Generierung von normalverteilten Zufallszahlen entsprechend einem vorgegebenen Mittelwert und einer maximalen Standardabweichung dargestellt. Hierdurch soll die chemische Zusammensetzung des Kalksteins entsprechend der örtlichen Abbaufront im Steinbruch nachgebildet werden. Das Material des Steinbruchs wird in der Regel zunächst dem Brecher und anschließend einem Mischbett zugeführt.

Mischbett

Die Vorhomogenisierung von Kalkstein aus dem Steinbruch findet in einem Mischbett statt. Insbesondere der CaCO₃-Gehalt der Hauptkomponente Kalkstein weist im Steinbruch beträchtliche Schwankungen auf [6]. Die Vorhomogenisierung im Mischbett ist für eine homogene Rohmehlzusammensetzung daher zwingend notwendig und hängt vom Mischbettaufbau beziehungsweise der Materialschichtung im Mischbett ab.

Die Hilfsgröße, welche die Qualität der Vorhomogenisierung im Mischbett beschreibt, ist der sogenannte Mischeffekt oder das Varianzreduktionsverhältnis. Dieses Verhältnis kennzeichnet die Varianz der chemischen Zusammensetzung des Ausgangsmassenstroms in Bezug auf den Eingangsmassenstrom in das Mischbett.

Eine Mischbetthalde selbst wird im gewählten Modellansatz als eine Anzahl von diskreten Einzelelementen mit gleicher Masse definiert. Die Eingangskenngrößen für den Modellansatz sind die Länge des Mischbetts, die Dicke einer Mischbettschicht (Dicke des Abzugskratzers bei senkrechter Abzugskratzerbewegung über den Mischbettguerschnitt), die Anzahl an Bandabsetzer-Bewegungen zwischen zwei Haldenendpunkten sowie als Betriebsparameter die horizontale Bewegungsgeschwindigkeit des Bandabsetzers und der Massenzufluss in das Mischbett. Der im Modellansatz gewählte Mischbettaufbau, welcher auf dem Chevron-Prinzip beruht, als auch die Materialzufuhr und -entnahme können durch die schematisch in Abbildung 14 dargestellte Matrix beschrieben werden. Im Mischbettmodell wird für vordefinierte Anzahl eine an Abzugskratzerbewegungen entlang der Mischbettlänge Varianz-Reduktionsverhältnis das berechnet.



Seite 27 -







Abbildung 14: Links: Idealisierte 2d- Beschreibung eines Mischbetts, welches einen Mischbettaufbau nach der Chevron-Methode aufweist [7]; Rechts: Mischbettquerschnitt nach der Chevron-Methode [8]

2.1.2.7 Potentialgetriebener Feststofftransport (VDZ / KIMA P)

Mühle

Der Feststofftransport in Rohrmühlen (z.B. Kugelmühle) wird durch einen potentialgetriebenen Modellansatz realisiert. Dieser Ansatz kann auch auf andere Anlagen der Steine- und Erdenindustrie, wie z.B. Trommeltrockner, übertragen werden. Die Mühle wird hierbei zunächst eindimensional durch eine Reihenschaltung von idealen Rührkesselsegmenten diskretisiert. Der Materialtransport von einem Segment in ein benachbartes ergibt sich aus der Differenz der Füllstände in den jeweiligen Segmenten (Formel (6). Die Transportrichtung stellt sich somit automatisch ein. Füllstand und Verweilzeit hängen von der Anzahl der Mühlensegmente und der Konduktivität K ab. Diese beschreibt den Anteil der Massendifferenz zweier benachbarter Segmente, der vom stärker gefüllten in das weniger gefüllte Segment übergeht. Das Transportmodell wurde um die Möglichkeit erweitert, das Arbeitsverhalten von Mühleneinbauten wie Aus- und Übertragswänden separt zu beschreiben. Dies erlaubt es, den betriebstechnisch relevanten Einfluss dieser Elemente explizit zu variieren. Weiterhin berücksichtigt der Modellansatz Rückvermischung und den Einfluss des Mahlkörperfüllgrads der Mühle auf den Mahlgutfüllstand sowie den Transport. Die Erstellung eines konkreten Modells für eine Kugelmühle wird im Rahmen von Kapitel 2.1.4 näher erläutert.

$$\frac{d(m_i)}{dt} = \dot{m}_{i-1} - \dot{m}_i = k(\dot{m}_{i-1} - \dot{m}_i) - k(\dot{m}_i - \dot{m}_{i+1})$$
(6)

Abbildung 15 zeigt exemplarisch die Ergebnisse einer der durchgeführten grundlegenden Parametervariationen qualitativen Validierung zur des Transportmodells für eine Beispielmühlenkonfiguration. Bei den variierten Parametern handelt es sich um unterschiedliche Konduktivitätsparameter (K1 für den Transport in der Mühle, K2_{Inlet} und K2_{Outlet} zur Beschreibung des Arbeitsverhaltens der Trenn- und Übertragswand). Abbildung 15 links zeigt hierbei den Einfluss von drei unterschiedlichen Konduktivitätsparametern auf den mittleren Materialfüllstand in der Mühle, während Abbildung 15 rechts den Füllstand jedes einzelnen Segments bei einer gewählten Diskretisierung von 22 Mühlensegmenten darstellt. Dieser resultiert aus dem Transportverhalten in der Mühle, das im Wesentlichen durch die Fließfähigkeit des Materials, die Durchlässigkeit der Austragswand und den Materialtransport in der Wand bestimmt wird. Der sich einstellende Füllgrad wurde anhand von Datensätzen aus untersuchten Zementmühlen verifiziert.



vd7

DIMATTED 🛞





Unter Verwendung des gewählten Modellansatzes lässt sich durch die Verwendung einer Tracerkomponente eine virtuelle Verweilzeitverteilung der Mühle bestimmen. Diese wurde dann mit einem empirischen Ansatz für Zementmühlen nach Lippek [9] im stationären Mühlenbetrieb validiert. Durch die Wahl einer geeigneten Parameterkombination lässt sich auf diese Weise eine realistische mittlere Verweilzeit bei passendem Füllstand für eine definierte Mühlenkonfiguration einstellen. Um diesen Prozess zukünftig effizient durchführen zu können, wurde zudem eine entsprechende Modellstruktur für die virtuelle Verweilzeitmessung in Matlab Simulink geschaffen.



Abbildung 15: Links: Segmentfüllstand in der Kugelmühle resultierend aus einer Parametervariation für das potentialgetriebene Transportmodell; Rechts: Füllunungsvorgang der Mühle in Abhängigkeit der Parameter des Transportmodells.

Drehrohrofen

Aufgrund der Drehung des Ofens kann die Bewegung des Festbettes innerhalb des Drehrohrofens in drei Kategorien unterteilt werden: Rutschen, Periodisches Stürzen und Abrollen.



Abbildung 16: Bewegungsformen des Festbetts im Drehrohrofen. [10]

vd7

Diese Bewegung bewirkt in Verbindung mit dem Neigungswinkel des Ofens aufgrund der Gravitationskräfte, dass sich das Festbett in einer Spiralbewegung in axialer Richtung zum Ende des Ofens bewegt, bis es vom Ofenende fällt.



Seite 29





Abbildung 17: Schnittansicht eines Drehrohrofens mit Wehr am Ofenauslauf. [10]

Saeman [11] schlägt ein Modell zur Berechnung des periodischen Stürzens und Rollens des Festbettes vor. In diesem Modell werden der Volumenstrom und die mittlere Axialgeschwindigkeit des Festbettes berechnet, um die Bewegung des Festbettes entlang des Drehrohrofens zu beschreiben. Wie in Abbildung 17 dargestellt, werden Geschwindigkeit und Volumenstrom anhand des Zentriwinkels des Festbettes " β ", der Drehzahl des Ofens " ω ", des axialen Winkels des Ofens " α " und der Dammhöhe am Ofen, der Wehrhöhe "hs" und die Eingangsgeschwindigkeit zum Ofen "Vs, ein" berechnet.

$$\dot{V}_{S} = A_{s} \cdot v_{s} = \frac{2}{3} \omega R_{i}^{3} \cdot \left(\frac{tan\alpha}{sin\beta} - \frac{\partial h_{s}}{\partial z} cot\beta\right) \cdot \left(2\frac{h_{s}}{R_{i}} - \frac{h_{s}^{2}}{R_{i}^{2}}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$\tag{7}$$

Drehgeschwindigkeit des Ofens $\left(\frac{rad}{s}\right)$ ω Innenradius des Ofens (m) R_i Axialer Neigungswinkel des Ofens (rad) α Zentriwinkel des Festbetts β (rad) Querschnittsfläche des Festbettes (m^2) A_{s} Höhe des Festbettes h_s (m)

Um die Berechnung der festen Bewegung zu vereinfachen, wurden alle plausiblen Lösungen der Gleichung in einer Matrix ohne Einheit berechnet. Die resultierenden, einheitlosen Betthöhen



Seite 30

vd7

DIMATTED 🛞



werden durch Interpolation der berechneten Matrix gemäß den Eingabeparametern berechnet. Wie bereits erläutert, wurde für die Berechnung der Interpolation die Spline-Methode verwendet, um glatte Ergebnisse zu erzielen (s. Kapitel 2.1.2.2).

2.1.2.8 Aktive Förderaggregate (Di Matteo)

Auf Basis des stufenlosen vektorbasierten Silo-Ansatzes (siehe oben) hat KIMA P ein erstes Förderband für Feststoff implementiert. In diesem Fall bewegen sich bei aktiver Förderung Anfangsund Endposition des Förderbands mit festem Abstand dynamisch durch den Vektor.

In jedem Simulationsschritt wird Materie auf das Förderband aufgegeben. Um diese Materie korrekt aufzugeben, wird anhand der Förderbandgeschwindigkeit errechnet, welche Vektorelemente und in welchem Anteil betroffen sind. Die Distribution des Feststoffes in den Vektor erfolgt dabei genau wie im Silo. Förderbänder, und somit die Vektorelemente, haben eine maximale Kapazität – wenn mehr Material in einem Simulationsschritt aufgegeben wird, als das Förderband (abhängig von der Fördergeschwindigkeit) an Kapazität hat, verlässt das überflüssige Material den Prozess, sprich wird über einen separaten Ausgang an die Umgebung abgegeben.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden Prozesse bei der Förderung von Ersatzroh- und Ersatzbrennstoffen analysiert und auf Basis bestehender Anlagen, insbesondere bei der Fa. Spenner Zement, die typischen Organe einer Prozesskette identifiziert. Hierbei wurden die wesentlichen zu implementierenden Maschinen in unterschiedliche Klassen unterteilt, so dass auf Basis dieser Hierarchie später eine komplett objektorientierte Implementierung auf der Grundlage von Vererbungsmechanismen möglich wird. Dabei werden stets Attribute und Methoden eines abstrakten Grundmodells (z.B. Feststromförderorgan) an spezifische Ausprägungen derselben Klasse weitergegeben, ohne eine nochmalige Implementierung notwendig zu machen. Grundsätzlich wurde hierzu der Klassifikationsrahmen nach [12] genutzt, um eine generelle Taxonomie der Objekte zu erstellen. Es ist ein Auszug als Beispiel für den entwickelten Rahmen zur Taxonomie von Lager- und Transportorganen dargestellt. Es wurden u.a. auch die bestehenden grundsätzlichen Klassifizierungskriterien nach [13] und einem Klassifizierungsrahmen des VDI weiterentwickelt, erweitert und auf die bestehende Aufgabe abgestimmt. Um im weiteren Verlauf eine schnelle Implementierung der grundlegende Elemente zu ermöglichen, wurde auf Basis des Klassifizierungsrahmens eine Prioritätenliste erstellt, welche für die spezifischen Elemente des Grundmodels jeweils die wesentlichen Module zur Implementierung vorschlägt. Somit war es möglich, im Rahmen dieses Projektes alle notwendigen fördertechnischen Elemente zu implementieren und gleichzeitig für etwaige nachfolgende Entwicklungen einen möglichst vollständigen Klassifizierungsrahmen zu erarbeiten, so dass bei nachfolgender Erweiterung des Modulvorrats keine grundsätzlichen Anpassungen der Modulstruktur erforderlich werden. Im Folgenden seien auf Basis des grundsätzlichen Klassifizierungsrahmens (siehe auch [14]) einige ausgewählte implementierte Module der Förderaggregate näher dargestellt. Hierbei sollen spezifische Betrachtungen der Modellierung, Simulation und Verifikation der Modelle exemplarisch aufgezeigt werden, so dass ein generelles Bild der allgemeinen Vorgehensweise gezeichnet werden kann (siehe auch [15]). Dabei sollen grob die folgenden Grundelemente unterschieden werden:

- I. Lagerorgane
- II. Förderorgane
- III. Dosierorgane
- IV. Abscheideorgane
- V. Trockner



Seite 31





Abbildung 18 – Auszug des entwickelten Klassifizierungsrahmens für die zu entwickelnden Modelle

Lagerorgane

Ein Lagerorgan im Sinne der Modellierung besteht stets aus einem definierten nutzbaren Lagervolumen Q [m³], welches sich auf Basis der geometrischen Gegebenheiten der jeweiligen Lagerstätte definieren lässt. Im einfachsten Fall kann hier z.B. ein rechteckiges Silo mit einer definierten Lagermaterialhöhe, -breite und –tiefe angenommen werden, wobei insbesondere im Zementbereich eher zylindrische Silos typisch sind. Grundlegend wird hierbei das jeweils zu einem Zeitpunkt t im Silo befindliche Materialvolumen Q(t) auf Basis eines Grundlagervolumens Q₀ [m³], eines Volumenzustroms \dot{Q}_{in} [m³/h] und eines Volumenabstroms \dot{Q}_{out} [m³/h] wie folgt bestimmt:

$$Q(t) = Q_0 + \int_0^t \left[\dot{Q}_{in}(t) - \dot{Q}_{out}(t) \right] dt$$
(8)



vd7



Auf Basis der Materialeigenschaften des eingelagerten Schüttgutes oder Gases können zusätzliche Aussagen zum im Lager eingelagerten Material getroffen werden. So kann beispielsweise auf Basis der Dichte des Materials $\rho [t/m^3]$ die im Silo befindliche Materialmenge auch gravimetrisch (m [t]) angegeben werden.

$$m(t) = Q(t) \cdot \rho \tag{9}$$

Ein wesentlicher Beitrag zur Beschreibung von Lagerorganen stellen die zugehörigen Austragsorgane dar, welche in der Praxis den entsprechenden abfördernden Materialstrom \dot{Q}_{out} [m³/h] realisieren. Hierbei wird in der Modellierung von einem theoretischen max. Austragsvolumenstrom von $\dot{Q}_{out_{max}}$ [m³/h] ausgegangen, welcher dann durch einen entsprechenden aktuellen Austragskoeffizienten a(t) skaliert werden kann, so dass gilt:

$$\dot{Q}_{out}(t) = \dot{Q}_{out_{max}} \cdot a(t) \tag{10}$$

Generell lässt sich also das Modell eines Lagerorgans (hier: Bulk Material Storage System – BMSS) in der in Abbildung 19 dargestellten Weise abbilden, wobei hierbei auch das zugehörige Simulationsmodul dem gegenübergestellt wurde.



Abbildung 19 – Gegenüberstellung des entwickelten Basismodells eines Lagerorgans (a) und des implementierten Simulationsmoduls (b)

Förderorgane

Im Bereich der Förderorgane wurden im Rahmen der Implementierung grundsätzlich zwischen Stetig- und Unstetigförderer unterschieden. Insbesondere vor dem Hintergrund der notwendigen Förderorgane zur Abbildung des Zementwerkes bei der Fa. Spenner, sind hierbei eine Vielzahl unterschiedlicher Förderorgane notwendig. Hierzu gehören insbesondere die folgenden Modelle: Grundfördermodel, Bandförderer, Schneckenförderer und Becherwerk.

Analog zu dem grundlegenden Modell einer Lagerstätte wurde zunächst auch ein Basismodell eines abstrakten Stetigförderorgans implementiert. Hierbei wird auf Basis einer grundsätzlichen Vorschubbewegung ein Volumenstrom \dot{Q}_{out} [m³/h] realisiert. Dabei ist zu beachten, dass auch ein Förderorgan ein entsprechendes Materialspeichervolumen beinhaltet, da zum Beispiel bei einem Schnecken- oder Bandförderer durch die gegebenen Dimensionen während des Transportvorgangs



Seite 33



sich ein definiertes Materialvolumen innerhalb des Förderers befindet. Grundsätzlich gelten die gleichen Gesetzmäßigkeiten wie bei den Lagerstätten. Das entsprechende Volumen ergibt sich innerhalb des Förderers auf Basis eines eingehenden und eines ausgehenden Volumenflusses, so dass die Grundgleichung auch hier Anwendung finden kann.

Die Definition des ausgehenden Volumenflusses $\dot{Q}_{out}(t)$ [m³/h] ist je nach Ausprägung des Förderers unterschiedlich. Hierzu sollen in der folgenden Abbildung die wesentlichen Zusammenhänge zur Definition des Volumenflusses anhand eines Bandförderers (Abbildung 20 – (a)), eines Schneckenförderers (Abbildung 20 – (b)) und eines Trogkettenförderers (Abbildung 20 – (c)) dargestellt werden (siehe auch [12]).



Abbildung 20 – Definition des ausgehenden Volumenstroms je nach Art des Stetigförderorgans: (a): Bandförderer; (b): Schneckenförderer; (c). Trogkettenförderer

Je nach Ausprägung des Förderorgans können dann auf Basis der zugrundeliegenden Geometrie entsprechende Volumenstromgleichungen definiert werden. Hierbei sind zum einen die jeweiligen geometrischen Größen des Förderers, sowie die charakteristischen Eigenschaften des Förderguts (hier: Schüttguteigenschaften) zu betrachten. Im Folgenden seien hier exemplarisch die Volumenstromgleichungen für die in Abbildung 20 eingeführten Förderorgane dargestellt.

Bandförderer:
$$\dot{Q}_{out}(t) = 3600 \cdot b \cdot h \cdot v \text{ [m}^{3}/\text{h]}$$
 (11)
Schneckenförderer: $\dot{Q}_{out}(t) = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot [(d+h)^{2} - d^{2}] \cdot (t-e) \cdot 60 \cdot n \text{ [m}^{3}/\text{h]}$ (12)
Trogkettenförderer: $\dot{Q}_{out}(t) = 3600 \cdot b \cdot h \cdot \alpha \cdot v \text{ [m}^{3}/\text{h]}$ (13)
mit $H = h \cdot \alpha$



Seite 34

vd7



Generell lässt sich also das Modell eines kontinuierlichen Förderorgans (hier: Continous Mechanical Conveyor (CMC)) in der in Abbildung 21 dargestellten Form abbilden, wobei hier auch das zugehörige Simulationsmodul dem gegenübergestellt wurde.

Im Gegensatz zu den zuvor dargestellten Stetigförderern wurde mit dem Becherwerk ein typischer Unstetigförderer implementiert. Im Gegensatz zur Implementierung der zuvor genannten Elemente ist dieses Modell dadurch gekennzeichnet, dass sich eben kein stetiger Volumenfluss am Ausgang des Modells einstellt, sondern das Material eben in einzelnen diskreten Paketen am Ausgang vorliegt.



Abbildung 21 – Gegenüberstellung des entwickelten Basismodells eines Förderorgans (a) und des implementierten Simulationsmoduls (b)

Grundlage dieser Unstetigkeiten ist bei dem modellierten Becherwerk die Aufteilung des Volumenstroms $\dot{Q}_{out}(t)$ auf Basis einer definierten Becherteilung $l_B[m]$ und einem zugehörigen Bechervolumen $V_B[m^3]$ (siehe auch [16]).

Daher musste die diskrete Struktur des Fördervorganges im Rahmen des Simulationsmodells entsprechend umgesetzt werden, was eine Anpassung des Grundlagenmoduls eines Stetigförderers notwendig machte (siehe auch [17]). Des Weiteren sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass das Modell zur Berechnung der jeweiligen Becherfüllung neben dem eigentlichen Materialzustrom $\dot{Q}_{in}(t) [m^3/h]$ (siehe Abbildung 22 – (a)) zusätzlich noch ein sogenanntes Bunkerreservoir im Becherwerksfuß betrachten muss, da bei der Becherbefüllung bei entsprechendem Materialfüllstand im Becherwerksfuß stets zunächst ein Aufsammeln von Restmaterial erfolgt (siehe Abbildung 22 – (b)) [4].



DIMATTED 🛞





Abbildung 22 – Befüllung eines Becherwerks und Ableitung der Becherfüllstände bzw. des Materialreservoirs im Becherwerksfuß, (a): Becherbefüllung ohne zus. Schöpfvorgang im Becherwerksfuß; (b) Becherbefüllung mit zus. Schöpfvorgang im Becherwerksfuß und entsprechender Vorbefüllung der Becher

Dosierorgane

Dosierorgane übernehmen im Rahmen eines Anlagenkonzeptes die volumetrische oder gravimetrische Dosierung von Schüttgütern, so dass eine definierte Volumen- oder Gewichtsmenge einem entsprechenden Prozess zugeführt werden kann. Grundsätzlich wird hier daher im Gegensatz zum klassischen Förderorgan zusätzlich ein entsprechendes regelungstechnisches Modell zur Bereitstellung eines konstanten Förderstromes benötigt. Das für einen geschlossenen Regelkreis benötigte Messsignal zur Validierung und Verifizierung des aktuellen Förderstromes beruht hierbei bei gravimetrischen Systemen auf einer kontinuierlichen Verwiegung des Materials und einer nachfolgenden Bestimmung des Massenflusses $\dot{m} [t/h]$ unter Einbeziehung der aktuellen Fördervorschubgeschwindigkeit v [m/s]. Im Projekt wurden Modelle von Dosierbandwaage und Schneckendosiersystem entwickelt. Nachfolgend ist beispielhaft die Modellierung eines Schneckendosiersystems in Abbildung 23 – (a) dargestellt.



Abbildung 23 – Schneckendosiersystem – (a): Allgemeiner mechanischer Aufbau des Systems; (b): Verallgemeinerte Geometrie zur Modellierung

Der Hauptbestandteil des mathematischen Modells, das eigentliche mechatronische Anlagenmodell, wird im Wesentlichen durch die Modellierung des Massenflusses in der Anlagengeometrie bestimmt.



Seite 36


Diese ist in Abbildung 23 – (b) dargestellt. In diesem Kontext spielt aber auch die Modellierung des Schüttgutes und seiner Eigenschaften eine entscheidende Rolle. Grundsätzlich wird bei Förderorganen wie der Förderschnecke zunächst einmal ein reiner Volumenstrom modelliert und erst durch die Hinzunahme der spezifischen Schüttdichte des Fördergutes kann auch der zugehörige Massenfluss betrachtet werden, was bei der Modellierung eines gravimetrischen Dosiersystems entscheidend ist. Als Grundlage für die Modellierung dient hierbei die vereinfachte Geometrie des betrachteten Systems.

Die Modellierung des Massenflusses \dot{m}_{dos} [t/h] durch das System beruht auf dem aktuellen Gewicht der Wiegestrecke m_{tube} [t] und der aktuellen Drehzahl des Schneckenförderers $\omega(t) \left[\frac{1}{min}\right]$ (siehe auch [18]).

$$\dot{m}_{dos} = \frac{m_{tube}}{A_{dos} \cdot L_{dos}} \cdot A_{dos} \cdot S_{dos} \cdot \omega(t)$$
(14)

Der Massenfluss am Auslass der Waage \dot{m}_{out} [t/h] muss naturgemäß gleich dem Massenfluss in der Rohrsektion sein und ist dabei nur durch eine entsprechende Zeit verzögert:

$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{dos} \cdot (t - T_{tube}) \tag{15}$$

$$T_{tube} = \frac{L_{tube}}{V_{tube}} = \frac{L_{tube}}{S_{tube} \cdot \omega(t)}$$
(16)

Die Höhe des Materials innerhalb des Zwischenbunkers kann auf Basis der vereinfachten Geometrie aus Abbildung 23 – (b) über den folgenden Zusammenhang definiert werden:

$$H_{bulk} = \frac{h_{hopp}L_{hopp}w_2 + \sqrt{h_{hopp}^2 L_{hopp}^2 w_2^2 + 2L_{hopp}V_{bulk}(w_1 - w_2)}}{L(w_2 - w_1)}$$
(17)

Der Lastwiderstand des Schüttgutes gegen das Drehmoment der Schnecke wurde auf Basis des DIN 15 262-Standards [5] modelliert und stellt ein wesentliches Element zur Modellierung der Leistungsaufnahme des Antriebssystems dar und kann durch den folgenden Zusammenhang mathematisch beschrieben werden:

$$T_{L} = \frac{\lambda \cdot \rho \cdot \varphi \cdot (D^{2} - d^{2})}{8 \cdot n} \left(L_{hopp} s_{hopp} (c_{hopp} + 1) + L_{dos} s_{dos} + L_{tube} s_{tube} \right)$$
(18)

Die Hauptfunktionalität des hier betrachteten gravimetrischen Dosiersystems ergibt sich aus der kontinuierlichen Anpassung der Schneckengeschwindigkeit basierend auf dem aktuell gemessenen Gewicht des Materials in der Rohrsektion und dem definierten Massenflusssollwert. Der eigentliche Regler wurde hierbei auf Basis eines diskreten PID-Reglers realisiert, welcher aber in der Realität durch eine Onlinekalibrierroutine während des Betriebes der Anlage automatisch adaptiert wird, da hier auch Verschleiß- und Verschmutzungseffekte entsprechend betrachtet werden müssen.

Grundlage für den geschlossenen Regelkreis stellt hierbei ein Prozessbeobachter dar, welcher aus den vorhandenen Messwerten der Anlage (aktuelle Schneckengeschwindigkeit, Gewicht der Messstrecke, etc.) den aktuellen Massenfluss berechnet.

Zusätzlich beinhaltet das System noch einen weiteren Regelkreis für die Steuerung der zuführenden Organe zur Stabilisierung des Materialgewichts im Zwischenbunker. Danach ergibt sich das in der



- Seite 37 -





nachfolgenden Abbildung dargestellte generelle regelungstechnische Modell des Dosiersystems, welches zwei parallele Regelkreise für (i). den kontinuierlichen Dosierregler und (ii). die Regelung der Zuführorgane und die zugehörigen PID-Regler bzw. PI-Regler enthält (siehe auch [19]).



Abbildung 24 – Generelles regelungstechnisches Modell des Dosiersystems

Auf Basis des Regelkreises ergibt sich eine Kennlinie des Schneckendosiersystems, welche den generellen Zusammenhang zwischen Gewicht der Rohrsektion, der aktuellen Schneckendrehzahl und dem resultierenden Massenfluss beschreibt. Hierbei kann also der Massenfluss als Funktion der Schneckendrehzahl und des Materialgewichtes, bzw. der Materialdichte dargestellt werden $(\dot{m}_{out} = f(m_{tube}, \omega(t)))$. In Abbildung 25 findet sich die resultierende Kennlinie unter Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen der Schneckendrehzahl und dem resultierenden Volumenförderstroms.

Generell basiert die Modellierung des Dosierorgans auch auf einem abstrahierten Grundmodell, welches grundlegende Elemente von Lager- und Förderorganen in einer Kombination enthält.



Abbildung 25 – Kennlinie des Schneckendosiersystems (Massenfluss als Funktion der Materialdichte und der Schneckendrehzahl)

Hierbei kann auf Basis einer modularen Betrachtung mit Hilfe unterschiedlicher Transportorgane die Art des Dosierorgans definiert werden, so dass sich beispielsweise bei Nutzung eines Schneckenförderers der zuvor eingeführte Schneckendosierer darstellen lässt. In Abbildung 26 ist

KIMA PROCESSCOTTER Seite 38



das Basismodell eines Dosierorgans (Continuous Dosing Unit (CDU)) erneut dem Simulationsmodul gegenübergestellt.



Abbildung 26 – Gegenüberstellung des entwickelten Basismodells eines Dosierorgans (a) und des implementierten Simulationsmoduls (b)

Abscheideorgane

Insbesondere im Bereich der alternativen Brennstoffe (siehe auch AP5) werden spezifische Abscheideorgane zur Klassierung von Schüttgütern auf Basis der jeweiligen Partikelgrößenverteilung (Particle Size Distribution PSD) genutzt. Als notwendiges Beispiel für ein Abscheideorgan wurde daher ein klassisches Schüttgutsieb als Simulationsmodul implementiert. Hierbei kann die Siebung stets als eine Klassifizierung von Materialien modelliert werden, so dass ein einfließender Materialvolumenstrom $\dot{Q}_{in}(t)$ auf Basis seiner Partikelgrößenverteilung in einen Übergrößenvolumenstrom $\dot{Q}_{out_{in}}(t)$ und einem Siebvolumenstrom $\dot{Q}_{out_{s}}(t)$ aufgeteilt wird. Die generelle Sieb- oder Klassierfunktion wird auf Grund einer vorherigen Definition des Siebgitters vorgegeben, wobei das Verhältnis von offener zu geschlossener Siebfläche sowie die absoluten Öffnungsgrößen des Gitters wesentlich für die Ableitung der entsprechenden ausgehenden Materialströme anzusehen sind. Dabei lässt sich A₀ [m²] als Anteil geöffneter Bereiche im Siebgitter definieren. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Siebfunktion ist die geometrische Größe des Siebes (aktive Siebfläche A [m²]), sowie die Neigung des Siebes, welche sich auf Basis der Aufstellungskriterien ergeben (siehe auch [20]).

Zur Bestimmung der Gesamtkapazität des Siebes wurde im Rahmen der Modellierung ein Ansatz auf Basis von Korrelationsfaktoren C_i genutzt, so dass der Gesamtmassenstrom über das Sieb \dot{m}_c [t/h] sich wie folgt beschrieben lässt:

$$\dot{m}_c = A_0 \cdot F_C \cdot \prod_{i=1}^{10} C_i \tag{19}$$

Die einzelnen Korrelationskoeffizienten C₁ bis C₁₀ decken auf Basis empirischer Modelle einzelne Kriterien der Siebfunktion ab. Hierzu gehören zum Beispiel Anpassungsfaktoren in Bezug auf das Material (z.B. C₂ für die Schüttdichte ρ oder C₁₀ für Feuchtigkeit), die Konfiguration des Siebes (z.B. C₅ für die Anzahl der Decks, C₆ für die Neigung des Siebes oder C₁ den Öffnungsanteil) und natürlich die eigentliche Materialgrößenverteilung (z.B. C₃ für den Übergrößenanteil, den Halbgrößen-/Untergrößenanteil C₄ oder C₈ für die Partikelgestalt). *F_C* beschreibt die Auslegungskapazität [t/h/m²] des Abscheideorgans. Auf Basis dieses Massenflusses kann eine Materialbelegung definiert werden, welche in Bezug auf die Abscheideeffizienz entsprechend große Auswirkungen hat, da bei



Seite 39

vd7

DIMATTED 🛞



zunehmender Beladung die Menge an Material pro m² Siebfläche steigt und damit zunehmend Material keinen direkten Kontakt mit dem Sieb hat. Dies wurde im Rahmen der Implementierung auf Basis von zwei unabhängigen Schieberegistern innerhalb des Modells erreicht, wobei ein Register die Materialschicht symbolisiert, die direkten Kontakt mit dem Sieb und daher auch mit größtmöglicher Effizienz klassifiziert wird (siehe auch [21]). Das zweite Register wird erst befüllt, wenn die untere Schicht komplett gefüllt wurde und repräsentiert dann eine Materialschicht, die keinen Kontakt mehr zur Siebfläche hat und daher kaum oder gar nicht klassifiziert wird. Nachfolgend ist wieder das generelle abstrahierte Modell eines Abscheideorgans dargestellt (Abbildung 27 - (a)), wobei das entsprechend implementierte Simulationsmodul (Abbildung 27 - (a))



Abbildung 27 – Gegenüberstellung des entwickelten Basismodells eines Abscheideorgans (a) und des implementierten Simulationsmoduls (b)

Trockner

Zur Abbildung einer typischen Prozesskette für die Nutzung von alternativen Brennstoffen im Bereich der Zementkalzinierung wurde ein Trockner als Bestandteil der Modellbibliothek implementiert. Das Trocknungsmodul basiert auf der Notwendigkeit denjenigen Masseanteil am Gesamtmassenstrom $\dot{m}_{in}(t) \left[\frac{t}{h}\right]$,], der sich der Feuchte des Materials zuordnen lässt, zumindest partiell aus der Feststoffphase in die Gasphase zu überführen, was praktisch einer Verdampfung von Wasser entspricht. Hierbei wurde im Rahmen der Modellimplementierung und im Rahmen einer gewissen Vereinfachung von einer entsprechenden Trocknungseffizienz ausgegangen, da naturgemäß auf Basis der praktisch zur Verfügung stehenden Trocknungsenergie in der Regel nicht die gesamte Feuchtigkeit im Materialstrom beim Durchlauf durch das Trocknungsaggregat umgewandelt werden kann, sondern jeweils ein entsprechender Anteil im Feststrom verbleibt. In Abbildung 28 ist das grundlegende Modell des Trockners sowie das zugehörige Simulationsmodul dargestellt.

Der Trockner basiert grundsätzlich auf der Implementierung eines Förderorgans, da auch innerhalb des Aggregats zunächst einmal eine Materialförderung realisiert wird (z.B. bei einem klassischen Bandtrockner auf Basis eines Förderbands). Dieser wird ergänzt durch ein vereinfachtes Trocknungsmodell, bei dem die Trocknungseffizienz e [%] von der Materialverweilzeit T_D [s] innerhalb des Trockners, also letztendlich von der Fördergeschwindigkeit v [m/s], dem zugeförderten Gesamtmassenstrom $m_{in}(t) [t/h]$ und der zur Verfügung stehenden Wärmeenergie Q_{Tr} [kJ], welche sich in der Praxis in der Regel aus der zur Verfügung stehenden Trocknungsluftmenge ergibt, abhängt. Letztere wird im Bereich der Zementherstellung in der Regel aus anderen Prozessbereichen abgeleitet. So wird beispielsweise die im Rahmen des Klinkerkühlers anfallende



Seite 40

vdz

DIMATTED 🛞



Prozesswärme in der Praxis typischerweise als Trocknungsluft zurückgeführt. Nachfolgend ist für die entwickelten Module das Basismodell in Abbildung 28 - (a) dargestellt, wobei das entwickelte Simulationsmodul am Beispiel eines Brennstofftrockners (siehe auch AP5) in Abbildung 28 - (b) entsprechend abgebildet wurde. Das entwickelte Grundmodul des Trockners kann für die Implementierung weiterer spezifischer Trocknungsgeometrien (z.B. Luftstromtrockner, Schneckentrockner, Trommeltrockner, etc.) weiterentwickelt werden.



Abbildung 28 – Gegenüberstellung des entwickelten Basismodells eines Trocknungsorgans (a) und des implementierten Simulationsmoduls (b)

Zur Beschreibung von elektrischen Antriebsmotormodellen wurde eine Simulation eines Drehstrom-Asynchron-Motors für jeden Förderer erstellt. Damit werden Drehmomentbelastung-, Stromabnahme- und Krafteintrag berechnet.

Die Implementierung basierte auf der dq0-Transformation. Damit konnte die Analyse von Drehstrom-Asynchronmaschinen vereinfacht werden. Typische physikalische Größen wie Drehmoment, Leistung und Ströme können mit einer zeitlichen Auflösung bis zu 1 ms berechnet werden, was die dynamische Analyse unterstützen kann. Abbildung 29 zeigt dies beispielhaft.







Abbildung 29 – Ergebnisse der Simulation eines Drehstromasynchronmotors als Antriebseinheit für fördertechnische Organe: (a) Rotordrehzahl über der Zeit, (b) Drehmoment über der Zeit und (c) Leistung über der Zeit

Das Modell wurde so implementiert, dass alle anderen Systeme, die die Berechnung des Leistungsbedarfs oder die Dynamikeffekte eines Leistungsantriebs erfordern, die Motormodellfunktion leicht aufrufen können. Vorkonfigurierte Motoren können ausgewählt werden, oder ein kundenspezifischer Motor kann nach physikalischen Parametern konfiguriert werden (siehe auch [22]).

2.1.2.9 Staubtransport und Abscheidung von Staub aus der Gasphase (VDZ)

vdz

Der Transport von Staub durch das System wird durch die Gasphase realisiert. Hierzu wurden zwei Transportmodelle implementiert. Das einfache Modell berechnet die Verweilzeit des Gases und transportiert den Staub mit der gleichen Verweilzeit mit. Eintretende Ströme werden dabei in dem bereits erläuterten "HoldUp" zwischengespeichert und nach entsprechender Verweilzeit wieder aus dem System ausgetragen. Ein komplexes Modell ist für die detailiertere Abbildung implementiert und sieht eine dynamsiche Segmentierung des Systems entsprechend der Verweilzeit vor (Abbildung 30). Diese Modelle werden vor allem in Rohrstücken (Pipe) verwendet.



Seite 42





Anzahl der Segmente

Abbildung 30: Darstellung des Modells zur dynamischen Segmentierung des Gastransports

Steigschächte, zu welchen auch Kalzinatoren gehören, können eine klassierende Wirkung auf den Staub haben. Hierzu wurde zunächst ein Modell betrachtet, welches die unterschiedlichen Partikelgrößen im Material betrachtet, um eine exakte Separierung des Materials mit Blick auf Transport und Verweilzeit im Steigschacht zu ermöglichen [23]. Der Rechenaufwand steigt bei dieser Lösung jedoch sehr stark an. Dementsprechend wurde zunächst eine vereinfachte Lösung implementiert. Diese ist gültig für den Stokes-Bereich, in dem sich die meisten Prozesse bei der Zementherstellung bewegen [3]. Im verwendeten Ansatz wird zunächst die Partikelgröße bestimmt, bei der sich ein Partikel in einer senkrechten Aufwärtsströmung im Gleichgewicht befindet, also weder nach unten fällt noch von dem Luftstrom mitgenommen wird. Das sogenannte Grenzkorn definiert den Separationsgrad und teilt den Staub anhand der Partikelgrößenverteilung in die grobe und feine Fraktion auf, d.h. alle Staubkörner, die kleiner sind als das Grenzkorn, werden von der Strömung mitgerissen und alle Staubkörner, die größer sind, fallen runter.

Die Abscheidungsprozesse von Stäuben aus der Luft sind aus verschiedenen Gründen in verfahrenstechnischen Prozessen wichtig. Die Staubabscheidung durch Zyklone ist im Zementherstellungsprozess weit verbreitet. Neben der Entstaubung der Mühlen und der Sichter sind Zyklone im Vorwärmerturm das zentrale Element. Die Korngrößenverteilungen von Rein- und Rohgas wurden durch die Bestimmung der Trennkorngröße [24] berechnet. Das Modell bezieht die Geometrie des Zyklons ein, was besonders für die Anwendung im Vorwärmerturm wichtig ist.

Zur weiteren Darstellung der Staubabscheidung wurde ein Modell für einen Gewebefilter sowie ein Modell für einen Elektrofilter grundlegend implementiert. Beide Modellansätze beziehen die oberen Temperaturgrenzen ein, da die Filteranlagen oberhalb dieser Grenzen Schaden nehmen können. Die Abscheidung erfolgt momentan durch aus der Literatur bekannte Kennzahlen für die Effizienz [6].



- Seite 43



2.1.2.1 Grundmodule für Zerkleinerungsmaschinen (VDZ)

Neben dem potentialgetriebenen Materialtranport in der Kugelmühle wurden weitere Grundmodelle für die Beschreibung von Zerkleinerungsmaschinen implementiert. Diese können auch zur Beschreibung anderer Anlagen in der Steine- und Erdenindustrie genutzt werden. Es handelt sich um Modelle zur Beschreibung der Zerkleinerung, unterschieden nach Mahlung und Brechen, sowie Modelle zur Klassierung im Windsichter. Die ebenfalls relevante Siebung wurde bereits im Rahmen der Förderaggregate beschrieben.

Zerkleinerung im Brecher

Brecher werden für die Grobzerkleinerung von Gestein eingesetzt. In Zementwerkek werden sie in der Regel für die Zerkleinerung von Kalkstein nach der Gewinnung im Steinbruch eingesetzt. Im Rahmen des Projektes wurde eine Zerkleinerung im Hammerbrecher betrachtet. Im verwendeten Brechermodell wird eine Zerkleinerungskinetik erster Ordnung angenommen, welche von einer direkten Korrelation von Energieeintrag und Zerkleinerungsergebnis (ausgedrückt als Durchgangssumme der resultierenden Korngrößenverteilung) ausgeht. Hierbei wird die Ausgangsgleichung der Rittinger-Theorie verwendet, welche auf der Annahme basiert, dass die Zerkleinerungsenergie proportional zur erzeugten Produktoberfläche ist [25]. Dieser Ansatz ist für die betrachteten Größenbereiche zulässig. Da der elektrische Energiebedarf der Brecher im Vergleich zu den Mühlen und den Gebläsen des Brennprozesses als sehr klein zu bewerten ist, wird ein einfacher und daher perfomanter Ansatz gewählt.

Das Zerkleinerungsergebnis wird anhand eines berechneten Durchgangssummenwertes (D₈₀) der resultierenden Korngrößenverteilung bestimmt. Es wird hierbei ein konstantes Zerkleinerungsverhältnis je nach Brecherbauart vorgegeben. Die Ableitung der Gleichung für den Energiebedarf des Brechers basiert auf der Annahme, dass der Netto-Energiebedarf für die Zerkleinerung proportional zum Gesamtenergiebedarf des Brechers ist. Darüber hinaus kann der notwendige Gesamtenergiebedarf als proportional zur kinetischen Energie der Schwinghämmer des Rotors beschrieben werden [25]. Der Netto-Energiebedarf des Brechers stellt sich somit in Abhängigkeit der Anlagenkenngrößen, Hammermasse und Rotordurchmesser sowie der Betriebsgröße "Rotationsgeschwindigkeit" des Rotors ein.

Zerkleinerung in Kugelmühlen

Für die Abbildung der Mahlung in einer Kugelmühle wurde ein Modellansatz nach Espig gewählt [9]. Dieses Zerkleinerungsmodell erster Ordnung beschreibt die Zerkleinerung für ein gegebenes Material in Abhängigkeit vom Energieeintrag in das beanspruchte Material. Grundlage des Modells ist die sogenannte Zerkleinerungsinvariante, welche als kumulierte Kenngröße das Zusammenwirken einer bestimmten Anlage mit einem bestimmten Material darstellt. Diese Kenngröße kann durch Beprobung und Messungen an einer realen Anlage bestimmt werden. Der Modellansatz erlaubt es, den Einfluss sich verändernder Randbedingungen (Energieeintrag, Aufgabemasse oder -korngröße) auf das Zerkleinerungsergebnis zu bestimmen. Die Zerkleinerungsinvariante wird für den diskontinuierlichen Fall nach folgendem Ansatz berechnet:

$$c_{inv,Batch}(x) = -\frac{m}{t_{end}} \cdot \ln\left(\frac{R_{t_{end}}(x)}{R_{0(t=0)}(x)}\right)$$
(20)

mit

x: Korngröße

m: Masse in der Mühle

Seite 44





- Rtend: Rückstandssummenverteilung des Mahlguts nach Ende der Mahlung
- R₀: Rückstandssummenverteilung des Mahlgutes vor Start der Mahlung

Die Größe c_{inv} beschreibt dabei für jede Korngröße x den möglichen Massenanteil je Zeitschritt, bei der ein Teil von größeren Partikeln (> x) um einen bestimmten Grad reduziert wird. Die Zerkleinerungsinvariante bleibt unabhängig vom Durchsatz und der Korngrößenverteilungen des Mühlenaufgabegutes. Es wirken sich jedoch die apparativen Einstellungen einer Kugelmühle wie Kugelgattierung, Drehzahl, Panzerung und Belüftung sowie die Mahlbarkeit des Mahlgutes auf sie aus.

Ausgehend von den oben definierten Zusammenhängen ergibt sich aus den Gleichungen (22) bzw. (21) die Energiecharakteristik-Kurve [26, 27, 28]. Diese errechnet sich direkt aus dem Verhältnis der effektiven Leistung einer Mahlanlage und der Mühleneffizienz-Kurve gemäß:

$$W_{inv}(x) = \frac{P_{eff}}{c_{inv}(x)}$$
(21)

mit

P_{eff}: Effektive Leistung der Mahlanlage

Damit beschreibt die Energiecharakteristik-Kurve den spezifischen Energiebedarf, der notwendig ist, um den gleichen Zerkleinerungsgrad zu erzielen, wie oben beschrieben. Hierbei geht weiterhin der Massenstrom bzw. die Masse und Mahldauer im diskontinuierlichen Fall in die Gleichung ein. Gemäß Espig [26] kann auch für den Einfluss der Energie eine Invarianz in bestimmten Grenzen festgestellt werden. Zerkleinerungsinvariante kann im stationären Zustand einer Mühle bestimmt werden. Dazu müssen die Korngrößenverteilungen von Mühlenaufgabegut, Mühlenaustragsgut und der zugehörige Mahlgutmassenstrom bzw. sein Äquivalent aus Mahlgutmasse in der Mühle und Dauer der Mahlung im diskontinuierlichen Fall gemessen werden. Der Vorteil dieses Ansatzes gegenüber einer alternativen Herangehensweise, z.B. mittels des "Perfect mixing model", ist damit die Tatsache, dass keine explizite Bestimmung von Materialparametern durch zusätzliche Versuche erforderlich ist [29].

Abbildung 31 zeigt exemplarisch die Ergebnisse des Zerkleinerungsmodells. Hier ist die Veränderung der Partikelgrößenverteilung (angegeben als Dichteverteilung) durch die Zerkleinerung bei unterschiedlichen Energieeinträgen für die zweite Kammer der Zementmühle dargestellt. Es ist erkennbar, dass sich die Verteilungen mit zunehmendem Energieeintrag nach links hin zu kleineren Korngrößen verschieben. Verändert sich durch die Verweilzeit in der Mühle oder durch Veränderung des Füllgrads der Energieeintrag in das Material, so resultiert dies auch in einer Veränderung der Mahlfeinheit. Bei der Veränderung der Mahlbarkeit des Mahlguts ist, wie bereits erläutert, eine erneute Parametrisierung des Modells auf Basis von Messungen erforderlich. Alternativ besteht die Möglichkeit einer rechnerischen Korrektur auf Basis der Mahlbarkeit nach Zeisel. Dieser Ansatz ist bisher aber noch nicht ausreichend validiert.



- Seite 45





Abbildung 31: Ergebnis der Anwendung der Zerkleinerungscharakteristik auf die Eingangskorngrößenverteilung am Beispiel der 2. Mahlkammer

Das Modell nach Espig kann sowohl für die Beschreibung von diskontinuierlichen als auch kontinuierlich betriebenen Mühlen genutzt werden. Der gewählte Modellansatz für die Kugelmühle entkoppelt den Materialtransport und die Zerkleinerung jedoch, um auch die Beschreibung instationärer Modellzustände wie beispielsweise An- und Abfahrvorgänge zu ermöglichen. Der Materialtransport erfolgt wie auf Seite 28 beschrieben. Die Zerkleinerung wird in jedem Zeitschritt für jedes Segment der Kugelmühle durch den diskontinuierlichen Modellansatz nach Espig realisiert.

Durch eine mehrstufige Beschreibung der Zerkleinerung entlang der Mahlbahn kann außerdem der Einfluss der zunehmenden Feinheit trotz der Kinetik erster Ordnung abgebildet werden. Hierbei können die Segmente der Kugelmühle durch experimentelle Daten unterschiedlich parametrisiert werden.

Klassierung im Windsichter

Nahezu alle Mahlanlagen in der Zementindustrie arbeiten im geschlossenen Kreislauf mit Sichtern zur Klassierung des Mahlguts. Im Sichter wird das Material im Gasstrom dispergiert und der Sichtzone zugeführt. Dort wird das Material durch die Einwirkung von Gewichts-, Zentrifugal- und Schleppkraft entsprechend der Partikelgröße (bei gleicher Dichte) in Feingut und Grobgut aufgeteilt und zu unterschiedlichen Punkten des Sichters tranportiert. Feingut wird als Produktstrom weiter zu einem Abscheider geleitet. Grobgut wird zurück zu der Mühle geführt, wo er erneut gemahlen werden kann. Die Trennwirkung eines Sichters kann durch die Trennkurve (Tromp-Kurve) ausgedrückt werden. Sie beschreibt, in welchem Verhältnis jede Partikelklasse des Aufgabegutes in das Grobgut bzw. in das Feingut gelangt. Bei bekannter Trenncharakteristik eines Sichters können bei bekanntem Aufgabemassenstrom die Korngrößenverteilungen und Massenanteile des Grobund Feingutes bestimmt werden. Die Trenncharakteristik kann für einen Betriebszustand messtechnisch bestimmt werden.



vdz



DIMATTED 🕅



Abbildung 32: Tromp-Kurve für den Sichter der Fa. Spenner . Orange: gemessene Trennkurve; Blau: berechnet durch das Modell nach Whiten mit parametrisiertem Modell für den vorliegenden Betriebspunkt.

Die Trenncharakteristik eines Sichters verändert sich jedoch in Abhängigkeit der Betriebsparameter wie z.B. der Drehzahl des Stabkorbs und des Luftvolumenstroms. Daher wurden zwei verschiedene Möglichkeiten für die Beschreibung der Klassierung implementiert. Bei dem ersten Ansatz wird die Trennkurve als konstant vorgegeben. Der Ansatz ist besonders praktisch bei Sichtern, die bei fest vordefinierten Betriebsbedingungen laufen und die Betriebsbedingungen sich im Laufe der Produktion kaum bis gar nicht ändern. Der Ansatz ermöglicht eine schnelle Parametrisierung mit vergleichsweise geringem experimentellem Aufwand. Allerdings können mit der Vorgabe einer konstanten Trennkurve die dynamischen Änderungen der Produktion bei sich verändernden Betriebsbedingungen nicht abgebildet werden.

Für diesen Zweck wurde ein zweites Modell implementiert, das die Trennkurve mithilfe des Ansatzes nach Whiten berechnet. Dieser Ansatz bedarf eines höheren Aufwandes bei der Parametrisierung, ermöglicht aber eine dynamische Berechnung der Trennkurve. Whiten schlägt in seinen Arbeiten ein empirisches Modell vor, das die Tromp-Kurve (E_{oa}) eines Sichters in Abhängigkeit von Bypass (C = 1 - bypass), der Höhe und der Form des so genannten Fischhakens (β , β^*), der Trennschärfe (α) und des Trennkorns (d_{50c}) des jeweiligen Sichters dynamisch berechnet [30].

$$E_{oa} = C \cdot \left[\frac{\left(1 + \beta \cdot \beta^* \cdot \frac{d}{d_{50c}}\right) \cdot (\exp(\alpha) - 1)}{\exp\left(\alpha \cdot \beta^* \cdot \frac{d}{d_{50c}}\right) + \exp(\alpha) - 2} \right]$$
(22)





Falls die Tromp-Kurve keinen Fischhaken aufweist, kann der Parameter β auf Null und der Parameter β^* auf Eins gesetzt werden. Die Modellgleichung von Whiten vereinfacht sich zu [31]:

$$E_{ao} = C \cdot \left[\frac{\exp(\alpha) - 1}{\exp\left(\alpha \cdot \frac{d}{d_{50c}}\right) + \exp(\alpha) - 2} \right]$$
(23)

Um die oben genannten Modellparameter in Abhängigkeit der Sichterparameter (Staubbeladung, Luftstrom, Rotorgeschwindigkeit) zu bestimmen, müssen für jeden Sichter (bzw. Sichterbauart) im Idealfall Trennkurven für die unterschiedlichen, realen Betriebsbedingungen experimentell gemessen werden.

2.1.2.2 Grundlagenmodule für den Brennprozess (VDZ / KIMA P)

Wärmetauscher Gas – Feststoff (Vorwärmerturm)

Im Zyklonvorwärmer und Kalzinator werden vorhandene Anlagenteile genutzt und zusammengeschaltet. Dies geschieht in eigenen Matlab-System-Blöcken. Zur Darstellung eines Kalzinators werden Rohrstücke mit entprechenden Querschnittsänderungen genutzt. Hierdurch stellen sich unterschiedliche Verweilzeiten des Gas-Staub-Gemisches entlang des Kalzinators ein. Zudem können hier Verzweigungen (nachfolgend T-Stücke) genutzt werden, die zum einen Gasströme zusammenführen, aber auch Fest- und Brennstoffe hinzufügen können.

Der Vorwärmerturm besteht aus Zyklonen und Rohrstücken mit Biegungen. Die oberste Zyklonstufe in Zementwerken besteht oft aus zwei parallelen Zyklonen. Der Gasstrom wird dementsprechend vor der Zyklonstufe durch ein T-Stück inzwei geteilt und nachher wieder vereinigt.

Modul Feststoffbrenner

Im Ofen-Simulationsmodul bestand das wichtigste Ziel darin, die Umsatzrate des festen Brennstoffs auf der Grundlage der Geometrie der kleinen Brennstoffpartikel, der chemischen Reaktionsgeschwindigkeit, ausgedrückt in Arrhenius-Konstanten, der Temperatur und der Sauerstoffkonzentration, zu berechnen. Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten, die Umsatzrate für den festen Brennstoff zu berechnen, indem unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften des festen Brennstoffs und Bedingungen, unter denen die chemische Reaktion stattfindet, berücksichtigt werden. Wie in Abbildung 33 dargestellt, kann aufgrund der hohen Betriebstemperaturen des Ofens und der geringen Partikelgröße der Brennstoffpartikel davon ausgegangen werden, dass Temperatur und Sauerstoffkonzentration die Hauptrolle beim Brennstoffumschlag spielen [32].



Seite 48

vdz



DIMATTEO 🛞



Abbildung 33: Ausbrennzeit für Steinkohle und Braunkohle in verschiedenen Größen und Temperaturen [32]

In diesem Fall kann eines der Umsatzmodelle für die Umwandlung kleiner Holzkohlepartikel verwendet werden. Im gewählten Modell wird angenommen, dass die Temperatur über alle kleinen Partikel hinweg gleich ist. Bei jedem Ofenquerschnitt wird angenommen, dass die Brennstoffpartikel kugelförmig sind. Die Entstehung kleiner Brennstoffpartikel aufgrund von Brechen durch Thermoschock wurden vernachlässigt. [33]

Die folgende Gleichung zeigt die Beziehung zwischen der Umsatzrate der Festbrennstoffpartikel als Funktion der Sauerstoffkonzentration der Brennstoffpartikeldurchmessertemperatur und den Arrhenius-Koeffizienten. [33]

$$\frac{dm}{dt} = \frac{-M_C C_{O_2} A_P}{\left(\frac{D}{(1.16 \times 10^{-4})T^{1.5}} + \frac{M_{O_2}}{Ae^{\left(\frac{-E}{RT}\right)}RT}\right)} \frac{kg}{s}$$

Symbol	Bedeutung		
С	Kohlenstoff		
O ₂	Sauerstoff		
Р	Partikel		
С	Molare Konzentration		
М	Molmasse		
A,E	Arrhenius-Konstanten		
R	Gaskonstante		
D	Durchmesser		
Т	Temperatur		
m	Masse		
t	Zeit		



Seite 49

DIMATTED 🛞



Durch die Implementierung dieses Modells in das Ofenmodul kann die Umsatzrate des festen Brennstoffs für jeden Abschnitt des Ofens berechnet werden. Die nachfolgenden Verbrennungsprodukte können auf der Grundlage der gleichen Umsatzrate berechnet und mit ihren jeweiligen Phasen gemischt werden. Zum Beispiel der Anteil Schwefeldioxid, der das Produkt der Schwefeloxidation des Brennstoffs ist, oder die Flugasche, die sich auf dem festen Bett absetzt [34]. Abbildung 34 zeigt den Algorithmus, der bei der Berechnung des Brennstoffpartikeldurchmessers in jedem axialen Segment des Ofens verwendet wird. Später können die Volumenänderungen in den Massenumsatz des Brennstoffs an jedem Querschnitt umgerechnet werden.





Obwohl dieses Modell die Länge der Flamme genau vorhersagen kann, hängt die genaue Position der Flamme und die Stabilität der Arrhenius-Gleichung von der Flammenphasentemperatur ab. Um den Brennstoffumsatz zu stabilisieren, schlägt Herz [35] eine ortsabhängige Exponentialgleichung vor, die den Umsatz über die Länge der Flamme berechnet. Da in jedem Intervall die Länge der Flamme aus dem vorherigen Rechenschritt berechnet werden kann, kann die von Herz vorgeschlagene Exponantialgleichung den Umsatz stabiler und homogener für jedes axiale Element berechnen. Abbildung 35 zeigt das Ergebnis der Umsatzrate des Brennstoffes über den Ofen.

$$U_{Br}(z) = 1 - \exp[-a \cdot (z - L_{oven})^b]$$
⁽²⁴⁾

$$a = -\frac{ln(0.01)}{L_{Flamme}^b}$$
(25)

$$b \in \{2,3\}$$
 (26)







Abbildung 35:Brennstoffumsatz entlang der Ofenachse

2.1.2.2.1 Verbrennungsreaktionen im Kalzinator

Im Ofen und Kalzinator wird parallel zum MainBus und DustMatter ein FuelBus weitergereicht. Der FuelBus enthält die Zusammensetzung des Brennstoffes, Dichte, Partikelgröße und Verbrennungsenthalpie (unterer Heizwert Hu) des Brennstoffes, vgl. Kapitel 2.1.2.2. Die Verbrennungsenthalpie wird experimentell ermittelt. Bei Bedarf kann die Verbrennungsenthalpie anhand der elementaren Zusammensetzung des Brennstoffes geschätzt werden:

$$Hu = 34.8 x_{\rm C} + 94.3 x_{\rm H} + 10.4 x_{\rm S} + 6.3 x_{\rm N} - 10.8 x_{\rm O} - 2.5 x_{\rm H_2O} \quad \text{in} \frac{\rm MJ}{\rm kg}$$
(27)

$$Ho = 34.8 x_{\rm C} + 94.3 x_{\rm H} + 10.4 x_{\rm S} + 6.3 x_{\rm N} - 10.8 x_{\rm O} \qquad \text{in} \frac{\rm MJ}{\rm kg}$$
(28)

Vor der Verbrennung wird der Brennstoff getrocknet. Die Feuchte wird nach dem oben beschriebenen Ansatz modelliert. Danach wird die Verbrennungsenthalpie angepasst:



Seite 51

DIMATTED 🛞



$$dh_{neu} = \frac{dh - x_{H_2O}^{evap} * dh_{H_2O}^{evap}}{1 - x_{H_2O}^{evap}}$$
(29)

Bei einer Temperatur größer als 100 °C entspricht die neu berechnete Verbrennungsenthalpie dem oberen Heizwert *Ho*.

Gleichzeitig gehen die Sauerstoffanteile des Brennstoffs in die Gasphase über.

$$dh_{neu} = \frac{dh - (x_0 + 2x_{0_2}) \cdot 10.8 \times 10^6}{1 - (x_0 + 2x_{0_2})}$$
(30)

Einige flüchtige Spezies wie Chloride und Schwermetallverbindungen gehen in die Gasphase über. Aktuell ist die Verflüchtigung nur von Chlorid Cl und Quecksilber Hg modelliert.

Im Kalzinator ist die Verbrennung flammenlos (siehe Kapitel 2.1.2.5.2) modelliert, d.h. der Brennstoff wird durch das Modul zusammen mit Staub transportiert, siehe Kapitel 2.1.2.9. Abhängig der Sauerstoffkonzentration und der Temperatur sind Verbrennungsreaktionen mithilfe der Arrheniusansatzes dynamisch modelliert.

Findet die Reaktion wegen Sauerstoffmangel oder niedrigen Temperatur nicht vollständig statt, wird der Brennstoff durch die Strömung entweder in der Brennstoffphase oder Gasphase weiter transportiert und in nachfolgenden Segmenten (Kalzinator) bzw. nachfolgenden Modulen verbrannt. Dabei werden die einzelnen Reaktionen als Gleichgewichtsreaktionen betrachtet.

all (c/g) Control start up Voltage warning PC <-> PLC hardcopy login: kima GEFÖRDERT VOM EMREDPRO Bundesministerium für Bildung und Forschung OCESS F1 | Cement mill F2 | Kiln F3 | Raw Mill Þ F101 Service F11 | Alarm Messages 1**d**7

2.1.3 AP3: Oberflächengestaltung der Anwenderoberfläche (KIMA A)

Abbildung 36: Anwenderoberfläche



Seite 52



Für die Auswahl und das Design der Anwenderoberfläche wurde es als wichtig angesehen, dem Anwender möglichst das Gefühl zu vermitteln, eine reale Anlage zu bedienen, wie er es z.B. aus seinem Produktionsbetrieb kennt. Das gilt sowohl für Simulationen zu Schulungszwecken als auch für die Prozess-Optimierung.

Aus diesem Grund wurde bereits zu Beginn des Projektes festgelegt, die gleichen Werkzeuge und Softwaren zu verwenden, wie sie auch für die Projektierung und Programmierung realer Prozesssteuerungen eingesetzt werden. Es muß jedoch ebenfalls eine einfache Hantierbarkeit und eine übersichtliche Systemstruktur gewährleistet sein, da die Simulationssysteme portabel sein müssen.

Die Anwenderoberfläche (s. *Abbildung 36*) als "Front End" stellt dabei die dymanischen Objekte aus der Simulation vor dem Hintergrund einer statischen grafischen Oberfläche dar. Der statische Teil dient dabei im Grunde genommen nur der besseren Einordung der dynamischen Teile in den Kontext eines Produktionsprozesses.

Die dynamischen Objekte werden mit Daten aus der Prozesssimulation und der zwischengeschalteten Anlagensteuerung versorgt. In der entgegengesetzten "Richtung" werden Bedienungen und Einstellungen, die über die Anwenderoberfläche getätigt werden, zur Anlagensteuerung und weiter zur Simulation übertragen.

Zwischen die Prozesssimulation und der Anwenderoberfläche wird eine Anlagensteuerung geschaltet, die den Zweck hat, die "gewohnten" Funktionsabläufe (z.B. Start- und Stopsequenzen), Verriegelungen und Bedienungen einer realen Anlage flexibel nachzubilden. Außerdem können in der Anlagensteuerung Reglersysteme oder Schnittstellen zu externen Systemen programmiert werden. Dabei kann immer auf schon vorhandene Technologien und Schnittstellen zurückgegriffen werden, ohne diese neu entwickeln zu müssen.

2.1.3.1 Softwaren und Systemaufbau

Das Simulationssystem Matlab/Simulink wird bereits in einem der vorhergehende Kapitel beschrieben.

Die Anwenderoberfläche wird mit der Software SIEMENS SIMATIC WinCC V7.4 gestaltet.

Diese Software beinhaltet:

- Die Schnittstelle zur Anlagensteuerung
- Ein Archivsystem für Anlagendaten
- Ein Archivsystem für Meldungen
- Die Editoren f
 ür die Gestaltung der grafischen Benutzeroberfl
 ächen und deren Dynamisierung.
- Die Runtime-Umgebung zum Bedienen und Beobachten der Simulation

Die Anlagensteuerung wird mit SPS Simulationssoftware aufgebaut.

Dazu notwendig sind zwei Softwaren:

- SIEMENS SIMATIC STEP7 Professional inclusive TIA-Portal

vdz

- SIEMENS SIMATIC-S7 PLCSIM Advanced
- Beide aktuell in der Version V15.



Seite 53



Die Software für die Anlagensteuerung und das WinCC können in unterschiedlichen Konfigurationen auf unterschiedlichen oder gemeinsamen Plattformen laufen. Dazu gibt es einige Bedingungen:

- Matlab/Simulink muss auf einem eigenen Rechner laufen
- Die Anlagensteuerung und die Anwenderoberfläche können auf dem gleichen Rechner laufen, aber auch auf getrennten Rechnern.
- Die Software der Anlagensteuerung kann in mehreren Instanzen auf dem gleichen Rechner laufen.
- Die Anwenderoberfläche kann nur einmal pro Rechner laufen
- Es gibt eine 1:1 Kommunikationsverbindung zwischen dem Matlab/Simulink und der Anlagensteuerung, d.h. es kann immer nur eine Simulation mit einer Anlagensteuerung verbunden werden.
- Zwischen den Anlagensteuerungen und den Anwenderoberflächen sind n:n Kommunikationsverbindungen möglich, d.h. die mehrere Anwenderoberflächen können mit mehreren Anlagensteuerungen Daten austauschen. Es gibt Systemgrenzen, die hier aber nicht relevant sind.
- Die Softwaren für die Anlagensteuerung und die Anwenderoberfläche sind für die Virtualisierung freigegeben.



Abbildung 37: Einfache Konfiguration

In der einfachen Konfiguration (s.Abbildung 37) läuft die Simulation im Matlab/Simulink auf einem PC, und die Anlagensteuerung und das Bediensystem auf einem zweiten.







Abbildung 38: Multi-Konfiguration

Die Abbildung 38 zeigt eine weitere mögliche Konfiguration. Die Matlab/Simulink Simulationen können z.B. verschiedene Anlagenteile einer virtuellen Fabrik enthalten, die über eine oder mehrere gleichgestaltete Anwenderoberflächen bedient und beobachtet werden können.

Diese Konfiguration kann um weitere Simulationen und Anwenderoberflächer erweitert werden, ebenso ist es möglich, die Anlagensteuerung und die Anwenderoberflächen in virtuellen Umgebungen zu betreiben.

2.1.3.2 Kommunikation Simulink, Soft-SPS

Die Schnittstelle zwischen der Simulation in Matlab/Simulink soll in der Lage sein größere Datenmengen in sehr kurzer Zeit zu übertragen. Die Datenmenge einer simulierten Anlage wurde im Vergleich zur Visualisierung und Bedienung einer realen Anlage um ein vielfaches größer angenommen, da für jeden Aktor und jeden Sensor wesentlich mehr Daten berechnet werden können als in realen Anlagen gemessen werden. So gibt es zum Beispiel in einer realen Anlage für ein normales Förderaggregat nur einen Wert "Ein/Aus", in einigen Fällen noch eine Motordrehzahl und einen Motorstrom. In der Simulation können für einen einfachen Aktor zusätzlich die aktuelle Beladung, die Fördermenge und der Energieverbrauch ermittelt werden. Außerdem gibt es an jeder Stelle in der Simulation detaillierte Informationen über die Zusammensetzung des geförderten Materials.

In der realen Anlage werden in der Visualisierung, je nach Anlagengröße, einige Hundert bis einige Tausend Werte verarbeitet, in der Simulation wird eher von einigen tausend bis zehntausend Daten ausgegangen.

Weitere Kriterien für eine geeignete Schnittstelle sind neben der Performance auch die Möglichkeiten der Datenstrukturierung, Code-Generierung und Portabilität.

Für die Kommunikation zwischen Matlab/Simulink und der Anlagensteuerung sollte ursprünglich eine standardisierte Software-Schnittstelle verwendet werden, wie sie auch in der Industrie Anwendung findet.

Zunächst wurde eine OPC-DA Kopplung projektiert, im Matlab/Simulink wurde dazu die optionale OPC-Toolbox zur Verfügung gestellt. Auf der Seite der Anlagensteuerung wurde zunächst mit einer Hardware-Steuerung SIMATIC S7-1500 getestet. Eine Verbindung konnte aufgebaut werden,



Seite 55



weitere Tests ergaben allerdings Einschränkungen auf Matlab/Simulink-Seite. Die Einschränkungen bezogen sich einerseits auf relativ unkomfortable Möglichkeiten, OPC-Items anzulegen, zum anderen konnte keine ausreichende Performance erreicht werden. Die fehlende Performance gab den Ausschlag, diese Schnittstelle nicht weiter zu verfolgen. Als weitere Möglichkeit wurde die OPC-UA Kopplung aufgebaut und getestet. Auch hier waren die Ergebnisse hinsichtlich der Performance nicht gut genug, um sie weiter zu verfolgen.

Die dritte Schnittstelle wurde auf Anregung von SIEMENS getestet, und zwar gibt es für die Software-SPS PLCSIM-Advanded eine API, die für eine Schnittstelle zum Matlab/Simulink genutzt werden kann. SIEMENS stellte dazu ein Beispielprojekt zur Verfügung. Eingehende Tests haben auch hier ergeben, dass die Flexibilität und Performance für das Projekt nicht gegeben sind.

Die letztlich implementierte Schnittstelle basiert auf dem TCP/IP-Transportprotokoll und stellt ein eigens für dieses Projekt entwickeltes, proprietäres Kommunikationsprotokoll dar.

Für die Schnittstelle wird in der Anlagensteuerung eine TCP/IP-Verbindung zum Matlab/Simulink PC angelegt. Die Datenübertragung über das TCP/IP-Transportprotokoll wird von einem Kommunikations-Prozessor bearbeitet, der fester Bestandteil der CPU ist, und der über einen Datenpuffer mit der Steuerung verbunden ist.

Dieser Puffer ist bei der eingesetzten Steuerung auf 8kByte begrenzt, größere Datenpaktet werden vom Steuerungsprogramm in mehreren Einzelschritten aus dem Puffer gelesen und verarbeitet.

Damit eine fehlerfreie Übertragung der Nutzdaten gewährleistet werden kann, sind in dem eigens entwickelten Protokoll mehrere Mechanismen zur gegenseitungen Überwachung implementiert worden. Ein gemeinsamer Header wurde definiert, der u.a die Gesamtlänge des Telegrammes enthält, den Telegrammtypen, und einen Zeitstempel. Zusätzlich wurden Kennungen für den Start und das Ende vereinbart. Mit diesen Informationen kann die Empfängerseite eine Überprüfung auf Vollständige Übermittlung durchführen.

Beim erstmaligen Verbindungsaufbau werden speziell für diesen Zweck definierte Initialisierungs-Telegramme ausgetauscht, die gegenseitig die Version und den Revisionsstand der Simulation und des SPS-Programmes enthalten (s. Abbildung 39). Ein weiterer Datenauschtauch findet nur statt, wenn diese Informationen auf beiden Seiten übereinstimmen.

Handshake tele	gram receive
Protocol Version	120
Simulation ID	5643
Revision	1
Handshake tele	gram send
Protocol Version	120
Plant ID	773
Revision	1

Abbildung 39: Inhalt der Initialisierungs-Telegramme auf SPS-Seite.

vdz

Anschließend sendet die Anlagensteuerung einen kompletten Datensatz aller programmierten Module. Dieser wird vom Simulink ausgewertet, und nur wenn alle Module übereinstimmen, wird der zyklische Datenaustausch gestartet. Dabei werden in einem festgelegten Zeitraster, z.B. eine Sekunde, die Daten aller Module in einem Telegramm zusammengefasst an die Anlagensteuerung



- Seite 56 -



gesendet. Diese wertet die Daten aus, und schickt ihrerseits ein Telegramm mit allen Moduldaten zurück an die Simulation. Die vollständige Bearbeitung der Daten in der Anlagensteuerung bis zum Empfang eines neues Telegrammes ist dadurch gewährleitstet, dass diese Bearbeitung hier wesentlich schneller stattfindet als der Sendetakt von einer Sekunde.

Wie schon in Tabelle 1 im Kaptiel 2.1.2.1 erklärt, werden Modultypen mit den Schnittstellen-Beschreibungen definiert. Um diese einfacher verarbeiten zu können, erhält jeder Modultyp eine eindeutige Nummer (DeviceType). Jedes Modul einer Simulation erhält eine eigene, ebenfalls eindeutige Nummer (DeviceID). Anhand dieser Kennzeichnung können beide Seiten die Daten eineutig zuordnen und weiter verarbeiten.

Тур	Name	Datentyp	Erklärung	
Common Header	TLength	uint32	Telegram Länge in Bytes	
	ТТуре	uint32	Telegram Typ	
	TTimeStampSec	uint32	Zeitstempel in Sek.	
	TTimeStampMs	uint32	Zeitstempel in mSek.	
Module Header	DeviceID	uint32	Eindeutige Zuordnung der Aggregate	
	DeviceType	uint32	Aggregate Typ	
	DeviceError	uint32	Fehlerzustand	
	DeviceWarning	uint32	Warnung	
	DevicePowerConsumption	float32	Energieverbrauch	
Module Body	DeviceType specific Data	Various	Aggr. Spezifische Daten	

Tabelle 2 ⁻	Beschreibung	Telegrammaufb	่อน
	Deserreibung	reiegrammaan	uu

2.1.3.3 Soft-SPS

Als Anlagensteuerung dient die Software SIEMENS SIMATIC PLCSIMAdvanced, die speziell für Anlagensimulationen entwickelt wurde. Sie kann wie eine Hardware – SPS programmiert werden, und bietet die notwendingen Kommunikationsschnittstellen zur Matlab/Simulink-Simulation und zum Anwenderoberfläche.

Sie kann auch in virtuellen Umgebungen betrieben werden, und gleichzeitig mehrfach gestartet werden, um z.B. mehrere Simulationen gleichzeitig zu betreiben. Fertige Simulationen lassen sich abspeichern und sind dann auch ohne detailierte Kenntnisse der SPS-Programmierung einfach zu starten und zu bedienen. Auf einem System können im Prinzip beliebig viele fertige Simulationen gespeichert und bei Bedarf gestartet und mit den passenden Matlab-Simulink Simulationen verbunden werden. Das macht sie sehr flexibel im Hinblick auf z.B. Simulationssysteme für Schulungen.

Die Anlagensteuerung erfüllt zwei Aufgaben. Zum Einen bildet sie die Schnittstelle zwischen der Simulation und der Anwenderoberfläche, zum Anderen übernimmt sie die Aufgaben der Steuerung in realen Anlagen. Der Umfang der Steuerungsfunktionen ist dabei in hohem Maße an die Aufgaben und Aspekte der jeweiligen Simulation anpassbar. So werden z.B. die Anforderungen einer Simulation zur Energieoptimierung anders sein als ein Trainingssystem für Anlagenbediener. In dem



– Seite 57 –

vdz



DIMATTED 🛞

einen Fall werden mehr Anzeigen, Kurven und Regler, Berechnungen und Analysewerkzeuge benötigt, im anderen Fall eher Bedienoptionen wie Antriebs- und Messtellendiagnosen.

Die Anforderungen einer Anlagensteuerung sind bei KIMA A bekannt und die SPS-Bausteine dafür sind entwickelt und erprobt. Die Bausteine aus der firmeneigenen Standardbibliothek sollen zum Einsatz kommen, müssen aber an die speziellen Anforderungen einer Simulationsumgebung angepasst werden.

Folgende grundlegende Funktionalitäten bietet der Standard:

Aktoren / Antriebe

- Überwachungen des Leistungs- und Steuerteiles (Sicherungen / Motorschutzschalter / Schützrückmeldungen)
- Externe Überwachungen, wie z.B. Drehzahlwächter, Reissleinenschalter...
- Hand- oder Lokalbetrieb für einzelne Aktoren
- Automatikbetrieb mit Gruppenzuordnungen, Ablaufsteuerungen und Verriegelungen
- Erzeugen von Meldungen
- Erzeugen von Statusanzeigen für die Anwenderoberfläche
- Wartungsfunktionen wie Zähler für Betriebsstunden und Schaltspiele
- Umfangreiche Status-Diagnose und Parametrierungen mit der Antriebsdiagnose

Sensoren / Messstellen

- Verarbeitung von Messwerten aus verschiedenen Quellen, wie analoge Eingänge, Feldbus, externe Messwerte über Schnittstellen.
- Überwachungen der Messkette
- Frei parametrier- und einstellbare Grenzwerte
- Filterfunktionen
- Umfangreiche Status-Diagnose und Parametrierung mit der Messtellendiagnose

Die besonderen Anforderungen des Simulationssystems im Vergleich zur realen Anlage sind:

- erhöhte Datenmengen
- der Umfang der Steuerungsaufgabe, wenn eine Simulation mehrere Anlagen umfasst, f
 ür die in der realen Anlage von getrennte Steuerungen eingesetzt werden.
- erhöhte Kommunikationslast
- eine Struktur, die es erlaubt Simulationsaufgaben möglichst effektiv umzusetzen
- Bedienbarkeit und Editierbarkeit auch mit geringeren Kenntnissen der Automatisierungstechnik, um Simulationen flexibel anpassen zu können.

Es gibt Anforderungen der realen Automatisierungstechnik, die in Simulationen nicht, nur eingeschränkt, oder nur in bestimmten Fällen und nur in geringem Maße implementiert werden müssen:

- Sicherheitstechnik / Abschaltungen und Verriegelungen

vdz

- Überwachung der Hardware (siehe oben)
- Hand- oder Lokalbetriebsarten



Seite 58 -



- Meldungen, Warnungen, Alarme
- Diagnosen

Aus Sicht der Anlagensteuerung besteht eine einfache Simulation aus einer Anlage, die fehlerlos produziert und die nur aus den Haupt-Aggregaten besteht, Diese Anlage soll möglichst schnell gestartet und gestoppt werden, die Prozessparameter sollen steuerbar sein, aber es sollen keine unvorhergesehenen Anlagenzustände auftreten, z.B. durch Störung und Ausfall einzelner Module.

Für Trainigssysteme sollten hingegen mehr Überwachungen programmiert sein, entsprechend auch mehr Meldungen erzeugt werden, die üblichen Diagnosen sollen möglich sein. Störungen und Ausfälle können Teil eines Trainingssytems sein.

Die größtmögliche Flexibilität wird erreicht indem eine Auswahl an Standard-Bausteinen eingesetzt wird. Diese aber in vollem Funktionsumfang, mit der Möglichkeit zunächst nur die notwendigen und gewünschten Fuktionen auszuwählen, und alle Weiteren nach Bedarf hinzufügen zu können.

Es kommen daher ein KIMA-Standard-Baustein für einen Ein-Richtungsantrieb und ein Messstellen-Baustein zum Einsatz, die alle der oben genannten Funktionen enthalten.

Diese werden um die Modultyp-Spezifischen Funktionen erweitert, und bilden als Modultypbausteine die Grundlage des Steuerungsprogramms.



Abbildung 40: Modultyp-Funktionsbausteine

Die Abbildung 40 zeigt Modultyp-Funktionsbausteine, Aktoren mit den niedrigen Nummern (FB7 - FB18), Sensoren mit den Nummern ab 4000.

In dem vorhergehenden Kapitel 2.1.3.2 wurde der Aufbau der Telegramme beschrieben, die zum einen sehr lang sein können, und zum anderen die Module in einer Reihenfolge auflisten, die nicht vorher festgelegt werden kann. Deshalb ist es wichtig, die Nutzdaten aus der Schnittstelle über eine variable Zuweisung den Instanzen der Modulbausteine korrekt zuzuordnen. Um das möglichst einfach und flexibel handhaben zu können, werden für jeden Modultyp-Funktionsbaustein die zugehörigen Multi-Instanz-Datenbausteine angelegt. Die Anzahl der Instanzen richtet sich nach Umfang der Simulation in Matlab/Simulink, es können zusätzlich Reserven vorgesehen werden. Die einzelnen Instanzen werden durchnummeriert, um sie später eindeutig zuordnen zu können.



Seite 59





- 🗈	St	atic	
•		ModuleNo	Dint
-		Telegram_RCV	"UDT_Module02_Conveyor_RCV"
-		Telegram_SEND	"UDT_Module02_Conveyor_SEND"
-		DRV_INSTANCE	"DRV_M1D_TA"
-		Group	"GRP_Evaluation"

Abbildung 41: Beispiel Instanz-DB

Die Abbildung 41 zeigt eine Übersicht der Daten für eine Instanz für den Modultyp 2 "Conveyor". Außer den Empfangs- und Sendedaten (Telegram_RCV und Telegram_SEND) sind noch die Strukturen DRV_INSTANCE und Group vorhanden. Die Datenstruktur DRV_INSTANCE ist wesentlich umfangreicher da sie alle Daten für den Ablauf des Standard-Antriebsbausteines enthält. Der Multi-Instanz-DB für diesen Modultyp ist mehrere kByte groß.

Für die Zuordnung der Daten aus der Kommunikation zu den Instanz-Daten wird eine Liste "DeviceListe" (s. Abbildung 43) eines benutzerdefinierten, stukturierten Datentyps "UDT-DeviceInfo" angelegt (s. Abbildung 42):

•	Device[3]	"UDT_DeviceInfo"	l i i i i i i i i i i i i i i i i i i i
	DeviceID	UDInt	136
	DeviceType	UInt	1
	DeviceNumber	Int	3
	DeviceSendAc	Bool	TRUE

Abbildung 42: DeviceInfo

•	Device	Array[1100 🔳	
	Device[1]	"UDT_DeviceInfo"	Feeding Silo Clinker
	Device[2]	"UDT_DeviceInfo"	Feeding Silo Anhydrith
	Device[3]	"UDT_DeviceInfo"	Feeding Silo Anhydrith1
	Device[4]	"UDT_DeviceInfo"	Feeding Silo Anhydrith2
	Device[5]	"UDT_DeviceInfo"	Silo Finished Product
	Device[6]	"UDT_DeviceInfo"	Silo Finished Product1
	Device[7]	"UDT_DeviceInfo"	Transport solid fresh feed
	Device[8]	"UDT_DeviceInfo"	Conveyor Rejects
	Device[9]	"UDT_DeviceInfo"	conveyor finish Candidate solid
	Device[10]	"UDT_DeviceInfo"	ElevatorZM3

Abbildung 43: DeviceListe

Diese Liste wird vom Programmierer ausgefüllt. Dabei müssen "DeviceID" und "DeviceType" jeweils genau einem Eintrag in den Empfangsdaten vom Matlab/Simulink entsprechen. Die "DeviceNumber" gibt die Position des Eintrages in der Modultyp-Instanz an. Da die Datenstruktur des Modultyps bekannt ist, können die Nutzdaten korrekt zugewiesen werden, indem die "DeviceID" gesucht, und bei übereinstimmendem "DeviceType" anhand der "DeviceNumber" das passende Datenfach in dem passenden Datenbaustein bestimmt wird. In der "Sende-Richtung" muss diese nicht Liste verwendet werden, da die Reihenfolge der Devices unerheblich ist.



Seite 60





Abbildung 44: Zuordnung der Empfangsdaten zu der passenden Modul-Multi-Instanz

Die Abbildung 44 zeigt wie die Nutzdaten von der Simulation zur Verarbeitung in der Anlagensteuerung umkopiert werden. Der Datensatz für jede Instanz sind natürlich wesentlich größer, da er auch die intern genutzten Daten enthält, und kann in der Abbildung nicht komplett dargestellt werden.

Für jeden Aktor und jeden Sensor gibt es einen Aufruf im zyklischen SPS-Programm. Dabei wird die "DeviceID" übergeben, sowie die Gruppenzuordnung im Automatikprogramm und die Vorgänger und Nachfolger für die Start- und Stoppsequenz.

Bei Bedarf kann dieser Aufruf um weitere Funktionen, z.B. zur Simulation von Fehlern, ergänzt werden.





▼ Net	tzwerk 8: Conveyor Rejects
Kom	Imentar
1 2	#t_No := 8;
3 4 5	<pre>#t_DeviceNo := #i_DeviceList[#t_No].DeviceNumber;</pre>
6 7 8	<pre>//Group Assignment #Module02_Conveyor[#t_DeviceNo].DRV_INSTANCE.Parameter.GroupAssignment := 2#1;</pre>
9 10	<pre>//Charger #Module02_Conveyor[#t_DeviceNo].DRV_INSTANCE.i_Charger := #Module05_DustSeparator[1].DRV_INSTANCE.o_DriveStart; //Discharger</pre>
12 13	<pre>#Module02_Conveyor[#t_DeviceNo].DRV_INSTANCE.i_Discharger := TRUE; //Drive call</pre>
15	F#Module02_Conveyor[#t_DeviceNo](i_ObjectNo:=#t_No,
16 17 18	<pre>i_DeviceList:=#i_DeviceList);</pre>

Abbildung 45: Aufruf eines Förderorgans

Die Abbildung 45 zeigt als Beispiel den Aufruf eines Förderorgans in SCL ("Structured Control Language"). Der Aufbau ist bewußt einfach gewählt, um eine möglichst effektive Programmierung zu ermöglichen. Der Code kann einfach kopiert und mit wenigen Änderungen für eine weitere Instanz des gleichen Modultyps verwendet werden. Die Zuordnung der Daten geschieht über die Varialbe ,t_No, die den Datensatz in der DeviceListe, siehe Abbildung 43 festlegt. Durch die vorher beschriebene Datenstruktur ist damit der Antrieb, hier "Conveyor Rejects" mit allen notwendigen Daten versorgt.

Angepasst werden müssen ggf. die Einstellungen für den Automatikbetrieb:

Die Gruppenzuordnung "Group Assignment" zur Automatik-Ablaufgruppe erfolgt durch Ändern der Nummer ".GroupAssignment" z.B. von 2#1 auf 2#2.

"Charger" und "Discharger" bestimmen den Vorgänger und Nachfolger in der Start- und Stopsquenz. Hier muss der passende Modultyp und die Nummer aus der "DeviceList" eingetragen werden.

An dieser Stelle können bei Bedarf auch mehr Verknüpfungen eingefügt werden, um z.B. Störungen des Antriebes zu simulieren. Das Steuerungsprogramm für die simulierte Anlage besteht dann aus einer Folge von solchen Einzelaufrufen. Regler und weitere Programmteile können unabhängig von diesem Programmteil erstellt und dann passend verschaltet werden.

2.1.3.4 Anwenderoberfläche

Die Anwenderobefläche wurde mit der SCADA-Software SIEMENS SIMATIC WinCC V7.4 erstellt.

Auch hier sollte eine Software eingesetzt werden, die auch in realen Anlagen eingesetzt wird, und alle Funktionen mitbringt, die eine moderne Anwenderoberfläche benötigt.

Diese Software wird seit langem von KIMA A eingesetzt, und alle notwendigen Objekte, Bibliotheken und Skripte sind vorhanden und erprobt. Der Aufbau der Bilder und die Navigation werden entsprechend dem firmeneigenen Standard projektiert.

Die Anwenderoberfläche ist so gestaltet, dass sie den Bediener bei seinen Aufgaben optimal unterstützt. Diese Aufgaben sind:



Seite 62





- Navigation, d.h. Auswahl der Anlagenbilder, gegliedert nach Anlagenteil und bei mehren Bedienbildern pro Anlagenteil deren Anordnung in Produktionsrichtung. Auswahl der Bedienboxen, Kurvenbilder und Meldeseiten.
- Darstellung der Anlage, der Zustände der Aktoren und Sensoren und Messwerte in einer übersichtlichen Form, die es dem Bediener erleichtert, die Verbindung zu einer realen Anlage herzustellen und Zusammenhänge zu erkennen.
- Bedienung der Anlage z.B. über Bedienboxen

Aus diesem Grund ist die Anwenderoberfläche grundsätzlich in drei abgegrenzte Bereiche aufgeteilt (s. Abbildung 46 und Abbildung 47).



Abbildung 46: Schematische Darstellung Anwenderoberfläche



Abbildung 47: Aufteilung Anwenderoberfläche



Seite 63

DIMATTED 🛞

/d7



Der Übersichtsbereich enthält allgemeine Anzeigen und Bedienungen, wie z.B. Störmeldungen, die Bedieneranmeldung und die Überwachung der Kommunikation.

Im Fensterbereich werden die Bedienbilder und -boxen der verschiedenen Anlage eingeblendet, der Tastenbereich dient zur Navigation und zum Aufruf von Bedienboxen.

Der Fensterbereich in Abbildung 47 zeigt die simulierte Zementmahlanlage. Dabei wird unterschieden in den statischen Hintergrund, der zu besseren Übersicht und Einordnung der Aktoren und Sensoren dient, und die dynamischen Objekte, die diese Aktoren und Sensoren darstellen.

Aktoren werden mit einen Motorsymbol dargestellt, Sensoren durch ein Feld mit dem Messwert.

Die jeweiligen Zustände der Aktoren und Sensoren werden farbig codiert dargestellt (s. Abbildung 48).

	Symbol Information	on							
not ready to run	🛑 trip new	100,0 °C good condition							
DI De auto ready to run	 trip static trip clearable 	100,0 °C alarm acknowledged							
🖂 🗖 🔂 selected in auto	() warning new	100,0 °C warning not acknowledged							
🖂 🗖 🕞 auto start up	warning static	100,0 °C warning acknowledged 100,0 °C warning resetable							
🖂 🗖 🗗 auto running	warning clearable maintenance pre-alarm	100,0 °C measurment fault not ack							
🔀 🗖 📴 stop sequence	Maintenance alarm	100,0 °C measurement fault resetable							
Docal mode	u additional fault 1 unlocked	100,0 0 alamiwaming unocked							
🖂 🗔 📴 running local mod	e 💢 gate no limit								
🔀 💼 🖬 🖬	gate opened								
	gate opening error								
	gate closing error	ESC - close							

Abbildung 48: Symbolinformation

Messwerte können auch in Kurvendiagrammen, entweder fest projektiert im Anlagenbild, oder parametrierbar in den "User Trends" angezeigt werden (Abbildung 49):



- Seite 64







Abbildung 49: Schaltfläche "Benutzerdefinierte Trends"

Meldungen werden in der Übersichtszeile und auf eigenen Meldeseiten (s. Abbildung 50) angezeigt.

0 🗟 隆	1 🖪 🖪 🖪	1 2 4	0	🐷 🚨 📓 🖆 AP 🛐 🧐	
Datum	Uhrzeit	Nummer	Zustand	Meldetext	Störort
880 02.12.2	0 08:31:57	1010	6	Gesamtaufgabe Max Limit erreicht	KMC Mühle
881 02.12.2	0 08:35:45	1000203		WCCRT:KMC01:Runtime wurde auf KMC01 deaktiviert	
882 02.12.2	0 08:36:14	1000202		WCCRT:KMC01:Runtime wurde auf KMC01 aktiviert	
883 02.12.2	0 08:36:15	1000205		WCCRT:KMC01:Verbindung SYSINFO aufgebaut	
884 02.12.2	0 08:36:15	1000205	#	WCCRT:KMC01:Verbindung Diagnose aufgebaut	
885 02.12.2	0 08:36:16	1000205		WCCRT:KMC01:Verbindung PLC01_KMC01 aufgebaut	
886 02.12.2	0 08:36:23	1010		Gesamtaufgabe Max Limit erreicht	KMC Muhle
887 02.12.2	0 08:36:23	1011		KMC Hauptregler intern freigeschaltet	KMC Mühle
888 02.12.2	0 08:36:53	1008003		USERT:KMC01:Manueller Login	
889 02.12.2	0 08:36:53	1		Login (Benutzer / Computer): 'operator' / 'KMC01'	WinCC-system
890 02.12.2	0 08:36:53	1		Login (Benutzer / Computer): 'operator' / 'KMC01'	WinCC-system
891 02.12.2	0 08:37:37	1012252	#1	AM:KMC01:Backup:Fehler beim Schreiben auf Backup - Pfad	
7 892 02.12.2	0 08:37:49	1012252	-	AM:KMC01:Backup:Fehler beim Schreiben auf Backup - Pfad	
893 02.12.2	0 08:46:20	1010		Gesamtaulgabe Max-Limit erreicht	KMC Muhle
894 02.12.2	0 11:07:08	1009	6	Frischgut Min-Limit erreicht	KMC Mühle
895 02.12.2	0 11:32:11	1009		Frischgut Min-Limit erreicht	KMC Mühle
896 02.12.2	0 11:57:59	1009		Frischgut Min-Limit erreicht	KMC Mühle
897 02.12.2	0 12:41:31	1009		Frischgut Min-Limit erreicht	KMC Muhle
898 02.12.2	0 14:21:38	1008005		USERT:KMC01:Manueller Logout	
899 02.12.2	0 14:21:38	1008003		USERT:KMC01:Manueller Login	
900 02.12.2	0 14:21:39	1		Login (Benutzer / Computer): 'kima' / 'KMC01'	WinCC-system
901 02.12.2	0 14:45:01	1012252		AM:KMC01:Backup:Fehler beim Schreiben auf Backup - Pfad	
902 02.12.2	0 14:45:01	1012252		AM:KMC01:Backup:Fehler beim Schreiben auf Backup - Pfad	
903 02.12.2	0 14:46:09	1009		Frischgut Min-Limit erreicht	KMC Mühle
904 02.12.2	0 14:46:09	1009		Frischgut Min-Limit erreicht	KMC Muhle
905 02.12.2	0 14:53:35	1008005		USERT:KMC01:Manueller Logout	
906 02.12.2	0 14:53:40	1008003		USERT:KMC01:Manueller Login	
907 02.12.2	0 14:53:41	1		Login (Benutzer / Computer): 'operator' / 'KMC01'	WinCC-system
908 02.12.2	0 17:47:59	1009		Frischgut Min-Limit arreicht	KMC Mühle
909 02.12.2	0 18:28:43	1009		Frischgut Min-Limit erreicht	KMC Muhle
910 03.12.2	0 04:50:32	1009		Frischgut Min-Limit erreicht	KMC Muhle
911 03.12.2	0 05:07:28	1009		Frischgut Min-Limit erreicht	KMC Mühle
912 03.12.2	0 14:20:58	1008005		USERT:KMC01:Manueller Logout	
913 03.12.2	0 14:20:58	1008003		USERT:KMC01:Manueller Login	
914 03.12.2	0 14:20:58	1		Login (Benutzer / Computer): 'kima' / 'KMC01'	WinCC-system
915 03.12.2	0 16:53:21	1002	(B)	OPS in für Feinheitsregelung ungeeigneter Betriebsart (nicht im Automatik-Meßbetrieb)	OPS an Mühle (siehe Bedieneinheit beim Sichter)
916 03.12.2	0 16:53:21	1004	13	Feinheitsregelung deaktiviert durch fehlerhafte Kommunikation mit OPS	OPS an Mühle (siehe Bedieneinheit beim Sichter)
917 03.12.2	0 16:57:58	1002	V	OPS in für Feinheitsregelung ungeeigneter Betriebsart (nicht im Automatik-Meßbetrieb)	OPS an Muhle (siehe Bedieneinheit beim Sichter)
918 03.12.2	0 16:57:58	1004		Feinheitsregelung deaktiviert durch fehlerhafte Kommunikation mit OPS	OPS an Mühle (siehe Bedieneinheit beim Sichter)
919 03.12.2	0 16:57:59	1002		OPS in für Feinheitsregelung ungeeigneter Betriebsart (nicht im Automatik-Meßbetrieb)	OPS an Mühle (siehe Bedieneinheit beim Sichter)
920 03.12.2	0 16:57:59	1004		Feinheitsregelung deaktiviert durch fehlerhafte Kommunikation mit OPS	OPS an Muhle (siehe Bedieneinheit beim Sichter)
921 03 12 2	0 20-32-53	1009		Friechaut Min Limit erreicht	KMC Mithle

Abbildung 50: Meldeseite

Die Bedienung und Einstellung von Werten erfolgt je nach Projektierung entweder in Bedienboxen, die über die Tastenleiste aufgerufen werden können, oder direkt im Anlagenbild.



DIMATTED 🛞



Group Select	Start		Area Selection and Automatic Start/Stop						
Carry 4 (7112)			Stop						
Group 1 (ZM3)	selected	RR LM AL SU RU SD	stop						
Group 2 (Raw Mill) sel.	selected	RR LM AL SU RU SD	stop						
Group 3 (Kiln) sel.	selected								

Abbildung 51: Bedienbox

Die Abbildung 51 zeigt eine Bedienbox zum Starten und Stoppen von Anlagenteilen. Die Bedienung erfolgt mit der Maus über die Schaltflächen z.B. "sel." Für Select, "Start" und "Stop". Dynamisierte Symbole zeigen über Farbwechsel den aktuellen Zustand an. In diesem Bild ist z.B. die Gruppe 1 (ZM3) bereits angewählt, symbolisiert durch die hellblaue Farbe hinter der Schrift "selected". Der Zustand der Anlage wird mit dem grün hinterlegten "RU" angezeigt und bedeutet "Running", d.h. die Anlage ist in Betrieb.

Andere Bedienungen, wie zum Beispiel Sollwertvorgaben (s. Abbildung 52), können direkt im Bild getätigt werden. Im Unterschied zu realen Anlagen erfolgt hier keine Sicherheitsabfrage, sondern die Werte werden direkt zur Steuerung geschrieben.



Abbildung 52: Sollwertvorgabe

Diagnosen dienen zur erweiterten Bedienung und Parametrierung von Aktoren und Sensoren. Sie sind Bestandteil des Firmen-Standards bei KIMA A und sind auch in der Simulation für jeden Messwert und jeden Aktor verfügbar.

Die "Antriebsdiagnose" zeigt den detaillierten Antriebsstatus. Es werden sowohl die Überwachungen der Hardware (Alarms) angezeigt, als auch zusätzlich programmierbare Verriegelungen (Additional Messages), und der Betriebszustand im Automatik und Lokalbetrieb. Die Abbildung 53 zeigt die Übersichtsseite.



- Seite 66



DevicePowerCo	nsumption							Outpu 384
	Ball Mill EMREDPRO	<u>Name:</u> <u>State:</u>	running auto	Ball Mill Main Drive			M	
	Status Messages Service Pictures/Groups	Auto-Mode Release Au Stop Charging Discharging	to	Local-Mode Repair-Switch Local Control Pushbutton Release Local	OL S/F-Mode	<u>tputs</u> Drive Star Run Sign	rt al	
0,600	ESC - Close edit apply cancel	Alarms Control Fus MCB Check Back	e :	Additional Messages 1 DeviceType faulty 2 not used 3 not used 4 not used 5 not used	Alarm/ Warning Alarm Alarm Alarm Alarm	Warning horn	Local inactive	un- lock
		Alar Charging Discharging	m Reset	6 hot used 7 hot used 8 hot used	Alarm Alarm Alarm			
		Comment	Comment 1 Comment 2					

Abbildung 53: Übersichtsseite "Antriebsdiagnose"

Für Sensoren ist eine Messtellendiagnose eingerichtet, die es ermöglicht Grenzwerte frei einzustellen und mit Parametern zu versehen (s. Abbildung 54). Diese Grenzwerte können im Programm der Anlagensteuerung für Verriegelungen oder Schaltfunktionen genutzt werden.



DIMATTED 🛞



eeding Silo Clinke	Name:	Feeding Clinker Silo +89,68 %					
EMREDPRO	L imit value	MAX / MIN /	State	Description		un- f	oat.Limit
Status	1 +100.00 %	MAX 🔽		(free)			
Messages	2 +90.00 %	MAX 🔽	<u> </u>	(free)			
MeasCurve	3 +0.00 %	NA V		(free)			
Service	4 +0.00 %	NA V		(free)			
Pictures/Groups	5 +5.00 %	MIN 🔽		Alarm			
	6 +0.00 %	MIN 🔽		Stop mill			
ESC - Close	0,000]		
edit appiy cancel	+0,00 LV6	nent 1 nent 2	+9(+100,00 <u>LV1</u> +100,00 <u>LV1</u> +100,00 +100,00 +100,00 +100,00 +100,00			+5,00

Abbildung 54: Messstellendiagnose

Für die Simulation und die einzelnen Module sind zusätzliche Anzeigen projektiert. Die in den folgenden Boxen angezeigten Daten teilen sich auf in die Daten aus der Prozesssimulation und den Daten, die für die Schnittstelle benötigt werden.

ListNo, ModuleNo, Device ID, Device Type dienen der eindeutigen Zuordnung des Bauteils zwischen Simulation und Anwenderoberfläche.

Device Error, Warning, Power, Fill Level, Output Level sind Daten, aus der Simulation, die hier zur Anzeige gebracht werden können, Device Lock, Device Stat und Set Output Level sind Daten, die von der Anwenderoberfläche oder der Anlagensteuerung verändert und zur Simulation gesendet werden.

Die Anzeige der Kommunikationsdaten (s. Abbildung 55) wird bei neuen oder geänderten Simulationen benutzt und etwaige Abweichungen in den Initialisierungs-Telegrammen einfach erkennen zu können. Die IP-Adresse der Simulation wird hier angezeigt und kann editiert werden, falls sich diese geändert hat. Die Anlagensteuerung versucht eine TCP-Verbindung zu dieser Adresse aufzubauen. Zur Überwachung der Kommunikation werden hier die Inhalte der Initialisierungs-Telegramme angezeigt.



- Seite 68





PLC - Simulink Communikation data					
IP-Address Simulink maschine 192 168 55 55					
Handshake telegram receive					
Protocol Version 120					
Simulation ID 5643					
Revision 1					
Handshake telegram send					
Protocol Version 120					
Plant ID 773					
Revision 1					

Abbildung 55: Anzeige der Kommunikationsdaten

In Abbildung 56 sind die Simulationsdaten eines Silos, hier des Silos für "Clinker" aus der Simulation der Zementmühle, dargestellt. Die Daten aus der Kommunikation werden angezeigt und können so leicht überprüft werden. Im Gegensatz zu realen Silos, als reine Materialspeicher, wurde in die Simulation ein Dosierorgan für den Siloaustrag integriert. Die auszutragende Materialmenge kann mit "Set Output Level" eingestellt werden.

Feeding Silo Clinker						
ListNo: 1	ModuleNo: 1					
RCV TelegramDevice ID6Device Type1Device Error0Device Warning0Device Power0,00Fill Level0,90Output Level0,42	SEND Telegram 6 1 Device Lock Device State Set Output Level 0,42					
	ESC - back					



Die Daten für ein einfaches Förderorgan sind in Abbildung 57 dargestellt. Zusätzlich zu realen Förderorganen sind hier die Daten für Power, Output Level, Fill Level und Speed Level immer vorhanden. "Power" gibt die aufgenommene Leistung an und "Fill Level" den Füllgrad des Materials.Der "Speed-Level" gibt die Geschwindigkeit in einem Bereich von 0-1 an, wobei 0 Stop, und 1 Nenngeschwindigkeit bedeutet. Werte zwischen 0 und 1 stellen bei Drehzahlveränderbaren Förderorganen die Geschwindigkeit ein.



Seite 69

DIMATTED 🛞



Finish candidate						
ListNo: 9	ModuleNo: 3					
RCV Telegram Device ID Device Type 2	SEND Telegram					
Device Error 0 Device Warning 0 Device Power 0,00 Output Level 9,64 Fill Level 0,00	Device Lock 1 Device State 0 Set Speed Level 1,00					
Speed Level 1,00	ESC - back					

Abbildung 57: Daten für ein einfaches Förderorgan

Der Fineness-Sensor zeigt in Abbildung 58 die Partikelgrößenverteilung (hier die Summenverteilung) an einer in der Matlab/Simulink definierten Stelle im Prozess. Auf der linke Seite sind die Zahlenwerte aufgelistet, die auf der rechten Seite in dem Kurvenbild angezeigt werden.

Diese Anzeigen sind in realen Anlagen kaum vorhanden, da die notwendigen Messeinrichtungen dazu sehr aufwändig sind. In der Simulation können solche Messwerte an mehreren Stellen im Prozess problemlos eingefügt werden, um z.B. den Sichtprozess in einer Mahlanlage besser nachvollziehen zu können.

Für jedes der in Tabelle 1 aufgeführten Module gibt es eine entsprechende Anzeigebox für die Anwenderoberfläche.



Abbildung 58: Finess Sensor





DIMATTED 🛞



2.1.4 AP4: Entwicklung/Anpassung Module Zementwerk (VDZ)

Die in AP2 entwickelten Grundlagenmodule wurden im Rahmen dieses Arbeitspaketes schrittweise zu Modellen konkreter Anlagenteile im Zementwerk erweitert. Dies beinhaltete die Definition von konkreten Geometrien, die Integration von variablen Stellgrößen sowie die Zusammenschaltung von Grundlagenmodulen zu verketteten Anlagen. Der Entwicklung fand in Kombination mit der Validierung aber auch unter Anpassung der Grundlagenmodelle in einem iterativen Prozess statt. Dabei wurde auch fortwährend die Performance des Modells überprüft.

2.1.4.1 Mahlanlagen (VDZ)

Ausgehend von den Grundmodellen für die Zerkleinerung, den Materialtransport und die Klassierung wurden konkrete Modelle der Anlagenteile der Roh- und Zementmahlanlagen entwickelt. Diese Teilmodelle wurden zunächst einzeln getestet und grundlegend parametrisiert, bevor sie abschließend zusammen mit Silos, Transportorganen und dem Gasmodell zu einer verketteten Gesamtanlage zusammengeschaltet und getestet wurden. Nachfolgend werden die verfahrenstechnisch bedeutendsten Anlagenteile, die Kugelmühle und der Sichter, näher beschrieben bevor die Gesamtmodelle der Rohmaterialaufbereitung, der Rohmahlung und der Zementmahlung vorgestellt werden.

Kugelmühle

In Kugelmühlen wird das Mahlgut durch Mahlkörper (meist Kugeln) verformt und zerkleinert. Dabei wirken im Bereich der Grobzerkleinerung vorwiegend die Mechanismen Prall und Schlag, während bei der Feinzerkleinerung Scher- und Reibkräfte überwiegen. Die in der Zementindustrie eingesetzte Bauart gehört zur Gruppe der Freifallmühlen, auch Sturzmühlen genannt. Hierbei ist der Prozessraum ein um die Längsachse rotierender Mahlbehälter, welcher mit Mahlkörpern gefüllt ist. Die Zerkleinerungswirkung entsteht in Abhängigkeit von Drehzahl und Mahlguteigenschaften durch den Bewegungsablauf der Mühlenfüllung. Entsprechend dem Länge/Durchmesser-Verhältnis des Mahlbehälters von Werten größer 1,5 werden diese Mühlen auch als Rohrmühle bezeichnet. Modelltechnisch setzt sich der Mahlprozess in der Kugelmühle, wie in Abbildung 59 schematisch dargestellt, aus dem Materialtransport in der Mühle und durch die Über- und Austragswände, der Zerkleinerung und der Interaktion mit der Gasphase zusammen. Weiterhin werden für alle Anlagen Wärmebilanzen und ggfs. chemische Reaktionen (hier Verdampfen von Wasser) bestimmt.







Abbildung 59: Aufbau des Mühlenmodells aus den Grundmodellen für Transport, Zerkleinerung, und Gasphase

Die in AP2 entwickelten Grundmodelle wurden im Rahmen dieses Arbeitspaketes in eine konkrete Anlagenstruktur eingebettet. Dies beinhaltet zunächst die Definition der wesentlichen Anlagenstruktur und Geometrie. Abbildung 60 zeigt das Konfigurationsinterface des Kugelmühlenmodells. Es ist möglich, unterschiedliche Bauarten von Kugelmühlen (1-, 2- oder 3-Kammermühlen, Mühlen mit Mittenaustrag) abzubilden. Weiterhin können die Geometrien der Ausund Übertragswände, die Zusammensetzung der Mahlkörperschüttung sowie die Details einer Wassereindüsung festgelegt werden. Interfaces dieser Art wurden für alle Anlagenteile geschaffen und stellen ein wichtiges Hilfswerkzeug für die künftige Erstellung von neuen Werkslayouts dar. Die Interfaces werden nachfolgend nicht mehr explizit für jeden Anlagenteil diskutiert.




%%%%% %%%%%	%%%%%%%% %%%%%%%%	6%%%%%% 6%%%%%	%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%	%%%%%%%%%%% %%%%%%%%%	%%	
Source co	ode					
Device	Geometry	Operation	Material / Gas tran	sport Wall Properies	4	
Geometr	у					
Mill Dian	neter in m:		[3.2; 3.2]		:	
Width of	segments 1st	Chamber:	[1,1,1,1,1]		:	
Width of	1st diaphragn	n:	0.3		:	
Width of	segments 2nd	l Chamber:	ones(1, 8)		:	
Width of	2nd diaphragi	m:	0.3	0.3		
Discharg	e:		0.6			
discharg	eSlotWidth in I	um?:	20			
Ball char	ge					
Ball Chai	rge [BallSize pe	ercentageCH	11 percentageCH2;]:	0, 0; 13, 0, 0; 10, 0, 0]:	
Portion o	hambers filled	with balls:		[0.3; 0.2]	:	
Bulk den	sity in kg / m3	:		[4500; 4500]	:	
True der	nsity in kg / m3	3:		[7870; 7870]	:	
tempera	tureBallCharge	Start:		20 + Constants.temp00	:	
Other	2					
watorIni	oction avalso	monte	[zeros(1 6) opec(1 7	7 \ 1]		
watering				//·*]	_04 7.0	
the geod	lesic height at	inlet [m]: 🛛	1		1	

Abbildung 60: Konfigurationsinterface der Kugelmühle

In Abhängigkeit von der Geometrie, der Mühlendrehzahl und der Mahlkörperfüllung wird die Leistungsaufnahme der Mühle nach folgender Formel berechnet.

 $P_{M\ddot{u}hle} = \left(c_{d>40mm} \cdot a_{d>40mm} + c_{d<40mm} \cdot (a_{d>40mm} - 1)\right) \cdot m_{Kugeln} \cdot n \cdot D_i$ (31)

P _{Mühle}	Leistungsaufnahme der Mühle	kW
$C_{d>40mm}$	Empirischer Leistungsfaktor für Kugeln > 40 mm	$\left(\frac{m}{s}\right)$
C _{d<40mm}	Empirischer Leistungsfaktor für Kugeln < 40 mm	$\left(\frac{m}{s}\right)$
a _{d>40mm}	Anteil Kugeln mit d > 40 mm	(-)
m _{Kugeln}	Masse der Kugelschüttung	(<i>kg</i>)
n	Drehzahl der Mühle	$\left(\frac{1}{s}\right)$
D _i	Innendurchmesser der Mühle	<i>(m)</i>



DIMATTED 🛞



In Abhängigkeit des Mahlgutfüllstands, der durch das Transportmodell bestimmt wird, ergibt sich der Energieeintrag ins Mahlgut. Durch Anwendung des Zerkleinerungsmodells nach Espig wird in jedem Segment der Mühle für jeden Zeitschritt das Zerkleinerungsergebnis ermittelt, bevor der Massentransport und die Mischung der Teilströme erfolgt. Die Effizienz der Zerkleinerung hängt dabei wesentlich vom Mahlgutfüllstand ab: Ist die Mühle unterfüllt, wird der Teil der Antriebsenergie, der durch die freiliegenden Kugeln aufgenommen wird, nicht ins Material eingetragen. Ist die Mühle hingegen überfüllt, bleibt ein Anteil des Produktes unbeansprucht. Es wäre durch eine Modellanpassung weiterhin möglich, auch den dämpfenden Effekt einer Überfüllung durch Veränderung der Zerkleinerungsinvariante abzubilden. Dies wurde im Rahmen des hier berichteten Projektes jedoch nicht realisiert.

Stabkorbsichter

Bei Sichtern wird im Wesentlichen zwischen statischen und dynamischen Sichterbauarten differenziert. Die dynamischen Sichter werden dabei in drei Generationen eingeteilt. Als Sichter 1. Generation werden Umluftsichter bezeichnet. Die weiterentwickelte Form des Zyklonumluftsichters wird als 2. Generation bezeichnet, und die aktuellen Hochleistungssichter, beziehungsweise Stabkorbsichter, stellen die 3. Generation dar. Alle Sichter können grundsätzlich in einfacher Art und Weise durch die Verwendung einer experimentell bestimmten Trenncharakteristik abgebildet werden. Komplexere Sichter-Modelle, wie das in AP2 entwickelte Modell, erlauben auch die Abbildung des dynamischen Betriebs. Entsprechend der Ausstattung im Werk der Fa. Spenner wurde ein Stabkorbsicher (3. Generation) modelliert. Dieser trennt das Aufgabegut in Abhängigkeit der Korbdrehzahl, des Luftvolumenstroms und des Aufgabemassenstroms. Das Volumen des Sichtraums, der Luftstrom und die Aufgabemasse bestimmen die Beladung (kg/m³), eine wesentliche Kenngröße für die Arbeitsweise eines Sichters. Der Luftvolumenstrom ergibt sich aus dem angeschlossenen Gasmodell, welches der Sichter durch seinen Druckverlust aktiv beeinflusst.



Abbildung 61: Einfluss der Sichterparameter auf die Trenncharakteristik



Seite 74





Abbildung 61 zeigt den Einfluss der Sichterparameter auf die Trenncharakteristik des Sichters. Mit zunehmender Stabkorbdrehzahl verschiebt sich die Trenngrenze hin zu kleineren Korngrößen. Der Einfluss der Luftmenge spiegelt sich im Bypass (ungesichteter Anteil) und in der Trenngrenze wider. Der Sichter wurde zunächst qualitativ als Einzelaggregat parametrisiert, bevor er im Rahmen der Erprobung an die Arbeitsweise der Gesamtanlage angepasst wurde. Hierbei müssen die Korngrößenverteilungen von Grob- und Feingut sowie die Massenströme im System in Einklang stehen.

Rohmaterialaufbereitung

Die Rohmaterilaufbereitung wurde in sehr einfacher Form realisiert. Da im Werk Spenner kein Mischbett zu finden ist, wurde dieser Anlagenteil nicht im Detail parametrisiert. Der Steinbruch liefert ähnlich einem Silo einen Massenstrom, der über einen Vorbunker (Silo-Modell) dem Brecher zugeführt wird. Das zerkleinerte Material wird dann weiter transportiert und kann einem weiteren Silo oder der Rohmühle geführt werden.



Abbildung 62: Steinbruch und Brecher

Zementmahlung

Die Zementmahlanlage wurde schrittweise aus den einzelnen Anlagenteilen zusammengesetzt. Im Gegensatz zur relativ einfachen Rohmaterialaufbereitung, bei der lediglich Feststoff transportiert wird, weist die Zementmühle ein komplexes Gasmodell auf. Unter anderem werden zwei unabhängige Gaskreislaufe in einem Modellteil benötigt. Dies verkompliziert die Programmstruktur des Gasmodells erheblich. Um die Kompatibilität und Funktionalität der Teilmodelle untereinander zu prüfen, wurde zunächst ein einfacher Mahlkreislauf zusammengeschaltet. Dieser besteht aus einer Kugelmühle, einem Sichter, einem Zyklon, einem Elektro-Filter und einem Gebläse, sowie mehreren Rohrleitungsstücken und Silos (Abbildung 63 :).



- Seite 75

vdz



DIMATTED 🛞



Abbildung 63 : Erstellung eines vollständigen Mahlkreislaufs mit Sichter

Basierend auf der erfolgreichen Erprobung von vereinfachten Anlagenschaltungen wurde schrittweise die Anlagenschaltung im Werk Erwitte realisiert. Die Kugelmühle arbeitet im Kreislauf mit dem Sichter, welcher über ein Becherwerk mit dem Austragsgut der Kugelmühle beschickt wird. Die Mühle wird ebenso wie der Sichter von einem Luftvolumenstrom durchströmt. Das Fertiggut wird abgeschieden und in Silos gespeichert während das Rückgut des Sichters der Zementmühle erneut zugeführt wird. Abbildung 63 zeigt den Modellaufbau in Simulink. Erkennbar sind die wesentlichen Anlagenteile sowie die Rohrleitungen und Förderaggregate dazwischen.









- 1 Aufgabe-Silos
- 2 Gas-Silos
- 3 Kugelmühle
- 4 Mühlen-Zyklon
- 5 Filter-Gebläse
- 6 Becherwerk

7 Sichter

- 8 Sichter-Gebläse
- 9 Zirkulationsluft-Sichter
- 10 Fertiggut-Silos
- 11 Rückgut-Bandwaage

Abbildung 64: Bereinigte Darstellung des Gesamtmodells Zementmühle





Rohmahlung

Die Rohmahlanlage ist grundsätzlich ähnlich aufgebaut wie die Zementmühle. Die Mahlung erfolgt in einer sogenannten Tandem-Mahlanlage, bestehend aus einer Prallhammermühle und einer im Kreislauf betriebenen Luftstrom-Kugelmühle. Das Produkt der Kugelmühle wird durch Heißgase einem Steigschacht zugeführt, dem ebenfalls mittels Heißgas das Produkt der Vorzerkleinerung in der Prallhammermühle aufgegeben wird. Der Materialstrom wird einem Sichter zugeführt. Das Produkt wird im Gasstrom der Entstaubung zugeführt, während das Grobgut als Aufgabe der Kugelmühle dient. Abbildung 65 zeigt die verschaltete Anlage, welche aus den bereits aus der Zementmühle bekannten Teilsystemen besteht. Zusätzlich befindet sich ein Brecher ("crusher") im System, der die zur Vorzerkleinerung eingesetzte Prallhammermühle abbildet.



Abbildung 65: Teilmodell der Rohmühle

2.1.4.2 Vorwärmer und Kalzinator (VDZ)

Im thermischen Prozess der Zementherstellung sind die Vorwärmung und -kalzinierung neben dem eigentlichen Brennprozess im Ofen verantwortlich für die Qualität des Klinkers und die Effizienz des Prozesses.

Um die Zeitregime des übergeordneten Frameworks (Simulink) für die Gasphase zu umgehen, wurden diverse Anlagenteile in Matlab aus den Teilmodellen zusammengeschaltet, um den Kalzinator und den Vorwärmer abzubilden. Es hat sich gezeigt, dass dieses Vorgehen zweckmäßig ist, um die teilweise hohen Gasgeschwindigkeiten besser abbilden zu können und keine Limitierung durch die minimale Zeitschrittweite zu haben. Dies ist besonders im Vorwärmerturm notwendig, der



Seite 78

vd7





aus verschiedenen Zyklonstufen zusammengesetzt wurde. Allerdings ist dieses Vorgehen auch deutlich durch Restriktionen innerhalb des Matlab/Simulink Systems beeinflusst. Diese einzelnen Zyklonstufen enthalten bereits eine Implementierung des dargestellten Konzepts. Der Zyklon ist intern immer mit einer Rohrleitung als Anschlussteil versehen. Aus den einzelnen Zyklonstufen wird der Vorwärmerturm als weiteres Teilmodell (Matlab-Klasse) zusammengeschaltet.



Abbildung 66: Prinzip der Komponentenverschaltung am Beispiel des Vorwärmers

Zur einfachen Parametrisierung der Zyklone ist eine Eingabemaske implementiert. Hier kann für jeden Zyklon eine exakte Geometrie vorgegeben werden. Oft ist die exakte Geometrie nicht bekannt. Daher kann die Geometrie des jeweiligen Zyklons auch über den Durchmesser berechnet werden. Diese Lösung berechnet einen möglichst gut geeigneten Abscheidezyklon und bietet sich im Vorwärmer für die oberste Stufe an, jedoch nur bedingt für die sonstigen.

Neben den Zyklonen können auch die Rohrleitungen individuell ausgelegt werden. Im Vergleich zu aufwendigen Rohrsystemen ist dies jedoch nur vereinfacht möglich. Neben Durchmesser, Länge und Neigung kann eine Biegung hinzugefügt werden.

Der Vorwämer ist eine Quelle für Falschluft. Diese kann durch eine freie Querschnittsfläche parametrisiert werden und ist auch vom Volumenstrom im System abhängig.

	Preheater cyclones								
	Stage	а	b	ra	d	ri	h	hi	
1	1	3	1.5000	3.8900	6.3400	2	7.0900	6.5000	
2	2	3	1.5000	3.8900	6.3400	1.5000	7.0900	6.5000	
3	3	3	1.5000	3.8900	6.6400	1.5000	7.0900	6.5000	
4	4	3	1.5000	3.8900	6.6400	1.5000	7.0900	6.5000	
5	51	3	1.5000	3.8900	6.6400	1.5000	7.0900	6.5000	
6	52	2.5000	1.2500	3.1250	4	1.5000	8	11	
Save data View cyclone geometry Calc cyclone geometry									

Abbildung 67: Eingabemaske zur Parametrisierung der Zyklone im Vorwärmer

vdz





Eine besondere Herausforderung stellt am Vorwärmer die Schaltung seiner Zyklone dar. Bis zur vorletzten Stufe bewegt sich das Mehl nach unten und wird dort an den Kalzinator weitergegeben. Das Heißmehl wird nach dem Kalzinator wieder in die unterste Stufe des Vorwärmers aufgegeben, dort abgeschieden und dem Ofeneinlauf zugeführt. Hierfür verfügt der Matlab-System-Block über 2 Feststoff-Ausgänge. In diesem Gegenstromprozess kommt das heiße Gas vom Kalzinator in die unterste Stufe und wird zur obersten Stufe transportiert. In der obersten Stufe wird der Staub bestmöglich abgeschieden, das Rohgas verlässt das System, hierfür ist ein Gas-Ausgang vorgesehen. Die Rohrstücke, in die das Mehl vom darüberliegenden Zyklon aufgegeben wird, fungieren gleichzeitig als Steigschacht.



Abbildung 68: System-Block Vorwärmer

Der Kalzinator ist, wie bereits beschrieben, aus Rohr- und T-Stücken zusammengeschaltet. Dies ist wie beim Vorwärmer in einem System-Block dynamisch implementiert. Kalzinatoren können sehr unterschiedlich aussehen und unterschiedliche Querschnittsänderungen aufweisen. Durch die Verschaltung im System ist eine einfache Zusammenschaltung dieser komplexen Geometrien möglich. Hierzu wurde ebenfalls eine Eingabehilfe (Abbildung 69) entwickelt. Das hier gewählte Vorgehen ist auch um weitere Teilmodelle (z.B. Mischkammern) erweiterbar.



- Seite 80



	Setup Pipes								– 🗆 X
	Device Type	alpha (1 2 3)		I (1 2 3)			d (1	2 3)	Device types:
1	TPipe	90 90 0	1.99	1	0.1	2.3	0.7	2.3	Pipe, TPipe,-remove-
2	TPipe	90 45 0	5	10	0.1	2.3	0.7	2.3	
3	Pipe	90 0 0	4.6	0	0	2.3	2.3	0	
4	TPipe	90 90 0	3.4	2	10	2.3	5.7	2.3	
5	Pipe	90 0 0	30.145	0	0	5.7	5.7	0	alpha(1); inclination of the pipe or tPipeMerge between input 1 and 2
6	Pipe	90 0 0	2	0	0	5.7	3.6	0	alpha(2): inclination of tPipeMerge input 2 and output
7	Pipe	90 0 0	1.4	0	0	3.6	3.6	0	alpha(3): not in use
8	Pipe	45 0 0	1.4	0	0	3.6	3.6	0	
9	Pipe	0 0 0	1.4	0	0	3.6	3.6	0	
10	Pipe	-45 0 0	4.4	0	0	3.6	3.6	0	
11	Pipe	-90 0 0	28	0	0	3.6	3.6	0	I(1): length of pipe or length of tPipe input 1
									I(2): length of tPipe output
	<							3	•
									d(1): diameter of pipe input or diameter of tPipeMerge input 1
									d(2): diameter of pipe output or diameter of tPipeMerge input 2
									d(3): diameter of tPipeMerge output
	Update Dat	ta	Ado	d Element					

Abbildung 69: Eingabemaske zur Parametrisierung des Kalzinators

Im Matlab-System-Block des Kalzinators werden die T-Stücke verwendet, um zum einen das Gas im Kalzinator weiterzureichen und zum anderen einen Eingang im Kalzinator bereitzustellen, der in der Simulink-Umgebung angeschlossen werden muss. Da Kalzinatoren auch Steigschächte sind, kann das Mehl teilweise oder komplett nach unten fallen. Um dies abzubilden wurde ein weiterer Festoffausgang implementiert.

Wird dem Kalzinator Brennstoff hinzugefügt, wird dieser parallel zum Staub mittransportiert und dabei verbrannt, wenn die Bedingungen dafür vorhanden sind. Der Transport von Brennstoffen ist ein Sonderfall im Zementwerk und wurde daher nur in die notwendigen Systeme implementiert.

2.1.4.3 Drehrohrofen (KIMA P)

Im Drehrohrofen laufen die wesentlichen chemischen Reaktionen ab, die zur Bildung der Klinkerphasen führen. In Abbildung 70 ist das Simulinkmodell des Drehrohrofens dargestellt. In der singulären Betrachtung des Ofens erfolgt die Beschickung aus imaginären Silos, in denen die Einsatzstoffe Zusammensetzungen so gewählt wurden, dass sie typischen nach Zyklonwärmetauscher bzw. Klinkerkühler entsprechen. Die Beschickung des Brenners erfolgt aus einem Brennstoffsilo über den "Fuel-Bus". Die Grundoperationen wie Wärmetransport aufgrund von Konvektion, Leitung und Strahlung oder chemische Reaktionen wurden dabei auf Grundlage der Basismodelle implementiert.







Abbildung 70 : Simulinkmodell des Drehrohrofens

Um die im Feststoffbett des Ofens hohen Temperaturen von ca. 1450°C, und damit ein Sintern, zu erreichen, wird ca. 50% des thermischen Energiebedarfs eines Zementwerks mittels eines Brenners im Ofen umgesetzt. Die erzeugte Flamme kann eine Länge von mehreren Metern aufweisen. In Deutschland werden dazu Mehrstoff-Brenner verwendet, die verschiedene Arten von Festbrennstoffen gleichzeitig verarbeiten können. Als Brennstoff kommen beispielsweise Kohlenstaub und zu einem immer größeren Anteil alternative Brennstoffe zum Einsatz, wie aufbereiteter Hausmüll oder auch Tiermehl. Es wurde daher ein Feststoffbrenner in das Ofenmodell eingebunden, sodass der Einsatz verschiedenster fester Brennstoffe modelliert werden kann. Zur Beschreibung des Wärmeaustauschs und der Energiebilanz besteht das Ofenmodell aus vier Phasen: Feststoff, Gas, Flamme und Wand. Innerhalb des Ofens ist die Wandphase in den Teil getrennt, der mit dem Gas in Kontakt steht (WG), und den Teil, der mit Feststoff in Kontakt steht. Wärmeenergie wird von der Flammenphase durch Strahlung auf die Wand und die feste Phase übertragen. Die Gasphase interagiert mit der Wand und der festen Phase durch Strahlungs- und Konvektionswärmeübertragung. Wenn Fest- und Wandphase in Kontakt stehen, wird die Wärmeenergie durch Wärmeleitung übertragen. Innerhalb des Ofens gibt die Wand auch Wärmestrahlung an das Festbett ab. Die äußere Wandschicht leitet Wärme durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung an die Umgebung ab [36].

$q'_{F \to S}^{\dot{\epsilon}}$	Strahlungswärmeübertragung der Flamme auf den Feststoff	$q'_{F o WG}^{\epsilon}$	Strahlungswärmeübertragung der Flamme auf die Wand
$q'^{\epsilon}_{G o WG}$	Strahlungswärmeübertragung von Gas an die Wand	$q'^{\alpha}_{G \to WG}$	Konvektive Wärmeübertra- gung von Gas an die Wand
$q' \overset{\dot{\epsilon}}{_{G \to S}}$	Strahlungswärmeübertragung von Gas auf Feststoff	$q'^{\dot{lpha}}_{G o S}$	Konvektive Wärmeübertra- gung von Gas auf Feststoff

Tabelle 3: Auflistung der betrachteten Wärmeströme im Ofenquerschnitt

vdz



DIMATTED 🛞



$q'_{WG \rightarrow S}^{\epsilon}$	Strahlungswärmeübertragung der Wand auf den Feststoff	$q'_{W \to S}^{\lambda}$	Leitfähige Wärmeübertragung der Wand auf den Feststoff
$q'_{Wa \to U}^{\epsilon}$	Strahlungswärmeübertragung der Wand an die Umwelt	$q'^{\alpha}_{Wa \to U}$	Konvektive Wärmeübertra- gung der Wand an die Umwelt



Abbildung 71: Schnittdarstellung des Ofens mit Darstellung der Wärmeströme [36]

Aufgrund der Rotation des Ofens und der verhältnismäßig hohen Gasgeschwindigkeit, vor allem im Bereich der Flamme, wird ein Teil des Feststoffs aufgewirbelt und mit dem Gasstrom mitgetragen. Staub innerhalb der Gasphase beeinflusst die Strahlungseigenschaften des Gas-Staubgemischs und hat aufgrund der, im Vergleich zum Gas deutlich höheren spezifischen Wärmekapazität, einen deutlichen Einfluss auf die Energiebilanzierung des Ofens. Um diesen Einfluss abzubilden wurde angenommen, dass Staub proportional zur Gasgeschwindigkeit aufgewirbelt wird, sich im Verlauf des Ofens jedoch nicht wieder absetzt. Darüberhinaus wurde angenommen, dass im Bereich der Sinterzone aufgrund der Konsistenz des Feststoffs kein Staub aufgewirbelt wird. Die Gesamtmenge des aufgewirbelten Staubs wird an Erfahrungs- bzw. Messwerten aus realen Anlagen angepasst.

Die folgenden Komponenten des Festbettes werden berücksichtigt, um den energetischen und stofflichen Einfluss verschiedener Rohmehlzusammensetzungen zu beschreiben. Rekationsprodukte sind die Klinkerphasen, die nachstehend beschrieben werden. Aus dem Calciumcarbonat erzeugtes Kohlendioxid wird der Gasphase zugesetzt.

- 1. CaO(C) 6. $2CaO.SiO_2(C_2S)$
- 2. $SiO_2(S)$ 7. $3CaO \cdot SiO_2(C_3S)$
- 3. $Al_2O_3(A)$ 8. $3CaO \cdot Al_2O_3(C_3A)$
- 4. $Fe_2O_3(F)$ 9. $4CaO \cdot [Al_2O_3, Fe_2O_3](C_4AF)$
- 5. *CaCO*₃





DIMATTED 🛞



Die Arrhenius-Gleichung wird verwendet, um das Ausmaß der Reaktion des Festbettes zu berechnen.

$$k_k = A_k \cdot e^{\left(-\frac{E_k}{RT_S}\right)} \tag{32}$$

Nr.	Reaktionen	$A_k(\frac{1}{s})$	$E_k(\frac{J}{mol})$	$\Delta h_k[rac{KJ}{mol}]$
1	$CaCO_3 = C + CO_2$	3.8694E+23	6.0671E+5	-178.33
2	$2C + S = C_2 S$	4.1111E+5	1.9306E+5	126.08
3	$C_2S + C = C_3A$	1.3333E+5	2.5586E+5	-13.471
4	$3C + A = C_3 A$	8.3333E+6	1.9376E+5	39.448
5	$4C + A + F = C_4 AF$	8.3333E+8	1.8492E+5	200.13

Die Arrhenius-Koeffizienten sind in der folgenden Tabelle aufgeführt [37] [38] [39].

Die Reaktionen finden statt, wenn der Feststoff durch den Ofen transportiert wird. Das Ausmaß der Reaktion hängt von den Arrhenius-Koeffizienten und der Temperatur des Festbettes ab.

Druckabfall im Drehrohrofen

Der innere Gasstrom im Ofen wird durch den durch Reibung verursachten Druckabfall behindert. Der zur Aufrechterhaltung dieses internen Durchflusses erforderliche Druckabfall ist der Parameter, der zur Bestimmung des Leistungsbedarfs des Lüfters erforderlich ist. Der Moody-Reibungsfaktor (oder Darcy-Reibungsfaktor) ist ein dimensionsloser Parameter, der den Druckabfallgradienten mit der Durchschnittsgeschwindigkeit der Gase in Beziehung setzen.

 $f = \frac{-(\frac{dp}{dx})D_h}{\rho u_m^2/2}$

(33)

- f Reibungsfaktor [-]
- D_h Hydraulikdurchmesser m
- ho Durchschnittliche Dichte Kg/m³
- u_m Durchschnittsgeschwindigkeit m/s

Reibungsfaktorkorrelationen sind normalerweise mit den Fluidströmungsregimen und -bedingungen verbunden. In diesem Modell wird angenommen, dass das Strömungsregime turbulent und voll entwickelt ist. Die dieser Bedingung entsprechende Korrelation ist wie folgt:



Seite 84

vd7



$$f = (0.790 \ln \text{Re}_{\text{D}} - 1.64)^{-2}$$
(34)

$$3000 \le \operatorname{Re}_{\rm p} \le 5 \times 10^6 \tag{35}$$

$$\operatorname{Re}_{D} = \frac{\rho u_{m} D_{h}}{\mu}$$
(36)

Da die Öffnung über dem festen Bett innerhalb des Ofens keine Kreisform hat, wird ein effektiver Durchmesser als charakteristische Länge berechnet. Es heißt hydraulischer Durchmesser und ist definiert als:

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \tag{37}$$

Das A_c und P sind die Querschnittsfläche und der benetzte Umfang der Öffnung über dem festen Bett. Da für jedes der axialen diskreten Elemente des Ofenmodells alle Variablen bekannt sind, kann der Druckabfall an jedem Element berechnet und der Gesamtdruckabfall abgeleitet werden, indem alle elementaren Druckabfälle summiert werden [40].



Abbildung 72: Druckabfall und Gasgeschindigkeit entlang der Ofenachse

Wie in der obigen Grafik dargestellt, nimmt der Druckabfallgradient im Ofen mit zunehmender Geschwindigkeit der Gase zu.

2.1.4.4 Klinkerkühler (KIMA P / VDZ)

Es wurde ein typischer Klinkerkühler mittels der vorhandenen Grundmodule abgebildet. Die bei modernen Zementwerken gebräuchliste Variante eines Klinkerkühlers ist der Schubrostkühler, je



Seite 85

DIMATTED 🛞



nach Ausführung auch Walking-Floor-Kühler genannt. Der heiße Zementklinker wird darin nach Austritt aus dem Drehrohrofen mittels Durchströmen mit Umgebungsluft von über 1000°C auf ca. 150°C heruntergekühlt. Die so aufgeheizte Luft wird als Sekundärluft im Ofen und, falls vorhanden, als Tertiärluft im Kalzinator sowie als Abluft zur Trocknung in der Rohmehlmühle verwendet. Die Gesamtluftmenge ist durch Gebläse einstellbar. Die Verteilung auf Sekundär- Tertiär- und Abluft kann allerdings nur bedingt durch entsprechende Klappenstellungen kontrolliert werden.

Der Feststofftransport wird durch die Vorschubgeschwindigkeit des Rostes vorgeben. Da dies ähnlich dem Transport mittels eines Förderbands erfolgt, konnten die bereits entwickelten Grundmodule für den Feststofftransport mittels Förderband verwendet werden.

Um die Gasströmung abzubilden, wurde der Kühler bei der Modellierung in einen Rost- und einen Gasteil getrennt. Dies ermöglicht eine Entkopplung der mit Überdruck arbeitenden Kühlergebläse vom grundsätzlich bei leichtem Unterdruck betriebenen "Gasbereich" über dem Klinkerbett (siehe Abbildung 73 und Abbildung 74). Aufgrund der Größe des Druckverlusts bei der Durchströmung der Klinkerschüttung scheint dieses Vorgehen legitim zu sein.

Der Klinkerkühler entspricht im Sinne des Gasmodells zwei Gaseingängen, die direkt mit den Subsystemen (Ofen, Abgas) verbunden sind. Die Gaseingänge liefern Volumenströme an die Subsysteme, die durch das Klinkerbett vorgewärmt sind und evtl. Staub beinhalten. Die Gas-Temperaturen im freien Raum des Klinkerkühlers fallen ab, da auch der Klinker durch die Kühlung kälter wird. Entsprechend hat das Abgas eine kältere Temperatur als die Luft zum Ofen. Entsprechend der Volumenströme des Abgases und der Luft zum Ofen wird ein Gewicht (w_{cooler}) bestimmt, welches die Bestimmung der Temperaturen ermöglicht. Durch den großen freien Raum über dem Kühler wird angenommen, dass genügend Luft vorhanden ist, damit die hier getroffene Vereinfachung gültig ist. Dem freien Raum wird ein Volumenströme durch die Kühlerkammern bereitgestellt. Ist dieser Volumenstrom kleiner als die benötigten Volumenströme für Abgas und Ofenluft, wird die restliche Luft durch Falschluft am Ofenkopf bereitgestellt. Umgekehrt kann hier auch Luft entweichen.



Abbildung 73: Schematische Darstellung der Gasaufteilung auf Sekundär- und Tertiärluft und Abgas im Klinkerkühler.

Die Durchströmung der Kühlluft durch das Festbett des Kühlers bedingt eine konvektive Wärmeübertragung zwischen Gas und Festbett. Diese Wärmeübertragung zwischen festen Partikeln in einer Schüttung und des um sie herum fließenden Fluids kann mit der logarithmischen mittleren Temperaturdifferenz und dem geeigneten Wärmeübertragungskoeffizienten berechnet werden, der in der Formel als α angegeben ist.

$$\dot{q} = \alpha \Delta T_{IM} \tag{38}$$

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_s - T_{in}) - (T_s - T_{out})}{\ln \frac{T_s - T_{in}}{T_s - T_{out}}}$$
(39)

Das Fluid bewegt sich aufgrund der kleinen Zwischenräume zwischen den Partikeln schneller durch die Hohlräume einer Schüttung als durch freien Querschnitt. Darüber hinaus spielt die Form der Partikel eine Rolle, weshalb die resultierende Reynolds-Zahl dieses Phänomen darstellen muss. Um dies zu beheben, wurden "\u03c6", der Hohlraumfaktor und "f" -Formfaktoren verwendet, um den Wert des Wärmeübertragungskoeffizienten anzupassen.

$$\operatorname{Re}_{\varphi} = \frac{w_{free}d_s}{\upsilon\varphi} \tag{40}$$

freie Bettgeschwindigkeit
$$w_{free}$$
Partikelgröße d_s kinematische Viskosität υ Porosität φ Formfaktor f

$$Nu_{lam} = 0.664 \sqrt{\text{Re}_{\varphi}^{3}} \sqrt[3]{\text{Pr}}, \ Nu_{turb} = \frac{0.037 \,\text{Re}_{\varphi}^{0.8} \,\text{Pr}}{1 \times 2.443 \,\text{Re}_{\varphi}^{-0.1} (\text{Pr}^{2/3} - 1)}$$
(41)

$$Nu_{sphere} = 2 + \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2} , \quad Nu = f \cdot Nu_{sphere}$$
(42)



- Seite 87



$$\alpha = \frac{Nu \times \lambda}{d_s} \tag{43}$$

Das singuläre Simulinkmodell des Klinkerkühlers ist in Abbildung 74 dargestellt.



Abbildung 74: Simulinkmodell des Klinkerkühlers

Die vom Kühler an den Ofen bzw. Kalzinator gelieferte Luft wird zwischen Sekundär- und Tertiärluft relativ zum Verhältnis von Sekundärluft zur Gesamtluft des Kühlers verteilt. Masse und Enthalpie für jeden dieser Luftströme werden separat berechnet. Da die Wärmekapazität von Luft eine Funktion der Temperatur ist, mussten die Sekundär- und Tertiärtemperaturen iterativ berechnet werden.

2.1.5 AP5: Implementierung von Produktinnovation, Erprobung (Di Matteo)

Zur Schonung fossiler Brennstoffe (insbesondere Kohle) und zur Verminderung der CO2 – Emissionen ist die optimierte Nutzung alternativer Roh- und Brennstoffe (EBS) für die Zementindustrie besonders interessant. Limitierend für den breiten Einsatz von Ersatzstoffen sind vielfach die schwankenden Qualitäten der Ersatzroh- oder Ersatzbrennstoffe. Insbesondere führen variierende Heizwerte oder andere schwankende fördertechnische Eigenschaften (wie zum Beispiel Feuchtegehalt, Partikelgröße, Dichte oder chemische Zusammensetzung) zu Problemen in der Prozessführung, die dann wiederum Auswirkungen auf die Produktqualität haben können. Ein gleichmäßiger Betrieb der Produktionsanlage ist aber unabdingbare Voraussetzung für eine energiesparende Fahrweise der Anlage und für eine gleichbleibend hohe Qualität des Produktes. Neben einer störungsfreien Zugabe des Brennstoffs ist hier insbesondere aber auch die intelligente Steuerung der Produktionsanlage in Abhängigkeit sich ändernder Parameter zu nennen.

Im Vergleich zu Kohle sind Ersatzbrennstoffe aufgrund ihrer inhomogenen, vielfältigen und oft faserigen Struktur, wegen von Schwankungen der Materialeigenschaften und Agglomerationseffekten ein schwierig zu förderndes und zu dosierendes Schüttgut. Um beispielhaft



Seite 88

vd7





die große Bandbreite der Ausprägung von alternativen Brennstoffen aufzuzeigen, sollen in der folgenden Abbildung unterschiedliche alternative Brennstoffe einmal bildlich dargestellt werden.





(C)





(d)

Abbildung 75: Typische Arten von alternativen Brennstoffen: (a) Fein gesiebter aus Plastikfolien abgeleiteter Brennstoff; (b) Grob aufbereiteter Brennstoff aus Plastikabfällen; (c) Ersatzbrennstoff aus Teppichresten und Stofffasern; (d) Grobe Reifenschnitzel

Auf Basis der in Abbildung 75 gezeigten unterschiedlichsten Arten von Ersatzbrennstoffen kann verdeutlicht werden, wie wichtig eine genaue Kenntnis über die genaue Auswirkung des Brennstoffes auf den Verbrennungsprozess sein kann. Insbesondere da häufig mehrere alternative Brennstoffe gleichzeitig an unterschiedlichen Stellen (Drehrohrofen und Kalzinator) im Verbrennungsprozess eingesetzt werden. Daher ist die Vernetzung der Anlagenkomponenten noch nicht so ausgereift, dass eine Brennstoffdosierung robust und kalorisch hochpräzise realisiert werden kann. Vor allem für die kalorisch präzise Dosierung von EBS sind wesentliche Entwicklungen in der Online-Bestimmung des Brennwertes und der Online-Modulation des auf den Brennwert bezogenen Materialflusses notwendig.

Hier ist eine kontinuierliche Ermittlung der Stoffparameter (Heizwert, Feuchte, Schadstoffgehalt) unerlässlich, um geeignete Konditionierungsmaßnahmen (Trocknen, Zerkleinern, Sichten) während des Förderprozesses einzuleiten, damit Schwankungen der Verbrennungstemperatur im Drehrohrofen minimal (< 1%) gehalten werden können.

Gelingt die Kontrolle der Ersatzbrennstoffzufuhr nicht, muss dem Ofen sofort beispielsweise ein Primärbrennstoff wie Kohle zugeführt werden. Im schlimmsten Fall muss die Produktion ausgesetzt werden, bis die Brennstoffzufuhr und die Produktionstemperatur wieder kontrolliert werden können. Hierbei entstehen sehr schnell hohe Kosten. Beim Ausfall solcher Systeme können pro Stunde Anlagenstillstand schnell mehrere Zehntausend Euro Produktionsausfall zustande kommen.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sollten die Grundlagen geschaffen werden, so dass das entwickelte Simulationsmodul ganz spezifisch für den oben beschriebenen Ansatz genutzt werden kann. Hierzu wurde auf Basis der grundsätzlichen Konzeptionierung typischer Anlagen zur



Seite 89





Annahme, Förderung, Lagerung, Aufbereitung und Dosierung von alternativen Brennstoffen im Rahmen des Arbeitspaketes AP5.1 eine generelle sensorbasierte EBS-Dosiereinrichtung zunächst geplant und konzeptioniert, wobei hierbei die jeweilige spätere Umsetzung im Rahmen des entwickelten Simulationstools zusätzlich betrachtet wurde.

Auf Basis dieser Entwicklungen wurden dann in einem zweiten Arbeitspaket (AP5.2) Messdaten an einer entsprechenden Teststrecke unter Nutzung realer Anlagen- und Sensorelemente aufgenommen, so dass eine entsprechende Verifikation der Sensorkonzepte erfolgen konnte. Neben der eigentlich Validierung geeigneter Sensoren wurden in diesem Arbeitspaket auch Arbeiten in Bezug auf die Klassifizierung alternativer Brennstoffe durchgeführt, so dass auf Basis der gewonnen Erkenntnisse eine nähergehende Auswahl von geeigneten Prozessvariablen zur Optimierung der Brennstoffzufuhr abgeleitet werden konnten.

Hinzu kommt in AP5.3 die messtechnische Konzeptionierung und Ausarbeitung der zugehörigen regelungstechnischen Konzepte. Hierbei wurde u.a. auch die modellhafte Abbildung realen Sensorverhaltens untersucht und in die bestehende Simulationsumgebung inkludiert. Final wurde im Arbeitspaket AP5.4 die eigentliche Umsetzung des Konzeptes im Rahmen einer Simulation durchgeführt. Nachfolgend sollen die wesentlichen Entwicklungen in den einzelnen Arbeitspaketen zusammengefasst werden.

2.1.5.1 AP5.1: Planung und Auslegung einer sensorbasierten EBS-Dosiereinrichtung

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde zunächst eine Bestandsaufnahme der im Zementwerk vorhandenen Anlagenelemente vorgenommen. Hierbei wurden typische Beispielkonfigurationen von bestehenden Anlagen für die Ersatzbrennstoffzufuhr (EBS) ausgewertet und entsprechend ihrer implementierten Elemente passende Sensorkonzepte entwickelt. Abbildung 76 zeigt hier beispielhaft ein Sensorkonzept für die Umsetzung einer sensorbasierten Steuerung einer typischen Anlage zur Annahme, Aufbereitung, Lagerung, Transport und Dosierung von alternativen Brennstoffen im Zementherstellungsprozess. Hierbei wurden die bereits im Rahmen des zweiten Arbeitspakets implementierten Elemente besonders betrachtet.

Diese wurde im Rahmen des Entwicklungsprozesses auf Basis eines zuvor erstellten generalisierten Anlagenkonzeptes konzipiert, wobei typische umgesetzte Anlagenkonzepte im Bereich alternativer Brennstoffe systematisch analysiert und ausgewertet wurden. Für das beispielhafte Anlagenkonzept wurde eine Menge an typischen Sensoren für notwendige Messgrößen (Massenstrommessungen, Geschwindigkeitsmessungen, Feuchtemessungen, Dichtemessungen, etc.) ausgewählt, so dass die relevanten Prozessparameter zur intelligenten Steuerung und Regelung der Brennstoffzufuhr an einer realen Anlage erfasst werden können.







Abbildung 76 – Entwickeltes grundlegendes Sensorkonzept für eine typische Anlage zur Annahme, Aufbereitung, Lagerung, Transport und Dosierung von alternativen Brennstoffen im Zementherstellungsprozess.

Auf Basis des vorliegenden Konzeptes wurde ein entsprechendes sensorisches Konzept für eine zu implementierende Teststrecke (siehe auch Arbeitspaket AP5.2) entwickelt, welche so gestaltet wurde, dass eine Implementierung im Technikum der Fa. Di Matteo ermöglicht wird. Hierbei soll die Testanlage so aufgebaut sein, dass die typischen notwendigen Aufgaben einer realen Förderanlage entsprechend abgebildet werden können. Es wurde daraufhin ein entsprechendes Prozess- und Instrumentierungsdiagramm (P&ID) entwickelt, welches das in Abbildung 76 abgebildete generelle Sensorkonzept aufgreift und in eine für dieses Vorhaben beherrschbare Größe überführt. Hierbei wird naturgemäß der eigentliche Verbrennungsprozess nicht abgebildet, da dieser nicht im Rahmen der Technikumsanlage umzusetzen wäre. Der Aufbau der Teststrecke wurde mit der Zielsetzung einer entsprechenden Charakterisierung der notwendigen Sensoren für die Echtzeit-Klassifizierung des geförderten Brennstoffes entworfen. Um hier zunächst eine Zuordnung von möglichen Sensorprinzipien zu typischen Eigenschaften alternativer Brennstoffe zu gewährleisten, wurde zunächst eine vollständige Übersicht der Eigenschaften der Ersatzbrennstoffe und der zuzuordnenden Sensorprinzipien auf Basis einer umfassenden Literatur- und Marktrecherche erstellt. Die Ergebnisse seien in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.



- Seite 91



Tabelle 4: Eigenschaften von alternativen Brennstoffen und zugeordnete Sensorkonzepte

	Eigenschaft	Values/Definitions	Auswirkungen auf den Prozess	Vorliegende Sensoren zur Messung /
	Generelles Erscheinungsbild	z.B. Fluffig, Klebrig, Stückig, etc	Stromaufnahme von Transporteinrichtungen, Effizienz von Trocknungseinrichtungen, Sieheffizienz etc	Besuminning Bildverarbeitung auf Basis von Farb- und Tiefenkameras oder indirekt über andere Messgrößen im Prozess
	Schüttdichte p	t/m³	Verhältniss von Volumen- und Massenstrom, Stromaufnahme von Dosier- und Transporteinrichtungen, Feuchtigkeit des Materials	Echtzeitdurchlaufsensorik zur Bestimmung der Schüttdichte nicht verfügbar. Nur indirekt z.B. über die Feuchte abzuleiten.
	Kompressionsfähigkeit, z.B. gemessen als ρ=ƒ(p)	t/m³ pro N∖m²	Zeitkonsolidierung des Materials in Speichermedien und resultierende Änderung der Schüttdichte und Fließfähigkeit	Echtzeitdurchlaufsensorik nicht verfügbar, sondern nur durch spezifische Druckversuche messbar. Nur indirekt über Momentbedarf von Austragsorganen zu bestimmen.
HYSIKALISCH	Partikelgrößenverteilung (PSiD)	Histogramm für m ³	Auf Basis unterschiedlicher Partikelgrößen besteht jeweils unterschiedliches Ausbrandverhalten der Partikel innerhalb der Verbrennungsprozesse.	Die Partikelgröße kann in Echtzeit nicht definiert gemessen werden. Die Bestimmung erfolgt typischerweise auf Basis eine Reihe von Siebprozessen. Innerhalb des Prozesses kann nur indirekt auf die Partikelgröße geschlossen werden.
	Partikeloberflächen- verteilung (PSuD)	Histogramm für m ²	Auf Basis unterschiedlicher der Partikeloberflächen kann das Ausbrandverhalten eindeutiger als über die Partikelgröße definiert werden, da hier auch indirekt die Gestalt einzelner	Die Partikelgröße kann in Echtzeit nicht definiert gemessen werden. Die Bestimmung erfolgt typischerweise auf Basis eine Reihe von Siebprozessen. Innerhalb des Prozesses kann nur indirekt auf die Partikelgröße geschlossen werden.
	Anteil von Verunreinigungen	%	Verunreinigungen im Brennstoffstrom tragen typischerweise nicht zum Energieeintrag in den Verbrennungsprozess bei, so das der Anteil der Verunreinigungen am Gesamtmaterialstrom ein wichtiger Faktor bei der Bewertung des Energieeintrages darstellt.	Der Anteil der Verunreinigungen kann auf Basis des ausgeschiedenen Materials während der Materialaufbereitung (z.B. in Bezug auf Sieb- oder Sichterprozesse) bestimmt werden. Hierzu bedarf es der Integration von Gewichtsmesseinrichtungen.
	Chlor- und Schwefelanteil	mg/kg	Der Chlor- und Schwefelgehalt ist wesentlich in Bezug auf die Emissionen des Verbrennungsprozess, sowie die Klinkerqualität.	Die Echtzeitmessung der angegebenen Größen kann z.B. auf Basis von NIR-Sensorik erfolgen.
IEMISCH	Schwermetallanteil	mg/kg	Der Schwermetallanteil ist wesentlich in Bezug auf die Emissionen des Verbrennungsprozess, sowie die Klinkerqualität.	Die Echtzeitmessung der angegebenen Größen kann z.B. auf Basis von NIR-Sensorik erfolgen.
2	Feuchtigkeitsanteil	%	Die Feuchtigkeit beeinflusst den Brennwert des Ersatzbrennstoffes.	Die Echtzeitmessung der angegebenen Größen kann z.B. auf Basis von NIR-Sensorik erfolgen. Alternativ stehen hier Messmethoden auf Basis von Mikrowellen zur Verfügung, welche sich leichter in bestehende Prozesse integrieren lassen.
THERMISCH	Zündtemperatur	°C	Die Zündtemperatur beeinflusst maßgeblich die Verbrennung der Partikel innerhalb des Verbrennungsprozesses.	Zur Bestimmung der Zündtemperatur sind spezifische Experimente in Brennkammern notwendig. Es kann jedoch durch eine Klassifizierung der Materialzusammensetzung mittels NIR auf die Zündtemperatur geschlossen werden.
	Brennwert	kJ/kg	Der Brennwert kennzeichnet die eingetragene Energiemenge.	Der Brennwert kann nur indirekt über eine Klassifizierung des Materials auf Basis von NIR- Sensoren bestimmt werden.
	Verweilzeit	S	Die Verweilzeit des Materials innerhalb des Brennprozess (z.B. innerhalb der Flamme) definiert den Ausbrand des Materials.	Keine Messung möglich.
ERHEIT	K _{St} Wert	bar m/s	Wert des maximalen zeitlichen Druckanstiegs ((dp/dt) _{max}), der in einem 1 m ³ -Behälter unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen gemessen wird.	Nur experimentell zu bestimmen.
SICH	P _{max} Staubexplosionsklasse	bar g St 0 - St 3	Maximaler Explosionsdruck. Basis für die spätere Klassifizierung der Explosionsschutzzonen.	Nur experimentell zu bestimmen.

Ein wesentlicher Aspekt der Realisierung der angedachten Produktinnovation stellt daher neben der Implementierung und Erprobung von Sensoren zur Echtzeitklassifizierung von Brennstoffen als integraler Bestandteil einer intelligenten Förderlinie, eben auch der Aufbau von Teststrecken zur



vdz

DIMATTED 🛞



Charakterisierung und Klassifikation unterschiedlicher Brennstoffe dar. Diese wurden als Teil des Arbeitspaketes AP5.2 ebenfalls betrachtet.

2.1.5.2 AP5.2: Ausstattung einer Teststrecke mit Integration und Charakterisierung der Sensoren

Um die sensorbasierte EBS-Dosierung und Förderung und insbesondere das zugehörige Sensorkonzept testen zu können, wurde im Technikum der Fa. Di Matteo eine entsprechende Anlage genutzt, in der das Material in einem Kreislauf bewegt wird.

Diese Anlage sollte zunächst als Teststrecke für den sensorbasierten Ansatz genutzt werden um beispielsweise die Eignung einzelner Sensoren verifizieren zu können. Das Kernelement dieser Anlage ist hierbei das gravimetrische Dosiersystem, welches einen definierten Massenstrom erzeugt. Die weiteren Elemente der Anlage sind in Abbildung 77 dargestellt.



Abbildung 77: Technikumsanlage zur Evaluierung der Sensorik: (1) – Becherwerk; (2) – Zwischenbunker; (3) – Vordosierschneckenförderer; (4) – Vorbunker gravimetrische Dosierung; (5) – gravimetrisches Dosiersystem; (6) – Trogschneckenförderer; (7) Trogkettenförderer; (8) Materialweiche; (9) Kontrollwiegesystem

Im Rahmen der Vorplanung des Sensorkonzeptes wurden bereits entsprechende Sensoren zur Integration in ähnlichen Anlagen ausgewählt, wobei innerhalb der Teststrecke naturgemäß nur eine Untermenge der Sensoren integriert werden kann. Dafür wurden aber zusätzliche Elemente inkludiert, welche so in realen Anlagen nicht zur Verfügung stehen. Hierzu zählt insbesondere die Möglichkeit eine Kontrollverwiegung durchzuführen, so dass die Genauigkeit der Dosierung überprüft werden kann. Zu diesem Zweck wurde eine entsprechende Materialweiche inkludiert, über welche Material gezielt aus dem Förderstrom in ein zusätzliches Wiegebehältnis transportiert werden kann. Dies ist notwendig um beispielsweise Informationen zur Materialfeuchte und –dichte mit der Dosiergenauigkeit in Verbindung zu bringen.

Ein Hauptbestandteil der Arbeiten in diesem Arbeitspaket beschäftigten sich mit der Charakterisierung von alternativen Brennstoffen und der Fragestellung, wie auf Basis von spezifischen Sensormessungen auf die entsprechenden Eigenschaften (siehe auch *Tabelle 4*) geschlossen werden kann. Hierzu wurden neben den Versuchen mit der in Abbildung 85



Seite 93





dargestellten Technikumsanlage weitere reale Teststrecken aufgebaut, welche im Folgenden kurz erläutert werden sollen:

Teststrecke in realer Anlage zur Ermittlung des Einflusses von Materialfeuchte und Brennwert

Da die Abbildung von Trocknungsvorgängen im Rahmen von Technikumsversuchen nur sehr schwer umzusetzen ist, wurde hier eine entsprechende Teststrecke in einer realen Anlage prototypisch implementiert. Hierbei wurde die Feuchtigkeit des Materials vor und hinter eines implementierten Trocknungssystems für alternative Brennstoffe auf Basis von provisorisch installierten Mikrowellenfeuchtigkeitssensoren kontinuierlich erfasst. Die entsprechende Anordnung sei in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.



Abbildung 78: Teststrecke zur Ermittlung des Einflusses der Materialtrocknung auf den Brennwert

Die Tests wurden hierfür an einem pneumatischen Trockner (sog. Flash Dryer) aufgenommen, welcher mit heißer Abluft aus dem Kühler betrieben wird. In Kombination mit einer kontinuierlichen Beprobung und Analyse des geförderten Materials vor und hinter der Trocknungsanlage (siehe auch Abbildung 78) und einer entsprechenden Auswertung des Brennwertes, soll die Datenbasis geschaffen werden um nachfolgend ein entsprechendes statistisches Modell für das geförderte Material zu generieren. Die folgenden Graphen in Abbildung 79 zeigen beispielhaft den Einfluss der Trocknung auf den Brennwert des Materials bei den aufgenommen Daten an der Teststrecke. Die Messwertaufnahmen sind hierbei für eine Grundfeuchte des Materials vor dem Trocknen von ca. 15% definiert.

Der so gefundene Zusammenhang lässt sich auch durch die Theorie stützen, da hier für den Heizwert (lower heating value LHV [MJ/kg]) sich der folgende Zusammenhang definieren lässt, in welchem die Menge an gebundenen Wasser (H₂O) sich entsprechend negativ auf den Heizwert auswirkt.



Seite 94



$$LHV = 34.8 x_{C} + 94.3 x_{H} + 10.4 x_{S} + 6.3 x_{N} - 10.8 x_{O} - 2.5 x_{H_{2}O} in \frac{MJ}{Kg}$$
(44)

Auf Basis der gewonnen Erkenntnisse lässt sich ein statistisches Modell für die jeweils untersuchte Materialkomposition ermitteln, wobei ein quadratischer Zusammenhang angenommen werden soll.



Abbildung 79: Einfluss der Trocknung von alternativen Brennstoffen auf deren Brennwert

Teststrecken zur Definition der Sedimentationsgeschwindigkeit und Materialzusammensetzung von alternativen Brennstoffen

Zur generellen Klassifizierung der alternativen Brennstoffe hinsichtlich ihres generellen Erscheinungsbildes wurde ein Teststand zur Vorbestimmung der Sedimentationsgeschwindigkeit entwickelt und umgesetzt. Die Messungen sollten dabei möglichst einfach durchzuführen und reproduzierbar sein. Dafür bietet sich am ehesten die Messung der Fallzeit an. Eine Klassifizierungsgröße könnte auf dem Verhältnis von gesamter Fallzeit und Differenzfallzeit zwischen dem ersten und letzten Partikel basieren. Dadurch lassen sich theoretisch gleichzeitig Partikelgrößenverteilung und Schütt- bzw. Partikeldichte ableiten. Dementsprechend müssten schwere homogene Partikel schnell und relativ gleichzeitig fallen und inhomogene leichte Partikel in Relation langsamer und in einer größeren Zeitspanne den Boden erreichen. In Abbildung 80 – (a) ist der Versuchsstand, der für die Versuche aufgebaut wurde, dargestellt. Es wurden daraufhin die in der Teststrecke geförderten Materialien untersucht, wobei in Abbildung 80 – (b) einige Beispiele für die Durchführung der Fallversuche dargestellt sind (siehe auch [41]).



(a)

(b)

Abbildung 80: Versuchsstand (a) und Beispiele für durchgeführte Fallversuche (b)

vdz



Seite 95



In Verbindung mit der hier dargestellten klassischen Bestimmung der Sedimentation, wurde außerdem der in Abbildung 115 eingeführte Versuchsstand zur Untersuchung des Schöpfverhaltens von Becherwerken auch zur Klassifizierung von Brennstoffen eingesetzt. Die Idee hierbei beruht auf einer automatischen Beobachtung des Austragsverhaltens des Materials bei der Entleerung der Becher durch eine Hochgeschwindigkeitskamera. Um das Flugverhalten während des Fördervorganges zu beobachten, ist es möglich je nach Becherposition einzelne Partikel des Materialstroms automatisch auf Basis des optischen Flusses zu verfolgen und somit Ihre Trajektorie abzuleiten. Aus diesen Daten lassen sich einige der notwendigen Eigenschaften der alternativen Brennstoffe indirekt ableiten. So ist es beispielsweise möglich auf Basis der Spannweite der Flugbahnen auf die Materialzusammensetzung in Bezug auf die Partikelgrößen und Partikelmassen zu schließen. Die so gewonnenen Daten können zur Klassifizierung der Brennstoffe genutzt werden. Es wurde des Weiteren untersucht, ob ein solches Verfahren auch zur direkten Integration in einen realen Förderer genutzt werden könnte. Exemplarisch sei in der folgenden Abbildung die Prozesskette der Auswertung dargestellt. Hierbei zeigt Abbildung 81 – (a) ein Einzelbild einer aufgenommenen Sequenz für einen alternativen Brennstoff auf Basis von Plastikfolien. Hierbei wird dann im Rahmen der automatischen Auswertung der optische Fluss einiger zuvor als gut verfolgbar (Good-Points-to-Track-Ansatz) klassifizierter Bildelemente bestimmt. Die so entstehenden Bewegungsvektoren sind in Abbildung 81 - (b) beispielhaft an einem Einzelbild dargestellt. Abschließend entsteht auf Basis aller verfolgten Einzelpunkte und der entsprechenden Becherpositionen in den Einzelbildern ein Vektorfeld, welches die Bewegung des Materials beim Abwurf aus dem Becher visualisiert. Hierbei kann auf Basis des Abbildungsverhältnisses der Kamera auch eine metrische Skala definiert werden, so dass auch ein Vergleich mit typischen Abwurfparabeln klassischer Schüttgüter ermöglicht wird. Abbildung 81 – (c) zeigt ein solches Vektorfeld, aus welchem dann beispielsweise die Streuung und die Fallgeschwindigkeit des Materials automatisch abgeleitet werden kann. Die Auswertung der Kamerasequenzen kann dabei auf Basis des entwickelten Algorithmus automatisch erfolgen, so dass auch eine große Anzahl unterschiedlicher Sequenzen problemlos analysiert werden kann.



Abbildung 81: Analyse der Becherentleerung (a), Optische Verfolgung von Partikeln (b) und aufgenommenes Vektorfeld der Partikelbewegungen und entsprechende Becherpositionen

Teststrecke zur Validierung von Abscheidegraden und Anteil von Störstoffen

vdz



Seite 96



Zur generellen Klassifizierung der alternativen Brennstoffe hinsichtlich des Anteils der Störstoffe und der typischen Abscheidegrade bei der Siebung und Sichtung, konnte ebenfalls nicht auf den Versuchsaufbau im Technikum zurückgegriffen werden, da hier die notwendigen Materialmengen typischer Brennstoffvariationen nicht handhabbar gewesen wären. Vielmehr wurde auf Daten an realen Anlagen zurückgegriffen die im Rahmen des Projektes gesammelt wurden. Hierzu wurden typische Stoffströme an in realen Anlagen installierten Scheibensieben, Rüttelsieben, Luftstromsichtern und Magnetabscheidern über einen definierten Zeitraum analysiert. Nachfolgend sollen beispielhaft typische Ergebnisse und typische ausgeschleuste Störstoffe für unterschiedliche Abscheiderarten dargestellt werden. Es wurde ein typischer Stoffstrom für alternativen Brennstoff, welcher aus Plastikabfällen abgeleitet wird (RDF) exemplarisch ausgewählt. Hierbei ist zum besseren Verständnis des nachfolgenden Graphen zu erwähnen, dass typischerweise aus dem Gesamtstoffstrom des Brennstoffes drei unterschiedliche Brennstoffarten, je nach Einsatzort, abgeleitet werden. Diese sind von sehr grob (Partikelgröße <300mm und >100mm) für den Einsatz in Vorbrennkammern (z.B. Step-Combustor), über mittelgrob (Partikelgröße <100mm und >60mm) für den Einsatz im Kalzinator, bis zu fein (Partikelgröße <30mm) zum Einsatz am Hauptbrenner im Drehrohrofen, hinsichtlich Ihrer Partikelgrößenverteilung definiert.



Abbildung 82: Beispiel für die Ermittlung von Stoffströmen an unterschiedlichen Abscheideorganen in realen Anlagen zur Förderung von Ersatzbrennstoffen (hier: RDF)

Die in der obigen Abbildung dargestellten Verhältnisse stellen zeitliche Mittelwerte auf Basis der sensorischen Erfassung der Ausschleusemengen der einzelnen Abscheideorgane dar. Es ist jedoch zu beobachten, dass die einzelnen Ausschleusestoffströme sehr starken zeitlichen Variationen unterworfen sind. Hierbei sind dann insbesondere die Querströme zwischen den einzelnen Brennstoffarten für eine Echtzeitauswertung interessant.

Auf Basis der gewonnenen Prozessdaten und Sensorkonzepte wurden im nachfolgenden Arbeitspaket nun Szenarien für eine mögliche Nutzung dieser Daten im Rahmen einer Echtzeitoptimierung der Brennstoffzufuhr entwickelt. Das Erfassungskonzept auf Basis von Wiegeelementen an den einzelnen Auffangbehältern ist hierbei ausreichend, um die notwendigen zeitlichen Verläufe der Stoffströme aufnehmen zu können. Um einen Eindruck über die unterschiedlichen Abscheidestoffströme zu geben, sollen in der nachfolgenden Abbildung visuelle



Seite 97

vd7





Beispiele für die einzelnen Abscheidungen dargestellt werden, welche im Rahmen der Auswertungen erfasst wurden.



Abbildung 83: Visuelle Darstellung der Abscheidestoffströme aus den Teststrecken: (a) – Mineralische Anteile; (b) – kleine magnetische Metallfraktionen; (c) – Agglomerationen von Brennstoff; (d) – Typischer Auswurf einer Luftklassifizierung aus metallischen und mineralischen Komponenten; (e) – Plastikfolien als Übergrößen; (f) – Abscheidung aus einem Grobmaterialstrom

2.1.5.3 AP5.3: Datenerfassung und Berechnung des notwendigen Materialstroms

Im Kontext des vorgestellten Konzeptes einer Verbesserung der Brennstoffzufuhr auf Basis sensorischer Daten wurde zunächst ein Szenario entwickelt, welches auf einer Messung der Materialfeuchte beruht und ein klassisches Problem in Bezug auf eine mögliche Maximierung des Einsatzes von Ersatzbrennstoffen teilweise auflösen soll. Das grundsätzliche Problem in Bezug auf eine Erhöhung des Anteils alternativer Brennstoffe im Gesamtbrennstoffmix besteht u.a. in den grundsätzlichen Schwankungen des Brennwertes [kJ/kg]. Da in der Regel die dosierte Zuführung des Brennstoffes auf Basis einer Messung des Massenstroms (m [kg/h]) erfolgt, führt ein volatiler Brennwert des zugeführten Brennstoffes automatisch auch zu einer nicht zu erfassenden Änderung der eingetragenen thermischen Energie pro Zeiteinheit [kJ/h], was wiederum in der Folge zu ungewollten Instabilitäten im Verbrennungsprozess (z.B. im Drehrohrofen) führen kann. Je größer nun der absolute, dem Brennprozess zugeführte, Massenstrom von alternativen Brennstoffen ist, desto größer ist der Einfluss von Brennwertschwankungen auf den Verbrennungsvorgang. Darum wird in der Praxis gerade unter generell schwierigen Prozessbedingungen (z.B. bei auftretenden Auffälligkeiten an der Ausmauerung des Ofens) häufig der Anteil von alternativen Brennstoffen limitiert, um die Prozessunsicherheit besser kontrollieren zu können. Wenn zum Beispiel von einer



Seite 98





durchschnittlichen Fördermenge eines alternativen Brennstoff von 15t/h ausgegangen wird und man in einer entsprechenden Studie die Bandbreite der Feuchtigkeitsschwankungen des geförderten Material einbezieht, so ergeben sich Prozessdaten wie in der folgenden Abbildung dargestellt. Abbildung 84 zeigt Links das Histogramm von aufgenommenen Materialfeuchten über einen Zeitraum von 100 Stunden, welche jeweils durch Probenahme und Laboranalyse bestimmt wurden. Es ergibt sich hier näherungsweise eine Gauß'sche Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Feuchte in Bezug auf einen Mittelwert von ca. 15%. Dem gegenüber zeigt der rechte Graph in Abbildung 84 die zugehörige Schwankung des Energieeintrages. Es ist zu erkennen, dass hier selbst in einem relativ kurzen Zeitraum, große Schwankungen auftreten können.



Abbildung 84: Einfluss der Feuchte auf den Energieeintrag: Links: Histogramm der im Labor bestimmten Materialfeuchte; Rechts: Schwankung des Energieeintrages in einem Testzeitraum

Es wurde ein Ansatz entwickelt, in dem ein bestehendes Förderorgan um ein zusätzliches sensorisches Element zur Echtzeitbestimmung der Materialfeuchte ergänzt wurde. Hierbei wird auf Basis der erfassten Feuchte des Materials und eines statistischen Modells der Brennwert des Materials geschätzt und somit eine entsprechende Korrektur der Dosierung vorgenommen. In der folgenden Abbildung 85 sind die rein gravimetrische Dosierung (Abbildung 120 – (a)) und der verbesserte sensorbasierte Ansatz (Abbildung 120 – (b)) gegenübergestellt.



Abbildung 85: Einführung eines Ansatzes für eine sensorbasierte Dosierung; (a) – Rein gravimetrische Dosierung auf Basis des Materialgewichts; (b) Einbezug der Materialfeuchte zur Abschätzung des Brennwertes



Der klassische regelungstechnische Ansatz, wie er bereits in Arbeitspaket AP2 (siehe auch Abbildung 24) eingeführt wurde, wurde nun auf Basis der zur Verfügung stehenden Feuchtemessung entsprechend erweitert, wobei auf Basis der Ergebnisse aus Abbildung 79 ein simples Modell zur relativen Entwicklung des Brennwertes entwickelt wurde, so dass dieser dann als eigentliche Regelgröße genutzt werden kann. Hierzu wurde zunächst auf Basis der Vorliegenden ein Brennwertanpassungsfaktor für unterschiedliche Trocknungseffizienzen aus den vorliegenden Daten bestimmt (siehe Abbildung 86). Auf dieser Basis konnte dann ein statistisches Modell abgeleitet werden, welches für einen definierten eingehenden Feuchteanteil in Bezug auf eine definierte Grundfeuchte von 15% eine Brennwertanpassung bestimmt.



Abbildung 86: Definition eines Brennwertanpassungsfaktors für unterschiedliche Trocknungseffizienzen hier am Beispiel für Ersatzbrennstoff abgeleitet aus Plastikfolien

Das Modell zur Berechnung des angepassten Brennwertes B* [kJ/t] auf Basis der Feuchte H [%] und des Grundbrennwertes bei 15% Feuchte sei nachfolgend dargestellt.

$$B^* = B \cdot P(H) = B \cdot (1,1423 + 0,00012 \cdot H - 0,0006 \cdot H^2)$$
(45)

Hierbei wurde mit P(H) eine statistische Anpassungsfunktion aus den Messdaten abgeleitet, welche den entsprechenden Brennwertanpassungsfaktor auf Basis der Feuchte definiert. Der generelle Zusammenhang ist nachfolgend dargestellt.



Abbildung 87: Modell zur Anpassung des Brennwertes auf Basis der gemessenen Materialfeuchte



-Seite 100

vdz

Kima Automatisierung GmbH Es ist dann möglich, den eigentlichen Regelkreis um eine weitere Stufe einer Kaskade zu erweitern, so dass der Brennwertregler für die nachgelagerten Regelstufen den Sollwert für den Massenfluss vorgibt. In Bezug auf eine spätere Implementierung ist es derzeit noch notwendig, die entsprechende Funktion P(H) jeweils auf das entsprechende Material zu kalibrieren, da das Modell als einzigen Grundparameter die Feuchte als anpassungsrelevant betrachtet und des Weiteren einen absoluten Referenzwert für die Basisfeuchte bei 15% benötigt (B₁₅ [kJ/t]). Für den in Abbildung 85 dargestellten Dosieransatz kann also nun auf Basis des Brennwertes des Materials bei einer Feuchte H [%] (B_H [kJ/t]) und dem einzustellenden Brennstofffluss \dot{B} [kJ/h] der notwendige Massenfluss \dot{m} [t/h] wie folgt definiert werden:

$$\dot{m} = \frac{\dot{B}}{B_H} = \frac{\dot{B}}{B_{15} \cdot P(H)} = \frac{\dot{B}}{B_{15} \cdot (1,1423 + 0,00012 \cdot H - 0,0006 \cdot H^2)}$$
(46)

Die Validierung des Ansatzes fand auf Basis des Simulationstools statt und wurde im Rahmen des Arbeitspaketes AP5.4 umgesetzt.

Neben der Optimierung der grundlegenden Dosierung von alternativen Brennstoffen auf Basis der Integration einer Feuchtemessung, wurde außerdem ein Konzept zur globalen Maximierung des Einsatzes von alternativen Brennstoffen erarbeitet und implementiert. Hierbei wird eine möglichst komplexe und auf Basis realer Anlagenkonzepte (siehe auch Abbildung 76) konzipierte Anlage zum Handling von Ersatzbrennstoffen in das Simulationsmodell integriert, so dass nachfolgend eine Untersuchung von möglichen Optimierungsansätzen auf Basis des Models ermöglicht wird. Um den sensorbasierten Ansatz hierbei im Rahmen der Simulation abbilden zu können wurden zunächst spezifische Sensorelemente der Modulbibliothek der Simulationsumgebung hinzugefügt. Diese beinhalten neben der grundlegenden Möglichkeit zur Bereitstellung von Messwerten aus dem MainBus oder FuelBus auch eine Integration von spezifischen Sensormodellen zur Abbildung der zugrundeliegenden Übertragungsfunktionen. Somit wird es ermöglicht im Rahmen der Evaluierung und Verifikation von Optimierungsansätzen auch mögliche Abbildungsfehler der eingesetzten Sensorik einzubeziehen. Hier wurde zunächst in jedem Sensor ein einfaches Modell zur Nachbildung des stochastischen Fehleranteils (Sensorrauschen) s(t) auf Basis von Gauß'schem weißen Rauschen implementiert.

Des Weiteren wurde ein Offset-Fehler ergänzt, so dass sich der generelle Zusammenhang zwischen der physikalischen Prozessgröße M(t) und dem Sensorwert m(t) wie folgt darstellt:

$$m(t) = (M(t) + o) + s(t) = (M(t) + o) + s(t)$$
(47)

Es ergibt sich folglich das in Abbildung 88 dargestellte generalisierte Sensormodell, welches durch Angabe des Erwartungswertes und der Standardabweichung der zugrundeliegenden Gauß'schen Wahrscheinlichkeitsverteilung parametrierbar ist. Die Abbildung von systematischen und stochastischen Messfehlern ist für die Entwicklung von Regelalgorithmen auf Basis der Simulationsumgebung unumgänglich, da ansonsten die Robustheit der Algorithmen gegenüber typischem Prozessrauschen nur unzureichend validiert werden kann.



-Seite 101







Abbildung 88: Generalisiertes Sensormodell

Es wurde nachfolgend eine angepasste Variante des in Abbildung 76 dargestellten Sensorkonzeptes innerhalb der Simulationsumgebung umgesetzt. Hier wurde ein Ansatz auf Basis von vier Brennstoffen (Kohle als Primärbrennstoff, aufbereiteter Plastikabfall, Reifenschnitzel und Biomasse als alternative Brennstoffe) gewählt, so das auf Basis dieses Modells der generelle Einsatz von alternativen Brennstoffen simulativ evaluiert werden kann. Das zugehörige Modell soll nachfolgend auch zur exemplarischen Implementierung eines Fuzzy-basierten Ansatzes zur möglichen automatischen Maximierung des Einsatzes von alternativen Brennstoffen genutzt werden. Da im Zementwerk von Spenner Zement aus prozesstechnischen Gründen derzeit keine alternativen Brennstoffe am Drehrohrofen angewandt werden, wurde hier bei der Architektur der Anlage bewusst von einer Umsetzung der Anlagentechnik bei Spenner abgesehen. Abbildung 89 zeigt das implementierte Modell.







Abbildung 89: Implementierung einer Anlage zur Annahme, Lagerung, Förderung, Aufbereitung und Dosierung von alternativen Brennstoffen innerhalb des Simulationstools



Seite 103



Als exemplarischer regelungstechnischer Ansatz wurde ein Fuzzy-basiertes Regelsystem implementiert, welches die typischen wesentlichen Prozessgrößen zur Beherrschung des Verbrennungsprozesses beinhaltet. Hierzu gehören insbesondere die eigentlichen Prozessregelgrößen zur Sicherung der Produktgualität (z.B. Flammen- oder Produkttemperatur), sekundäre Prozessanforderungen (z.B. die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten (z.B. Chlor, NOx, etc.), sowie Sensorgrößen hinsichtlich der Brennstoffqualitäten (z.B. Feuchte, Fremdstoffanteil, etc.). Als generelle Regelgröße wurde außerdem eine Maximierung des Anteils von alternativen Brennstoffen am Gesamtbrennstoff-mix entsprechend implementiert, so dass bei einer Anlage mit n alternativen Brennstoffvolumenströmen [Q1...Qn] [m3/h] und einem Primärbrennstoff QP [m3/h] (in der Regel Kohle) zum einen der Gesamtbrennstoffeintrag minimiert und der Anteil der alternativen Brennstoffe maximiert werden soll. Als Zielgröße gilt dann folgendes:

$$min\left\{Q_P + \sum_{i=1}^n Q_i\right\} \quad \bigwedge \quad max\left\{\frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{Q_P + \sum_{i=1}^n Q_i}\right\} \tag{48}$$

Die grundlegende Implementierung basiert auf der generellen Struktur eines Fuzzy-Regelsystems. Um den Prozess im Rahmen dieses Berichtes zu beschreiben, soll ein vereinfachtes Modell des Reglers an dieser Stelle in Form eines generellen Blockschaltbildes dargestellt werden. Hierbei wird eine Menge von Eingangsgrößen zunächst auf einen Wertebereich der Grundmenge der zugehörigen linguistischen Variable skaliert. Hierbei werden die definierten Fuzzy-Mengen (Sets) eingesetzt, so dass ein Zugehörigkeitsgrad für jede Teilmenge bestimmt wird. Dieser Vorgang wird nachfolgend stets als Fuzzyfizierung bezeichnet. Nachfolgend erfolgt die Inferenz auf Basis einer Regelmenge und der zugehörigen Prämissenauswertung durch Akkumulation (z.B. Max.-Min.der einzelnen Zugehörigkeitsfunktionen. Um nachfolgend einen Inferenz) spezifischen Ausgangswert je Ausgangsvariable zu bestimmen, bedarf es am Ausgang des Reglers der sog. Defuzzifizierung der unscharfen Menge der linguistischen Ausgangsvariablen auf Basis der Schwerpunktmethode. Abbildung 90 zeigt beispielhaft die Konzeptionierung des Reglers am Prozessgröße "Materialtemperatur [°C]" und Beispiel der tм der zugehörigen Zugehörigkeitsfunktionen in den einzelnen Abschnitten. Hierbei wird auf Beispiel der Materialtemperatur ein Sollwert für die Zuführung der beiden Brennstoffarten durch den Fuzzy-Regler definiert.



Abbildung 90: Blockdiagramm des Fuzzy-basierten Reglers zur Maximierung des Einsatzes von alternativen Brennstoffen



-Seite 104



2.1.5.4 AP5.4: Betrieb der kalorischen Förder- und Dosieranlage

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden die in Arbeitspaket AP5.3 entwickelten Ansätze zur sensorbasierten Regelung mit Hilfe des entwickelten Simulationstools in Matlab/Simulink entsprechend modelliert und das Verhalten der Anlage simuliert. Hierzu wurde in einem ersten Ansatz der Betrieb des Dosierorgans ohne Nutzung der feuchte-basierten Schätzung des Brennwertes simuliert, so dass sich eine rein gravimetrische Dosierung auf Basis des Massenflusses [kg/h] ergibt. Dabei wurde eine Variation der Eingangsfeuchte des Materials simuliert. Hierzu wurde ein Trockner in der Zuführung integriert, welcher auf Basis eines zuvor definierten Effizienzprofils über der Zeit unterschiedliche Materialfeuchten generiert. Auf dieser Basis wurde dann das Modell um die Nutzung der Feuchte zur Schätzung des Brennwertes ergänzt. Hierbei wurde als zusätzliche Kaskade des bereits im Grundmodell implementierten Regelkreises zur Stabilisierung des Massenstroms ein Brennwert-Regler ergänzt, welcher auf der obersten Ebene nun eine Stabilisierung des Brennwertstroms realisiert. Abbildung 91 zeigt das erweiterte Simulink-Modell inklusive der grundsätzlichen Regelstruktur auf Basis eines PID-Reglers.



Abbildung 91: Simulink-Modell zur Simulation des feuchte-basierten Dosieransatzes für alternative Brennstoffe

Auf Basis der in AP5.3 beschriebenen aufgenommenen Feuchtevariationen (siehe auch Abbildung 84) wurde ein entsprechendes Signal zur Variation der Materialfeuchte in der Simulation entwickelt, so dass hier die typische Bandbreite der Schwankungen im Rahmen der Simulation abgebildet wird. Auf dieser Basis konnte eine Validierung und Verifikation des Regelungskonzeptes mit Hilfe des Simulationstools durchgeführt werden. Hierbei sollen die Ergebnisse des gravimetrischen Systems (siehe Abbildung 85 – (a)) mit dem feuchte-basierten erweiterten Regelungskonzept (siehe Abbildung 85 – (b)) verglichen werden. Die nachfolgenden Graphen in Abbildung 92 zeigen einen Vergleich zwischen der klassischen nicht-sensorbasierten Dosierung (oben) und des erweiterten Regelkonzeptes auf Basis der Feuchte (unten). Es ist deutlich zu erkennen, dass bei der rein gravimetrischen Dosierung es auf Grundlage der Feuchtigkeitsvariation zu einer Schwankung des eingetragenen Brennwertes kommt, da der eingetragene Massenfluss konstant bleibt. Dies ist die einzige Größe die im Rahmen des Regelkonzeptes auf Basis von Prozessparametern nachgeregelt wird (gravimetrische Dosierung).

Im Vergleich hierzu kann der Ansatz auf Basis einer Brennwertschätzung durch Nutzung der Feuchte die Schwankungen des Brennwerteintrages entsprechend reduizieren (siehe Abbildung 92 – (b)). Hierbei wird der Massenfluss je nach gemessenen Feuchtegrad angepasst und entsprechend optimiert, so dass ein deutlich stabilerer Energieeintrag realisiert werden kann.



-Seite 105





Abbildung 92: Vergleich von klassischer (a) und sensorbasierter (b) Zufuhr von alternativen Brennstoffen und der damit verbundenen Fluktuation des Energieeintrages.

Auf Basis der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erzielten Ergebnisse wurde bereits ein Ansatz zur Umsetzung des entsprechenden Konzeptes im Rahmen realer Anlagen entwickelt, welcher in der Folge zu einer entsprechenden Umsetzung im Rahmen von Kundenprojekten genutzt werden soll. Details hierzu seien in AP7 im Rahmen des wirtschaftlichen Transfers der Forschungsergebnisse näher dargestellt.

Neben der Implementierung und Erprobung des Ansatzes zur feuchte-basierten Brennstoffregelung wurde auch der bereits in AP5.3 vorgestellte Ansatz zur Fuzzy-basierten Maximierung des Einsatzes von alternativen Brennstoffen im Rahmen des Projektes simulationstechnisch untersucht. In der nachfolgenden Abbildung ist einer der implementierten Fuzzy-Regler im Simulink-Modell dargestellt, wobei im Rahmen dieses Berichts ein einfaches Modell auf Basis von einem Primärbrennstoff (hier: Kohle) und einem alternativen Brennstoff zur Verdeutlichung der Ergebnisse dargestellt werden soll. Der Vorteil bei der Nutzung eines Fuzzy-basierten Reglers ist die einfache Erweiterung des



- Seite 106 -





Regelkonzeptes auf mehrfache Ein- und Ausgangssysteme (Multiple Input – Multiple Output Systeme – MiMo-Systeme), welche auf Basis von konventionellen Regelalgorithmen deutlich aufwändiger in ihrer Implementierung wären. So können die bereits entwickelten Ansätze durch entsprechende Erweiterungen des Systems und Formulierung zusätzlicher Regeln auf Basis linguistischer Variablen in Zukunft weiter verfeinert werden.



Abbildung 93: Fuzzy-Regler zur Optimierung der Energiezufuhr zum Drehrohrofen

Zur einfachen Validierung des Ansatzes wurden mit Hilfe des entwickelten Simulationstools entsprechende Szenarien erprobt und validiert. Nachfolgend sei beispielhaft ein Ergebnis des in Abbildung 90 gezeigten Szenarios dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass der implementierte Regler auf Basis der zugrundeliegenden Regeln den Anteil der alternativen Brennstoffe am Gesamtenergieeintrag über der Zeit maximiert und gleichzeitig die Material- bzw. Flammentemperatur auf die entsprechende Sollwerte einregelt. Der Fuzzy-basierte Ansatz wurde daher als grundlegend positiv bewertet.



Abbildung 94: Simulationsergebnisse zur Maximierung des Einsatzes von alternativen Brennstoffen



DIMATTED 🕅



Abschließend lässt sich festhalten, dass die im Rahmen des Arbeitspaketes AP5 erarbeiteten Ansätze zur modellbasierten Optimierung der Brennstoffregelung mit Hilfe des entwickelten Simulationsframeworks hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit validiert und verifiziert werden konnten. Während der feuchtigkeitsbasierte Ansatz zur kalorischen Dosierung von alternativen Brennstoffen auch bereits auf Basis realer Messwerte evaluiert werden konnte, steht eine solche Studie für den Fuzzy-basierten Ansatz zur Maximierung alternativer Brennstoffe noch aus, da die Durchführung eines solchen Vorhabens einen großen Eingriff in die produktions-technischen Abläufe der Zementproduktionen bedeuten wurde. Daher sollen die oben genannten Ansätze zunächst, nach einer weiteren generellen Validierung der Simulations-umgebung und der hinterlegten Modelle, weiter simulativ optimiert werden. Hierbei wird das entwickelte Framework einen großen Beitrag zum Transfer der gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis darstellen. Da der gewählte Fuzzy-Ansatz strukturbedingt große Anzahl Parametern zur Optimierung eine von beinhaltet (Zugehörigkeitsfunktionen, Inferenz, etc.), kann hier langfristig das bestehende System durch Algorithmen aus dem Bereich des maschinellen Lernens ergänzt werden, so dass die notwendigen Parameter datenbasiert automatisch optimiert werden können.

2.1.6 AP6: Erprobung und Validierung der Ergebnisse am Beispiel eines Zementwerks (VDZ)

Zur Erpobung und Validierung des erstellten Modells wurde das Zementwerk Spenner Erwitte in seinen wesentlichen Komponenten abgebildet. Eine Übersichtsdarstellung des Simulinkgesamtmodells mit den Teilen Rohmühle ("Raw Mill"), Drehrohofenanlage mit Vorwärmer, Kalzinator und Klinkerkühler ("Kiln"), sowie abschließend der Zementvermahlung ("Cement Mill") findet sich in Abbildung 95. Im folgenden wird auf die Beschaffung der zur Validierung benötigten Daten, sowie die Parametrisierung eingegangen. Da die Verschaltung zu einem Gesamtsystem momentan noch zu rechenintensiv ist, wurden die Teilanlagen einzeln erprobt. Dies wird zum Abschluss exemplarisch am Beispiel der Zementmahlanlage ausgeführt.






Abbildung 95: Simulinkdarstellung des Gesamtsystems "vom Steinbruch bis zum Zementsilo"









2.1.6.1 Datenbeschaffung (VDZ / KIMA A / KIMA P / Di Matteo)

Für die Auslegung, Parametrisierung und Validierung der entwickelten Simulationsmodule wurden im Laufe des Projektes Daten der Fa. Spenner abgefragt und genutzt. Dazu zählen in erster Linie Prozessdaten. Weiterhin wurden aber auch Anlagenschaltbilder, technische Zeichnungen und Labordaten mit in die Modellentwicklung einbezogen. Die Prozessdaten wurden aus den bereitgestellten Datenbanken ausgelesen und für die weitere Verarbeitung in Matlab konvertiert. Ausgehend von den Gesprächen und den Erprobungssessions wurden weiterhin auch mündlich Informationen oder weiterführende Daten (wie Graphen und Auswertungen aus dem Leitsystem) bereitgestellt. Abbildung 96 und Abbildung 97 illustieren exemplarisch unterschiedliche Datenquellen, die für die Parametrisierung des Sichters in dem ZM3-Mühlenkreislauf herangezogen wurden.



Abbildung 96: Datenquellen eines Sichters: Leitstandbild.









a) Technische Zeichnung

b) 3D Ansicht







Abbildung 97: Datenquellen eines Sichters (Fortsetzung): a) und b) Geoetriedaten des Sichters im ZM3-Mühlenkreislauf; c) Typ-Schild mit wichtigen Kenndaten; d) Kennlinien des Sichtergebläse aus der Auslegungsrechnung des Sichters [42].

Um die Zementmühle detailliert darstellen zu können, wurde eine mehrtägige Mühlenuntersuchung durchgeführt. Hier wurde das Prozessverhalten der Mahlanalge vor Ort beurteilt. Zu diesem Zweck wurde der Sichter beprobt und Trenncharakteristiken bei unterschiedlichen Betriebspunkten aufgenommen. Zudem wurde der Volumenstrom durch Prandlt-Messungen an verschiedenen Punkten im System bestimmt. Das Aufgabematerial und das Fertiggut wurden beprobt und durch Siebanalyse und Lasergranulometrie charakterisiert.







Abbildung 98: Beprobung der Mahlanlagen: 2.Kammer.

Bei der direkten Untersuchung der Mahlanlagen wurde die Mühle begangen und Proben aus dem Innenraum genommen. Die Charakterisierung der Proben wurde im Labor durch Siebung, Lasergranulometrie und spezifische Oberfläche durchgeführt. Aus den Korngrößenverteilungen wurden Abmahlkurven erzeugt, welche zur Parametrisierung des Zerkleinerungsmodells benötigt werden. In der Abbildung 98 sind beispielhaft Ergebnisse einer Siebanalyse aus der ersten Kammer dargestellt.

2.1.6.2 Parametrisierung und Validierung der Mahlanlagen (VDZ)

Am Beispiel der Zementmühle wird ausführlich auf die Parametrisierung und Validierung des Systems eingegangen. Für die Rohmühle, aber auch das Ofensysten, wurde ein analoges Vorgehen gewählt, welches hier nicht im Detail erläutert wird.

Die Auswertung der vorhandenen und gemessenen Daten hat gezeigt, dass sich das gewählte Modell recht zuverlässig für einen vorgegebenen Betriebspunkt parametrisieren lässt, vgl. Abbildung 100. Die Parametrisierung lässt zudem auch den Betrieb der Anlage in weiteren industriell relevanten Bereichen zu.

Zur Parametrisierung des Mahlkreislaufs wurden zwei einfache Modelle erstellt und dann einzeln bearbeitet. Im ersten Modell wurde der Sichter mit einer konstanten Materialaufgabe versehen. Die Fitting-Parameter des Sichtermodells können während der Laufzeit verändert und so an einen Betriebspunkt angepasst werden. Mit Hilfe des hinterlegten Sichtermodells können dann typische Parameter wie Sichterdrehzahl und Luftvolumenstrom variiert werden, um unterschiedliche Korngrößenverteilungen bzw. Feinheiten herzustellen.

Im zweiten Parametrisierungs-Modell wurde die Kugelmühle mit einer Materialaufgabe versehen (Abbildung 99), die das Rückgut des Sichters und den Klinker gemischt auf die Mühle aufgibt. Die Korngrößenverteilung des Rückguts entspricht der Korngrößenverteilung, die im Mühlenversuch



-Seite 112





gemessen wurde. Die Korngrößenverteilung des Klinkers entspricht ebenfalls der des gemessenen Materials.





Das Transportmodell benötigt verschiedene Konduktivitätsfaktoren für den Transport in der Mühle (K1), den Transport durch die Übertrags-/Austragswand (K2) und den Transport aus der Wand (K3) heraus. Daraus ergeben sich 6 Konduktivitätsfaktoren für 2 Mahlkammern, deren Einfluss auf das Zerkleinerungsergebnis und auf den Füllgrad in den Mahlkammern durch Parametervariation untersucht wurde. Die Faktoren wurden dabei zwischen 0.2 und 0.5 in äquidistanten Schritten von 0.1 variiert. Es zeigt sich eine deutliche Äbhängigkeit des Füllgrads vom Transportverhalten (Abbildung 100, oben).



Abbildung 100: Parametervariation der Konduktivitätsfakoren in der Mühle; oben: Füllgrad der zweiten Mahlkammer, unten: Zugehöriger Lageparameter nach RRSB des Mahlproduktes (Indikator für die Feinheit)

Das Transportverhalten hat jedoch auch Einfluss auf die Zerkleinerung in der Mühle (Abbildung 100 unten). Maßgeblich wird das Zerkleinerungsverhalten jedoch durch die Zerkleinerungscharakteristik



-Seite 113

vd7

DIMATTED 🛞



[9] vorgegeben. Diese wird wie zuvor erläutert auf Basis der Daten aus dem Mühlenaudit berechnet (Abbildung 31) und dem Modell zur Verfügung gestellt.

Auf Grundlage der Parametrisierung und Validierung der einzelnen Module des Zement-Mahlkreislaufs (Sichter und Kugelmühle) wurde das Teilmodell des Mahlkreislaufs parametrisiert. Zur Validierung des Mahlkreislaufs waren verschiedene Anpassungen des Quellcodes des Gasmodells und der Transportorgane notwendig.



Abbildung 101: Verschaltung des Sichterkreislaufs im Mahlkreislauf der Zementmühle

Zur Validierung des Modells der Mahlanlage wurden Parametervariationen durchgeführt. Variiert wurden die Aufgabemenge (in Silo das OutputLevel) und die Sichterdrehzahl (in Separator 18 das setSeparationLevel).

Parametervariation 1 (Abbildung 102) zeigt die Füllung der Mühle mit Mahlgut (Anfahrzustand). Bei etwa 3000 Sekunden zeigt die Mühle einen idealen Mahlgutfüllstand (Füllstand = 1). In dieser Zeit wird mit erhöhter Aufgabemenge und maximaler Sichterdrehzahl gefahren. Die Frischgut-Aufgabemenge und die Sichterdrehzahl wurden nach der Anfahrzeit reduziert, um die Mühle nicht weiter zu füllen und einen idealen Mahlgutfüllstand zu halten.



vd7





Abbildung 102: Parametervariation 1: Zementmühle

Parametervariation 2 (Abbildung 103) zeigt die Variation des Sichters im Betrieb. Nach einem kürzeren Anfahrvorgang (1) ist die Mühle in Kammer 2 nicht vollständig gefüllt. Durch Reduktion von Aufgabemenge und Sichterdrehzahl wird der Materialfüllstand konstant gehalten (2). Es ist zu erkennen, dass der Mahlgutfüllstand innerhalb der Kammer 2 über die Mahlbahnlänge variiert. Aufgrund des potentialgetriebenen Transports fällt der Füllstand in Materialflussrichtung ab. Durch schrittweise Erhöhung der Sichterdrehzahl füllt sich die Mühle unterschiedlich schnell (3) (4). Entsprechend der Erhöhung der Sichterdrehzahl zeigte sich auch eine Reduktion des Lageparameters (x') der RRSB-Verteilung, das Fertiggut wurde also feiner. Bei Reduzierung der Sichterdrehzahl (5) sinkt die Feinheit wieder.



-Seite 115

vd7









2.1.6.3 Parametrisierung und Validierung der Rohmahlanlage (VDZ)

vdz

Das Vorgehen bei der grundsätzlichen Parametrisierung der Rohmahlanlage erfolgte analog zu dem bereits beschriebenen Prozess bei der Zementmühle. Da bei der Rohmahlung in der Regel keine starken Prozessveränderungen (wie z.B. bei einem Sortenwechsel an der Zementmühle) zu erwarten sind, vereinfacht sich die Parametrisierung. Die Kombination von Vorbrecher und Mühle,



-Seite 116-

DIMATTED



sowie der unbekannte Massenstrom im Steigschacht erschweren jedoch die Parametrisierung. Die Berechnung einer Tromp-Kurve ist hier nicht ohne weiteres möglich. Diese konnte jedoch aus historischen Messungen rekonstruiert werden. Durch isokinetische Absaugung konnte eine Staubprobe aus dem Steigschacht der Mühle gewonnen und zur Berechnung genutzt werden. Wesentliche Kenngrößen für die Anpassung der Parameter sind daher die Massenströme nach Sichter sowie die Aufgabekorngrößenverteilung der Kugelmühle.



Sichter Trompkurve

Abbildung 104: Trenncharakteristik des Sichters der Rohmühle

Neben der Zerkleinerung ist die Trocknung des Mahlguts eine wesentliche Aufgabe der Rohmühle. Hierzu werden heiße Ofenabgase eingesetzt. Die Enthalpiebilanzen, der Wärmeaustausch und die relevanten chemischen Reaktionen wurden bereits hinreichend beschrieben. Im Rahmen der Parametrisierung der Gesamtanlage wurden die Modellparameter zusammen mit den Volumenströmen des Gasmodells schrittweise an den realen Prozess angepasst.

2.1.6.4 Parametrisierung und Validierung des Brennprozesses (VDZ / KIMA P)

Die Parametrisierung von komplexen Systemen, wie dem Ofensystem eines Zementwerks, ist sehr aufwendig. Der zunächst kleinteilige Ansatz, der bereits in der Parametrisierung der Zementmühle dargestellt wurde, ist hier sehr hilfreich. So wurde das Gesamtsystem "Brennprozess" im 1. Schritt in die Teilmodelle:

- Ofen
- Kalzinator
- Vorwärmer
- Kühler





unterteilt. Diese Teilmodelle wurden einzeln vorparametrisiert. Daraufhin wurde ein weiteres Teilmodell zusammengeschaltet, welches den Gas- und Feststofftransport in Kalzinator und Vorwärmer simuliert.

Rohmehl Vorbehandlung im Vorwärmer Kalzinator-Verbund

Zur weiteren Parametrisierung wurde das Ofenmodell genutzt, wobei der Ofen zunächst durch ein einfaches Rohr ersetzt wurde (Abbildung 105). Die Temperatur nach dem Ofen und nach der Tertiärluftleitung wurde angepasst, so dass schnell ein stabiler Ofenbetrieb simuliert werden kann. Genauso wurde die chemische Zusammensetzung des Ofengases angepasst. Mit diesem Modell konnte der Druckverlust des Systems eingestellt werden und eine detailiertere Parametrisierung durchgeführt werden. Darüber hinaus konnten wesentliche Kenngrößen des Ofensystems validiert werden, hierzu gehören u.a.:

- Verhalten bei Änderung der Brennstoffe am Kalzinator
 - o Temperaturverlauf Kalzinator-Vorwärmer
 - o Vorentsäuerungsgrad / Vorkalzinierungsgrad
 - Emissionen (CO,NO)
 - o Sauerstoffgehalt
- Verhalten bei Änderung des Wärmetauschergeläses
- Einfluss der Rohmehl-Aufgabemenge









Abbildung 105: Modell Kalzinator-Vorwärmer-Kühler zur Validierung

vdz

Seite 119



DIMATTED 🛞



Zur Parametrisierung der Druckverluste und des Gasmodells wurden vor allem die Kennlinien des Wärmetauschergebläses betrachtet. Abbildung 106 zeigt die Anlagen und Gebläsekennlinie im stabilen Betrieb. Der Volumenstrom des Wärmetauschergebläses lässt sich im typischen Bereich einstellen (1,3-1,7 Nm³/kg_{Klinker}). Das Abgasgebläse lässt sich bis zu einem Volumenstrom einstellen, der bei etwa 1,5 Nm³/kg_{Klinker} entsteht.



Abbildung 106: Anlagen- und Gebläsekennline des Ofen-Systems

Die Reaktionen haben starken Einfluss auf weite Teile des Systems:

- Temperaturen
- Volumenstrom und damit direkt auf das Gasmodell
- Chemische Zusammensetzung der Gas- und Stoffströme, Emissionen

vd7

Prinzipiell zeigten die dargestellten Reaktionen schnell die richtige Tendenz. Es war in einigen Fällen jedoch eine Feinjustierung notwendig, da die Bedingungen im Zementwerk nicht denen in Versuchsständen im Labor entsprechen. Ein gutes Beispiel ist hier die Strähnenbildung im Kalzinator. Es ist bekannt, dass es hier zu Luftströmungen unterschiedlicher Temperatur und unterschiedlichen Sauerstoffgehalts kommt, was zu nicht idealen Bedingungen im Querschnitt des Systems führt. Hier war daher die Einführung von Wirkungsgraden bei der Wärmeübertragung oder eine Anpassung von Reaktionsgeschwindigkeiten erforderlich.

Das Modell wurde so parametrisiert, dass die wesentlichen Kenngrößen mit den Werksangaben übereinstimmen. Nach einer Anlaufphase stabilisiert sich der Kalzinator (ab ca. 500 Sekunden). Die



-Seite 120



Gastemperaturen sinken aufsteigend entlang des Vorwärmers. Das Brenngut wird entsprechend erwärmt. Die spezifische Verbrennungsenergie ist mit etwa 1700 kJ/kg_{Klinker} noch zu niedrig, um eine ausreichende Vorkalzinierung zu erreichen.

In einer Parametervariation (ab 2000 Sekunden) konnte durch die Erhöhung der Verbrennungsenergie (auf etwa 1900 kJ/kg_{Klinker}) am Kalzinator, die Gas-Temperatur im Vorwärmer erhöht werden (Abbildung 107)



Abbildung 107: Gastemperaturen in den Zyklon-Vorwärmerstufen unter Variation des Brennstoffgehalts am Kalzinator

Im Anfahrbetrieb des Modells werden die Gebläse auf volle Leistung gebracht. Nach etwa 200 Sekunden wird dann Mehl auf den Vorwärmer aufgegeben. Abbildung 107 zeigt die Massenstöme zum Kalzinator und zum Ofen. Der Heißmehl-Massenstrom zum Ofen ist aufgrund der Vorentsäuerung im Kalzinator geringer als der Massenstrom in den Kalzinator. Mit steigendem Brennstoffgehalt ändern sich die Ströme. Ist der Brennstoffgehalt zu gering, zeigt sich ein niediger Vorentsäuerungsgrad des Rohmehls. Wird mehr Brennstoff im Kalzinator verbrannt, erhöht sich auch der Vorkalziniergrad. Es wird entsprechend mehr Kohlenstoffdioxid emittiert.



-Seite 121





Abbildung 108: Heißmehl-Massenströme auf den Kalzinator und den Ofen unter Variation des Brennstoffgehalts am Kalzinator

Um den Ofen- und Kalzinatorbetrieb beurteilen zu können, ist der Sauerstoffgehalt eine wichtige Kenngröße. Abbildung 109 zeigt den Sauerstoffgehalt nach dem Kalzinator. Im Kalzinator wird zum einen der verfügbare Sauerstoff verbrannt, zum anderen wird frischer Sauerstoff den Verbrennungsreaktionen durch die Tertiärkluft zur Verfügung gestellt. Üblicherweise liegt der Sauerstoffgehalt nach dem Kalzinator bei 1,5-3 Vol.-%, dies kann je nach Betriebsweise und Falschlufteintrag jedoch unterschiedlich sein.







Abbildung 109: Sauerstoffkonzentration in Kalzinator

Durch die Verbrennungsreaktionen im Ofen und Kalzinator entstehen Emissionen. Besonders in schnellen Anfahrvorgängen können die entstehenden Emissionen unnötig hoch sein. Abbildung 110 zeigt die Stickoxid-Emissionen im Anfahrvorgang des Modells, ab etwa 400 Sekunden zeigt sich eine Stabilisierung. Kohlenstoffmonoxid verhält sich ähnlich. Der Anfahrvorgang im Teil-Modell entspricht nicht dem normalen Vorgehen im Zementwerk. Besonders da im Modell nicht mit Anlagenschäden zu rechnen ist, kann hier ein stark beschleunigtes Vorgehen gewählt werden, was Rechenkapazitäten schont.

Ab etwa 400 Sekunden stabilisieren sich die Emissionswerte. Für die Verbrennung ist zunächst ausreichend Sauerstoff verfügbar, was sich auf die Kohlenstoffmonoxid Emissionen auswirkt. Nach Anpassung des Kalzinatorbrennstoffs steht weniger Sauerstoff zur Verfügung und es entsteht mehr Kohlenstoffmonoixid und auch mehr Stickoxide. Im Zementwerk werden aktive NO_x-Reduktionsmaßnahmen genutzt, im dargestellten Modell sind diese nicht implementiert.







Abbildung 110: Stickoxid- (oben) und Kohlenstoffmonoxid-Emissionen (Mitte) unter Variation des Brennstoffgehalts am Kalzinator

Drehrohrofen

Vor allem wechselnde Betriebszustände, wie Anfahrvorgänge, sind dafür prädestiniert mittels eines Prozessmodells untersucht zu werden. Als Beispiel ist in Abbildung 111 die Untersuchung des Ausbrandverhaltens eines festen Brennstoffes über der Ofenlänge dargestellt.



DIMATTED 🛞





Abbildung 111: Expemplarische Darstellung des Abbrands über der Ofenlänge

Darüberhinaus kann das dynamische Ofenmodell auch den Einfluss verschiedener Ofenbedingungen auf die Feststoffzusammensetzung darstellen. Exemplarisch ist dies in Abbildung 112 über der Ofenlänge dargestellt.



Abbildung 112: Exemplarische Zusammensetzung des Festbetts entlang der Ofenachse

Klinkerkühler

Durch die Durchströmung mit angesaugter Außenluft wird der den Ofen mit > 1000°C verlassende Klinker bei Durchlaufen des Kühlers auf ca. 100°C heruntergekühlt. Der Verlauf der Klinkertemperatur über der Kühlerlänge ist in Abbildung 113 dargestellt.





Abbildung 113: Verlauf der Klinkertemperatur entlang des Kühlers

Durch die beiden Gebläse im System Ofen lassen sich die spezifischen Volumenströme auf übliche Werte einstellen. Hier wurde als Betriebspunkt ein spezifischer Volumenstrom von etwa 1,6 Nm³/kg_{Klinker} für das Wärmetauschergebläse eingestellt. Um den Luftüberschuss des Rostkühlers abzuführen wurde das Abgasgebläse auf etwa 1 Nm³/kg_{Klinker} eingestellt. Das Abgas wird aus dem hinteren Teil des Kühlers entnommen und ist daher kälter als das Gas zum Ofensystem(Abbildung 95). Es zeigt sich zudem eine Abhängigkeit der Abgastemperatur zur Klinker-Betthöhe. Die Temperatur im hinteren Teil des Kühlers steigt langsamer, da der Klinker hier erst später ankommt. Dementsprechend steigen erst Sekundär- und Tertiärlufttemperatur und dann die Abgastemperatur an.



Abbildung 114: Kühler Sekundärluft- / Tertiärluft- und Abgas-Temperatur

vdz





2.1.6.5 Validierung und Anpassung des Systemverhaltens der implementieren Fördersysteme (Di Matteo)

Basierend auf den entwickelten Simulationsmodulen der Fördersysteme wurden implementierungsbegleitend auf Basis einer praktischen Datenauswertung Szenarien zur möglichen Validierung und Verifizierung entwickelt. Hierbei sollten auf Basis realer Messdaten insbesondere unklare oder unsichere Elemente der Grundmodellierung einzelner Module spezifischer ausgewertet und damit die Abbildungsqualität der Simulationsmodule generell erhöht werden. Dazu war es notwendig für gegebenespezifischespezifische Fragestellungen spezifische Testaufbauten zu entwickeln und aufzusetzen, wobei bei der Konzeptionierung und Umsetzung teilweise auf bestehende Lagermaschinen der Fa. Di Matteo zurückgegriffen werden konnte. Nachfolgend sollen einige exemplarische Fragestellungen und die darauf rückzuführenden Optimierungen an den Simulationsmodulen auf Basis der erhobenen Daten dargestellt werden.

I. Untersuchung des Schöpf- und Eintragverhaltens beim Simulationsmodul Becherwerk

Wie bereits in der Darstellung des Simulationsmoduls Becherwerk unter AP2 dargestellt, erfolgt die Becherbefüllung zum einen über die direkte Befüllung auf Basis des eingetragenen Materialstroms und zum anderen über einen Schöpfvorgang im Becherwerksfuß, welcher sich auf Basis des aktuell akkumulierten Materials an dieser Stelle einstellt. Bei der Implementierung des entsprechenden Modells entstanden Fragen in Bezug auf die genaue Abbildung des Schöpfvorganges, da ein genaues Modell für den Anteil des Schöpfvorganges in Bezug auf den Materialzustrom und den resultierenden Becherfüllungsgrad nicht zur Verfügung stand. Des Weiteren war in diesem Kontext auch der genaue Einfluss auf den Energiebedarf des Förderorgans zu untersuchen.

Zur Untersuchung der zuvor genannten Aspekte wurde ein Teststand auf Basis eines verkürzten Versuchsbecherwerkes aufgebaut. In Abbildung 115 - (a) ist der eigentliche Versuchsaufbau des Becherwerkes dargestellt, wobei zusätzlich ein System zur kontrollierbaren Zuführung eines definierten Materialvolumenstroms (Abbildung 115 - (b)) aufgebaut werden musste um die aufgeworfenen Fragestellungen beantworten zu können.





(a)

(b)

Abbildung 115 – Teststand zur Validierung des Schöpfvorgangs an einem Becherwerk (a) inklusive Zuführungvorrichtung (b)



-Seite 127



Zur Validierung der Anpassung des Energiebedarfs auf Basis der anfallenden Schöpfarbeit wurde eine Untersuchung mit unterschiedlichen Materialien (hier: Schüttgütern) durchgeführt. Vor Beginn der Versuche wurde zunächst ein Materialsumpf im Becherwerksfuß angelegt, sodass eine Becherbahn entstand. Zusätzliches aufgegebenes Material diente folglich den Untersuchungen des Schöpfvorgangs. Vor jedem Versuchsdurchgang wurde eine vorher definierte Menge Material aufgegeben, die sich im ungünstigsten Fall im Fuß ansammeln konnte. Im ersten und zweiten Durchgang (DG) des Becherwerkes fand jeweils nur ein Schöpfvorgang mit Messaufnahme statt. Nach erneuter Materialaufgabe erfolgten abschließend drei Durchläufe. Zu beachten ist, dass die Stromaufnahme jeweils bei gleichbleibender Drehzahl des Motors stattfindet. Veränderungen der Fördergeschwindigkeit durch Verstellen der Drehzahl. führen zu einem geänderten Nenndrehmoment und Nennleistung. Um diese Fehler zu vermeiden, erfolgt die Änderung der Fördergeschwindigkeit mithilfe einer Anpassung des Übersetzungsverhältnisses. Die folgende Abbildung zeigt eine exemplarische Stromaufnahme für den dritten Durchgang beim Schöpfen von Sand und Granulat. Die Höhe der Maxima hängt dabei von der Fördergeschwindigkeit und Art des Bechers ab. Des Weiteren ist sie maßgebend für die spezifische Schöpfarbeit und die daraus resultierende erforderliche Zusatzleistung des Antriebs (siehe auch [41]).



Abbildung 116 – Exemplarischer Verlauf der Schöpfarbeit beim Schöpfvorgang abgeleitet von der aufgenommenen Stromaufnahme des angeschlossenen Motors

Auf Basis der Stromaufnahmen und der jeweils abgeleiteten spezifischen Schöpfarbeiten für unterschiedliche Fördergeschwindigkeiten bzw. Motordrehzahlen, und der Durchführung der Versuche für unterschiedliche Schüttgüter und Becherarten lässt sich dann in der Folge eine Übersicht der entsprechenden empirischen Daten generieren, welche in der nachfolgenden Abbildung dargestellt ist.





Seite 128

DIMATTED 🕅

vd7



Abbildung 117 – Speifische. Schöpfarbeit in Abhängigkeit der Fördergeschwindigkeit für unterschiedliche Schüttgüter und Becherformen

II. Untersuchung des Energiebedarfs von Band- und Gurtförderern

Bandförderorgans Im Rahmen der Implementierung des wurde ein neuartiges Energieberechnungsmodell für Gurt- bzw. Bandförderer zugrunde gelegt, welches im Gegensatz zu anderen bekannten Modellen auch schwer zu beschreibende Elemente wie den Bandwiderstand, bzw. Steigungsunterschiede mit einbezieht. Dieses Modell wurde von S. Zhang und X. Xia "A New Energy Calculation Model of Belt Conveyor" (2009) [1] beschrieben und von diesen bereits für Energieeffizienzbetrachtungen eingesetzt. Das angegebene Modell unterscheidet sich von anderen bekannten Energiebetrachtungen u.a. dadurch, dass die Dynamik der Bandbeladung und der Bandgeschwindigkeit berücksichtigt wird. Viele der anderen Modelle betrachten den Energiebedarf als eine statische Größe, da der berechnete Energiebedarf eher zu Auslegungszwecken als zu Zwecken der Energieoptimierung genutzt wird.

Auf Basis dieses Modells wurden im Rahmen dieses Projektes Vergleiche mit anderen typischen Modellen zur Energiebedarfsermittlung (z.B. DIN [2], ISO [3], JIS [4], etc.) bei Bandförderern angestellt. Um hierbei die unterschiedlichen Ansätze mit realen Messdaten vergleichen zu können, bedarf es der Untersuchung unterschiedlicher Ausprägungen eines Bandförderers. Da die notwendige Bandbreite im Rahmen von klassischen Versuchsständen nicht abzudecken ist, wurde hierzu auf Messdaten von realen Anlagen zurückgegriffen, die im Rahmen von Inbetriebnahmen systematisch gesammelt und in einer entsprechenden Datenbank hinterlegt wurden. Hierbei zeigte das neue Modell im Gegensatz zu den anderen Ansätzen geringere Abweichungen zu realen Messdaten (siehe auch Abbildung 118 – (a)). Somit lassen sich auf Basis dieser Untersuchungen und des betrachteten Energiemodells spezifische Energiebedarfe nach Abbildung 118 – (b) von Bandförderern für spezifische Fördergeometrien, Massenflüsse und Fördergeschwindigkeiten ableiten.



Abbildung 118: Energiebedarfsermittlung von Bandförderern: (a) Vergleich unterschiedlicher Energiemodelle von Bandförderern im Vergleich zu realen Messdaten für unterschiedliche Fördergeschwindigkeiten; (b) Energiebedarf eines Bandförderers für unterschiedliche Materialzuführungen und Bandgeschwindigkeiten

2.1.6.6 Erprobung der Modelle

Im Rahmen der Erprobungsphase wurden die entwickelten Modelle innerhalb des Konsortiums und insbesondere in Zusammenarbeit mit dem Anwendungspartner, der Fa. Spenner, getestet und in einem iterativen Prozess weiter angepasst. Coronabedingt war eine ausführlichere Vorort Erprobung



-Seite 129





nicht möglich. Es wurden daher alternativ Online Testphasen durchgeführt. Die Erprobung erfolgt dabei in mehreren Schritten:

1. Überprüfen der parametrisierten Modelle durch Variationsrechnung

Die Modelle wurden nach der in den vorherigen Kapiteln erläuterten Parametrisierung dazu verwandt, weitere Betriebszustände zu berechnen, die dann mit verfügbaren Prozessdaten abgeglichen wurden. Weiterhin wurden auch Betriebszustände simuliert, für die keine Prozessdaten vorliegen. Diese wurden qualitativ bewertet.

2. Diskussion des Modellverhaltens mit Fachexperten

Die Modelle wurden zum Teil als Stand-alone Modelle und zum Teil als vollständiges Modell-Interface-System in WinCC mit verfahrenstechnischen Fachexperten getestet und diskutiert. Hierzu zählen sowohl Experten für Mahltechnik und Brenntechnik (VDZ), Regelungstechnik (KIMA A + KIMA P) sowie Fördertechnik (DiMatteo). Neben der Überprüfung der berechneten Zahlenwerte wurde vor allem auch das Zeitverhalten der Anlage begutachtet. Im Rahmen der Diskussionen wurde geprüft, ob und wann sich das teilweise subjektive Gefühl einstellt, dass sich die Anlage real verhält. Hierbei spielen neben der Intensität von Auswirkungen vor allem Reaktionszeiten eine wesentliche Rolle. Die komplexen Zusammenhänge sind durch Auswertealgorithmen nur schwer zu erfassen.

3. Erprobung der Modelle mit externen Partnern

Die Modelle wurden im letzten Schritt mit der Fa. Spenner erprobt. Die erfahrenen Anlagensteuerer und -verantwortlichen können das Verhalten ihrer Anlagen auf Basis jahrelanger Erfahrung bewerten und kennen die Nuancen, die den Betrieb ihrer Prozesse von anderen, ähnlich aufgebauten Anlagen unterscheiden. Dieser Schritt der Erprobung stellt den höchsten Anspruch an die Modelle dar und zeigt, wie komplex das Anlagenverhalten im Detail sein kann.

Im Laufe der mehrstufigen Erprobung konnten Fehler beseitigt und Modelle schrittweise verbessert werden. Die Ergebnisse von Erprobungsläufen wurden vor allem bei der Parametrisierung genutzt. Es zeigt sich, dass die notwendigen Modellvereinfachungen dazu führen, dass nicht alle Effekte im Prozess vollständig abgedeckt werden können. Aber es konnte auch nachgewiesen werden, dass die Modelle grundsätzlich das Anlagenverhalten in den wesentlichen und für den Prozess relevanten Punkten korrekt abbilden. Dies gilt insbesondere auch für instationäre Zustände wie z.B. das Anund Abfahren von Anlagen. Dies sei exemplarisch für den Start der kalten und ungefüllten Zementmühle erläutert. Der Anfahrvorgang ist wesentlich durch das Transportverhalten der Mühle, den Verweilzeiten des Materials im Kreislauf und der Trennwirkung des Sichters bestimmt. Je nach Aufgabemenge und Sichtereinstellung füllt sich die Mühle unterschiedlich schnell und erreicht schließlich einen stabilen Betriebszustand. Im Rahmen einer ersten Erprobung zeigte sich, dass das Modell den Füllvorgang zu schnell abbildet. Dies wurde durch Parameteranpassungen korrigiert, bis der gesamte Prozess ein ähnliches Zeitverhalten aufwies, wie die von der Fa. Spenner bereitgestellten Anfahrkurven in Abbildung 119. Diese wurden weiterhin als Ausgangpunkt für weitere Variationsrechnungen genutzt, in denen eine Optimierung des Anfahrvorgangs untersucht wurde (Kapitel 2.1.6.4).

Die Modelle wurden zudem in den Vorlesungen "Verfahrenstechnik der Zementherstellung" und "Angewandte verfahrenstechnische Simulation" an der Hochschule Düsseldorf genutzt, um das Verhalten der Prozesse der Zementindustrie zu illustrieren. Weiterhin wurden Ansätze zur Prozessmodellierung im Rahmen der geschaffenen Modellstruktur erläutert und mit den



-Seite 130





Studierenden diskutiert. Die gewonnenen Erkenntnisse unterstützen vor allem die Weiterentwicklung des Systems in Richtung eines Schulungssimulators.



Abbildung 119: Verlauf des Anfahrvorgangs der Zementmühle der Fa. Spenner

Des Weiteren wurden die Modelle auch innerhalb des Konsortiums durch Anwendung auf verfahrenstechnische Fragestellungen, wie insbesondere in Kapitel 2.1.5.4 erläutert, erprobt.

2.1.7 AP 7: Weitere Forschungsfragen und Transfer

2.1.7.1 Entwicklung eines digitalen Prozesszwillings

Die im Rahmen des Projektes entwickelte Simulationsumgebung bildet den Ausgangspunkt für die Entwicklung eines hybriden digitalen Zwillings des Zementherstellungsprozesses. "Hybrid" bedeutet in diesem Fall, dass der digitale Zwilling das Prozessverhalten nicht nur rein auf Basis von Daten wiedergeben kann, sondern durch gut validierte chemische und physikalische Modelle unterstützt wird. Diese technische Weiterentwicklung kann zukünftig leistungsstärkere und robustere KI-Anwendungen ermöglichen und würde einen wesentlichen Fortschritt in der Digitalisierung der Zementindustrie und artverwandter Prozessindustrien darstellen.

Das Herzstück der Weiterentwicklung der bestehenden Simulationsumgebung zu einem modellgestützten "Digitalen Zwilling" ist die dynamische Parametrierung der chemischen, physikalischen und mathematischen Modelle. Diese würde durch die Integration von KI-Modellen realisiert werden. Der hybride, digitale Zwilling soll dabei mit seinem realen Zwilling, dem Prozess, über das Leitsystem verbunden werden und wird mit dessen historischen Daten bewirtschaftet. Durch die fortlaufende automatische Anpassung der Parameter wird die Vorhersagekraft des Modells bei sich ändernden Betriebsweisen gestärkt. Der Digitale Prozess-Zwilling stellt die Grundlage für Prozessoptimierungen, für eine Prozessüberwachung und für die Erprobung neuer Technologien dar.

Das angestrebte hybride Simulationsmodell soll im Rahmen eines Nachfolgeprojektes entwickelt und anhand von zwei Anwendungsfällen erprobt werden. Im ersten Anwendungsfall wird die Veränderung des Prozesses z.B. durch Verschleiß am Beispiel des Mahlprozesses überwacht. Dies kann dann für die Vorhersage von optimalen Wartungsintervallen genutzt werden. Der zweite Use Case fokussiert sich auf die Reduktion von CO2-Emissionen aus dem Klinkerbrennprozess. Dabei



-Seite 131

vd7





soll untersucht werden, welchen Einfluss die Integration von neuen Umwelttechniken zur CO2-Abscheidung auf das dynamische Verhalten des Gesamtprozesses haben kann. Eine besondere Herausforderung liegt darin, dass der digitale Zwilling auf eine Situation extrapoliert werden soll, die physikalisch noch nicht vorliegt. Das Forschungsvorhaben wurde unter dem Titel "Digitaler Prozess-Zwilling für die nachhaltige Zementherstellung" (Kurzform: DIGIPROZZ) durch die VDZ Technology gGmbH, KIMA Process Control GmbH, KIMA-Automatisierung GmbH und die Hochschule Düsseldorf (HSD) im Juli 2020 im Rahmen der Fördermaßnahme "Digital GreenTech – Umwelttechnik trifft Digitalisierung" eingereicht.

Auf Basis eines solchen Prozesszwillings oder durch Einsatz von artverwandten modellgestützten digitalen Zwillingen von (Teil-)Anlagen lassen sich unterschiedliche Fragestellungen untersuchen und auch entsprechende Forschungsfragen formulieren, welche nacholgend kurz beschrieben werden sollen:

Intelligente Brennstoffdosierung und Anwendung eines digitalen Zwillings zur intelligenten Regelung alternativer Brennstoffe

Aufbauend auf den Ergebnissen im Arbeitspaket AP5 soll das Konzept der Intelligenten Brennstoffdosierung weiter ausgebaut werden, wobei aktuelle Entwicklungen im Bereich des maschinellen Lernens sich für die Anwendung in diesem Problemfeld besonders eignen. Hierbei soll unter anderem das Konzept des digitalen Zwillings zur Anwendung kommen um das derzeitige sensorbasierte Konzept weiter entwickeln zu können. Die Kernidee dieser Applikation beruht weiterhin auf einer möglichst präzisen Echtzeiterfassung von Brennstoffparametern, wobei die im Rahmen dieses Projektes entwickelten Methodiken und Sensorkonzepte zur Anwendung kommen können. Im Gegensatz zu der innerhalb dieses Projektes genutzten Systematik, basiert der Ansatz des digitalen Zwillings auf einer prädiktiven Vorgehensweise in der auf Basis genetischer Algorithmen die vorliegenden Sensordaten aus der Online-Überwachung der Brennstoffe vorab die ideale Zusammensetzung der einzelnen Brennstoffkomponenten (z.B. Kohle, Biomasse, Altreifen, Plastikabfälle, etc.) modellbasiert ermittelt wird. Hierzu wäre die weitergehende Integration notwendiger Sensorik im Bereich der Verbrennungsprozesse in Drehrohrofen und Kalzinator ebenfalls essentiel. Hierbei kann das vorliegende Simulationsmodell als perfekte Basis für die Erschaffung des digitalen Zwillings genutzt werden, so dass ausschließlich der neue Optimierungsansatz zu implementieren wäre. Das grundlegende Setup eines solchen Ansatzes sei exemplarisch in Abbildung 120 dargestellt.



Abbildung 120 – Modellbasierte Brennstoffoptimierung auf Basis aktueller Sensordaten des Verbrennungsprozesses in Drehrohrofen und Klazinator und einem digitalen Zwilling

vd7



-Seite 132



Erprobung von alternativen und adaptiven Regelkonzepten und Prozessszenarien zur Optimierung des Prozessverhaltens auf Basis von Prozessvariablen

Der bisherige Implementierungsstand für die Brennstoffzufuhr in den Verbrennungsprozess der EMREDPRO Simulationsumgebung sieht einen Fuzzy Regelkreis vor. Dessen Aufgabe ist es, die Verbrennungstemperatur konstant zu halten und gleichzeitig die Nutzung von alternativen Brennstoffen zu erhöhen. Dabei gilt die Prämisse, dass die gesetzlichen Vorgaben in Bezug auf Emissionsausstoß eingehalten werden. Hierbei sollen insbesondere auch Methoden aus dem Bereich des maschinellen Lernens zum Einsatz kommen, so dass beispielsweise eine automatische Vorhersage von Brennstoffeigenschaften auf Basis eines Modells ermöglicht wird. Dabei gilt es, den Einsatz von alternativen Brennstoffen weiter zu erhöhen und gleichzeitig die Anforderungen der Regierung in Bezug auf Emissionsausstoß nicht zu überschreiten.

Vorhersage von direkten und indirekten Prozessemissionen

Auf Basis selbstlernender Methoden und des grundsätzlichen Simulationsmodells soll es ermöglicht werden direkte und indirekte Prozessemissionen vorherzusagen. Hierbei spielen insbesondere auch die in AP5 entwickelten und eingeführten weitergehenden Methoden zur messtechnischen Erfassung von Brennstoffeigenschaften in Echtzeit ein wesentliche Rolle. In Kombination mit einem selbstlernenden Modell auf Basis von maschinellen Lernalgorithmen und einer entsprechenden Rückführung von realen Emissionendaten, kann so ein Modell entwickelt werden, welches es ermöglicht pro-aktiv die typische Emissionsantwort des Verbrennungsprozesses vorherzusagen, so dass auf dieser Basis auch eine weitergehende Optimierung des Brennstoffeinsatzes möglich sein sollte.

Die oben genannten Beispiele basieren zu einem großen Teil auf Methoden aus dem Bereich des Maschinellen Lernens. Maschinelles Lernen ist ein weit verbreitetes Forschungsgebiet, welches den Ansatz verfolgt, dass komplexe Systeme nicht programmiert, sondern von einem Lernalgorithmus analysiert und verarbeitet werden. Dadurch ist es möglich, reale Mehrzieloptimierungsprobleme besser handhaben zu können. Dabei gliedert sich das Forschungsfeld des maschinellen Lernens in drei Hauptkategorien:

Überwachtes Lernen zielt darauf ab, einem Algorithmus auf Basis von vorher definierten Trainingsdaten ein Verhalten anzutrainieren. Dabei bildet ein Datensatz den bewerteten Zustand des gesamten Systems ab. Beispielsweise Ein- und Ausgänge des Systems, in Kombination mit der Information, ob es sich um einen guten oder schlechten Zustand handelt. Der Algorithmus lernt innerhalb der Trainingsphase mit dem System umzugehen, um dann in der Testphase auf unbekannte und nicht bewertete Datensätze korrekt reagieren zu können.

Unüberwachtes Lernen zielt darauf ab, Muster in Datensätzen zu finden. Dabei soll die Komplexität reduziert werden, ohne aussagekräftige Daten zu verlieren.

Reinforcement Learning zielt darauf ab, einem Algorithmus ein gewünschtes Verhalten anhand von Interaktionen mit einer Umgebung beizubringen. In Abbildung 121 ist der generelle Aufbau eines RL Algorithmus abgebildet. Dabei agiert der Algorithmus (Agent) mit seiner Umgebung (Environment) und erhält für jede Aktion, die er tätigt (Action) einen neuen Zustand (State) des Environments und eine Belohnung (Reward). Diese Belohnung basiert auf der Interaktion mit der Umgebung und fällt positiv oder negativ aus. Das Ziel des Reinforcement Learning Algorithmus ist es, die Belohnung zu maximieren.



-Seite 133







Abbildung 121 : Reinforcement Learning Struktur

Im Bereich der EMREDPRO Simulationsumgebung ist die Anwendung von überwachtem Lernen und Reinforcement Learning zur Weiterentwicklung erfolgsversprechend.

So könnte beispielsweise der bereits implementierte Fuzzy Regler durch einen entsprechenden Lernalgorithmus Algorithmus ersetzt oder durch diesen ergänzt werden. Dieser wird mit vorher definierten Datensätzen, welche unterschiedliche Situationen des Systems abbilden, vortrainiert. Anschließend wird die Interaktion des trainierten Algorithmus mit der Simulationsumgebung validiert. Weitergehend ist eine die Nutzung eines Reinforcement Learning Algorithmus möglich. Dieser Algorithmus (Agent) hat die Aufgabe, den Einsatz von alternativen Brennstoffen zu maximieren, die Verbrennungstemperatur konstant zu halten und die Emissionsvorgaben einzuhalten. Dabei kann die EMREDPRO Simulation als Environment angesehen werden. Der Agent variiert die Eingangsparameter der Simulation (z.B. Zuführung Kohle, Zuführung Alternative Brennstoffe) und erhält in jedem Zeitschritt einen neuen Zustand (State) des Environments (z.B. Verbrennungstemperatur, Emissionsgehalt). Zusätzlich wird für jeden Zeitschritt ein Reward, basierend auf der prozentualen Nutzung alternativer Brennstoffe und des Emissionsgehaltes, berechnet. Nach einer gewissen Interaktionszeit gilt das System als angelernt. Anschließend wird die Interaktion mit dem Simulationsumgebung validiert.

In einem weiteren Schritt ist es denkbar, maschinelles Lernen im Zusammenhang mit der Vorhersage von Prozessemissionen einzusetzen, um diese im realen Betrieb zu reduzieren. So ist ein paralleler Betrieb von Simulation und realem Prozess möglich. Auf Basis der gewonnenen Daten aus der Simulation kann der reale Prozess angepasst werden, um die entstehenden direkten und indirekten Emissionen zu reduzieren.

Des Weiteren ist es möglich, maschinelles Lernen dazu einzusetzen, die Simulation selbst zu kalibrieren. Das bedeutet, dass die Wirklichkeit exakter abgebildet wird und dadurch die Abweichung zwischen Simulation und realem Prozess sinkt. Ein Vorteil einer akkuraten Simulation ist es, bessere Vorhersagen in Bezug auf den realen Prozess treffen zu können. Dazu werden die Simulationsparameter mithilfe von maschinellem Lernen und auf Basis der gemessenen Emissionsdaten und des dazugehörenden Prozessabbildes optimiert. Zuletzt ist es auch möglich, durch die Modelle gezielt synthetische Prozessdaten auch für extreme Prozesszustände zu generieren, die dann für das Training von robusten Modellen eingesetzt werden können.

2.1.7.2 Optimierung von Betriebsparametern und Anlagenfahrweisen

vdz

Die Betriebsparameter von Bestandsanlagen in der Zementindustrie sind oft bereits gut eingestellt. Bei der Optimierung wird allerdings meist ein Kompromiss zwischen Effizienz, Verschleiß und Betrieb geschlossen. Der in EMREDPRO entwickelte Simulator kann Anfahrzustände und den Normalbetrieb abbilden und den Anwender so unterstützen, neue Ansatze zur Optimierung auszuprobieren und zu bewerten.





DIMATTED 🛞

Bereits in Kapitel 2.1.6.4 wurde eine typische Parametervariation des Kalzinator-Vorwärmersystems beschrieben. Bereits kleine Änderungen des Brennstoffgehalts am Kalzinator wirkten sich auf die Heißmehl-Qualität und die Emissionen aus.

Im Anfahrbetrieb entsteht in der Regel Ausschussmaterial (z.B. Abmahlprodukte), aber auch große direkte und indirekte Emissionen. Das Ausschussmaterial kann in der Regel weiterverwendet werden, größere Mengen sind jedoch unerwünscht. Die Dauer des Anfahrbetriebs ist vom Bediener, aber unter anderem auch von gegebenen Einflüssen (z.B. Verschleiß, Aufheizperioden, Materialparameter) vorgegeben. Diese gegebenen Randbedingungen können bei der Optimierung von Anfahrzuständen berücksichtigt werden.

Die Optimierung des Anfahrbetriebs lässt sich gut am Beispiel der Zementmühle erläutern. Lange Füllzeiten der Mühle sind mit organisatorischem Aufwand und hohen Stromverbräuchen, und damit indirekt mit CO₂ Emissionen, verbunden. Am Beispiel der Zementmühle wurde durch Variation der Parameter Aufgabemenge und Sichterdrehzahl die Dauer bis zur Stabilisierung des Systems verkürzt. Bereits dargestellt wurde die Füllung der Mahlanlage bei der Parametrisierung (Seite 112). Wird die Aufgabemenge beim Anfahrbetrieb erhöht (Abbildung 122), verkürzt sich dieser und die Aussschussmenge wird reduziert. Im Beispiel konnte die Arbeit des Mühlenantriebs während der Anfahrzeit von etwa 1480 kWh auf 840 kWh reduziert werden. Die durchschnittlichen Kohlendioxidemissionen einer Kilowattstunde Strom (Strommix, Spezifischer Emissionsfaktor) betrugen im Jahr 2018 468 g_{CO2}/kWh. Hiermit ergibt sich eine Reduktion der indirekten CO₂-







Abbildung 122: Optimierung des Anfahrprozesse

2.1.7.3 Einsatz des Modells als Schulungssimulator

Das Simulationsmodell und die in AP5 erzielten Erkenntnisse hinsichtlich einer intelligenten Nutzung von alternativen Brennstoffen sollen genutzt werden um zukünftig in Form von Schulungsmaßnahmen Zementwerksbetreibern, die bisher keine oder nur wenig alternative Brennstoffe in Ihrem Kalzinationsprozess einsetzen, eine entsprechende Entscheidungshilfe in Form von Simulationen an die Hand zu geben. Auf dieser Basis kann das Investitionsrisiko und die mit der Einführung von alternativen Brennstoffen verbundenen Prozessunsicherheiten minimiert werden, was im Idealfall eine entsprechende Investitionsneigung begünstigen soll, so dass der Anteil der Sekundärbrennstoffe im Brennstoffmix der Zementindustrie weiter zunimmt. Eine entsprechende Nutzung der Simulationsumgebung zu diesem Zweck ist bereits mit dem erzielten Stand zum Ende des Projektes möglich und gerade in Verbindung mit den ersten Ergebnissen in Bezug auf eine grundlegende regelungstechnische Umsetzung auch zielführend einsetzbar.

In vielen Fällen erfolgt die Aus- und Weiterbildung von Fachkräften in der Zementindustrie bisher durch theoretische Schulungen. Persönliche, praktische Erfahrung bleibt jedoch besser im Gedächtnis, wie die Erfahrungspyramide nach Edgar Dale zeigt. Der Einsatz eines modellgestützten digitalen Zwillings als Trainingswerkzeug kann Mitarbeiter praxisnah auch an neue Technologien z.B. zur Emissionsreduktion heranführen. Aber auch der Umgang mit KI-Anwendungen und neuen Mensch-Maschine-Schnittstellen kann hier erprobt werden. Der Umgang mit neuen Anwendungen in einer sicheren Umgebung wird Mitarbeitern helfen, die neuen Methoden besser zu verstehen und die digitale Transformation sozialverträglich zu gestalten. Die Verknüpfung von mathematischen Modellen mit einer SPS Ebene und dem SCADA System wirkt sehr realitätsnah und gibt dem Anwender die Möglichkeit sich schnell in das System einzufinden. Der im Projekt EMREDPRO entwickelte Simulator wird auch nach Projektende weiterentwickelt, um als anwenderfreundliches Schulungswerkzeug, die Prozesse der Zementmühle, bei Schulungen des VDZ erprobt werden und so gewonnene Erkentnisse zur weiteren Verbesserung des Schulungssimulators beitragen.

Zum Unterricht in Klassenräumen wird eine Trainer-Trainee Umgebung benötigt, in der unterschiedliche Berechtigungen zum Bedienen des Systems vorhanden sind. So kann der Trainer (oder Lehrer) Prozessstörungen direkt auslösen sowie an- und abschalten (siehe Tabelle 5) und Verriegelungsbedingungen umgehen, um Störungen von Anlagenteilen individuell auszulösen. Der Schüler muss zunächst geeignete Sofortmaßnahmen ergreifen, um die Störungen zu beheben oder deren Auswirkungen zu reduzieren. Anschließend können die Maßnahmen durch Vergleich mit Standardprozeduren bewertet und diskutiert werden. Besonders verschleißbedingte Störungen treten erst nach langen Betriebszeiten auf, was für Schulungen nicht zielführend ist. Daher sollte der Trainer den Vorgang beschleunigen können.

Im Simulator müssen Zustände gespeichert und geladen werden können. Besonders die Anfahrvorgänge können sehr lang sein und so die Motivation der Schüler senken. Misserfolge und Probleme bei der Bedienung können große Lerneffekte haben. Die Motivation der Schüler würde jedoch stark gesenkt werden, wenn keine adäquaten Speicherzustände vorhanden sind, die dem Schüler die Möglichkeit geben, die Fehlerursache zu beheben. All diese Funktionalitäten sind grundsätzlich mit der entwickelten Lösung erreichbar. Die weiter Ausarbeitung einer robusten Klassenraumlösung stellt eine Anschlussentwicklung dar.



-Seite 136





Tabelle 5 Übersicht von Prozessstörungen, für die eine Kommunikationsstruktur erforderlich ist.

Art der Störung	Modell-Lösungsweg
Zyklonverstopfung	Schleichender Prozess, durch entweder hohe innere Kreisläufe (SO3- und Cl-Gehalte) oder zu hohe Staubbeladung. Besonders im Anfahrvorgang neigt der Zyklonvorwärmer zu Verstopfungen. Der Trainer kann Schwellwerte vorgeben, um diese Situationen automatisch auszulösen.
	Das Mehl wird im Zyklon zwischengespeichert. Das Gasmodell berechnet die Erhöhung des Unterdrucks und aufgrund des gespeicherten Mehls kommt es zu einer Temperaturänderung in der betroffenen Zyklon-Stufe.
	Nach Abreinigung der Verstopfungen wird der Materialspeicher spontan freigegeben (Mehlschuss).
Starke Ansatzbildung	Die Bildung von Ansätzen kann als Funktion aus Laufzeit und dem Gehalt der Chlorid- und Schwefelverbindungen im Gas dargestellt werden. Ansatzbildung kann zu einer Veränderung des Querschnitts und damit der Strömungsgeschwindigkeit führen. Das Gasmodell unterstützt dies. Bei Ansatzbildung im Ofen muss zudem die Position des Ansatzes beschrieben werden und im Ofenscanner angezeigt werden.
Herabfallender Ansatz	Zur Laufzeit wird die Menge des Ansatzes in einem Zwischenspeicher bestimmt. Bei Erreichen eines Schwellwertes wird ein zufälliger Anteil des Ansatzes abgelöst. Dies kann dazu führen, dass:
	1. Zyklone verstopfen,
	2. Die Druckverhältnisse sich ändern,
	 Der Materialtransport (pneumatisch oder mechanisch) beeinflusst wird, inkl. Temperatur- änderungen, chem. Zusammensetzung, etc.
	 Die Transportorgane verstopfen und der Materialtransport behindert wird
Roter Fleck am Ofenmantel / Ausmauerungsschäden	Ausgelöst durch hohe Temperaturen im Ofen / am Brenner oder Schäden an der Ausmauerung. Ausmauerungen erhalten hierfür eine Zustandsanzeige die mit einem Verschleißparameter versehen wird. Der Trainer kann zudem die Wahrscheinlichkeit eines Ausmauerungsschadens vorgeben.
Verschiebung Sinterzone / Falsche Flammenform	Die Form der Flamme und damit die Sinterzone kann durch die Axial- und Primärmluft variiert werden.



-Seite 137 -





,Red River' im Kühler	Es entstehen Material-Bypässe im Kühler, dies kann durch einen schnelleren Transport in bestimmten Bereichen des Kühlers vorgegeben werden.
Reduzierende Brennbedingungen	Bei mangelndem Sauerstoffgehalt stellt sich diese Bedingung ein.
Verstopfte Übertrags- / Austragswände	Während des Mahlbetriebs kann sich die Mahlleistung der Mühle verändern, indem die Wände verstopfen. Dies hängt von den Eigenschaften des Mahlguts ab:
	 Feuchte, Agglomerationsneigung erhöht die Partikelgröße
	2. Korngröße vor der Wand
	Sind die Mahlkörper vor der Wand zu klein, können diese die Wand ebenfalls verstopfen. Der Transport-Koeffizient zum Eintrag in die Wand (K2) wird reduziert.
Falsche Gattierung	Die Gattierung der Kugelmühle wird durch den Trainer vorgegeben. Der Schüler kann die falsche Gattierung als Ursache für unzureichende Mahlleistung identifizieren. Der Tranportkoeffizient für die Bewegung des Mahlguts (K1) kann durch das freie Volumen in der Mahlkörperschüttung beeinflusst werden. Zudem kann die Zerkleinerungscharakteristik beeinflusst werden.
Verstopfung Filter / Unzureichende Abreinigung	Der Trainer kann die maximale Speicherkapazität der Filter vorgeben. Mit der Laufzeit ändert sich die Abscheideleistung.
Verschleiß (kontinuierlich),	Das Verschleißverhalten von Anlagenteilen kann individuell durch Kennzahlen vorgegeben werden und verändert sich so während des Betriebs.
Ausfall von Anlagenkomponenten (mechanisch/elektrisch)	Direkt durch den Trainer vorgegeben. In der Trainer- Umgebung kann hierfür ein Werkzeug bereitgestellt werden, das zufällig bei allen Schülern Störungen aufschaltet. Die Logik-Ebene (PLC) reagiert mit den Verriegelungsbedingungen und das SCADA-System zeigt dem Schüler die Anlagenstörungen an.
Überdruck in den Anlagenteilen (z.B. Ofenkopf)	Durch Überdruck in den Anlagenteilen kann staubbeladene Luft entweichen und so die Dichtungen schädigen. Der Staubgehalt wird im Environment-Bus gesammelt. Der Staubgehalt wird so global erfasst und kann bewertet werden.

Im Vergleich zu dem realen Prozess können dem Schüler im Simulator mehr Informationen über den Betrieb und das Material zur Verfügung gestellt werden. Besonders die direkten Auswirkungen des Prozesses auf den Vorkalziniergrad, den Freikalk-Gehalt, die Korngrößenverteilung und anderen



-Seite 138 –





benutzerdefinierten Trends (siehe Abbildung 49) sind für die Entwicklung und Verbesserung des Prozessverständnisses sehr hilfreich. Verglichen mit dem realen Prozess können diese Informationen kontinuierlich angezeigt werden.

Die Schulungsumgebung kann zum Erlernen der Steuerung von Bestandsanlagen oder auch zur gezielten Auseinanderstezung mit neuen Technologien und Regelkonzepten genutzt werden. Im Rahmen des Projekts sei hier konkret auf die in AP5 erzielten Erkenntnisse zur intelligenten Nutzung von alternativen Brennstoffen hingewiesen. Diese können verwandt werden, um durch Demonstrationen für Zementwerksbetreiber, die bisher keine oder nur wenig alternative Brennstoffe in ihrem Kalzinationsprozess einsetzen, eine entsprechende Entscheidungshilfe in Form von Simulationen an die Hand zu geben.

2.1.7.4 Praxiserprobung des feuchte-basierten Dosiersystems für alternative Brennstoffe

Das in Arbeitspaket AP5 erarbeitete Konzept der feuchte-basierten Dosierung von alternativen Brennstoffen soll in zukünftigen Arbeiten weiter ausgebaut werden. Hierzu wurden bereits erste Schritte in Bezug auf eine Implementierung der notwendigen Sensorik (hier: Mikrowellenfeuchtesensor) in den üblichen Produkten zur gravimetrischen Dosierung im Rahmen des Projektes durchgeführt. Nachfolgend sei beispielhaft der Einbau eines Feuchtesensors im Vorbunker eines gravimetrischen Schneckendosiersystems dargestellt.





(b)

Abbildung 123: Beispiel für die Integration von Feuchtigkeitsmesstechnik auf Basis von Mikrowellen in einen bestehenden Materialbunker eines gravimetrischen Dosiersystems: (a) Maßzeichnung zur Installation der Sensorik; (b) Prinzipdarstellung der Integration



Ein wichtiger Baustein zum Transfer des grundlegenden Konzeptes in ein entsprechendes Produkt mit der damit verbundenen wirtschaftlichen Anschlussfähigkeit stellt insbesondere die Notwendigkeit einer automatischen Kalibrierung des Systems auf unterschiedliche alternative Brennstoffe dar. Hierbei können insbesondere die in AP5.2 erzielten Ergebnisse hinsichtlich einer sensorischen Klassifizierung und Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen als Grundlage für die Implementierung einer Kalibrierroutine genutzt werden. Ziel hierbei ist es auf Basis von Messdaten des Feuchtesensors und entsprechender Auswertung von Wiegesignalen und einer eventuellen Rückkopplung von Daten des Verbrennungsprozesses eine Anpassung des Systems zu realisieren. Die Realisierung eines entsprechenden marktfähigen feuchte-basierten Dosiersystems ist hierbei das Ziel, wobei zunächst eine prototypische Implementierung eines solchen Konzeptes bei einem Referenzkunden geplant ist.

2.1.8 Fazit und Ausblick

Im Rahmen des Projektes EMREDPRO wurden vom Konsortium mit dem modularen und multifunktionalen Framework die vorwettbewerblichen Rahmenbedingungen geschaffen, um verfahrenstechnische Prozesse und Grundoperationen, in erster Line der Steine und Erdenindustrie, realitätsnah in einem Prozessmodell abbilden zu können. Die Spannbreite reicht dabei von der singulären, tieferen Betrachtung einzelner Anlagenteile bis zur kompletten Abbildung eines gesamten Zementwerks, vom Brecher im Steinbruch bis zu den Zementsilos. Als Nutzer werden neben Entwicklern und Verfahrensingenieuren auch Schulungsteilnehmer in Fortbildungen adressiert. Dies ist durch ein 4 Ebenen-System möglich, das den Bogen von der detaillierten Erweiterungsmöglichkeit von Modulen in Matlab, über die Verschaltung von Anlagenteilen in Simulink bis hin zu einer realitätsgetreuen Leitstandsumgebung inkl. Soft-SPS spannt.

Neben der Weiterentwicklung als Schulungstool, oder zur Optimierung von bestehenden Anlagenteilen, ist auch die Modellgestützte Auslegung von Neuanlagen denkbar. Darüberhinaus eignet sich das erstelle Framework, zur Entwicklung von Modellprädiktiven Reglern, oder auch in Verbindung mit KI als digitaler Zwilling gesamter Werke.

2.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die für die Bearbeitung des Projektes bereitgestellten Mittel wurden bei den Partnern entsprechend der jeweils durchgeführten Arbeiten eingesetzt. Der zahlenmäßige Nachweis wurde separat übermittelt.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

<u>DiMatteo</u>

DiMatteo hat das AP5 federführend bearbeitet und die entsprechenden Arbeiten geplant und ausgeführt. Daneben wurden insbesondere die Förderorgane im Modell implementiert (AP2) und deren Implementierung in AP4 evaluiert.

Kima Automatisierung

KIMA Automatisierung verantwortete das AP3 und damit die Gestaltung und Einbindung der Anwenderoberfläche. Daneben wurde die Soft-SPS umgestetzt und in Kooperation mit KIMA





vd7





Process Control die Kommunikationsschnittstelle zwischen Simulink und WinnCC entwickelt und implementiert.

Kima Process Control

Kima Process Control hat die Projektkoordination (AP1) übernommen. Daneben wurde die Erstellung des Modellframeworks und die Erstellung der Grundlagenmodule (AP2), in enger Kooperation mit dem VDZ, federführend übernommen. Aufgrund der Eigenentwicklung von Softwaremodulen, konnte auf einen der Teil ursprünglich geplanten Matlab/Simulink Toolboxen verzichtet werden.

<u>VDZ</u>

Der VDZ hat die Leitung und Koordination der Arbeitspakete AP4 (Entwicklung / Anpassung Module Zementwerk), AP5 (Erprobung und Validierung der Ergenisse am Beispiel eines Zementwerks) und AP7 (Weitere Forschungsfragen und Transfer) übernommen.

Bei den geplanten Kosten für die Software WinCC konnten Mittel aufgrund eines günstigeren Angebots für Trainingslizenzen eingespart werden. Diese konnten für Anschaffung zusätzlichen Matlabtoolboxen und für die Erweiterung der Personalkosten genutzt werden, um einen zusätzlichen Mehraufwand in der Erprobungsphase abzudecken. Darüber hinaus waren keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt notwendig.

Die im Forschungsprojekt durchgeführten Arbeiten entsprechend den definierten Arbeitspaketen, waren notwenig und angemessen, um die Projektziele zu erreichen. Es wurden alle in der Meilensteinplanung des VDZ definierten Aufgabenstellungen erfolgreich bearbeitet.

2.4 Nutzung und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschrittenen Verwertungsplans

Eine Veröffentlichung von Teilergebnissen ist entweder erfolgt oder geplant, sie es in Form von Veröffentlichungen in Fachzeitschirften oder Konferenzen. Detaillierte Auskünfte zu Nutzen und Verwertbarkeit hat jeder Partner dem Projektträger DLR in seinem Erfolgskontrollbericht übermittelt.

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Berichtszeitraum sind <u>keine</u> FE-Ergebnisse von Seiten Dritter bekannt geworden, die für die Durchführung des Projektes relevant waren.

2.6 Veröffentlichungen der Ergebnisse aus dem Projekt

vdz

Erfolgte Veröffentlichungen:

- VDZ-Mitteilungen: Offizieller Projektstart von "EMREDPRO". Entwicklung eines Softwaretools für die Steine-und-Erden-Industrie. Nr. 163, Mai 2017
- P. M. Fleiger, M. Schneider, "How to approach data evaluation in the cement industry systematically," VDZ Congress 2018, Düsseldorf, 27. 09.2017



-Seite 141



- EMREDPRO Status und Perspektiven, 4. Sitzung Ausschuss Digitalisierung, Web-Meeting, 16.09.2020
- EMREDPRO Status und Perspektiven, 35. Sitzung Ausschuss "Umwelt und Verfahrenstechnik", Web-Meeting, 08.10.2020

Geplante Veröffentlichungen:

- "Model-based Approach for the Substitution of Fossile Fuels by Alternative Energy Sources derived from Waste Streams within the Cement Industry" - Geplante Einreichung bei der 2021 6th International Conference on Green Energy Technologies, Frankfurt
- "A novel approach for the humidity-based dosing of alternative fuels within the cement manufacturing process" – Geplante Einreichung bei der 13th International KES Conference in Intelligent Decision Technologies (KES IDT 2021)
- "Simulation-based Optimisation of Alternative Fuels Feeding" Geplante Einreichung beim Journal International Cement Review oder World Cement
- VDZ Mitteilungen 2021
- Cement International: Allgemein
- Cement International: Mühlensimulator







3. Literaturverzeichnis

- [1] W. Schröder, Fluidmechanik, Aachen: Wissenschaftsverlag Mainz in Aachen, 2004.
- [2] VDI Gesellschaft, VDI Wärmeatlas, Wiesbaden: Springer Berlin Heidelberg, 1984.
- [3] M. Stieß, Mechanische Verfahrenstechnik 2, Hrsg., Bd., Berlin: Springer, 1994.
- [4] F. Löffler, Staubabscheidung mit Schlauchfiltern und Taschenfiltern, 2. Hrsg., Bd. , F. Löffler, Hrsg., Braunschweig: Vieweg, 1991.
- [5] VDZ, Durchführung und Auswertung von Drehofenversuchen, Düsseldorf, 1992.
- [6] W. H. Duda, Cement-data-book: Bd.1: Internationale Verfahrenstechniken der Zementindustrie, 3., neubearb. und erw. Aufl. Hrsg., Bd., Wiesbaden: Bauverl., 1985.
- [7] M. Kumral, "Bed blending design incorporating multiple regression modelling and genetic algorithms," The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2006.
- [8] F. &. Z-Agioutantis, "Development of a software tool for the prediction of the coal blending efficiency in longitudinal stockpiles," Department of Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, Hania, Greece, 2001.
- [9] Espig, Berechnungsgleichungen und Gesetzmäßigkeiten für Mahlanlagen mit Trommelmühlen, Freiberg, 1984.
- [10] T. Ginsberg, Dynamische Modellierung von Drehrohröfen, Aachen: RWTH Aachen, 2010.
- [11] W. C. Saeman, "Passage of solids through rotary kilns Factors affecting the timeof passage," *Chemical Engineering Progress,*, Bd. 47, Nr. 10, p. 08–514, 1951.
- [12] L. D. M. Dominik Aufderheide, "Contonous Mechanical Conveying Systems," *World Cement,* pp. 10-14, 2017.
- [13] D. Aufderheide und L. Di Matteo, "Drive Concepts and Continous Mechanical Conveying Systems," *World Cement*, Bd. 1, pp. 57-60, 2017.
- [14] D. Aufderheide und L. D. Matteo, "Best Practice Approaches for Co-Processing of Alternative Fuels," *Cement International*, pp. 26-33, 2017.
- [15] D. I. f. Normung, Continous Mechanical Handling Equipment; Terminology, Berlin: Beuth Verlag, 1994.
- [16] C. Krause, "Modellierung und numerische Simulation eines mechanischen Stetigförderers für Schüttgut am Beispiel des Becherwerks," Fachhochschule Südwestfalen, Soest, 2018.
- [17] D. A. u. L. D. Matteo, "Alternative Fuels by the Bucket," *International Cement Review,* pp. 57-60, 1 2018.
- [18] M. Rodrigues, "Hardware-in-the-Loop (HiL) Test System for Gravimetric Dosing Machines," Fachhochschule Südwestfalen, Soest, 2016.
- [19] L. D. M. Dominik Aufderheide, "Full Modular Control System for Gravimetric Dosing Applications," *ZKG International,* pp. 44-49, 11 2014.



-Seite 143



- [20] H. Konanki, "Development of MATLAB/Simulink Based Simulation and Analysis Framework for Bulk Material Handling Equipment," Fachhochschule Südwestfalen, Soest, 2018.
- [21] F. James, "Screening Theory and Practice," Triple/S Dynamics, 2013.
- [22] Z. Mihailovic, "Modeling and Control Design of Vsi-Fed PMSM Drive Systems with Active Load," Virgina Tech, 1998.
- [23] D. Wang, J. You und C. Zhu, "Modeling of core flow in a gas-solids riser," *Powder Technology*, pp. 13-22, 2010.
- [24] E. Muschelknautz, "Die Berechnung von Zyklonabscheidern für Gase," *Chemie-Ingenieur-Technik*, Bd. 44, Nr., pp. 63-71, 1972.
- [25] C. K. Kwon, "Investigation of breakage characteristics of low rank coals in a laboratory swing hammer mill," Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, Korea, 2013.
- [26] D. Espig, V. Reinsch, W. Längricht und T. Meißner, "Advantages of computer-based mill audits and simulation using selected cement grinding plants," in *Hrsg. Process Technology of Cement Manufacturing : 5th International VDZ Congress 2002 (Düsseldorf 23.-27.09.2002).*, Düsseldorf, Bau und Technik, 2003.
- [27] D. Espig, "The energy efficiency curve to predict ball mill grinding behavior," *Cement International*, pp. 46-53, 68-74, 11 2013.
- [28] D. Espig und V. Reinsch, "Benerfis from a new energy efficiency curve to the tumbling mill grinding practice," *European Symposium on Comminution*, p. 10, 2002.
- [29] P. Fleiger, Einfluss derGattierung auf die Beanspruchungssituation und Zerkleinerung bei der Feinmahlung von Zement (Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 80), Düsseldorf : Bau+Technik GmbH, 2014.
- [30] O. Altun und H. Benzer, "Selection and mathematical modelling of high efficiency air classifiers," *Powder Technology*, Nr. 264, pp. 1-3, 2014.
- [31] H. Benzer, "Modeling and simulation of a fully air swept ball mill in a raw material grinding circuit," *Powder Technology*, Nr. 150, pp. 145-154, 2005.
- [32] K. Gomer, Technische Verbrennungssysteme, Springer-Verlag, 1991.
- [33] J. Z. Hamworthy, The John Zink Hamworthy combustion handbook, Taylor & Francis Group, LLC, 2013.
- [34] R. Weber, Combustion Fundamentals with Elements of Chemical Thermodynamics, Clausthal-Zellerfeld, 2007.
- [35] F. Herz, Entwicklung eines mathematischen Modells zur Simulation thermischer Prozesse in Drehrohröfen., Barleben: docupoint, 2012.
- [36] J. Horbach, "Erstellung eines Prozessmodells für Drehrohröfen zur Zementproduktion," RWTH, Aachen, 2016.
- [37] H. A. Spang, "A dynamic model of a cement kiln," Automatica, Bd. 8, pp. 309-323, 1972.
- [38] J. W. Lyons, H. S. Min, P. E. Parisot und J. F. Paul, "Experimentation with a wetprocess rotary cement kiln via the analog computer," Bd. 1, Nr. 29-33, 192.



-Seite 144


- [39] F. W. Locher, Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Düsseldorf: Verl. Bau und Technik, 2000, p. S. 107.
- [40] F. P. Incropera und D. P. DeWitt, Fundamentals of heat and mass transfer, New York: J. Wiley, 2011.
- [41] B. Schmidt, "Untersuchung des Austrags- und Förderverhaltens von Hochleistungsbecherwerken für Ersatzbrennstoffen in der Zementindustrie," Universiät Paderborn, Paderborn, 2019.
- [42] S. G. (. E. Interviewee, Technisches Archiv. [Interview]. 06 2019.
- [43] Gmehling und Brehm, Grundoperationen Lehrbuch der Technischen Chemie Band 2, Stuttgart: Thieme Verlag, 1996.
- [44] VDI Gesellschaft, VDI-Wärmeatlas, Wiesbaden: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [45] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, "Durchführung und Auswertung von Drehofenversuchen," in *VDZ-Merkblatt Vt 10*, Düsseldorf, VDZ, 1992.
- [46] A. Wolter, Forschungsberichte des Landes Nordreihn-Westfalen: Zur Bildung und Stabilität von Tricalciumsilikat und Aliten, Aachen: RWTH-Aachen, 1981.
- [47] M. d. Werk, "Trade-Off between Cost and Performance in Chevron bed-blending," Department of Mining and Materials Engineering, McGill University, Montreal, Quebec, 2017.
- [48] V. D. Z. e. H. VDZ, Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2018, Duesseldorf, 2018.
- [49] B. Liedmann, Simulation der Thermischen Umsetzung flugfähiger Ersatzbrennstoffe in Drehrohröfen der Zementindustrie, Aachen: Shaker Verlag, 2018.
- [50] B. Liedmann, Simulation der Thermischen Umsetzung flugfähiger Ersatzbrennstoffe in Drehrohröfen der Zementindustrie, Aachen: Shaker Verlag, 2018.
- [51] D. Labuhn und O. Romberg, Keine Panik vor Thermodynamik!", Vieweg Verlag, 3. Auflage, 2007.
- [52] H. Karbstein, F. Müller und R. Polke, "Scale up bei der Echtzerkleinerung in Rührwerkskugelmühlen," Bd. 37, Nr. 10, pp. 469-479, 1996.
- [53] K. Giske, GPU basierte Parallelisierung von deformierbaren Registrierungsverfahren als Grundlage für dynamische Anpassungen von Therapieplänen in der adaptiven Strahlentherapie, Heidelberg: Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität, 2011, p. 29.
- [54] Ö. Genç und A. Benzer, "Analysis of specific discharge rate functions in industrial scale cement grinding multi-compartment ball mills to assist ball mill modeling," *Minerals Engineering*, Nr. 74, pp. 20-29, 2015.
- [55] VDZ gGmbH, Datenbank Energiebedarf Zemente, 2019.
- [56] J. A. Manion, R. E. Huie, R. D. Levin, D. R. B. Jr., V. L. Orkin, W. Tsang, W. S. McGivern, J. W. Hudgens, V. D. Knyazev, E. C. A. M. T. D. B. Atkinson, C.-Y. Lin, T. C. Allison, W. G. Mallard, F. Westley, J. T. Herron, R. F. Hampson und D. H. Frizzell, NIST Chemical Kinetics Database, NIST Standard Reference Database 17, Version 7.0 (Web Version), Release 1.6.8, Web address: https://kinetics.nist.gov/, Gaithersburg, Maryland, 20899-8320: National Institute of Standards and Technology, 2015.





- [57] C. W. Bale, E. Bélisle, P. Chartrand, S. A. Decterov, G. Eriksson, A. Gheribi, K. Hack, I. H. Jung, Y. B. Kang, J. Melançon, A. D. Pelton, S. Petersen, C. Robelin, J. Sangster und M.-A. V. Ende, "FactSage Thermochemical Software and Databases (2010-2016), web access: http://www.crct.polymtl.ca/factweb.php," *Calphad (vol. 54)*, pp. 35-53, 2016.
- [58] Espig, D., "The energy efficiency curve to predict ball mill grinding behavior," *Cement International*, pp. 46-53, 68-74, 11 2013.



- Seite 146



4. Anhang

4.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Modellumgebung in vier Ebenen	. 10
Abbildung 2: Baumstruktur der Vererbungsklassen	. 12
Abbildung 3: BUS-Editor	. 14
Abbildung 4: Materialkreislauf Zementmühle. Das Verzögerungselement (1) unterbricht die Schleife dem Becherwerk	vor 15
Abbildung 5: Simulinkansicht der PLC-Kommunikationsschnittstelle	. 16
Abbildung 6: Eingabemaske der Device IDs	. 18
Abbildung 7: Schematischer Aufbau der Finite-Differenzen-Gleichungslöser	. 18
Abbildung 8: Schematische Struktur der numerischen Berechnung der Finite-Differential-Gleichung n. Upwind.	ach 19
Abbildung 9: Ergebnis der linearen Methode im Vergleich zur Spline-Methode, hier am Beispiel Festbetthöhe über der Ofenlänge	der 20
Abbildung 10: Einfache Verschaltung von Strömungswiderständen	. 21
Abbildung 11: Beispielhafte Verschaltung zur Ermittlung der Druckcharakteristik	. 22
Abbildung 12: Einfluss von Klappenstellung auf die Charakteristik des Gesamtsystems	. 23
Abbildung 13: Skizze des Strömungsverlaufs in einem Zyklon	. 24
Abbildung 14: Links: Idealisierte 2d- Beschreibung eines Mischbetts, welches einen Mischbett-auf nach der Chevron-Methode aufweist [7]; Rechts: Mischbettquerschnitt nach der Chevron- Meth- [8]	bau ode 28
Abbildung 15: Links: Segmentfüllstand in der Kugelmühle resultierend aus einer Parametervariation das potentialgetriebene Transportmodell; Rechts: Füllunungsvorgang der Mühle in Abhängigkeit Parameter des Transportmodells.	n für ∶der 29
Abbildung 16: Bewegungsformen des Festbetts im Drehrohrofen. [10]	. 29
Abbildung 17: Schnittansicht eines Drehrohrofens mit Wehr am Ofenauslauf. [10]	. 30
Abbildung 18 – Auszug des entwickelten Klassifizierungsrahmens für die zu entwickelnden Modelle	. 32
Abbildung 19 – Gegenüberstellung des entwickelten Basismodells eines Lagerorgans (a) und implementierten Simulationsmoduls (b)	des . 33
Abbildung 20 – Definition des ausgehenden Volumenstroms je nach Art des Stetigförderorgans: Bandförderer; (b): Schneckenförderer; (c). Trogkettenförderer	(a): . 34
Abbildung 21 – Gegenüberstellung des entwickelten Basismodells eines Förderorgans (a) und implementierten Simulationsmoduls (b)	des . 35
 Abbildung 22 – Befüllung eines Becherwerks und Ableitung der Becherfüllstände bzw. Materialreservoirs im Becherwerksfuß, (a): Becherbefüllung ohne zus. Schöpfvorgang Becherwerksfuß; (b) Becherbefüllung mit zus. Schöpfvorgang im Becherwerksfuß entsprechender Vorbefüllung der Becher 	des im und 36
Abbildung 23 – Schneckendosiersystem – (a): Allgemeiner mechanischer Aufbau des Systems; Verallgemeinerte Geometrie zur Modellierung	(b): 36
Abbildung 24 – Generelles regelungstechnisches Modell des Dosiersystems	. 38
Abbildung 25 – Kennlinie des Schneckendosiersystems (Massenfluss als Funktion der Materialdichte der Schneckendrehzahl)	und 38
Abbildung 26 – Gegenüberstellung des entwickelten Basismodells eines Dosierorgans (a) und implementierten Simulationsmoduls (b)	des . 39
Abbildung 27 – Gegenüberstellung des entwickelten Basismodells eines Abscheideorgans (a) und implementierten Simulationsmoduls (b)	des . 40
Abbildung 28 – Gegenüberstellung des entwickelten Basismodells eines Trocknungsorgans (a) und implementierten Simulationsmoduls (b)	des . 41





Abbildung 29 – Ergebnisse der Simulation eines Drehstromasynchronmotors als Antriebseinheit fördertechnische Organe: (a) Rotordrehzahl über der Zeit, (b) Drehmoment über der Zeit und Leistung über der Zeit	für (c) . 42
Abbildung 30: Darstellung des Modells zur dynamischen Segmentierung des Gastransports	. 43
Abbildung 31: Ergebnis der Anwendung der Zerkleinerungscharakteristik auf Eingangskorngrößenverteilung am Beispiel der 2. Mahlkammer	die . 46
Abbildung 32: Tromp-Kurve für den Sichter der Fa. Spenner . Orange: gemessene Trennkurve; Bl berechnet durch das Modell nach Whiten mit parametrisiertem Modell für den vorliegend Betriebspunkt	lau: den . 47
Abbildung 33: Ausbrennzeit für Steinkohle und Braunkohle in verschiedenen Größen und Temperatu [32]	ren . 49
Abbildung 34: Algorithmus-Flussdiagramm zur Berechnung des Brennstoffpartikeldurchmessers	. 50
Abbildung 35:Brennstoffumsatz entlang der Ofenachse	. 51
Abbildung 36: Anwenderoberfläche	. 52
Abbildung 37: Einfache Konfiguration	. 54
Abbildung 38: Multi-Konfiguration	. 55
Abbildung 39: Inhalt der Initialisierungs-Telegramme auf SPS-Seite.	. 56
Abbildung 40: Modultyp-Funktionsbausteine	. 59
Abbildung 41: Beispiel Instanz-DB	. 60
Abbildung 42: DeviceInfo	. 60
Abbildung 43: DeviceListe	. 60
Abbildung 44: Zuordnung der Empfangsdaten zu der passenden Modul-Multi-Instanz	. 61
Abbildung 45: Aufruf eines Förderorgans	. 62
Abbildung 46: Schematische Darstellung Anwenderoberfläche	. 63
Abbildung 47: Aufteilung Anwenderoberfläche	. 63
Abbildung 48: Symbolinformation	. 64
Abbildung 49: Schaltfläche "Benutzerdefinierte Trends"	. 65
Abbildung 50: Meldeseite	. 65
Abbildung 51: Bedienbox	. 66
Abbildung 52: Sollwertvorgabe	. 66
Abbildung 53: Übersichtsseite "Antriebsdiagnose"	. 67
Abbildung 54: Messstellendiagnose	. 68
Abbildung 55: Anzeige der Kommunikationsdaten	. 69
Abbildung 56: Simulationsdaten	. 69
Abbildung 57: Daten für ein einfaches Förderorgan	. 70
Abbildung 58: Finess Sensor	. 70
Abbildung 59: Aufbau des Mühlenmodells aus den Grundmodellen für Transport, Zerkleinerung, u Gasphase	und . 72
Abbildung 60: Konfigurationsinterface der Kugelmühle	. 73
Abbildung 61: Einfluss der Sichterparameter auf die Trenncharakteristik	. 74
Abbildung 62: Steinbruch und Brecher	. 75
Abbildung 63 :Erstellung eines vollständigen Mahlkreislaufs mit Sichter	. 76
Abbildung 64: Bereinigte Darstellung des Gesamtmodells Zementmühle	. 77
Abbildung 65: Teilmodell der Rohmühle	. 78
Abbildung 66: Prinzip der Komponentenverschaltung am Beispiel des Vorwärmers	. 79
Abbildung 67: Eingabemaske zur Parametrisierung der Zyklone im Vorwärmer	. 79
Abbildung 68: System-Block Vorwärmer	. 80
Abbildung 69: Eingabemaske zur Parametrisierung des Kalzinators	. 81







Abbildung 70 : Simulinkmodell des Drehrohrofens	82
Abbildung 71: Schnittdarstellung des Ofens mit Darstellung der Wärmeströme [36]	83
Abbildung 72: Druckabfall und Gasgeschindigkeit entlang der Ofenachse	85
Abbildung 73: Schematische Darstellung der Gasaufteilung auf Sekundär- und Tertiärluft und Abgas Klinkerkühler.	im 87
Abbildung 74: Simulinkmodell des Klinkerkühlers	88
Abbildung 75: Typische Arten von alternativen Brennstoffen: (a) Fein gesiebter aus Plastikfoli abgeleiteter Brennstoff; (b) Grob aufbereiteter Brennstoff aus Plastikabfällen; (c) Ersatzbrennst aus Teppichresten und Stofffasern; (d) Grobe Reifenschnitzel	ien toff 89
Abbildung 76 – Entwickeltes grundlegendes Sensorkonzept für eine typische Anlage zur Annahm Aufbereitung, Lagerung, Transport und Dosierung von alternativen Brennstoffen Zementherstellungsprozess	ne, im 91
 Abbildung 77: Technikumsanlage zur Evaluierung der Sensorik: (1) – Becherwerk; (2) – Zwischenbunk (3) – Vordosierschneckenförderer; (4) – Vorbunker gravimetrische Dosierung; (5) – gravimetrisch Dosiersystem; (6) – Trogschneckenförderer; (7) Trogkettenförderer; (8) Materialweiche; Kontrollwiegesystem. 	er; nes (9) 93
Abbildung 78: Teststrecke zur Ermittlung des Einflusses der Materialtrocknung auf den Brennwert	94
Abbildung 79: Einfluss der Trocknung von alternativen Brennstoffen auf deren Brennwert	95
Abbildung 80: Versuchsstand (a) und Beispiele für durchgeführte Fallversuche (b)	95
Abbildung 81: Analyse der Becherentleerung (a), Optische Verfolgung von Partikeln (b) u aufgenommenes Vektorfeld der Partikelbewegungen und entsprechende Becherpositionen	nd 96
Abbildung 82: Beispiel für die Ermittlung von Stoffströmen an unterschiedlichen Abscheideorganen realen Anlagen zur Förderung von Ersatzbrennstoffen (hier: RDF)	in 97
 Abbildung 83: Visuelle Darstellung der Abscheidestoffströme aus den Teststrecken: (a) – Mineralisc Anteile; (b) – kleine magnetische Metallfraktionen; (c) – Agglomerationen von Brennstoff; (d) Typischer Auswurf einer Luftklassifizierung aus metallischen und mineralischen Komponenten; (e Plastikfolien als Übergrößen; (f) – Abscheidung aus einem Grobmaterialstrom 	:he) – :) – 98
Abbildung 84: Einfluss der Feuchte auf den Energieeintrag: Links: Histogramm der im Labor bestimmt Materialfeuchte; Rechts: Schwankung des Energieeintrages in einem Testzeitraum	ten 99
Abbildung 85: Einführung eines Ansatzes für eine sensorbasierte Dosierung; (a) – Rein gravimetrisc Dosierung auf Basis des Materialgewichts; (b) Einbezug der Materialfeuchte zur Abschätzung d Brennwertes	:he les 99
Abbildung 86: Definition eines Brennwertanpassungsfaktors für unterschiedliche Trocknungseffizienz hier am Beispiel für Ersatzbrennstoff abgeleitet aus Plastikfolien	en 00
Abbildung 87: Modell zur Anpassung des Brennwertes auf Basis der gemessenen Materialfeuchte 1	00
Abbildung 88: Generalisiertes Sensormodell 1	02
Abbildung 89: Implementierung einer Anlage zur Annahme, Lagerung, Förderung, Aufbereitung u Dosierung von alternativen Brennstoffen innerhalb des Simulationstools	ind 03
Abbildung 90: Blockdiagramm des Fuzzy-basierten Reglers zur Maximierung des Einsatzes v alternativen Brennstoffen	on 04
Abbildung 91: Simulink-Modell zur Simulation des feuchte-basierten Dosieransatzes für alternati Brennstoffe	ive 05
Abbildung 92: Vergleich von klassischer (a) und sensorbasierter (b) Zufuhr von alternativen Brennstoff und der damit verbundenen Fluktuation des Energieeintrages	ien 06
Abbildung 93: Fuzzy-Regler zur Optimierung der Energiezufuhr zum Drehrohrofen	07
Abbildung 94: Simulationsergebnisse zur Maximierung des Einsatzes von alternativen Brennstoffen . 1	07
Abbildung 95: Simulinkdarstellung des Gesamtsystems "vom Steinbruch bis zum Zementsilo" 1	09
Abbildung 96: Datenquellen eines Sichters: Leitstandbild1	10
 Abbildung 97: Datenquellen eines Sichters (Fortsetzung): a) und b) Geoetriedaten des Sichters im ZM Mühlenkreislauf; c) Typ-Schild mit wichtigen Kenndaten; d) Kennlinien des Sichtergebläse aus o Auslegungsrechnung des Sichters [42]	/13- der 11
Abbildung 98: Beprobung der Mahlanlagen: 2.Kammer 1	12



vdz

DIMATTED



Abbildung 99: Parametrisierungsmodell des Mahlkreislaufs 113
Abbildung 100: Parametervariation der Konduktivitätsfakoren in der Mühle; oben: Füllgrad der zweiten Mahlkammer, unten: Zugehöriger Lageparameter nach RRSB des Mahlproduktes (Indikator für die Feinheit)
Abbildung 101: Verschaltung des Sichterkreislaufs im Mahlkreislauf der Zementmühle 114
Abbildung 102: Parametervariation 1: Zementmühle115
Abbildung 103: Parametervariation 2: Zementmühle 116
Abbildung 104: Trenncharakteristik des Sichters der Rohmühle
Abbildung 105: Modell Kalzinator-Vorwärmer-Kühler zur Validierung119
Abbildung 106: Anlagen- und Gebläsekennline des Ofen-Systems 120
Abbildung 107: Gastemperaturen in den Zyklon-Vorwärmerstufen unter Variation des Brennstoffgehalts am Kalzinator
Abbildung 108: Heißmehl-Massenströme auf den Kalzinator und den Ofen unter Variation des Brennstoffgehalts am Kalzinator
Abbildung 109: Sauerstoffkonzentration in Kalzinator
Abbildung 110: Stickoxid- (oben) und Kohlenstoffmonoxid-Emissionen (Mitte) unter Variation des Brennstoffgehalts am Kalzinator
Abbildung 111: Expemplarische Darstellung des Abbrands über der Ofenlänge 125
Abbildung 112: Exemplarische Zusammensetzung des Festbetts entlang der Ofenachse 125
Abbildung 113: Verlauf der Klinkertemperatur entlang des Kühlers 126
Abbildung 114: Kühler Sekundärluft- / Tertiärluft- und Abgas-Temperatur 126
Abbildung 115 – Teststand zur Validierung des Schöpfvorgangs an einem Becherwerk (a) inklusive Zuführungvorrichtung (b)
Abbildung 116 – Exemplarischer Verlauf der Schöpfarbeit beim Schöpfvorgang abgeleitet von der aufgenommenen Stromaufnahme des angeschlossenen Motors
Abbildung 117 – Speifische. Schöpfarbeit in Abhängigkeit der Fördergeschwindigkeit für unterschiedliche Schüttgüter und Becherformen
Abbildung 118: Energiebedarfsermittlung von Bandförderern: (a) Vergleich unterschiedlicher Energiemodelle von Bandförderern im Vergleich zu realen Messdaten für unterschiedliche Fördergeschwindigkeiten; (b) Energiebedarf eines Bandförderers für unterschiedliche Materialzuführungen und Bandgeschwindigkeiten
Abbildung 119: Verlauf des Anfahrvorgangs der Zementmühle der Fa. Spenner
Abbildung 120 – Modellbasierte Brennstoffoptimierung auf Basis aktueller Sensordaten des Verbrennungsprozesses in Drehrohrofen und Klazinator und einem digitalen Zwilling
Abbildung 121 : Reinforcement Learning Struktur 134
Abbildung 122: Optimierung des Anfahrprozesse
Abbildung 123: Beispiel für die Integration von Feuchtigkeitsmesstechnik auf Basis von Mikrowellen in einen bestehenden Materialbunker eines gravimetrischen Dosiersystems: (a) Maßzeichnung zur Installation der Sensorik; (b) Prinzipdarstellung der Integration





4.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Tabellarische Zusammenstellung der zur Darstellungsebene übertragenen und empfang	enen
aggregatspezifischen Daten	16
Tabelle 2: Beschreibung Telegrammaufbau	57
Tabelle 3: Auflistung der betrachteten Wärmeströme im Ofenquerschnitt	82
Tabelle 4: Eigenschaften von alternativen Brennstoffen und zugeordnete Sensorkonzepte	92
Tabelle 5 Übersicht von Prozessstörungen, für die eine Kommunikationsstruktur erforderlich ist	. 137





