

## Neuro - Fuzzy - Regelung einer Zementmühle (Fachartikel VIP 2003)

J. Vogel (1), L. Runge (2), K.-D. Morgeneier (2)  
Vogel Automatisierungstechnik GmbH, Dornburg (1)  
Fachhochschule Jena (2)

### Kurzfassung

Eine Zementmahlanlage ist aus regelungstechnischer Sicht ein multivariablen, nichtlineares System. Fuzzy- oder Neuro/Fuzzy- Regelungssysteme tragen in besonderer Weise dem komplexen, nichtlinearen Charakter des Mahlprozesses Rechnung. Ein Neuronales Netz soll die Feinheit des Endproduktes Zement durch Modellierung des Prozesses vorhersagen und dadurch die Totzeit des bisherigen Regelungsverfahrens deutlich reduzieren. Bisher wurde die Feinheit des Fertiggutes ausschließlich durch Laborauswertung bestimmt, was eine Totzeit von 30 min ergab.

Durch den Einsatz des auf LabVIEW™ basierenden CIME-Systems mit integrierter Vorhersage der Mahlfeinheit durch ein Neuronales Netz wurde eine höhere Kontinuität in der Mühlenfahrweise erreicht. Die intelligenten Regelungsverfahren lassen sich durch die grafische Programmierung mit LabVIEW™ leicht und schnell an veränderte Prozessbedingungen anpassen.

### Abstract

A cement powdering plant is a multivariable, nonlinear system from the regulation technical view. Fuzzy or Neuro/Fuzzy control systems take the complex, nonlinear character of the process of powdering into account in a special way. A neural net shall predict the fineness of the final product cement by modeling of the process and reduce the dead time of the previous regulation procedure through it clearly. Till now, the fineness of the ready good exclusively was determined by laboratory evaluation what a dead time yielded of 30 min. By the input of the CIME system with an integrated forecast of the powdering fineness by a neural net based on LabVIEW™ a higher continuity was achieved in the mill operation. The intelligent regulation procedures can easily and fast be adapted by the graphic programming to changed process conditions with LabVIEW™.

### Einleitung

Das Expertensystem, Computational Intelligence Mill Expert (CIME), zur qualitativen und quantitativen Optimierung von beliebigen Produktionsprozessen ist frei konfigurierbar und somit für die unterschiedlichsten Einsatzfälle geeignet. Der Schwerpunkt liegt auf der Beherrschung nichtlinearer Prozesse mit hoher Komplexität, die zum Umkippen oder Wegdriften neigen. Es basiert auf der grafischen Programmierumgebung LabVIEW™. Die grafische Programmierung erlaubt es dem Kunden, seine Applikation nach kurzer Einarbeitungszeit selbst zu pflegen und zu erweitern.

In die grafisch programmierbaren Regelungen sind intelligente Technologien wie Fuzzy-Regler und Neuronale Netze integrierbar. Dadurch ließ sich das Neuronale Netze problemlos und schnell in das CIME-System einbinden. Parallel dazu lassen sich auch weitere Regelalgorithmen integrieren.

CIME ermöglicht durch die Offenheit und Vielseitigkeit von LabVIEW™ den parallelen Einsatz der verschiedensten linearen und nichtlinearen Regelungsverfahren.

Die komplexe Automatisierung mit CIME erfolgt unter folgenden Gesichtspunkten:

- Erhöhung der Flexibilität bei der Vermahlung verschiedener Zementarten
- Sicherung einer hohen Zementqualität und
- Halten von optimierten Prozesskosten auch in Extremsituationen.

Fuzzy- oder Neuro/Fuzzy- Regelungssysteme tragen in besonderer Weise dem komplexen, nichtlinearen Charakter des Mahlprozesses Rechnung:

- in Form von Wenn-Dann-Regeln kann Erfahrungswissen in die Regelung eingebracht werden (Fuzzy - Regelung)
- die Verknüpfungen zwischen den Prozessgrößen können besser berücksichtigt werden (Fuzzy-Regler mit mehreren Eignungsgrößen) und
- über ein entsprechend trainiertes künstliches neuronales Netz (KNN) können Prozesseigenschaften erfasst und als Führungsgröße einem Fuzzy-Regler aufgeschaltet werden (Neuro/Fuzzy-Regelung).

Eine Zustandserkennung bewertet den Momentanwert und die Änderungsgeschwindigkeit der Prozessgrößen und wählt daraufhin die entsprechende Regelstrategie aus. Die Prozessgrößen werden dafür auf eine einheitliche Wertungsskala normiert. Die Wertungsskala einer Prozessgröße wird in Balkenform mit kontinuierlichem Farbumschlag angezeigt, sodass der Bediener die Ergebnisse der Zustandserkennung nachvollziehen und kontrollieren kann. Die übersichtliche Darstellungsform von komplexen Zuständen ist eine wesentliche Eigenschaft des CIME-Systems. Mit Hilfe der Zustandserkennung lassen sich auch Extremsituationen (z.B. Überfüllung der Mühle oder des Mühlenaustragsbecherwerks) rechtzeitig erkennen und abfangen.

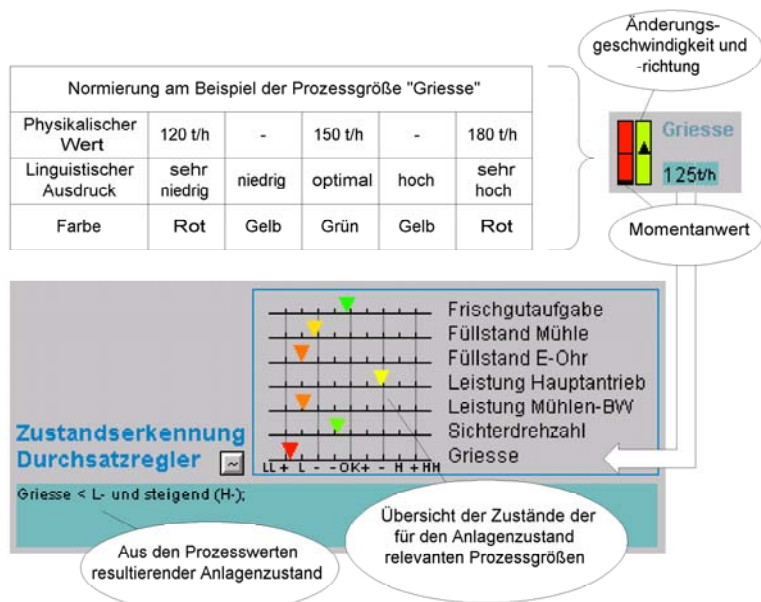


Bild 1: Übersichtliche Darstellung des aktuellen Prozesszustandes

Die Zustandserkennung ist mit Petri-Netzen realisiert. Petri-Netze sind eine Entwurfsmethode bei der Software-Erstellung. CIME erlaubt aber auch die Programmierung mit Petri-Netzen. Die Petri-Netze werden dabei direkt in die Diagramme der grafischen Programmierumgebung gezeichnet und sind sofort ausführbar. Das direkte Programmieren in Entwurfsmethoden erleichtert und verkürzt die Implementierung und den anschließenden Test von komplexer Funktionalität.

Als Visualisierung kam WinCC zum Einsatz diese besitzt alle Merkmale moderner, vollgrafischer Visualisierungssysteme wie Trenderfassung, Meldungserzeugung und Benutzerverwaltung. Im vorgestellten Einsatzfall besteht die Aufgabe, die Zementproduktion einer Kugelmühle hinsichtlich Qualität und Quantität zu optimieren. Die Produktion ist bereits weitgehend automatisiert. Es gibt einen zentralen Leitstand mit einem Prozessleitsystem. Das CIME-System besteht aus einem PC mit der Regelungs-Software und einer WinCC-Visualisierung. Es wird an das vorhandene Leitsystem gekoppelt. Alle relevanten Prozessgrößen werden vom Leitsystem übergeben und die entsprechenden Stellgrößen wieder zum Leitsystem gesendet.

Das CIME-System beinhaltet eine Rezepturverwaltung zur Produktion verschiedener Zementsorten. Die Rezepturwerte sind gemeinsam mit anderen rezepturabhängigen Prozess- und Regelparametern in einer Datenbank gespeichert. Jeder Zementsorte ist ein Parameterdatensatz zugeordnet.

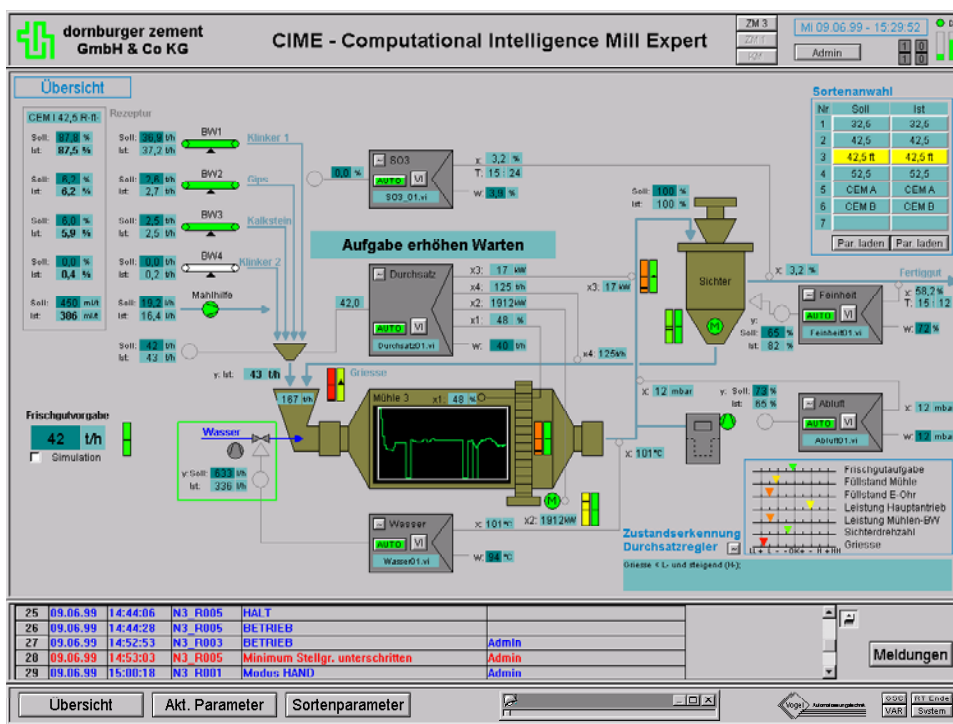


Bild2: WinCC - Visualisierungsbild CIME

Die Regelung besteht aus fünf unabhängigen Reglern, die folgende fünf Prozessgrößen beeinflussen:

- der Unterdruck der Mühlenabluft
- die Feinheit des Mahlgutes
- der SO<sub>3</sub>-Gehalt des Mahlgutes
- die Temperatur in der Mühle
- der Durchsatz der Mühle

Ein Neuronales Netz kommt zur Verringerung der Totzeit einer Prozessgröße zum Einsatz, die als Regelgröße für den Feinheitsregler benötigt wird. Bisher wurde die Feinheit des Fertiggutes ausschließlich durch Laborauswertung bestimmt, was eine Totzeit von 30 min ergab. Ein Multilayer-Perzeptron-Netz ermittelt durch Modellierung des Prozesses den Feinheitswert. Es stützt sich dabei auf die Laborauswertung und weitere Prozessparameter. Das Neuronale Netz kann die Feinheit kontinuierlich bestimmen, woraus sich nun eine Totzeit im Sekundenbereich ergibt. Der Entwurf und die Realisierung des Neuronalen Netzes wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

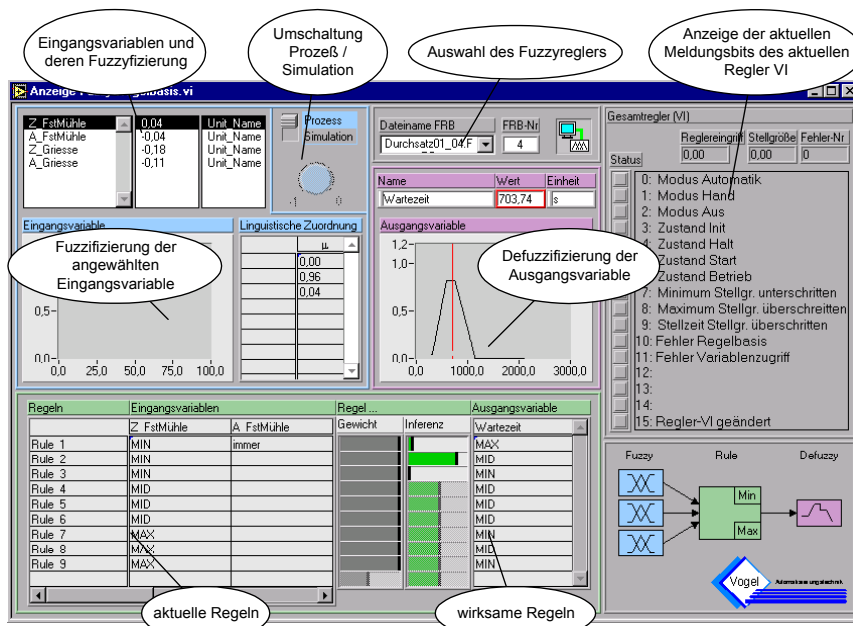
### **Leistungsmerkmale von CIME**

Die Leistungsmerkmale des CIME sind durch nachfolgende Punkte gekennzeichnet:

- Realisierung aller Regelung in LabVIEW™
- Rezeptur- und Parameterverwaltung für alle Zementsorten in einer Datenbank
- Trends und Meldungen für jeden Regler
- Implementierung intelligenter Regelverfahren (Fuzzy, Neuronale Netze)
- Verwendung von Petri-Netzen bei der grafischen Programmierung mit LabVIEW™
- Benutzerdefinierter Regler-VI's für jede Sorte
- Online-Bearbeitung der Regler-VI's
- Zugriffsschutz für jeden Parameter einstellbar
- Zustandserkennung zur Auswahl von Regelstrategien
- Online-Beobachtung der Fuzzy-Regelbasen
- einfache Erweiterbarkeit durch den Benutzer (z.B. Anzahl der Parameter oder Prozessvariablen, Änderung von Messbereichsgrenzen und Bezeichnungen aller Variablen - Online)

## Werkzeuge zur Optimierung der Regler

Zur optimalen Einstellung der Fuzzy-Regler steht ein leistungsfähiges Tool zur Verfügung. Der ausgewählte Fuzzy-Regler kann sowohl am Prozess beobachtet, als auch durch



Vorgabe von Eingangswerten in seinem Verhalten simuliert werden.

Bild3: Einstellung der Fuzzy-Regler

## Regelungsstruktur der Mahlanlage und KNN

Als primäres Ziel wurde im Vorfeld die möglichst genaue Vorhersage (Funktionsapproximation) des Feinheitswertes festgelegt. Mit dem Erreichen dieses Zieles könnte die Anlage in folgende Richtungen optimiert werden:

- Reduzierung der Häufigkeit der Analysen
- schnelleres Reagieren auf Veränderungen im Mahlprozess
- eventuelle Durchsatzsteigerung durch stabilisierte und optimierte Fahrweise.

Durch die schnellere Auswertung des Feinheitswertes könnte man zugleich näher am Prozess fahren und somit qualitätsstabiler werden.

Die nun vorliegende Regelungsstruktur unterscheidet sich im Messsystem und den daraus veränderten Regelparametern. Das Messsystem (Analysegerät) wird zeitweise von einem neuronalen Netz ersetzt. Dazu kommen Anpassungen bei den Ansteuerelementen (z. B. Frequenzumrichter) und den Aktoren. Es müssen jedoch keine zusätzlichen Geräte angeschafft werden und es entfallen auch aufwendige Softwareinstallationen.

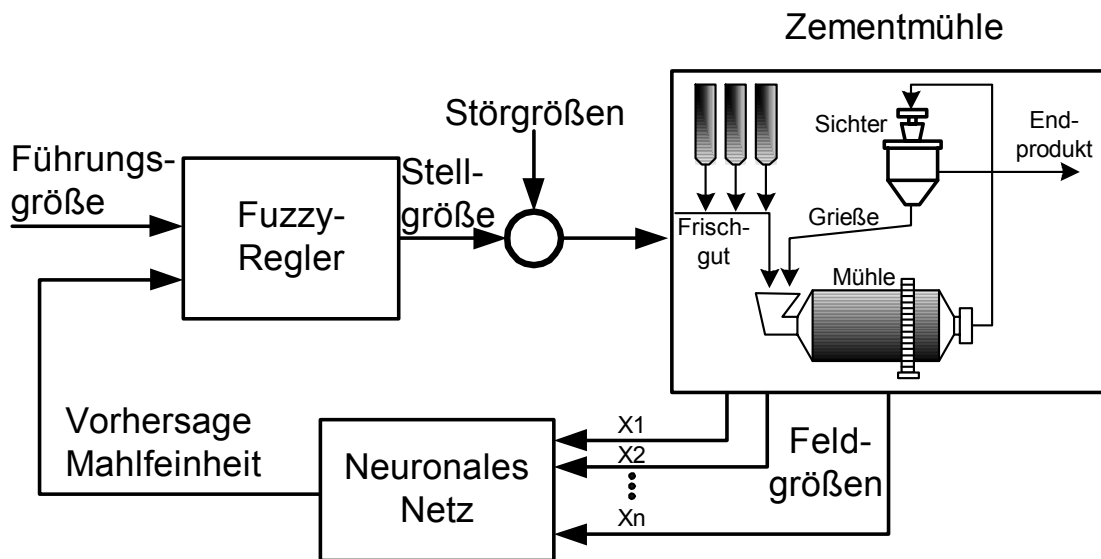


Bild5: Regelungsstruktur mit KNN

Die Eingangsgröße des KNN (gemessene Prozessgrößen) und die in einem größeren Zeitintervall erfassten Werte des Analysators werden zum ständigen Nachtrainieren des KNN benutzt, weshalb für die berechneten Führungsgrößen der aktuelle Prozesszustand der Mahlanlage berücksichtigt werden kann.

### Zusammenfassung

Durch den Einsatz des CIME-Systems mit integrierter Vorhersage der Mahlfeinheit durch ein KNN wurde eine höhere Kontinuität in der Mühlenfahrweise erreicht. Diese führte durch bessere Auslastung der Anlagenkapazität (Steigerung der Produktionsmenge) zu einer Verringerung des Elektroenergieverbrauchs. CIME verhindert Extremsituationen durch integrierte Sicherheitsstrategien und erhöht somit die Prozesssicherheit. Es kommen intelligente Regelungsverfahren zum Einsatz, die durch grafische Programmierung leicht und schnell an veränderte Prozessbedingungen anpassbar sind.

In das künstliche neuronale Netz wurden die Prozessparameter der Mahlanlage integriert und das Nachtrainieren durch die Laborwerte realisiert. Durch dieses neue System der Mahlfeinheitsregelung konnte eine wesentliche Verbesserung der Regelgüte erzielt werden. Der Hauptgrund für diesen Effekt liegt in der deutlich verkürzten Totzeit zwischen zwei Regeleingriffen von ca. 30 min auf < 30 s. Das KNN konnte fast bis an die Genauigkeit des Analysengerätes heran trainiert werden und ist somit über lange Betriebszeiten als adäquate Methode zur Bestimmung von Produktfeinheiten anzusehen.

### Literaturhinweis

- [1] Bedienungsanleitung Computational Intelligence Mill Expert  
Vogel Automatisierungstechnik GmbH, Dornburg 1999 [www.vat.de](http://www.vat.de)
- [2] 5tes Nationales&3rd International DataAnalysis Symposium 16.09.199 in Aachen  
Computational Intelligence Mill Expert
- [3] Zement-Kalk-Gips Heft 09/2002 Neuro - Fuzzy - Regelung