

## SIMDES - Ein neues Konzept zur Steuerung und Regelung verfahrenstechnischer Anlagen

Romann, M.

*Im Projekt SIMDES soll am Beispiel eines Entschwefelungsprozesses die Eignung neuronaler Netze für die Überwachung und Regelung verfahrenstechnischer Anlagen geprüft werden. Der untersuchte Prozeß ist relativ unkompliziert und kann daher in einem Rechnermodell nachgebildet werden. Das Rechnermodell trainiert zunächst das neuronale Netz, bis dieses in voergleichbarer Weise auf die Eingabegrößen reagiert. Im zweiten Schritt modelliert das Netz den realen Prozeß. Die Differenz zwischen der Modellrechnung und dem realen Prozeß wird als Regeldifferenz auf einen Regler zurückgeführt, der wiederum die Stellglieder der Anlage bedient. In diesem Testbetrieb zeigt sich, ob das Modell des Prozesses ausreicht, ein Netz zu trainieren und ob das neuronale Netz anschließend "lernt" mit dem realen Prozeß und dem Regler zurechtzukommen. Und: wird ein neuronales Netz imstande sein, den Prozeß zu optimieren?*

*The project SIMDES will show the suitability of neural nets for the control of process engineering machinery. The investigated example process is a less complicated chemical desulphurisation process of an exhaust gas. The first step includes the running of the process to gain the real process parameters and their behaviour. After this a neural net based model of the process is worked out and is trained with the results of the real process. The output of the working model will be compared with the real values of the process and the difference will be the feedback for the regulator of the entire process. SIMDES reaches its goal if the model and the regulator collaborates clearly in order to reach a stable running of the chemical process for desulphurisation.*

### 1. Einleitung

Die moderne Verfahrenstechnik verwirklicht Prozesse, die eine immer größer werdende Zahl aufeinanderfolgende Verfahrensschritte erfordern. Die Anlagen zu diesen Prozessen bilden hochkomplexe Systeme des Energie- und Stofftransports, in denen zu-

nehmend Teilströme zurückgeführt werden, oft aus Gründen der Wiederverwertung von Hilfsstoffen oder zur effektiveren Nutzung von Energie. Eine Beschreibung und Modellierung derartiger Systeme ist nur dann vollständig möglich, wenn die nichtlinearen und vorallem rückgekoppelten Strukturelemente und deren Interdependenzen vorhanden und verstanden sind. sind alle notwendigen Parameter bekannt und deren Wechselwirkungen untereinander ausreichend beschreibbar, dann ist ein deterministischer Programm in der Lage, die Anlage zu regeln.

Eine derartige, vollständige Beschreibung mag für jede einzelne Prozeßstufe gelingen, eine Entkopplung aller Prozeßstufen voneinander, z. B. durch Einfügen von Speicherbehältern, reduziert im Extremfall den Steuerungs- und Regelungsaufwand auf die einzelnen Stufen, das Verfahren wird jedoch unflexibel und lagert große Materialmengen. Ein optimal und flexibel gesteuerter Prozeß erfordert daher die Betrachtung der Anlage als Gesamtsystem.

Ein entsprechend komplizierter Prozeß entzieht sich jedoch oftmals einer vollständig automatisierten Steuerung. Es ist zwar möglich, mithilfe einer hochentwickelten Meß- und Regelungstechnik den stabilen Betrieb einer Anlage zu automatisieren, dennoch greift der Betriebsleiter korrigierend ein, wenn beispielsweise die Qualität des Produkts nachzulassen beginnt, die Steuerungstechnik jedoch nicht in der Lage ist, eine optimale Möglichkeit zur Korrektur auszuwählen und umzusetzen.

Die „Erfahrung“ des Betriebsleiters und dessen „Gefühl“ für den Prozeß bleiben unverzichtbare Elemente einer optimalen Prozeßführung. Die Entwicklung der Informationstechnologie in den letzten Jahren zeift jedoch, daß selbst diese Felder nicht auf den menschlichen Beobachter beschränkt bleiben müssen. Eine Nachbildung menschlicher Eigenschaften erlauben neue Softwaretechnologien, die unter den Bezeichnungen „Fuzzy Logic“ und „neuronaler Netze“ bekannt wurden und zunehmend Eingang in die Industrie finden.

## 2. Entschwefelung

Am Institut für Energieverfahrenstechnik an der TU Clausthal besteht seit einigen Jahren fundiertes Know-How in der Entschwefelung von Rauchgasen /1/. Hier wird anhand einer Technikumsanlage ein schwefeldioxidhaltiges Rauchgas simuliert, das anschließend einer Entschwefelung mit Feststoffadditiven auf Calciumbasis unterzogen wird.

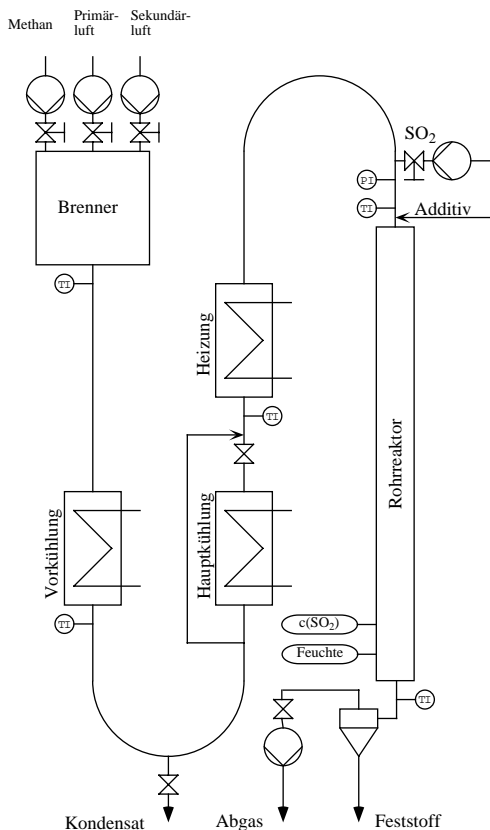


Bild 1: Technikumsanlage

Die Anlage verfügt über einen Methangasbrenner, in dem je Stunde ca 5 m<sup>3</sup> Erdgas verbrannt werden und damit eine thermische Leistung von 50 kW erbringt. Die Konditionierung des Rauchgases geschieht über 2 hintereinandergeschaltete Wärmetauscher, eine Tauchrohrheizung und einen Bypass um den zweiten Wärmetauscher. Diese Anlagenteile ermöglichen die Einstellung der Temperatur und der Feuchte des Rauchgases, bevor es in den Rohrreaktor eintritt. Vor dem Eintritt in die Reaktionszone wird soviel Schwefeldioxid beigemischt, so daß im Rauchgas eine Konzentration von 900 bis 1000 ppm erreicht wird. Das Rauchgas durchströmt einen statischen Mischer und wird gleich danach mit dem Additiv in innigen Kontakt gebracht. Die Zufuhr des feinkörnigen Additivs leistet ein Injektor, der nach dem Diffusionspumpenprinzip arbeitet und die Partikel mithilfe von Preßluft dispergiert und in die Gasströmung einbläst.

Nach 2m Reaktionsstrecke, die typisch in 1,8 Sekunden zurückgelegt werden, scheidet ein Zyklon den Feststoff aus der Gasströmung ab. Hernach zieht ein Saugzuggebläse das entschwefelte Rauchgas durch ein Feinfilter. Entschwefelt und entstaubt tritt das Rauchgas ins Freie.

Am Ende der Reaktionsstrecke befindet sich die Probenahmestelle, an der die Feuchte und die Zusammensetzung des Rauchgases überwacht werden. Zur Bilanzierung der Anlage werden zusätzlich sämtliche Massenströme bestimmt, sowie an mehreren Stellen die Temperaturen überwacht /2/. Alle Meßgrößen bilden später den Input für ein Neuronales Netz, dem die Steuerung und Regelung dieses Beispielprozesses obliegt.

## 3. Anforderung an die Steuerung

Die Entschwefelung des Rauchgases sollte energetisch und wirtschaftlich möglichst optimal arbeiten. Das bedeutet, daß minimale Mengen zusätzlicher Chemikalien benötigt werden und möglichst wenig Energie für den Entschwefelungsprozeß aufgewendet werden soll. Die resultierende Konzentration von Schwefeldioxid im entschwefelten Rauchgas hängt von mehreren Prozeßparametern ab, insbesondere von der Temperatur, der Feuchte, dem Druck und dem molaren Verhältnis Additiv zu Schwefel. Die Schwefeldioxidkonzentration ist also eine mehrdimensionale Funktion, die unterschiedliche Optima aufweisen kann, daneben aber auch Restriktionen unterliegt, wie z. B. den Grenzen der Prozeßparameter und physikalischen Gesetzen. Durch Reihenversuche, bei denen jeweils der Einfluß eines Prozeßparameters untersucht wird, können günstige Betriebszustände aufgefunden werden.

Eine einfache Meß- und Regelungstechnik ermöglicht den stabilen Betrieb der Anlage. Betriebsschwankungen oder -störungen können jedoch nur begrenzt aufgefangen werden. Hierzu soll ein neues Konzept verfolgt werden, das eine weitergehende Steuerung und Regelung des Prozesses ermöglicht: eine Anwendung neuronaler Netze /3/.

## 4. Neuronale Netze

Die moderne Informationstechnologie hat in den letzten Jahren gezeigt, daß es möglich ist, einige Aspekte von Funktionen des menschlichen Gehirns auf Computern zu simulieren. Dabei hielt man sich eng an die Erkenntnisse der Biologie, die das Neuron als eines

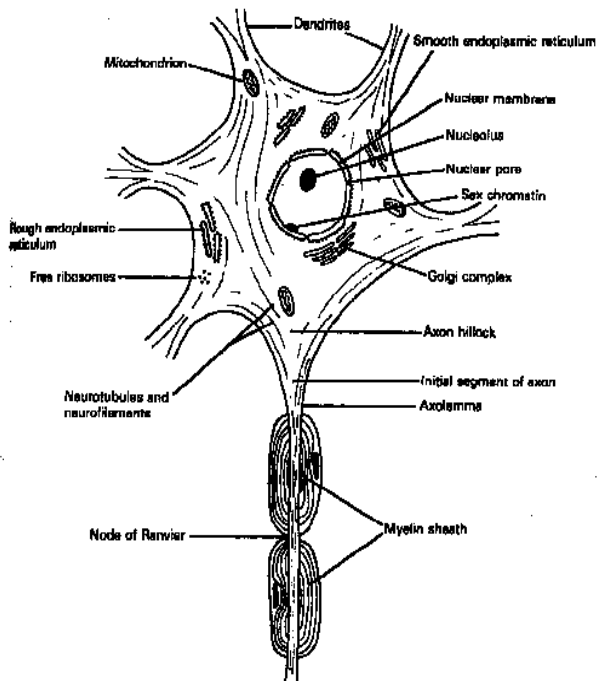


Bild 2: Neuron

der Grundelemente des Gehirns erkannt hatte.

#### 4.1 Das Neuron

Der typische Aufbau eines Neurons ist in **Bild 2** gezeigt. Die Dendriten bilden die Eingänge zu der Gehirnzelle, deren Axon den einzigen Ausgang bildet. Der Axon selbst verzweigt sich in viele Äste, die über Synapsen wiederum mit den Dendriten anderer Neuronen in Verbindung stehen. Diese vereinfachte Darstellung zeigt den prinzipiellen Aufbau des neuronalen Netzes im Gehirn, das in Wirklichkeit noch eine Reihe weiterer Strukturelemente umfaßt. Welche Leistung von einem neuronalen Netz erwartet werden kann, zeigt ein Vergleich der Leistung von Gehirnzellen und Computern: Die Signalgeschwindigkeit im Axon beträgt ca 100 m/s und die minimale Zeit zwischen zwei Impulsen beträgt ungefähr 1 Millisekunde /4/. Die

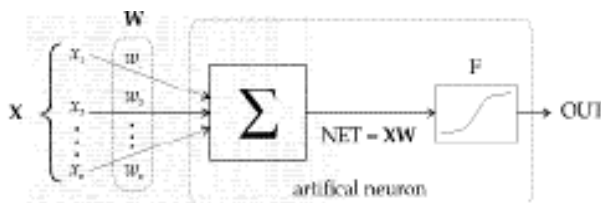


Bild 3: Modell eines Neurons

Signalgeschwindigkeiten in Mikrochips liegen hingegen einige Zehnerpotenzen höher. Es ist zur Zeit jedoch ausgeschlossen, ein neuronales Netz mit mehr als 100 Milliarden Neuronen rechnergestützt zu simulieren.

**Bild 3** zeigt ein künstliches Neuron, wie es in der Programmieretechnik eingesetzt wird. Der Vektor  $x$  stellt die Eingangsgrößen dar, die von außen an das Neuron herangeführt werden. Jede Eingangsgröße wird gewichtet. Der Vektor  $w$  mit den Gewichten stellt dabei den variablen Teil des Neurons dar, da diese Gewichte während der Trainingsphase des Netzes immer wieder verändert werden. Die Summe aus den Produkten von Eingangsgrößen mal deren Gewichte ergibt den Eingangsparameter der Funktion  $F$ , deren Wert den Ausgang des Neurons widerspiegelt. Eine gebräuchliche Ausgangsfunktion  $F$  mit dem Eingangsparameter  $NET$  und dem Funktionswert  $OUT$  für ein künstliches Neuron ist beispielsweise in der Form

$$OUT = \frac{1}{(1 + e^{-NET})}$$

gegeben.

Ein einzelnes Neuron ist somit in der Lage, einen gewichteten Entscheidungswert abhängig von einer Anzahl Eingangsparameter zu liefern. Die Entscheidung beruht dabei auf „Erfahrungswerten“, die in dem Gewichtungsvektor und der Ausgangsfunktion gespeichert sind. Damit lassen sich bereits sehr einfache Aufgaben erfüllen. Die eigentliche Leistung erwächst aber erst aus einem Netz von Neuronen.

#### 4.2 Netztopologie

Der Aufbau eines einfachen neuronalen Netzes zeigt **Bild 4**. Dieses Netzwerk setzt sich aus einem Eingangs- und einem Ausgangs-layer zusammen. Der Eingangs-layer liefert jedem Neuron des Ausgangs-layers einen gewichteten Eingangswert, er verteilt damit die Eingangswerte. Die Neuronen des Ausgangs-layers wiederum gewichten ebenfalls ihre Ein-

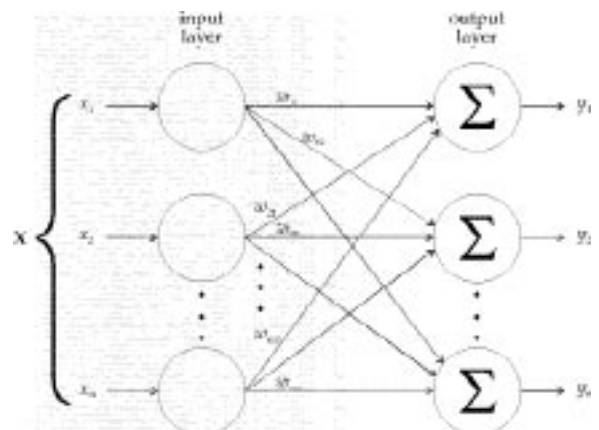


Bild 4: Neuronales Netz aus 2 Layern

gangswerte, so daß  $w$  nunmehr eine Matrix bildet. Das Netz ist voll untereinander vernetzt, d. h. daß alle Neuronen untereinander verbunden sind. Eine volle Vernetzung wird jedoch selten verwirklicht, da der Programmier- und Rechenaufwand mit steigender Zahl von Neuronen überproportional zunimmt /5/.

## 5. Modellbildung

Zur Bildung des Modells müssen Experimente mit der Entschwefelungsanlage durchgeführt werden, um experimentelle Daten zu sammeln, auf deren Basis das neuronale Netz trainiert wird /6/. Während des Trainings „lernt“ das Netz den Entschwefelungspro-

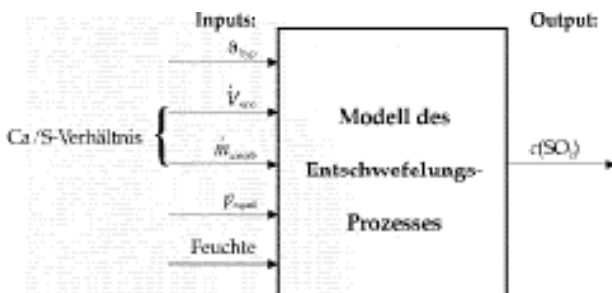


Bild 5: Black-Box-Modell

zeß zu simulieren, indem es die Elemente der Gewichtungsmatrix  $w$  in einem ständig wiederholten Durchlauf neu festlegt, bis letztlich der Output des Modells sich dem Output des realen Prozesses annähert.

## 6. Anbindung an einen Regler

Die Differenz zwischen dem Output des Modells und dem tatsächlichen Prozeßparameter kann als Regeldifferenz über einen Filter auf einen Regler zurückge-

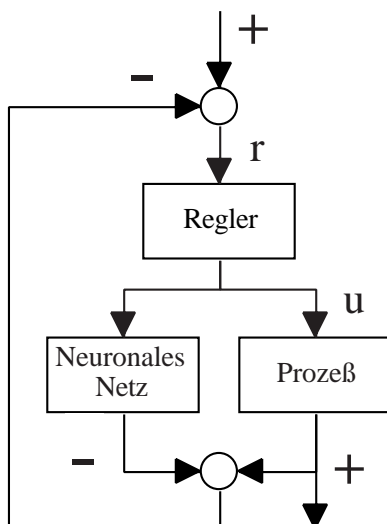


Bild 6: Anbindung des neuronalen Netzes

geben werden /7/. **Bild 6** zeigt eine einfache Möglichkeit, wie ein neuronales Netz im Verbund mit einem Regler arbeiten kann. Der Regler selbst kann ebenfalls auf einem neuronalen Netz basieren, aufgrund des hohen Aufwands ist das aber bisher nur selten realisiert worden.

SIMDES hat sich zum Ziel gesetzt, die Anbindung eines neuronalen Netzes in einen Regelkreis zu erarbeiten.

## 7. Zusammenfassung

In diesem kurzen Überblick wurde die zukünftige Arbeit im Projekt SIMDES, das gerade angelaufen ist, in ihren Grundzügen umrissen. Die Anwendung neuronaler Netze ist bereits in einigen Labors erfolgreich realisiert worden, wo abstrakte Vorgänge, wie z. B. die Muster- oder Bilderkennung, rechnergestützt automatisiert werden konnten. Neuronale Netze werden in Zukunft auch Gebiete der industriellen Anwendung erschließen.

## Literatur

- /1/ Th. Hünlich, R. Jeschar, R. Scholz  
Sorptionsskinetik von  $SO_2$  aus Verbrennungsabgasen bei niedrigen Temperaturen  
Zement-Kalk-Gips 39 (1986), Nr. 5, S. 251-258
- /2/ Robert H. Perry  
Perry's Chemical Engineers' Handbook  
Sixth Edition, MacCraw-Hill, 1984
- /3/ Mitsuru Takeshita, Herminé Soud  
FDG Performance and experience on coal-fired plants  
London, IEA Coal Research 1993
- /4/ Wilkinson, J. L.  
Neuroanatomy for medical students  
London, Boston, Singapore, Sydney, Wright 1986
- /5/ Pham, D. T.  
Neural Networks in Engineering, Cardiff
- /6/ Liu, Xing  
System identification and prediction using neural networks  
Thesis at the Intelligent Systems Research Laboratory of the University of Wales, College of Cardiff, 1993
- /7/ Yang, Y. Y., Linkens D. A.  
Adaptive neural-network-based approach for the control of continuously stirred tank reactors.  
IEEE Proceedings Control theory and applications, Vol. 141, 1994, pp. 341-349