

# Fuzzy Logic-basiertes Machine Learning in der Prozessmodellierung

Ulrich Bodenhofer  
Software Competence Center Hagenberg  
A-4232 Hagenberg, Austria  
*ulrich.bodenhofer@scch.at*

Für die Optimierung eines technischen Prozesses ist ein ausreichendes Verständnis der Zusammenhänge im Prozess unerlässlich. Konkret bedeutet das, dass ein hinreichend genaues Prozessmodell vorliegen muss. Traditionelle Methoden zur Modellierung technischer Prozesse gehen in der Regel von analytischen Modellen aus, also bekannten Gesetzen aus Physik, Chemie und angelagerten Ingenieurwissenschaften, die entweder in expliziter Form vorliegen oder sich als Lösungen meist hochkomplexer Systeme partieller Differentialgleichungen und/oder Integralgleichungen ergeben. In der Praxis ist man allerdings oft mit Prozessen konfrontiert, die sich entweder aufgrund ihres hohen Komplexitätsgrades einer analytischen Modellierung vollkommen entziehen oder deren analytische Modellierung — obwohl technisch machbar — ökonomisch nicht vertretbar ist.

Maschinelle Lernverfahren bieten hierbei oft eine geeignete Alternative. Unter maschinellen Lernverfahren versteht man eine bestimmte Klasse von Methoden, die aus Daten Zusammenhänge identifizieren können. Im Gegensatz zu statistischer Regression gehen maschinelle Lernverfahren nicht von einem vordefinierten parametrischen Modell aus, sondern bedienen sich allgemeinerer Darstellungsformen, oft mit universellen Approximationseigenschaften. Dazu zählen nicht zuletzt auch neuronale Netzwerke. Im Gegensatz dazu ist der vorliegende Beitrag einer besonderen Klasse gewidmet — regelbasierten Verfahren, die sich Fuzzy Logic bedienen — also Verfahren, die aus Daten Fuzzy-Regelsysteme (in Form unscharf formulierter Wenn-Dann-Regeln) erzeugen. Regelbasierte Verfahren zeichnen sich im Allgemeinen dadurch aus, dass sie über ein klassisches Black-Box-Vorhersagemodell hinaus wertvolle Einblicke in den Prozess erlauben. In traditionellen Ansätzen mit scharfen Klassifizierungsregeln ist es aber nicht möglich, daraus direkt ein Modell mit stetigen Übergängen abzuleiten. Der Fuzzy Logic-Ansatz bietet hierbei den entscheidenden Mehrwert, dass er sowohl wertvolle Einblicke in die Interna des betrachteten Prozesses bietet und auch gleichzeitig erlaubt, ein Prozessmodell mit interpolierenden Eigenschaften abzuleiten.

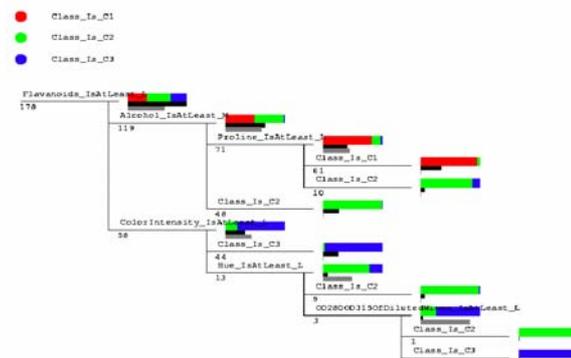
Maschinelle Lernverfahren stellen vor allem dann eine Alternative zu analytischer Prozessmodellierung dar, wenn Daten in ausreichender Menge und Qualität vorliegen. Ist absehbar, dass signifikante Einflüsse von Parametern herrühren, die nicht erfassbar sind, macht der Einsatz maschineller Lernverfahren wenig Sinn. Die Verfügbarkeit von Daten in entsprechender Menge und Qualität ist aber heute in vielen Bereichen gegeben. Viele Unternehmen führen in ihren Prozessen laufend Messungen durch, die in einer Betriebsdatenerfassung gespeichert werden. Maschinelle Lernverfahren bieten eine einfache und effektive Möglichkeit, aus diesen Datenbeständen echten Nutzen für die Prozessoptimierung zu ziehen.

Fuzzy Logic-basierte maschinelle Lernverfahren für sich sind in der Regel sehr einfach anwendbar. Voraussetzung dafür ist allerdings eine geeignete Vorverarbeitung der Daten, die sich — abhängig vom konkreten praktischen Problem und dem vorliegenden Datenmaterial — durchaus aufwändig gestalten kann. Insgesamt ist die Anwendung eines maschinellen Lernverfahrens ein interaktiver Prozess, in dem das Modell auf Basis der erzielten Ergebnisse laufend verfeinert wird.

Es sind heute eine Reihe effizienter Fuzzy Logic-basierter maschineller Lernverfahren verfügbar, die sich im harten Alltag industrieller Anwendungen bestens bewährt haben. Am

Forschungszentrum des Vortragenden wurden mehrere solche Methoden abgestimmt auf die Domäne Prozessmodellierung entwickelt:

- **FS-ID3:** eine Methode, die eine Regelbasis in Form eines Entscheidungsbaumes mit unscharfen Verzweigungen repräsentiert;
- **FS-FOIL:** ein induktives Lernverfahren, das eine Fuzzy-Regelbasis in tabellarischer Form berechnet;
- **RENO:** ein hocheffizientes numerisches Verfahren, das Fuzzy-Regelsysteme optimiert; durch die Anwendung von Regularisierungsmethoden liefert diese Methode auch dann genaue und robuste Ergebnisse, wenn die Daten verrauscht oder unvollständig sind;



Diese Methoden sind auch inzwischen Bestandteil eines Softwarepaketes zur Datenanalyse, das schon in einer Reihe von Industrieprojekten erfolgreich angewendet wurde:

- **Papierproduktion:** Die Herstellung von Papier ist ein hochkomplexer Prozess, der sich einer ausreichend realistischen analytischen Modellierung bisher weitestgehend entzogen hat. Zur Optimierung des Prozesses ist aber trotzdem notwendig zu wissen, wie die zahlreichen Prozessparameter die Qualität des Papiers beeinflussen (im vorliegenden Fall konkret die verschiedenen Bedruckbarkeits-eigenschaften des Papiers). In diesem Projekt wurde ein maßgeschneidertes Softwarepaket entwickelt, das aggregierte Prozessparameter aus der Betriebsdatenerfassung den Bedruckbarkeitseigenschaften, die mit einem eigens dafür entwickelten Bildverarbeitungssystem gemessen werden, gegenübergestellt. So können laufend wertvolle nichttriviale Zusammenhänge identifiziert werden, die für eine weitere Optimierung der Papiermaschine herangezogen werden.

- **Spritzgießprozess:** Für diesen Prozess stehen Softwarepakete auf Basis analytischer Modelle zur Verfügung. Diese sind allerdings nicht in der Lage, alle realen Einflüsse zu berücksichtigen (z.B. Alterung der Maschine, Umgebungsbedingungen in der Maschinenhalle). In einem Pilotprojekt wurde demonstriert, dass der Einsatz maschineller Lernverfahren zur Vorhersage bestimmter Qualitätseigenschaften des Spritzgusses (z.B. Masse, Maßhaltigkeiten) aus in der Maschine gemessenen Prozessparametern möglich ist.


Darüber hinaus haben sich vielfältige praktische Anwendungsmöglichkeiten für andere Bereiche der Prozessindustrie (z.B. Zementherstellung, pharmazeutische Herstellungsprozesse) ergeben, in denen Unternehmen mittels Fuzzy Logic-basierter maschineller Lernverfahren Hilfestellungen bei der Prozessoptimierung gegeben werden konnten.

**Zum Autor:** Dr. Ulrich Bodenhofer ist wissenschaftlicher Leiter des Software Competence Center Hagenberg (SCCH). Davor leitete er am SCCH den Bereich „Knowledge-Based Technologies“. Er verfügt über eine langjährige Erfahrung in der Grundlagenforschung im Gebiet Fuzzy Logic und deren industrielle Anwendungen in der Prozessmodellierung sowie im Bereich Signal- und Bildverarbeitung.