

Biegen mit „Fuzzy Logic“

Herausragende Reproduzierbarkeit bei hohem Bedienerkomfort

Juha Karisola

Universitäten, Forschungszentren und die Produktentwicklungsabteilungen privatwirtschaftlicher Unternehmen arbeiten ständig an der Erprobung neuer Möglichkeiten zur Verbesserung der Zuverlässigkeit, der Qualität und der Reproduzierbarkeit von Fertigungsprozessen, um die kontinuierlich steigenden Qualitätsanforderungen der Wirtschaft erfüllen zu können. Eine dieser völlig neuen und hochinteressanten Möglichkeiten zur Steigerung der Prozeßleistung bei einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen ist die Steuerung mittels „Fuzzy Logic“

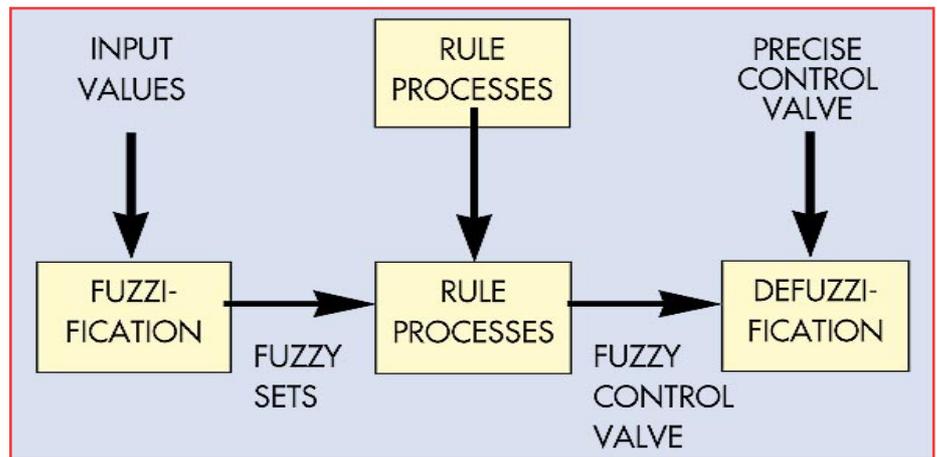


Bild 1 Schnittstelle für „Fuzzy Logic“ (Input Values: Eingangswerte; „Fuzzifikation“; Rule Processes: Verarbeitung der Regeln; Fuzzy Sets: Unbestimmte Mengen; Precise Control Value: Präziser Steuerwert; Fuzzy Control Value: Unbestimmter Steuerwert; Defuzzifikation: „Defuzzifikation“)

Die „Fuzzy Logic“ ist eine gänzlich neue Art der Computerlogik, die auf einem systematischen Ansatz der Handhabung von qualitätsbezogenen Informationen beruht. Dabei werden automatisierte Steuerungssysteme in die Lage versetzt, ähnlich einem menschlichen Wesen Überlegungen anzustellen und Schlußfolgerungen zu ziehen. Einfach ausgedrückt, setzt die „Fuzzy Logic“ vage Konzepte oder Werte in ein mathematisches Format um, das dann von dem Computer zur präzisen Steuerung von Prozessen eingesetzt wird.

Glassrobots hat ein System entwickelt, bei dem dieses Verfahren bei der Steuerung des Biegeprozesses für Windschutzscheiben angewandt wird. Der größte Vorteil besteht hierbei in der dauerhaften und präzisen Reproduzierbarkeit eines Prozesses. Daneben ist es mit dem neuen System auch möglich, in ein und demselben Fertigungsdurchgang mehrere verschiedene Windschutzscheiben zu bearbeiten. Der vorliegende Artikel enthält einige

allgemeine Informationen zu Steuerungssystemen mit „Fuzzy Logic“ sowie eine detaillierte Darstellung der Art und Weise und der Gründe für den Einsatz dieses neuen Verfahrens bei der Serienfertigung von Windschutzscheiben in einem Biegeofen.

Steuerungen mit „Fuzzy Logic“

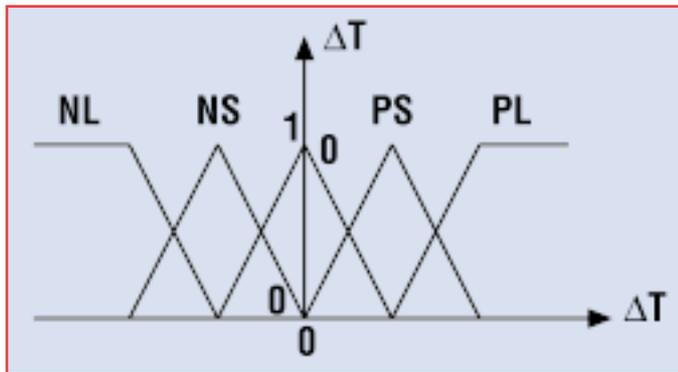
Die „Fuzzy Logic“ basiert auf der Theorie der „Fuzzy Sets“ (unbestimmte Mengen), die in den 60er und 70er Jahren des 20. Jahrhunderts von Professor L. Zadeh entwickelt wurde. Die Theorie der unscharfen Systeme ist ein Forschungsbereich, bei dem vornehmlich die *Ungenauigkeit* (Vagheit, Unbestimmtheit) oder die *Unsicherheit* mit Hilfe der Logik und der Mengenlehre untersucht werden, die speziell für diesen Zweck aufgestellt wurden.

Juha Karisola ist Vize-Präsident der Glassrobots Oy im finnischen Tampere und für Marketing und Verkauf zuständig

Entsprechend der normalen binären Logik gehört ein Objekt entweder zu einer Gruppe oder nicht; in der „Fuzzy Logic“ hingegen wird akzeptiert, daß ein Objekt auch nur teilweise zu einer Gruppe gehören kann. Beispielsweise gilt in der binären Logik, daß Wasser mit einer Temperatur von 30 °C warm ist; auch bei 20 °C wird das Wasser noch als warm angesehen, während es bei 19 °C plötzlich nicht mehr als warm gilt. Warmes Wasser ist ein unklares, „verschwommenes“ (= englisch „Fuzzy“) Konzept, das mit der binären Logik nicht zu erfassen ist.

Durch Verwendung von Zugehörigkeitsfunktionen (prozentuales Verhältnis) können einem Objekt, das nur teilweise zu einer Gruppe gehört, bei der „Fuzzy Logic“ quantitative Werte zugeordnet werden. Wasser mit einer

Bild 2



Temperatur von 20 °C gehört vollständig zu der Gruppe „warm“, während Wasser mit 19 °C nur zu einem bestimmten Prozentsatz zu dieser Gruppe gehört.

Die Zugehörigkeitsfunktionen in jeder Gruppe können glockenförmig, dreieckig oder trapezförmig sein. In der Regel werden drei, fünf oder sieben Gruppen verwendet.

Die Steuerung mit „Fuzzy Logic“ umfasst folgende Schritte (Bild 1):

- „Fuzzification“, Umsetzung der gemessenen Prozeßwerte in Zugehörigkeitsfunktionen
- Verarbeitung entsprechend festgelegter Regeln
- „Defuzzification“, Erstellung der genauen Steuerungswerte

Die Funktionsweise einer Steuerung mit „Fuzzy Logic“ läßt sich am besten an einem vereinfachten Beispiel mit einer Soll- und einer Ist-Temperatur darstellen. Das Ziel besteht darin, Steuerungsmechanismen zu definieren, mit denen sich die Ist-Temperatur durch Anpassung der Heiztemperatur permanent auf der Soll-Kurve befindet. In einem ersten Schritt werden dabei die Zugehörigkeitsfunktionen für die Eingangs- und Ausgangswerte in den unbestimmten Mengen definiert.

Bild 2 zeigt die unbestimmte Menge für den Temperaturunterschied zwischen der Ist- und der Soll-Temperatur (ΔT). Entsprechende Mengen müssen auch für andere Eingangswerte definiert werden (im vorliegenden Beispiel für die Ableitung von ΔT , aus der hervorgeht, ob die Differenz ab- oder zunimmt.

		$\Delta T/dt$				
		PL	PS	O	NS	NL
ΔT	PL	-	-	PL	-	-
	PS	-	PL	PS	O	-
	O	PL	PS	O	NS	NL
	NS	-	O	NS	NL	-
	NL	-	-	NL	-	-

Bild 3

Die unbestimmten Eingangswerte werden dann anhand der festgelegten Regeln verarbeitet. Diese Regeln bestehen bei einer Steuerung mit „Fuzzy Logic“ aus einer Bedingung IF (WENN) und der zugehörigen Steuerungsmaßnahme THEN (DANN). In der normalen Sprache würde eine derartige Regel etwa wie folgt lauten: Wenn die Ist-Temperatur leicht unter der Soll-Temperatur liegt und die Differenz leicht zunimmt, dann soll die Heizleistung beträchtlich erhöht werden. Die logische Regel lautet wie folgt: Wenn $\Delta T = NS$ (negativ, klein) und $\Delta T/dt = NS$ (negativ, klein), dann ist $P = PL$ (positiv, groß). Eine einfache Matrix der Verarbeitungsregeln ist in Bild 3 dargestellt. Jede Regel verarbeitet die Information anhand verschiedener Parameter und kommt dabei jeweils zu unterschiedlichen Ergebnissen (Ausgängen). Die genaue, erforderliche Heizleistung wird durch Kombination der Ergebnisse aller Regeln und Ermittlung des „Massenmittelpunkts“ bestimmt (Bild 4).

Allgemeine Vorteile von Steuerungen mit „Fuzzy Logic“

Steuerungen mit „Fuzzy Logic“ sind äußerst anwenderfreundlich. Sie stellen auf der Grundlage ungenauer Ein-

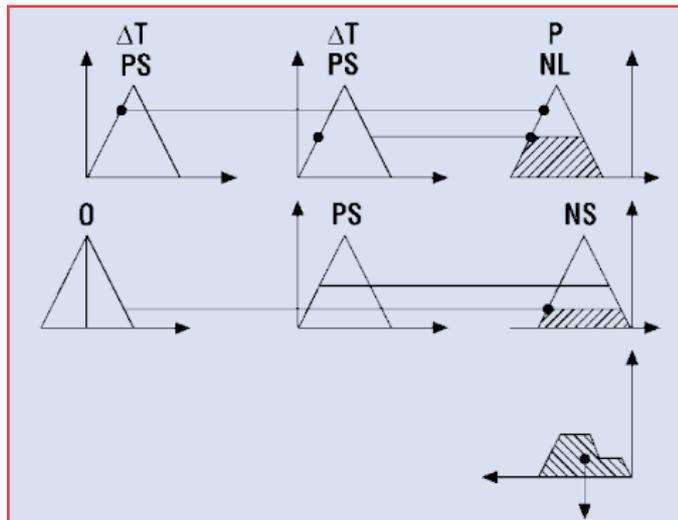
gangsdaten genaue Steuerwerte zur Verfügung – eine Herausforderung, an der ein herkömmlicher Controller scheitert. Aufgrund der parallelen Regelverarbeitung in Steuerungssystemen mit „Fuzzy Logic“ weisen diese Systeme eine sehr hohe Geschwindigkeit auf. Darüber hinaus resultiert diese parallele Ausführung jeder Regel in einem minimalen Fehlerrisiko. Das gesamte System ist in höchstem Maße fehlerbeständig und weitaus verlässlicher als herkömmliche Steuer-

ungen mit ihrer seriellen Datenverarbeitung. Eine Steuerung mit „Fuzzy Logic“ ist in der Lage, sich permanent und automatisch an veränderte Bedingungen anzupassen; dies ist wiederum eine Eigenschaft, die beispielsweise eine PID-Steuerung nicht aufweist.

„Fuzzy Logic“ bei der seriellen Fertigung von Windschutzscheiben

Der serielle Biegeofen (TFA) ist ein Tunnelofen mit zwei übereinander liegenden Förderschienen. Die obere Schiene dient der Vorwärmung und Biegung, während auf der unteren Schiene die Kühlung (Kantenpressung und Vergütung) erfolgt. Der Ofen ist kompakt gebaut und weist einen sehr niedrigen Energieverbrauch auf. Ursprünglich wurde dieser Ofen für die Herstellung von Ersatzwindschutzscheiben entwickelt, bei der Glas in kleinen oder mittelgroßen Chargen gebogen wird. Die Möglichkeit zur gleichzeitigen Verarbeitung unterschiedlicher Windschutzscheiben war eine grundlegende Anforderung – in manchen Fällen befand sich auf jedem Förderwagen eine andere Windschutzscheibe.

Bild 4



Dank seiner Vielfältigkeit wurde dieser Ofen sehr rasch nicht nur für die Fertigung von Ersatzwindschutzscheiben, sondern auch bei der Herstellung von Windschutzscheiben für die Erstausrüstung eingesetzt. Konstruktiv ist die Zykluszeit auf etwa 60 Sekunden begrenzt, so daß der Ofen bei niedrigeren Kapazitätsanforderungen auch zur Fertigung für die Erstausrüstung eingesetzt werden kann. Glashersteller, die mit seriellen Öfen arbeiten, beliefern vornehmlich Fahrzeughersteller mit kleineren Produktionsvolumen (z. B. Lkw-Hersteller, Hersteller von Sportwagen und Sonderfahrzeugen sowie kleine/mittlergroße Montagewerke in Europa, Lateinamerika und dem Fernen Osten.

Wie jeder Biegevorgang unterliegt auch der serielle Biegeprozeß einer Reihe von Einflußfaktoren, die die Reproduzierbarkeit des Prozesses beeinträchtigen. Zur Verbesserung des Prozesses und seiner Reproduzierbarkeit wurden diese Faktoren sorgfältig untersucht. Einige Faktoren, wie Unterschiede bei den Formen und dem Floatglas, sind nicht durch den Ofen selbst bedingt und werden deshalb an dieser Stelle nicht erörtert.

Die Reproduzierbarkeit des Prozesses wird vor allem von folgenden Faktoren beeinflusst:

Produktionsmix: Sobald der Ofen für kleine Losgrößen (alle Förderwagen mit unterschiedlichen Windschutzscheiben) oder mittlere Losgrößen (sieben Förderwagen jeweils mit vier unterschiedlichen Typen beladen,

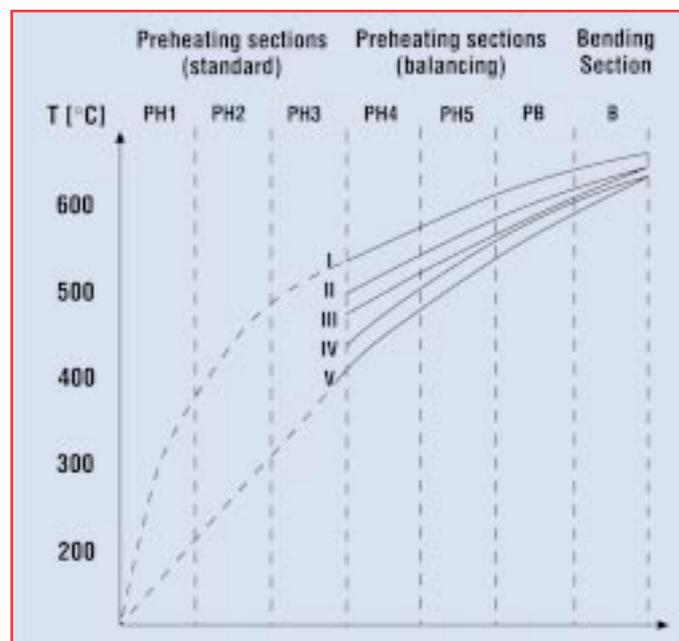


Bild 5 Preheating sections (standard): Vorwärmphasen (Standard); Preheating sections (balancing): Vorwärmphasen (Ausgleich); Bending section: Biegephase

den, 7/7/7/7) bestückt wird, ist der Prozeß durch unterschiedliche Biege- und Vorwärmzeiten gekennzeichnet. Wenn der Mix erneut geändert wird, ändern sich auch die Verarbeitungszeiten für jeden Scheibentyp entsprechend. Diese Änderungen der Prozeßzeit können im Biegebereich teilweise durch Anpassung der endgültigen Biegezeit (oder -temperatur) ausgeglichen werden, doch führt dies in der Regel zu Abweichungen von der Idealsituation.

Spezifisches Wärmegleichgewicht: Selbst wenn ein Ofen nach einer Vorwärmphase von einer Stunde in Betrieb genommen werden kann, wird das spezifische Wärmegleichgewicht erst nach einer weiteren Erwärmungsdauer von vier bis fünf Stunden er-

reicht. Sofern der Ofen nicht im Dreischichtbetrieb rund um die Uhr eingesetzt wird, steht das Bedienpersonal Tag für Tag vor demselben Dilemma: Ein Glasteil, das am Vormittag gefertigt wurde, hat nicht dieselbe Form wie ein identisches Glasteil, das mit demselben Programm am Nachmittag hergestellt wurde. Manche Bediener gleichen diesen Unterschied durch ein anderes Programm aus, das sie auswählen, sobald der Ofen das angegebene Wärmegleichgewicht erreicht hat.

Umgebungstemperatur: Die Temperatur in der Umgebung des Ofens unterliegt unter Umständen beträchtlichen Schwankungen, je nach Tages-

und Jahreszeit. Durch Verwendung von Temperaturreglern ist eine automatische Berücksichtigung dieser Schwankungen möglich, doch die Präzision dieser Regler ist nicht immer optimal. Bei herkömmlichen Ein-/Aus-Steuerungen und PID-Steuerungen kommt es in der Regel bei dieser Korrektur zu Ausschlägen, was die Form des Glasteils beeinflussen kann.

Spannungsschwankungen: Eine gute Prozeßqualität ist normalerweise bei Spannungsschwankungen von maximal 5 % garantiert. In vielen Ländern treten jedoch beträchtlich höhere Spannungsunterschiede auf.

Anstatt den Einfluß eines jeden dieser Faktoren durch ein separates System zu eliminieren, wurde ein völlig neuer Ansatz gewählt. Die Standardisierung der Biegezeit und die präzise Steuerung des Erwärmungs- und Biegeprozesses boten eine bequeme und gleichzeitig zuverlässige Möglichkeit zur Eliminierung dieser Einflußfaktoren.

„FuzzyBend“ – Funktionsweise

„FuzzyBend“ (Patent beantragt) von Glassrobots ist ein völlig neues, automatisiertes Steuerungssystem für Biegeöfen des Typs „TFA“ und „LTFBA“, die zur Fertigung von Windschutzscheiben eingesetzt werden. Gegenüber den bestehenden automatischen Systemen bietet dieses System deutliche Vorteile. So wird das Glas mit dem neuen System immer unter denselben Bedingungen während eines immer gleichbleibenden Zeitraums gebogen – unabhängig von jeglichen Änderungen im Produktionsmix, der Wärmebilanz im Ofen, der Umgebungstemperatur oder von Schwankungen in der Spannungsversorgung. Damit sind eine herausragende Reproduzierbarkeit und ein hohes Maß an Bedienerkomfort sichergestellt, während gleichzeitig die Kapazität des Ofens optimal genutzt werden kann. Unterschiedliche Biegeprogramme zum Ausgleich veränderter Rahmenbedingungen sind nicht mehr erforderlich.

Messungen genau ausgerichteter, optischer Infrarot-Pyrometer in der abschließenden Erwärmungs- sowie in der Biegephase bilden die Grundlage für die Steuerung des Biegeprozesses. Entsprechend der Dicke, der Größe und der Form des Glasteils wird eine der festgelegten Zielprozeßkurven ausgewählt (Bilder 1, 2 bis 5). Diese Kurve bestimmt, wie das Glas während der Vorwärmphasen (Bild 5 PH1-PB) erwärmt wird; damit wird der Großteil der Schwankungen in der Glastemperatur bereits an die Zielkurve angepaßt, bevor das Glas in die Biegephase gelangt. Der Ausgleich dieser Schwankungen wird automatisch durch eine Steuerung mit „Fuzzy Logic“ vorgenommen, die die Unterschiede zwischen der Zielkurve und der tatsächlichen Temperatur minimiert und zu starke Ausschläge während der Anpassung verhindert. Um sicherzustellen, daß die erforderliche



Bild 6 Serieller Biegeofen für Windschutzscheiben für Ersatzteile oder Erstausrüstung mit innovativem Steuersystem „FuzzyBend“, Ferndiagnose, Zustandsüberwachung und vertikal verstellbaren Heizelementen

Wärme während dieses Korrekturvorgangs gleichförmig über das Glas verteilt wird, behält das System das Erwärmungsprofil bei, während die programmierbare Anpassungsschaltung die Heizleistung für das gesamte Profil regelt. Das Glas weist beim Eintritt in die Biegephase immer dieselbe Temperatur und eine gleichmäßige Wärmeverteilung auf der gesamten Glasfläche auf. Beim Biegen werden das Wärmeprofil und die benötigten Biegeprogramme entsprechend der erforderlichen Form des Erzeugnisses ausgewählt.

Praktische Erfahrung im Einsatz von „FuzzyBend“-Steuerungen

„FuzzyBend“ wurde bereits bei zahlreichen Brennöfen auf der ganzen Welt eingebaut. Einige dieser Öfen werden in der Fertigung für die Erstausrüstung eingesetzt, auf anderen werden Austauschscheiben hergestellt. Wie zu erwarten war, hat sich die Reproduzierbarkeit des Biegeprozesses beträchtlich verbessert. Und genau auf diesen Aspekt richten die Erstausrüster ihr besonderes Augenmerk. Die Senkungstoleranz (Querkrümmung) wurde in der Regel auf die Hälfte oder weniger reduziert. Die Senkungsteuerung ist vor allem bei zusammengesetzter Form mit einer Haupt-

senkung von mehr als 15 mm ein kritischer Aspekt. Angesichts einer verstärkten Tendenz zur Verwendung von Teilen mit einer starken Senkung gewinnen präzise Steuerungen zunehmend an Bedeutung.

Ein weiterer wichtiger Vorteil war die Tatsache, daß ein Brennofen mit einer „FuzzyBend“-Steuerung mit einer Teilemischung bestückt werden kann; bei einer herkömmlichen automatischen Steuerung ginge dies zu Lasten der Biegetoleranzen. Bislang mußte die Beschickung des Brennofens genau geplant und das gesamte Fertigungsvolumen in Gruppen mit mehr oder weniger derselben Größe, Form und Dicke eingeteilt werden. „FuzzyBend“ gleicht Unterschiede in der Größe und Form durch Verwendung verschiedener Prozeßkurven aus. Der Betreiber hat damit praktisch freie Hand und kann die Beschickung entsprechend dem Auftragsbuch und nicht entsprechend der Beschränkungen des Biegeofens zusammenstellen.

Steuerungen mit „Fuzzy Logic“ werden oftmals als äußerst kompliziert bezeichnet. Doch wenngleich eine derartige Steuerung selbst auf einem hochkomplizierten Verfahren beruht, ist die Benutzerschnittstelle sehr einfach. Für das Bedienpersonal des Ofens könnte sie nicht einfacher sein. Der Bediener wählt nur die erforderliche Prozeßkurve aus und schaltet „FuzzyBend“ ein. Alle Steuerungsmechanismen arbeiten dann automatisch und im Hintergrund. □