

Arbeitsberichte des Instituts für Wirtschaftsinformatik

Herausgeber: Prof. Dr. J. Becker, Prof. Dr. H. L. Grob, Prof. Dr. K. Kurbel,
Prof. Dr. U. Müller-Funk, Prof. Dr. R. Unland, Prof. Dr. G. Vossen

Arbeitsbericht Nr. 23

**Ansätze für die Verbesserung von
PPS-Systemen durch Fuzzy-Logik**

Thomas Nietsch, Claus Rautenstrauch, Markus Rehfeldt,
Michael Rosemann, Klaus Turowski

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Zusammenfassung	2
1 Motivation für den Einsatz von Fuzzy-Logik in PPS-Systemen	3
1.1 Einführung in die Fuzzy-Logik	3
1.1.1 Fuzzy-Mengen	3
1.1.2 Fuzzy-Zahlen	5
1.1.3 Linguistische Variablen	6
1.1.4 Fuzzy-Logik und Entscheidungsunterstützungssysteme	7
1.1.5 Charakterisierung der zum Einsatz kommenden Methoden	10
1.2 Arten von Unsicherheit	11
1.3 Ansatzpunkte für Fuzzy-Logik innerhalb von PPS-Systemen	12
2 Potentiale für den Einsatz von Fuzzy-Logik in PPS-Systemen	14
2.1 Datenstrukturen	14
2.2 Produktionsplanung	21
2.3 Fertigungssteuerung und BDE	29
2.4 Weitere Bereiche und Entwicklungsaufgaben	31

Zusammenfassung

Ziel dieses Arbeitsberichts ist es, die Teilbereiche von Produktionsplanungs- und -steuerungssystemen (PPS-Systemen) zu identifizieren, die unter Beachtung der Interdependenzen zu anderen Teilbereichen mit einem Fuzzy-Ansatz modelliert und dadurch in ihrer Effizienz gesteigert werden können. Nach einer kurzen Einführung in die Fuzzy-Logik werden zunächst Ansätze für den Einsatz der Fuzzy-Logik innerhalb der Datenstrukturen der Produktionsplanung und -steuerung dargestellt. Danach werden die Funktionen von PPS-Systemen systematisch auf diesbezügliche Potentiale untersucht, wobei zwischen originärer und derivativer Verwendung der Fuzzy-Logik unterschieden wird, und Nutzeffekte sinnvoller 'Verunschärfungen' aufgezeigt werden. Der Arbeitsbericht schließt mit einem Ausblick.

1 Motivation für den Einsatz von Fuzzy-Logik in PPS-Systemen

1.1 Einführung in die Fuzzy-Logik

Fuzzy-Logik wurde in den 60er Jahren von Zadeh an der Universität Berkeley entwickelt.¹⁾ Zadeh suchte nach einer mathematischen Behandlung vager, unscharfer Begriffe. Die Grundlage für die Beschreibung vager Begriffe bilden unscharfe Mengen (Fuzzy-Sets), auf deren Theorie die unscharfe Logik basiert. Im folgenden werden die wichtigsten Begriffe der Fuzzy-Logik vorgestellt.

1.1.1 Fuzzy-Mengen

Aufgrund der engen Beziehung zwischen der Mengenlehre und der zweiwertigen Logik sollen zunächst die unscharfe Logik und daran anschließend unscharfe Mengen erläutert werden. Die Fuzzy-Logik ist eine Obermenge der booleschen Logik. Anstelle von zwei Wahrheitswerten, WAHR und FALSCH, arbeitet die unscharfe Logik auf einem Kontinuum zwischen 'wahr' und 'falsch', meist dargestellt durch das geschlossene Intervall reeller Zahlen $[0,1]$. Um mit diesen Werten arbeiten zu können, müssen auch die logischen Operatoren *Konjunktion*, *Disjunktion* und *Negation* entsprechend angepaßt werden. Das Ergebnis dieser Operationen ist wieder eine unscharfe Größe. Im Unterschied zur booleschen Logik gibt es verschiedene Implementierungen für einen unscharfen Operator. Eine mögliche und von Zadeh ursprünglich vorgeschlagene Definition der logischen Operatoren lautet: Seien $a, b \in [0,1]$ zwei unscharfe Wahrheitswerte, dann sind Konjunktion, Disjunktion und Negation folgendermaßen definiert:

Konjunktion: $a \text{ UND } b = \min(a, b)$

Disjunktion: $a \text{ ODER } b = \max(a, b)$

Negation: $\text{NICHT}(a) = 1 - a$

Es gibt für Konjunktion und Disjunktion eine Vielzahl von Varianten. Da die Wahl der passenden Operatoren einen wichtigen Parameter bei der Entwicklung eines Fuzzy-Systems darstellt, ist die mit der Operatorenauswahl verbundene Problematik Gegenstand ausführlicher Diskussionen.²⁾

Zur Definition der unscharfen Mengen soll zunächst der Begriff der scharfen Menge erläutert werden. Die folgende Beschreibung geht auf den Mathematiker Cantor zurück:

1) Vgl. Zadeh (1965).

2) Vgl. Mayer u. a. (1993), S. 36ff.; Zimmermann (1991), S. 30ff.; Zimmermann, Zysno (1980).

"Eine Menge M ist eine Zusammenfassung von bestimmten, wohlunterschiedenen Objekten unserer Anschauung oder unseres Denkens zu einem Ganzen. Objekte dieser Menge werden Elemente von M genannt".³⁾

Wohlunterschieden bedeutet, daß jedes Element der Menge nur einmal in ihr vorkommen darf. Bestimmt heißt, daß für jedes Objekt feststeht, ob es zu der Menge gehört oder nicht. Die Menge aller möglichen Objekte wird Grundmenge genannt.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, eine scharfe Menge zu beschreiben, von denen hier nur die Aufzählung und die charakteristische Funktion von Interesse sind.

Als Beispiel soll die Menge aller dringlichen Fertigungsaufträge des Arbeitsvorrats betrachtet werden. Vereinfacht wird angenommen, ein Auftrag sei dringlich, wenn seine Schlupfzeit kleiner als 10 Tage ist. Folgende Fertigungsaufträge sollen zusammen mit ihrer Schlupfzeit betrachtet werden.

FA_1 (3 Tage), FA_2 (14 Tage), FA_3 (29 Tage), FA_4 (10,5 Tage), FA_5 (9,5 Tage), FA_6 (4 Tage)

Mit einer scharfen Betrachtung ergibt sich die Menge A der dringlichen Fertigungsaufträge als $\{FA_1, FA_5, FA_6\}$.

Eine etwas modifizierte Beschreibung ließe sich auch über die Aufzählung der Grundmenge gewinnen, wobei jedem Element ein zusätzliches Attribut über die Zugehörigkeit zur Menge A der dringlichen Aufträge mitgegeben wird.

$$A = \{(FA_1, 1), (FA_2, 0), (FA_3, 0), (FA_4, 0), (FA_5, 1), (FA_6, 1)\}$$

Der zweite Teil eines jeden Tupels ist ein boolescher Wert, '1' steht für Zugehörigkeit und '0' für Nichtzugehörigkeit zu A . Nichts anderes wird durch eine charakteristische Funktion $f(x): X \rightarrow \{0,1\}$ dargestellt. X ist hierbei die Grundmenge. Dabei gilt:

$$f_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{falls } x \in A \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Der Übergang zu unscharfen Mengen erfolgt, indem anstelle der booleschen Werte alle Werte aus dem Intervall $[0,1] \in R$ zur Beschreibung der Mengenzugehörigkeit verwendet werden. Damit könnte die Auftragsmenge beispielsweise wie folgt definiert werden:

³⁾ Mayer u. a. (1993), S. 10.

$$\tilde{A} = \{(FA_1, 1), (FA_2, 0), (FA_3, 0), (FA_4, 0, 7), (FA_5, 1), (FA_6, 1)\}$$

Hier ist nun, anders als bei der scharfen Betrachtung, der Auftrag FA₄ in die Menge aufgenommen, obwohl seine Schlupfzeit oberhalb der Dringlichkeitsschranke von 10 Tagen liegt. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, daß ein Disponent einen solchen Auftrag zumindest als 'dringlich', wenn auch nicht als 'sehr dringlich' einstufen würde. Angemerkt sei, daß im Regelfall Tupel mit dem Zugehörigkeitswert '0' nicht aufgeführt werden.

Formal wird eine unscharfe Menge wie folgt definiert:

Ist X eine Menge von Objekten, die hinsichtlich einer unscharfen Aussage zu bewerten sind, so heißt

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) : x \in X\} \text{ unscharfe Menge (Fuzzy Set).}^{4)}$$

X bezeichnet die Grundmenge und $\mu_{\tilde{A}}$ die *Zugehörigkeitsfunktion*. Als Zugehörigkeitsfunktionen $\mu_{\tilde{A}}$ können beliebige Funktionen verwendet werden. Im wesentlichen werden Dreiecks-, Trapez-, S- und Gauss-Funktionen benutzt.⁵⁾ Die Auswahl hängt stark vom jeweiligen Anwendungsgebiet ab.

Das Konzept der scharfen Mengen ist ein Spezialfall der unscharfen Mengen mit $\mu_{\tilde{A}}(x) : X \rightarrow \{0,1\}$. Die Umwandlung einer scharfen Menge in eine unscharfe wird als *Fuzzifizierung* bezeichnet.⁶⁾

Analog zu den unscharfen logischen Operatoren lassen sich auch für unscharfe Mengen Operatoren wie Vereinigung, Durchschnitt und Komplement definieren.

1.1.2 Fuzzy-Zahlen

Eine unscharfe Zahl (Fuzzy-Zahl) \tilde{Z} ist eine unscharfe Menge über den reellen Zahlen R mit folgenden Eigenschaften:

- Es existiert genau ein $x_0 \in R$ mit $\mu_{\tilde{Z}}(x_0) = 1$ und
- $\mu_{\tilde{Z}}$ ist abschnittsweise stetig.

⁴⁾ Vgl. Zimmermann (1993), S. 8.

⁵⁾ Vgl. Mayer u. a. (1993), S. 16-22.

⁶⁾ Zum Begriff der Fuzzifizierung vgl. z. B. Kruse u. a. (1993), S. 166ff.; Mayer u. a. (1993), S. 69ff.; Zimmermann (1993), S. 93.

Exemplarisch ist in Abbildung 1 eine mögliche Zugehörigkeitsfunktion der Fuzzy-Zahl 30 wiedergegeben.

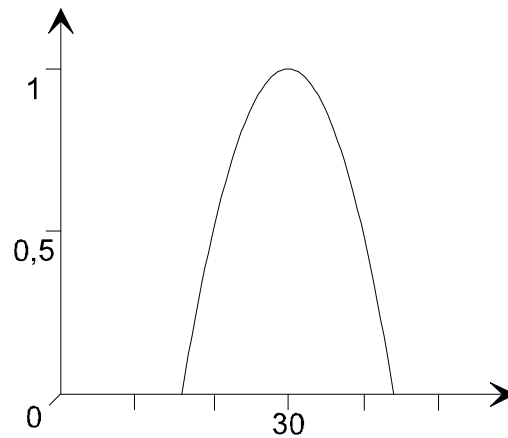


Abb. 1: Exemplarische Zugehörigkeitsfunktion einer unscharfen Zahl

1.1.3 Linguistische Variablen

Eine linguistische Variable ist eine Variable, deren Werte keine Zahlen der Verteilungen (wie etwa bei Zufallsvariablen), sondern sprachliche Konstrukte (sogenannte Terme) einer natürlichen oder künstlichen Sprache sind.⁷⁾ Formal wird eine linguistische Variable wie folgt definiert:⁸⁾

Eine *linguistische Variable* wird charakterisiert durch ein Quintupel der Form $(l, T(l), X, G, \tilde{M})$. Die einzelnen Elemente haben folgende Bedeutung:

- l ist der Name der linguistischen Variablen,
- $T(l)$ oder auch T ist die Term-Menge von l , d. h. die Menge der *linguistischen Werte* von l ,
- X ist die Grundmenge, über der die Fuzzy-Mengen definiert sind,
- G ist eine syntaktische Regel (Grammatik), die zur Generierung der Namen der linguistischen Werte von l dient, d. h. G erzeugt T ,
- \tilde{M} ist eine semantische Regel, die jedem linguistischen Wert eine Fuzzy-Menge über X zuordnet.

7) Vgl. Zimmermann (1993), S. 12.

8) Vgl. Zimmermann (1991), S. 132.

Zur Verdeutlichung soll hier die Auftragspriorität als linguistische Variable dargestellt werden, d. h., l wird der Bezeichner "Auftragspriorität" zugeordnet. $T(l)$ umfasse die Elemente 'sehr dringlich', 'dringlich' und 'nicht dringlich'. X ist die Menge der Tage (Schlupfzeit). \tilde{M} gibt die Zuordnung der Terme zu der Grundmenge, wie in der folgenden Abbildung 2 gezeigt, an. Auf die Grammatik soll hier nicht weiter eingegangen werden. Sie sei so definiert, daß gerade die obigen Terme als Sprache erzeugt werden können.

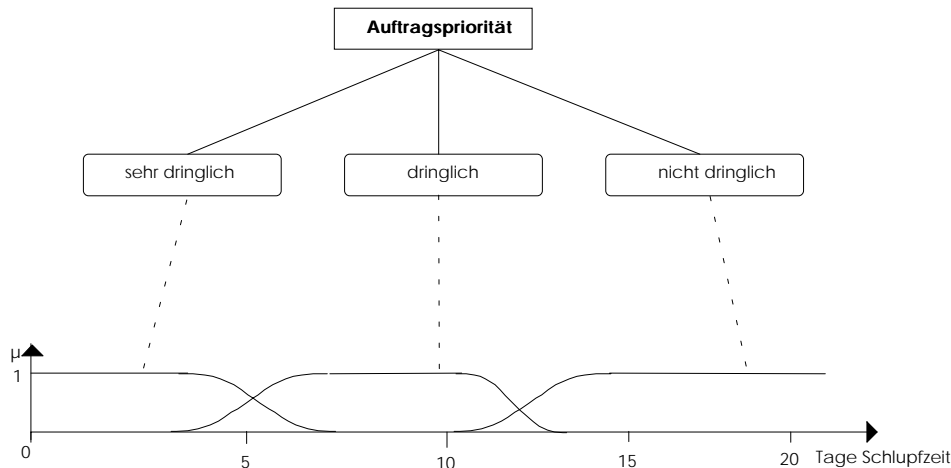


Abb. 2: Terme der linguistischen Variable "Auftragspriorität" mit Zugehörigkeitsfunktionen

1.1.4 Fuzzy-Logik und Entscheidungsunterstützungssysteme

Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS) sind ein potentielles Anwendungsgebiet der Fuzzy-Logik. Dies liegt vor allem an der einfachen Formulierung des Wissens sowie der Möglichkeit, "Daumenregeln" auf einem hohen Abstraktionsniveau innerhalb des Systems abzubilden. EUS lassen sich beispielsweise durch wissensbasierte Systeme realisieren. Bei diesen wird das Fachwissen über ein Anwendungsgebiet explizit getrennt und unabhängig vom Problemlösungswissen dargestellt.⁹⁾ Den Kern eines solchen Systems bildet die Wissensbasis, in der das Fachwissen im allgemeinen als Menge von Regeln (Produktionsregeln) abgelegt ist. Die Auswertung der Wissensbasis erfolgt durch eine Problemlösungskomponente. Diese führt vor allem Schlußfolgerungen aus, wobei der Vorgang auch als Inferenz bezeichnet wird.

Produktionsregeln können in Form natürlichsprachlicher Wenn-Dann-Regeln definiert werden. Die Prämisse enthält eine oder mehrere Klauseln der Form " $x = \text{Konstante}$ " verbunden über logische Konnektoren. Die Klauseln und die Prämisse selbst sind in traditionellen Systemen

⁹⁾ Vgl. Kurbel (1992), S. 18.

Aussagen im Sinne der Aussagenlogik. Ist die Prämisse erfüllt (WAHR), gilt auch die Konklusion.

Bsp.: *WENN (auftragspriorität IST dringlich) UND (kapazitätsauslastung IST niedrig) DANN auftrag einplanen*

Betrachtet man die Logik als Basis für die Darstellung des Wissens durch Regeln, lassen sich drei voneinander unabhängige Parameter bestimmen. Dies sind die Wahrheitswerte, die Operatoren zur Verknüpfung dieser Werte und das Verfahren zur Ableitung eines Wahrheitswertes aus der Prämisse (Inferenz, Schlußfolgerung). Im Fall scharfer Logik sind dies die beiden Wahrheitswerte, die logischen Operatoren (wie oben genannt zusammen mit der Implikation), die durch Wahrheitstafeln definiert werden können, und der modus ponens als mögliche Schlußfolgerungsmethode.

In einem unscharfen regelbasierten System sind die Produktionsregeln in der Lage, auch mit unscharfen Größen Schlußfolgerungen durchzuführen. Dies wird erreicht, indem kontinuierliche Wahrheitswerte als Wert einer Klausel zugelassen werden und Aussagen aus unscharfen Komponenten (Variablen, Quantoren und Relationen) zusammengesetzt werden können (approximatives Schließen). Ein unscharfes regelbasiertes System kann also neben scharfen Aussagen auch Aussagen mit linguistischen Variablen in den Regeln verarbeiten.

Wird eine unscharfe Regel ausgewertet, bestimmt sich der Wahrheitswert der Konklusion aus dem Wahrheitswert der Prämisse. Der Wahrheitswert der Konklusion errechnet sich aus den Wahrheitswerten der Klauseln, die wiederum durch unscharfe Operationen verknüpft werden. Die Wahrheitswerte der Klauseln lassen sich bei unscharfen Größen über deren Zugehörigkeitsfunktion bestimmen. Für die Inferenz ergibt sich eine ähnliche Problematik der Operatorenwahl wie bei der Verknüpfung unscharfer Wahrheitswerte.¹⁰⁾

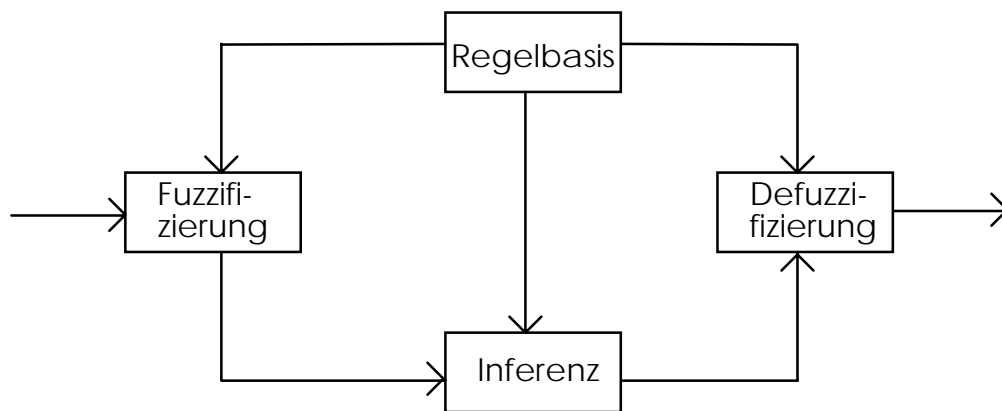
Die obige Einplanungsregel hat im scharfen und im unscharfen Fall syntaktisch dieselbe Form. Deren Semantik ist jedoch in den beiden Fällen unterschiedlich. Im scharfen Fall werden die Variablen mit scharfen Größen verglichen. Der Wahrheitswert der ersten Klausel ergibt sich z. B. aus der Aussage "*schlupfzeit des auftrags*" ≤ 10 tage. Als Ergebnis der Inferenz wird die boolesche Variable '*auftrag einplanen*' auf TRUE oder FALSE gesetzt. Wie werden nun Aufträge mit Schlupfzeiten knapp über 10 Tagen behandelt? In einem scharfen Fall bleiben diese unbeachtet. In einem unscharfen System wären "*auftragspriorität*" und "*kapazitätsauslastung*" als linguistische Variablen zu interpretieren. Somit sind z. B. 'dringlich' und 'niedrig' Terme

¹⁰⁾ Vgl. Mizumoto, Zimmermann (1982).

dieser Variablen. Die Klausel beschreibt eine unscharfe Menge der einzuplanenden Aufträge. Entsprechend wird der Konklusion bei der Schlußfolgerung ein Zugehörigkeitsgrad zugeordnet. Ein Auftrag mit einer Schlupfzeit von 11 Tagen könnte beispielsweise mit einem Zugehörigkeitswert von 0,6 der Menge einzuplanender Aufträge zugeordnet werden.

Im Gegensatz zu herkömmlichen regelbasierten Systemen werden in unscharfen regelbasierten Systemen bei der Inferenz immer alle Regeln ausgewertet. Die verschiedenen Konklusionen werden dann über die Vereinigungsoperatoren zusammengefaßt (Akkumulation).

Für die Entscheidung, ob ein Auftrag einzuplanen ist oder nicht, ist aus einer unscharfen Menge ein scharfer Wert abzuleiten (Defuzzifizierung). Hierbei können verschiedene Verfahren zur Anwendung gelangen. Die einfachsten und gebräuchlichsten sind die Maximummethode und die Flächenschwerpunktmethode. Eine Konklusion kann als Ergebnis einen linguistischen Term in Form einer unscharfen Menge liefern (beispielsweise hätte die Konklusion der Einplanungsregel auch "*einplanungsnotwendigkeit IST hoch*" lauten können). In diesem Fall muß nach der Akkumulation ein Term der linguistischen Variable abgeleitet werden (linguistische Approximation). Folgende Abbildung zeigt noch einmal die Verarbeitung innerhalb eines fuzzifizierten EUS.



Quelle: Palm, Hellendorn (1991), S. 19.

Abb. 3: Verarbeitungsprinzip innerhalb eines unscharfen EUS

Aus den obigen Betrachtungen lassen sich einige Charakteristika unscharfer EUS ableiten. Der Einsatz der Fuzzy-Logik ermöglicht es, Erfahrungen und Wissen durch Verwendung linguistischer Terme in Regeln, wie '*hohe dringlichkeit*' oder '*niedrige auslastung*', zu formulieren. Dadurch wird die Kommunikation mit dem System, sei es zur Wissensakquisition oder im Einsatz, wesentlich verständlicher und einfacher. Darüber hinaus ermöglicht die Repräsentation des menschlichen Wissens innerhalb einer Wissensbasis durch unscharfe Mengen eine adäquate Form der Darstellung von Expertenwissen, das sich sonst einer exakten Formulierung entzieht.

1.1.5 Charakterisierung der zum Einsatz kommenden Methoden

Die in den folgenden Ausführungen aufgezeigten Fuzzy-Ansätze setzen einen methodischen Hintergrund voraus, der hier kurz dargestellt werden soll.

- *Fuzzy Lineare Programmierung*: Die unscharfe Lineare Programmierung geht davon aus, daß Ziele sowie Bedingungen möglicher Handlungen nicht exakt bekannt sind. Ein Fuzzy Lineares Programm kann auf ein Lineares Programm abgebildet werden und bietet einen erweiterten Lösungsansatz.¹¹⁾
- *Fuzzy-Datenanalyse*: Die Fuzzy-Datenanalyse bezeichnet den Vorgang der Auswertung von Datenbeständen mit dem Ziel, diese zu klassifizieren. Ein Verfahren zur Fuzzy-Datenanalyse ist z. B. die Fuzzy-Clusteranalyse.¹²⁾
- *Fuzzy-Prognose*: Die Fuzzy-Prognose stellt ein Verfahren dar, das unter Einbeziehung wahrscheinlichkeitstheoretischer Verfahren und Fuzzy-Regel- und -Faktenwissen zu einer Prognose gelangt. Dazu wird z. B. das Ergebnis einer scharfen Schätzung als Fuzzy-Zahl interpretiert und - im Falle der Schätzung von Änderungsgrößen - zu dem Ergebnis einer unscharfen Schätzung addiert. Durch dieses Vorgehen wird berücksichtigt, daß neben der stochastischen Unsicherheit andere Arten von Unsicherheit in die Prognose einfließen (siehe Abbildung 4).

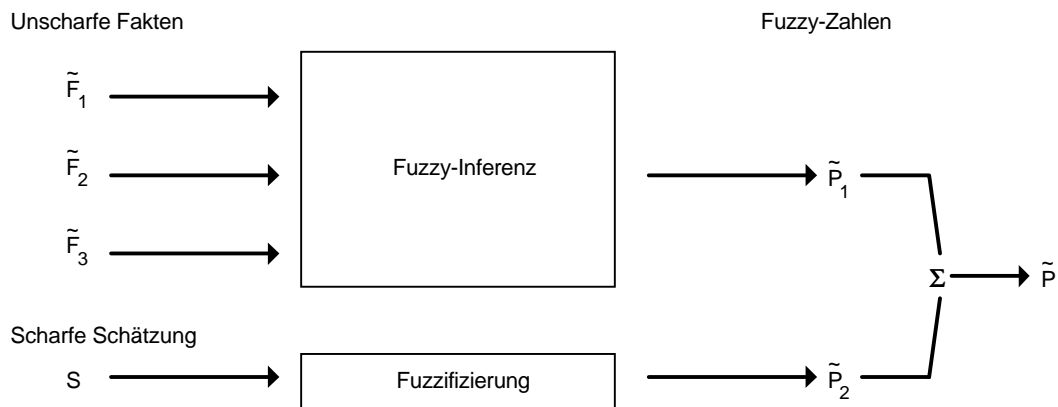


Abb. 4: Fuzzy-Prognose bei der Schätzung von Änderungsgrößen

¹¹⁾ Vgl. zur Fuzzy Linearen Programmierung Adam (1993), S. 366-373; Buscher, Roland (1993); Zimmermann (1993), S. 40-47; Zimmermann (1987), S. 71ff.

¹²⁾ Vgl. Bilz, Bocklisch (1977).

1.2 Arten von Unsicherheit

Der Einsatz von Entscheidungsunterstützungssystemen in PPS-Systemen beinhaltet insbesondere den Fall der Entscheidung bei Unsicherheit. Der Begriff der Unsicherheit ist vielschichtig und wird mit unterschiedlicher Bedeutung verwandt.¹³⁾ Neben dem Fuzzy-Ansatz existieren zur Abbildung und Bewältigung der Unsicherheit weitere Ansätze wie z. B. die Wahrscheinlichkeitstheorie.¹⁴⁾ Um diese Ansätze von einem Fuzzy-Ansatz abgrenzen und diesem bewertend gegenüberstellen zu können, bedarf es einer Erläuterung der verschiedenen Arten von Unsicherheit, die im Falle der Entscheidungsfindung relevant sind.¹⁵⁾ Es sei vorweggenommen, daß jede genannte Form von Unsicherheit innerhalb der PPS anzutreffen ist, weshalb die im folgenden dargestellte Klassifikation gegenüber anderen vorgezogen wird.¹⁶⁾

- *Stochastische Unsicherheit:* Mit stochastischer Unsicherheit wird die Art von Unsicherheit bezeichnet, die mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie adäquat dargestellt werden kann. Darunter fallen z. B. Aussagen der Form: "Die Wahrscheinlichkeit, daß Ausschuß an einem Aggregat auftritt, ist 0,05". Um zu einer solchen Aussage zu gelangen, müssen bestimmte Bedingungen erfüllt sein. Es können nur Aussagen im Sinne der Aussagenlogik mit einer Wahrscheinlichkeit versehen werden und die zugeordnete Wahrscheinlichkeit muß sich aus einer in der Vergangenheit beobachteten Häufigkeit ableiten.
- *Linguistische Unsicherheit:* Die linguistische (auch intrinsische) Unsicherheit bezeichnet die inhaltliche Unsicherheit von Wörtern oder Sätzen in natürlicher Sprache. Verursacht wird diese durch die vom Kontext abhängige Semantik natürlicher Sprache bzw. durch Formulierungen, die eine eindeutige Aussage bewußt vermeiden. Linguistische Unsicherheit resultiert aus einem individuell unterschiedlichen Begriffsverständnis. So verstehen unterschiedliche Disponenten unter einer 'hohen' Auslastung oder einer 'zufriedenstellenden' Termintreue etwas anderes, weil für sie unterschiedliche Ausprägungen der Kenngrößen (z. B. 70% und 90% Auslastung) als 'hoch' oder 'zufriedenstellend' empfunden werden.

¹³⁾ So differenziert beispielsweise Adam explizit zwischen Unsicherheit und Unschärfe. Vgl. Adam (1993), S. 366. An dieser Stelle wird jedoch der Standardliteratur zur Fuzzy-Logik gefolgt und der Begriff der Unsicherheit als Oberbegriff, der auch den der Unschärfe einschließt, verwendet. Allgemein wird der Begriff der Unschärfe oft als Synonym für linguistische Unsicherheit verwendet oder als Übersetzung für 'fuzzy', um Methoden oder Theorien von deren Fuzzy-Äquivalent abzugrenzen (z. B. (Aussagen-)Logik und (Fuzzy-)Logik).

¹⁴⁾ Vgl. auch Schneeweiß (1988), der verschiedene Ansätze zur Bewältigung der Unsicherheit in der PPS systematisiert (ohne dabei auf die Fuzzy-Logik einzugehen).

¹⁵⁾ Vgl. zu der folgenden Klassifizierung Zimmermann (1993), S. 3-7.

¹⁶⁾ Vgl. Buschner, Roland (1993), S. 313; Richter (1988), S. 198.

- *Informationale Unsicherheit*: Die informationale Unsicherheit entsteht, wenn zum einen zu viele Informationen vorhanden sind, so daß diese nicht problemadäquat berücksichtigt werden können, und zum anderen, wenn Informationen zu berücksichtigen sind, die nicht zur Verfügung stehen. Ein Übermaß an Informationen ergibt sich innerhalb der PPS aus der Vielschichtigkeit an Interdependenzen zwischen einzelnen PPS-Funktionen. Der Fall nicht vorhandener Informationen liegt z. B. bei Eilaufträgen oder Störungen dann vor, wenn sich keine stochastisch abgesicherte Eintrittswahrscheinlichkeit ermitteln läßt.

1.3 Ansatzpunkte für Fuzzy-Logik innerhalb von PPS-Systemen

Herkömmliche PPS-Systeme erheben im Extremfall den Anspruch, eine exakte, oft minuten-genaue Planung durchzuführen. Gegen diesen Ansatz sprechen die in der Praxis häufig zu beobachtenden Störungen, die durch das nicht deterministische Verhalten von Produktionsprozessen bedingt sind.¹⁷⁾ So lösen z. B. Betriebsmittelausfälle, unterschiedliche Personaleffizienzen, Eilaufträge usw. zumeist eine zeitaufwendige Neuplanung aus. Mangelhafte Flexibilität und geringe Fehlertoleranz sind die Folgen dieser deterministischen, detaillierten Planung.

Die hohe Komplexität von PPS-Systemen erlaubt es dem Benutzer im allgemeinen nicht, Planungs- oder Steuerungsverfahren des Systems zu ändern oder eigenes Erfahrungswissen einzubringen, sondern ermöglicht eine bedingte Anpassung nur im Rahmen des Parametrisierungsspielraums des Systems. Dieser ist jedoch durch eine Vielzahl an Parametern, möglichen Einstellungen und undurchsichtigen Verbundwirkungen gekennzeichnet.¹⁸⁾ Der Einsatz der Fuzzy-Logik läßt hingegen eine schnellere und konformere Anpassung der PPS an sich ändernde Zielvorgaben oder Nebenbedingungen erwarten.

Generell ist der Einsatz von Fuzzy-Logik in der PPS in den nachfolgend aufgeführten Situationen vielversprechend:

- *Entscheidungsunterstützung durch Quantifizierung von Sicherheiten und Risiken*: Immer wenn es gilt, die Sicherheit von Daten, die weder in scharfer Form vorliegen noch als scharfe Größen ermittelt werden können, einzuschätzen, können fuzzifizierte Größen Anhaltspunkte für Sicherheit oder Genauigkeit von Daten liefern. So kann z. B. die Aussage, daß ein Fertigungsauftrag mit Sicherheitsmaß 0,8 durchführbar ist, dem Disponenten bei der Einschätzung seiner Planungsspielräume eine wichtige Hilfestellung sein. Das hohe Sicherheitsmaß impliziert, daß dieser Plan mit hoher Sicherheit wie vorgegeben durch die Fer-

¹⁷⁾ Vgl. Kühnle, Spengler (1993).

¹⁸⁾ Vgl. Hartinger u. a. (1991); Pabst (1985), S. 160 und S. 163.

tigung läuft, wenn im Rahmen der Feinplanung *nichts Wesentliches* verändert wird. Ein solcher Plan sollte daher möglichst nicht verändert werden. Analog gilt der Umkehrschluß für ein niedriges Sicherheitsmaß.

- *Entscheidungsunterstützung bei erstmalig auftretenden oder selten vorkommenden Ereignissen:* In diesen Fällen müssen Verhaltensweisen von Prozessen prognostiziert werden, ohne daß für diese Prozesse geeignetes statistisches Material verfügbar ist bzw. ermittelt werden kann. Ein Beispiel für eine solche Situation kann die Fertigung eines Teils sein, das in dieser Form in der Vergangenheit noch nicht gefertigt wurde. Für die Vorkalkulation müssen hier trotz fehlender Vergangenheitsdaten u. a. Durchlaufzeiten geschätzt werden. Grundlage für eine solche Schätzung können Analogieschlüsse, Erfahrungswerte oder intuitiv geäußerte Einschätzungen von Disponenten sein. Diese subjektiven Werte können über linguistische Variablen für weitere Schritte operationalisiert werden und beispielsweise an Stelle statistischer Werte in Prognosemodelle einfließen. Stehen nach erstmaliger oder mehrfacher Durchführung eines Prozesses hinreichend viele und genaue Daten zur Verfügung, kann die Prognose wieder auf konventionelle Weise, d. h. ohne unscharfe Daten, erfolgen.
- *Quantifizierung natürlichsprachlicher Informationen:* Trotz ausgefeilter PPS-Konzepte und -Systeme sind in der Praxis insbesondere bei Auftragsfertigung menschliche Intuition und Erfahrung, z. B. bei der Umsetzung von Plänen oder der Behebung von Störfällen, erforderlich. Die Erfassung dieses Wissens für die Automatisierung von Entscheidungen durch Expertensysteme scheitert bei der konventionellen Wissensakquisition häufig daran, daß Experten ihr Wissen in scharfer Form nicht artikulieren können oder wollen. Die Erfassung unscharfer Formulierungen und deren Quantifizierung mit Hilfe der Fuzzy-Logik kann dazu beitragen, diese bislang unerschlossenen Wissenspotentiale für PPS-Systeme zugänglich zu machen.

Die Effizienz einer Fuzzifizierung der PPS muß sich in höheren Zielerreichungsgraden ausdrücken lassen. Ziel der PPS ist die Maximierung der von ihr beeinflussbaren Differenz aus Erlösen und Kosten. Aufgrund vielfältiger Wirkungs- und Bewertungsdefekte werden i. d. R. ersatzweise vier Ziele verfolgt: die Minimierung der Durchlaufzeiten und Bestände sowie die Maximierung der Termintreue und der (zudem möglichst gleichmäßigen) Kapazitätsauslastung. Eine Fuzzifizierung der PPS ist nur dann sinnvoll, wenn sich durch die Fuzzifizierung eine Steigerung des aus den Ersatzzielen abzuleitenden Nutzens in der Form ableiten läßt, daß der zu betreibende Aufwand überstiegen wird.

Die Darstellung entscheidungsrelevanten Wissens in einer der Umgangssprache angelehnten Form vermindert Entwicklungszeiten, erhöht die Wartungsfreundlichkeit und erlaubt eine schnelle, unproblematische Anpassung des Entscheidungsunterstützungssystems. Ebenso sind

Fuzzy-Entscheidungsunterstützungssysteme, bedingt durch die Einbeziehung unsicherer Daten in den Entscheidungsprozeß, fehlertolerant.¹⁹⁾ Mithin ist es grundsätzlich möglich, die intuitive Dispositionsfähigkeit des Menschen, insbesondere bei der Behandlung von Störungen, abzubilden. Dies ist z. B. im Bereich der Kapazitätswirtschaft von Nutzen. Treten unvorhergesehene Kapazitätsengpässe auf, müssen Ausgleichsmaßnahmen wie Überstunden, Zusatzschichten, Verlagerung oder Verschiebung von Arbeitsgängen oder eine Erhöhung der Fertigungsintensität veranlaßt werden. Hieraus ergibt sich ein komplexes, in der Regel kurzfristig zu lösendes Um-dispositionsproblem, bei dem im allgemeinen die Einbeziehung der Dispositionsfähigkeit des Menschen gegenüber einer rein maschinellen Lösung zu favorisieren ist - besonders dann, wenn ansonsten eine zeitintensive Neuplanung erforderlich wäre.²⁰⁾

In welchen PPS-Datenstrukturen und -Funktionen Fuzzy-Logik in welchem Ausmaß und auf welche Art zum Einsatz kommen könnte, wird im folgenden untersucht. Diese Aufgabe ist eng mit der Identifizierung von linguistischen und informationalen Unsicherheiten innerhalb der PPS gekoppelt. Das reine Auffinden dieser Unsicherheiten ist aber nur eine notwendige Bedingung. Hinreichend begründet ist die Fuzzifizierung erst, wenn sich daraus eine Steigerung der betriebswirtschaftlichen Effizienz ableiten läßt.

2 Potentiale für den Einsatz von Fuzzy-Logik in PPS-Systemen

2.1 Datenstrukturen

Unschärfe Daten können in zwei Ausprägungen in PPS-Systemen vorkommen: als *originäre* und als *abgeleitete* Daten. Originäre unscharfe Daten sind diejenigen Daten, die als Grundlage für weitere Verarbeitungen dienen. Im Regelfall handelt es sich dabei um fuzzifizierte Stammdaten. Unschärfe Daten, die als Ergebnis derartiger Verknüpfungen ermittelt werden, sind abgeleitete oder auch derivative unscharfe Daten. Ob ein Datum originär oder abgeleitet ist, ist jeweils von der Betrachtungsweise abhängig. So kann ein abgeleitetes Datum aus Sicht einer nachfolgenden Operation originär sein.

¹⁹⁾ In Analogie zur Fuzzy-Regelung gilt auch für die unscharfe Entscheidungsunterstützung, daß in einer Regelbasis zum Teil Regeln zusammengefaßt werden oder wegfallen können, ohne daß sich die Entscheidungen wesentlich verschlechtern, und daß die Verwendung vereinfachter Zugehörigkeitsfunktionen (z. B. Singleton oder Trapez) zu keiner Änderung der Regelungsgüte eines Fuzzy Control Systems führen. Vgl. hierzu N. N. (1990).

²⁰⁾ Vgl. Scheer (1990a), S. 26.

Grundsätzliche Konsequenzen für die Planung und Steuerung der Produktion hat eine Fuzzifizierung der verwendeten Stammdaten, weil hieraus wiederum direkt oder indirekt diverse Fuzzy-Daten abgeleitet werden. Im folgenden soll anhand der Teilestammdaten, Stücklisten, Arbeitspläne und Betriebsmitteldaten aufgezeigt werden, welche Daten sich jeweils begründet fuzzifizieren lassen.²¹⁾ Der generelle Vorteil der Fuzzifizierung von Datenstrukturen liegt darin, daß sich Daten, die sich nur unscharf ausdrücken lassen, durch Einsatz der Fuzzy-Logik - inklusive ihrer Unschärfe - operationalisieren lassen und damit verarbeitbar werden. Eine Fuzzifizierung relevanter Daten führt somit zu einer realitätsnäheren Abbildung der Produktionsbedingungen innerhalb des PPS-Systems. Darüber hinaus können Planungsentscheidungen unter explizitem Einbezug der real bestehenden Unsicherheit (über die genaue Ausprägung der Daten) getroffen werden. Es wird keine Exaktheit der Daten vorgetäuscht, wie es beim Ansatz scharfer Daten der Fall ist. Zudem lassen sich Pläne, die u. a. fuzzifizierte Daten enthalten, auch unter dem Grad ihrer Unsicherheit bewerten. Diese Nutzeffekte einer Fuzzifizierung gelten generell für alle potentiell unsicheren Daten, so daß im folgenden nicht immer ausdrücklich auf die Vorteile der jeweiligen Fuzzifizierung hingewiesen wird.

Teilestammdaten

Teilestammdaten für Endprodukte, Baugruppen, Einzelteile oder Materialien bestehen weitestgehend aus scharfen Attributen. Nur bei wenigen der teilweise über 100 Attribute läßt sich durch Verwendung von Fuzzy-Zahlen die Aussagefähigkeit der Daten verbessern. Beispiele hierfür sind *konstruktionsbedingter Ausschuß* oder die *interne Bearbeitungszeit*. Letztere stellt eine originäre Fuzzy-Größe dar, aus der u. a. die *Durchlaufzeit* abgeleitet werden kann.

Stücklisten

Stücklisten beschreiben die mengenmäßige Zusammensetzung von Endprodukten aus Baugruppen, Einzelteilen und Materialien.

Im wesentlichen gibt die Stückliste deterministische Strukturbeziehungen wieder: Es ist eindeutig festgelegt, welche Teile in welcher Anzahl auf welcher Ebene in ein Produkt eingehen. Allerdings sind auch Fälle denkbar, in denen diese Strukturbeziehungen nicht eindeutig sind. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden.

²¹⁾ Zu den Datenstrukturen in der Produktionsplanung und -steuerung und weiteren Grunddaten vgl. Kurbel (1993), S. 61ff. sowie Scheer (1990b), S. 72ff.

Falls variantenbedingter *Ausschuß* anfällt, kann dieser oftmals in Wahrscheinlichkeiten spezifiziert werden. Es ist dann zwar unbekannt, ob es bei der Produktion eines bestimmten Teils zu Ausschuß kommt, jedoch kann über alle zu produzierenden Teile der Ausschuß hinreichend genau durch eine Korrektur des Produktionskoeffizienten berücksichtigt werden. Hinreichend genau heißt hierbei, daß der inklusive Ausschuß notwendige Sekundärbedarf präzise genug ermittelt werden kann. In diesen Fällen reicht das Instrumentarium statistischer Methoden aus.

Oftmals läßt sich aber für den Ausschuß - und mithin für das Verhältnis zwischen Primär- und Sekundärbedarf - kein hinreichend genauer Erwartungswert bestimmen. Gründe hierfür sind die fehlende Erfahrung in der Produktion dieses Teils oder Unsicherheit über die Entwicklung des Lerneffekts. Unter Umständen kann aber ein erfahrener Mitarbeiter den zu erwartenden Ausschuß zumindest mit 'ungefähr 10 %' angeben. Diese Fuzzy-Zahl findet dann Eingang in die Materialbedarfsprognose.²²⁾ Unschärfe Daten erlauben es somit, ggf. eine zutreffendere Beziehung zwischen Primär- und Sekundärbedarf herzustellen als in bisherigen Systemen üblich.

Weiteres Einsatzpotential für Fuzzy-Ansätze entsteht durch die Notwendigkeit einer *recyclinggerechten Stücklistenstruktur*. Insbesondere Informationen zur Lebensdauer oder Recyclingfähigkeit und -würdigkeit lassen sich vor allem aufgrund derzeit noch mangelnder Erfahrungswerte nur unscharf angeben.

Die Fuzzifizierung der Stückliste wird bei Produkten gefördert, bei denen die *Produktionskoeffizienten* in kontinuierlichen Einheiten (Kilogramm, Tonnen, Liter etc.) angegeben werden. Auch ließe sich der schwer exakt zu quantifizierende Bedarf an *Hilfs- und Betriebsstoffen* (Tertiärbedarf) unscharf festhalten.

Arbeitspläne

Arbeitspläne beschreiben, welche Verrichtungen (Arbeitsgänge) in welcher Reihenfolge auf welchen Betriebsmitteln in welcher Zeit zur Erstellung von Eigenfertigungsteilen notwendig sind. Liegen die Arbeitspläne auftragsunabhängig vor, handelt es sich um Stammarbeitspläne. Ergänzt man diese um Termin- und Mengenangaben, so ergeben sich daraus die Fertigungsaufträge. Da fast jede PPS-Funktion (Ausnahmen sind die Primärbedarfsplanung und teilweise die BDE) mit Fertigungsaufträgen arbeitet, wirken unscharfe Arbeitsplandaten als originäre Fuzzy-Daten innerhalb der Produktionsplanung und -steuerung sehr weitreichend.

²²⁾ Vgl. auch die späteren Ausführungen zur Fuzzifizierung der Materialwirtschaft (Abschnitt 2.2, S. 24) sowie die Darstellung der Fuzzy-Prognose (Abschnitt 1.1.5, S. 10).

Umfassende Konsequenzen besitzt vor allem eine unscharfe Angabe der Zeitkomponenten eines Arbeitsgangs. Dieser setzt sich wie folgt zusammen: Einer ablaufbedingten *Wartezeit* vor der Maschine kann sich eine losgrößenunabhängige *Rüstzeit* anschließen. Die eigentliche *Bearbeitungszeit* ergibt sich entweder linear oder gemäß einer Prozeßmenge des eingesetzten Betriebsmittels²³⁾ abhängig von der zu fertigenden Stückzahl. Gegebenenfalls fällt anschließend eine *Abrüstzeit* an, die nicht der Rüstzeit für den nachfolgenden Arbeitsgang entspricht. Die Qualitätsprüfung vollzieht sich in der *Kontrollzeit*. Prozeßbedingt kann eine *Liegezeit* folgen, in der das Werkstück beispielsweise trocknet oder auskühlt. Die *Transportzeit* stellt die letzte Zeitkomponente eines Arbeitsgangs dar. Sie kann sich mit der Liegezeit überlappen.

Theoretisch wäre zu fordern, daß Rüst-, Kontroll- und Transportvorgänge als atomare Größen in eigenen Arbeitsgängen festgehalten werden (vgl. Abbildung 5). In der Praxis herrschen aber Arbeitsgänge vor, die diese Vorgänge als Zeitkomponenten enthalten.

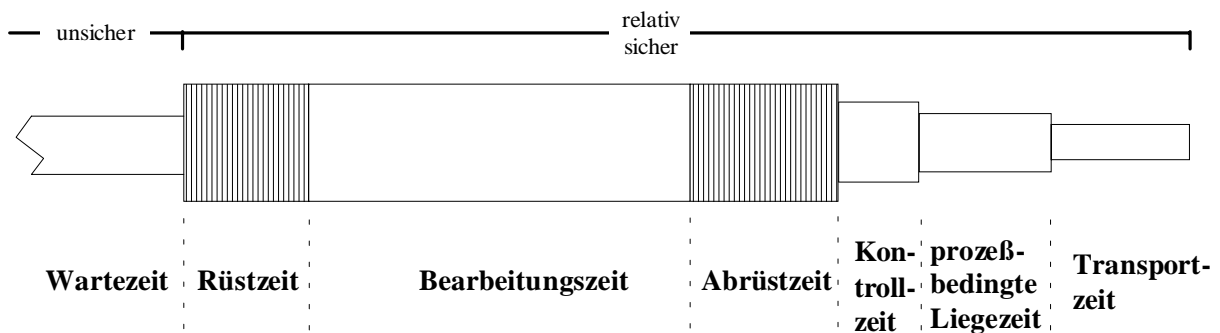


Abb. 5: Eignung der Zeitkomponenten eines Arbeitsgangs zur Fuzzifizierung

Während die Rüst-, Bearbeitungs-, Abrüst-, Kontroll-, Liege- und Transportzeiten im Regelfall als recht sicher prognostizierbar gelten können, stellt die Wartezeit als Zeitpuffer eine nur unscharf beschreibbare Größe dar. Es handelt sich dabei um ein originäres Fuzzy-Datum, aus dem sich diverse fuzzifizierte Größen ableiten lassen. Die tatsächliche Ausprägung der Wartezeit ergibt sich u. a. aufgrund von aktueller Auslastung, Störfällen, Materialflußrichtungen und Entscheidungen des Werkstattleiters. Folglich ist sie nicht sicher zu quantifizieren. Durch Verwendung einer Fuzzy-Zahl könnte dieser Unsicherheit Rechnung getragen werden, wobei aggregatabhängig unterschiedliche Ausmaße an Unsicherheit angenommen werden können (so sind Wartezeiten an Nicht-Engpässen eher auszuschließen). Durch Berücksichtigung der real bestehenden Unsicherheit hinsichtlich der Länge der Wartezeit steigt die planerische Durchdringung des Produktionsproblems. Damit geht eine höhere Planungssicherheit und eine größere Annäherung

²³⁾ Z. B. bei einem Brennofen oder einem Galvanikbad.

an die Realität einher. Die hohe Nutzenerwartung an eine Fuzzifizierung der Wartezeit resultiert nicht zuletzt aus der Tatsache, daß diese in der Einzel- und Kleinserienfertigung oftmals bis zu 90 % der Durchlaufzeit ausmacht.²⁴⁾

Wenngleich die übrigen Zeitkomponenten zumeist relativ sicher quantifiziert werden können, sind auch Fälle denkbar, in denen sie unsicher sind, weil z. B.

- die Bearbeitungszeit insbesondere von der Personaleffizienz abhängt, die genaue Beziehung aber unbekannt ist, oder das Werkstück unter bestimmten Umständen unterschiedliche Durchlaufzeiten hat (z. B. ist die Durchlaufzeit von Papier u. a. abhängig von der Luftfeuchtigkeit);
- bislang keine Erfahrungen gemacht oder keine Messungen durchgeführt wurden und eine Zeitschätzung gemäß den Systemen vorbestimmter Zeiten (im wesentlichen MTM-, WF-Verfahren)²⁵⁾ zu unpräzise oder aber unmöglich ist;
- der Prozeß nur mangelhaft beherrscht wird und sich deshalb der Ausschuß - und damit auch die zur Fertigung der Sollmenge erforderliche Bearbeitungszeit - nicht bestimmen läßt;
- die Rüst- und Abrüstzeiten auch reihenfolgeabhängig sind und aufgrund einer Vielfalt möglicher Reihenfolgebeziehungen eine matrizenhafte Darstellung der Rüst- und Abrüstzeiten nicht praktikabel ist. Durch eine geeignete Aggregation (z. B. 'Wenn dunkle Farbe, dann geringe Rüstzeit.') ließe sich das Datenvolumen beschränken. Auch kann an dieser Stelle etwaiger rüstabhängiger Ausschuß als unscharfe Zahl (in Mengeneinheiten) angegeben werden.
- die Kontrollzeit von unscharf formulierten Qualitätsanforderungen des Kunden abhängt;
- die prozeßbedingte Liegezeit nur ungenau angegeben werden kann, da z. B. Auskühlungs- und Trockenvorgänge u. a. von der Temperatur, der Materialbeschaffenheit oder der Legierung abhängen können;
- die Transportzeit nicht exakt quantifizierbar ist, da das Transportmittel ggf. einen Engpaß darstellt.²⁶⁾

²⁴⁾ Erste Untersuchungen finden sich hierzu bereits bei Stommel, Kunz (1973).

²⁵⁾ MTM = Methods Time Measurement, WF=Work Factor. Vgl. hierzu beispielsweise Kern (1992), S. 297ff.

²⁶⁾ Die Empfehlung, die Transportzeiten aufgrund ihrer mangelnden Kalkulierbarkeit zu fuzzifizieren, findet sich - allerdings ohne weitere Ausführungen - bei Lipp (1993), S. 101.

Sollten sich aufgrund dieser oder anderer Gründe mehrere Zeitkomponenten eines Arbeitsgangs nur unscharf angeben lassen, ergibt eine unscharfe Addition²⁷⁾ der scharfen und unscharfen Komponenten einen Eindruck von der insgesamt bestehenden Unsicherheit über den Zeitanatz für einen Arbeitsgang. Die Summation der Zeiten über alle Arbeitsgänge eines Stammarbeitsplans offenbart die hinsichtlich des gesamten Erstellungsprozesses bestehende Zeitunschärfe.

Neben den Zeitangaben lassen sich auch die Reihenfolgebeziehungen fuzzifizieren. Während eine eindeutige technologisch vorgeschriebene Arbeitsgangabfolge keine Anhaltspunkte für den Einsatz der Fuzzy-Logik bietet, bestehen oftmals Unsicherheiten bei der Verwendung von *Alternativarbeitsplänen*, wie sie insbesondere bei flexiblen Maschinenkonzepten (Flexible Fertigungszellen oder -systeme) angewendet werden. Dabei sind drei planerische Freiheitsgrade zu unterscheiden:²⁸⁾ Es kommen für einen Arbeitsgang weitere funktionsgleiche Maschinen in Betracht (Ausweichaggregat), es gibt einen alternativen, verfahrenstechnisch unterschiedlichen Ausweicharbeitsgang (Bohren oder Stanzen), oder die Arbeitsgangreihenfolge ist in Grenzen variabel (Bohren und dann Nutfräsen oder umgekehrt). Über unscharfe Regeln könnte dabei sowohl die jeweils aus ökonomischer als auch aus fertigungstechnischer Sicht vorliegende Substitutionseignung formuliert werden (z. B. 'bedingt geeignet', 'weniger geeignet'). Welcher Bearbeitungspfad im konkreten Fall gewählt wird, kann von mehreren Variablen abhängig gemacht werden ("Wenn die Qualitätsanforderungen hoch sind und die Menge klein ist, dann wähle Pfad B").

Weiterhin sind bei Einsatz von Konzepten der flexiblen Automatisierung *Attribute wie Eignung für das Nachtprogramm*²⁹⁾ oder *Einfahrauftrag*³⁰⁾ einem Arbeitsplan oder einer Arbeitsgangabfolge zuzuordnen. Dabei könnte die Eignung eines Auftrags für die Nachtschicht beispielsweise als 'weniger hoch' beschrieben sein.

Weitere Attribute, für die man sich eine Fuzzifizierung vorstellen könnte, sind die Maßnahmen zur Durchlaufzeitverkürzung (Übergangszeitenreduzierung, Splitting³¹⁾, Überlappung). Ihre Wirkung ('hohe' oder 'geringe' Durchlaufzeitverkürzung; 'ungefähr 30%') kann ebenso wie der mit ihnen verbundene Aufwand, die Beschleunigungskosten ('hoch'; 'ungefähr 500,- DM') mittels Fuzzy-Sets oder -Zahlen formuliert werden.

27) Vgl. zur unscharfen Addition Zimmermann (1991), S. 57ff.

28) Vgl. Becker, Rosemann (1993), S. 66f.; Maier (1980), S. 52f.

29) Das Kennzeichen Nachtprogramm besagt, daß das Werkstück beispielsweise ein unkritisches Zerspanverhalten aufweist oder keiner besonderen Rüstvorgänge bedarf. Durch die Priorisierung derartiger Aufträge soll die Zeit des störungsfreien Betriebs während der personalarmen Nachtschicht maximiert werden. Vgl. Förster, Hirt (1988), S. 122f.

30) Das erstmalige Testen und Optimieren eines NC-Programms wird als Einfahrauftrag bezeichnet. Ein solcher erfordert die Anwesenheit von qualifiziertem Personal (Maschinenbediener, Programmierer, Einrichter).

31) Die Fuzzifizierung der Eignung eines Auftrags splittings sowie Attribute wie Nachtprogramm oder Einfahrauftrag sind die einzigen Ansatzpunkte für die Integration von Unschärfe auf Ebene des Arbeitsplankopfes. Alle weiteren Ausführungen zur Fuzzifizierung des Arbeitsplans beschränken sich auf Positionsdaten.

Auch bei Einsatz 'konventioneller' Betriebsmittel kann Unsicherheit über die genaue Arbeitsgangfolge bestehen, weil z. B. Nacharbeitsaufwand notwendig sein kann, dessen Auftreten aber aufgrund fehlender Prozeßbeherrschung nicht sicher vorhergesagt werden kann, oder weil der Kunde seinen Auftrag erst nach Fertigungsbeginn konkretisiert. In diesen Fällen steht mit Fertigungsbeginn nicht genau fest, ob einige Arbeitsgänge später durchgeführt werden oder nicht. Aus einer Fuzzifizierung des Auftretens späterer Arbeitsgänge kann eine unscharf beschriebene Kapazitätsnachfrage abgeleitet werden.

Betriebsmitteldaten

Zu den scharfen Betriebsmitteldaten zählen z. B. die Betriebsmittelbezeichnung, der Standort oder die Kostenstelle.

Potentiell fuzzifizieren lassen sich hingegen folgende Betriebsmittelinformationen:

- Das *Kapazitätsangebot* der Maschine kann ggf. nicht exakt bestimmt werden, wenn z. B. ein Aggregat neu angeschafft worden ist und noch keine Erfahrungswerte bzgl. des Störverhaltens vorliegen. Auch könnte die Maschine zwar schon seit längerem im Einsatz sein, doch trotzdem lassen sich die Störungen selbst nicht mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorhersagen (Wirkungsdefekt). Außerdem könnten sich die Einsatzbedingungen geändert haben. Bei der unscharfen Angabe des Kapazitätsangebots handelt es sich um eine potentielle Anwendung für Fuzzy-Zahlen. Das Störverhalten kann hingegen gut mit Termen linguistischer Variablen wie 'störanfällig' beschrieben werden. Betriebsmittelbedingter Ausschuß ließe sich im Betriebsmitteldatensatz auch als unscharfe Größe (Fuzzy-Zahl in %) angeben.
- Der *Wartungsbedarf*, der z. B. nach einer 'hohen' Auslastung und einer 'hohen' Intensität in der Vergangenheit 'groß' ist, ließe sich unscharf formulieren. Für ein belastungsunabhängiges Wartungsintervall wie etwa 'ungefähr alle 14 Tage' kann eine Fuzzy-Zahl verwendet werden. Diese Fuzzifizierung geht ein in die Ermittlung des unscharfen Kapazitätsangebots des Betriebsmittels oder bestimmt die Wichtigkeit eines Wartungsauftrags gegenüber Fertigungsaufträgen, womit sie innerhalb der Feinplanung Bedeutung erlangt.
- Eine unscharfe Angabe des *Personalbedarfs* liegt vor, wenn der Maschinenbediener 'qualifiziert' oder 'erfahren' zu sein hat. Damit würden der Personaleinsatzplanung unscharfe Bedarfsdaten zugrundegelegt.
- Auch kann die durchschnittliche *Rüst- und Wartezeit* eines Auftrags vor dem Betriebsmittel unscharf angegeben werden.

- Die Zugehörigkeit eines Aggregats zu einer Fertigungsinsel kann durch Angabe eines Zugehörigkeitsgrads unscharf dargestellt werden, wenn sich der genaue Kapazitätsanteil nicht bestimmen läßt, weil er beispielsweise stark mit der jeweiligen Auftragsstruktur schwankt.³²⁾ Diese nur teilweise *Gruppenzugehörigkeit* findet Eingang bei der Berechnung der Inselkapazität, die wiederum für die Freigabe von Aufträgen in diese Insel relevant ist, d. h., durch eine Fuzzifizierung werden ggf. tatsächlich durchführbare Aufträge freigegeben, die man bei scharfer Angabe zurückhalten würde.
- Werden Daten des Rechnungswesens wie der Maschinenstundensatz aufgrund fehlender Datenintegration oder sonstiger Verfügbarkeit in den Betriebsmitteldaten gehalten, können auch diese Daten - insbesondere angesichts der hinlänglich bekannten Quantifizierungsschwierigkeit von Kosten - fuzzifiziert werden.

2.2 Produktionsplanung

Produktionsprogrammplanung

Aufgabe der Produktionsprogrammplanung bzw. Primärbedarfsplanung³³⁾ ist es, zu bestimmen, welche Produkte zu welchem Zeitpunkt und zu welcher Menge lieferfähig verfügbar sein sollen. Ziel ist es, den Absatzplan mit den Verkaufsmöglichkeiten am Markt und den Kapazitäten der Produktion optimal abzustimmen. Fehler bei der Planung wirken sich bei Unternehmen mit Serienfertigung dahingehend aus, daß Artikel unverkäuflich im Lager bleiben (Kapitalbindungskosten) oder aber verkäufliche Artikel nicht termin- und mengengerecht angeboten werden können (Verzugs- bzw. Fehlmengenkosten). Bei Auftragsfertigern hingegen kommt es zu Auslastungsschwankungen, Terminverzügen und Vertrauensverlusten.

Die Erstellung eines *Produktionsprogramms* unterliegt einer Vielzahl von Einflüssen. Unternehmensziele, Produktionskapazitäten und voraussichtliche Nachfrageentwicklung am Markt seien hier als wesentliche Einflußfaktoren genannt. Es werden spezifische Größen aus allen Bereichen des Betriebs benötigt, die zum größten Teil nur unvollständig bekannt sind und auf Erfahrungswerten (Betriebskapazität, Verkaufszahlen) und Absatzprognosen beruhen. Ziel bei der Erstellung eines Absatzplanes ist die Maximierung der Deckungsbeiträge über alle Produktarten.

³²⁾ Vgl. Kurbel (1993), S. 104f.

³³⁾ Unterscheidungen zwischen Produktionsprogrammplanung und Primärbedarfsplanung (für Serienfertiger bzw. für Auftragsfertiger, vgl. Kurbel (1993), S. 119ff. und 205ff.), sind für den Einsatz der Fuzzy-Logik nicht von Bedeutung und werden deshalb hier nicht getrennt behandelt.

Zur Lösung dieses betriebswirtschaftlichen Optimierungsproblems wurden oft lineare Optimierungsmodelle entworfen.³⁴⁾ Für praktische Anwendungen sind diese Systeme jedoch nur von geringer Bedeutung. Der Grund hierfür liegt u. a. in der hohen Komplexität der Randbedingungen sowie in der Behandlung unsicherer Parameterwerte zukünftiger Größen (Kapazitätsangebot, Nachfrage) innerhalb des "scharfen" Systems. Hier scheint der Ansatz der *Fuzzy Linearen Programmierung* vielversprechend.

Vielfach lassen sich die Größen der Randbedingungen (Kapazitätsangebot, Absatzzahlen) aufgrund ihrer Zukunftsbezogenheit nur schätzen. In der Praxis werden hierfür Prognoseverfahren angewandt. Zukünftige Entwicklungen werden dabei aus bereits vorhandenen Daten der Vergangenheit abgeleitet. Dieser Vorgang geschieht aufgrund seiner sehr komplexen Struktur i. d. R. auf einer qualitativen Ebene. In diesem Bereich bietet die *Fuzzy-Prognose* neue Ansätze.

Auftragssteuerung

Die Auftragssteuerung umfaßt Aufgaben der Angebotserstellung, der Zuordnung von Aufträgen zu Primarbedarfen, der Klärung der Realisierbarkeit, der Terminierung und der Statusverfolgung. Neben der Ermittlung technischer Lösungen und der Ausgestaltung vertraglicher Bedingungen umfaßt die *Angebotsplanung* die Kalkulation und die Prognose der Liefertermine. Oft müssen dem Kunden Preise und Termine genannt werden, ohne daß genaue Kenntnisse über die Konstruktion, den resultierenden Produktionsprozeß usw. vorhanden sind.

In die Bearbeitung eines Angebots sind außer Vertriebsfachkräften häufig auch Mitarbeiter aus Konstruktion und Fertigung involviert. Um diese Personalkapazitäten effektiver einsetzen zu können, versucht man den Vorgang zu erleichtern und zu beschleunigen, indem man Erfahrungen aus der Vergangenheit bereitstellt. Hierbei muß das Wissen, das in früher bereits abgewickelten Aufträgen enthalten ist, in geeigneter Form zur Verfügung gestellt werden. Die Daten über frühere Aufträge müssen analysiert und auf die aktuelle Situation hin transformiert werden. Es kommt vor allem darauf an, möglichst ähnliche Aufträge zu finden.

Das Problemlösen mit Hilfe von Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen aktuellen und früheren Fällen ist Gegenstand der *fallbasierten Wissensverarbeitung*. Verfahren zur Bildung fallbasierter Systeme setzen voraus, daß die relevanten Ähnlichkeitskriterien sowie deren Einfluß auf den Grad der Ähnlichkeit schon vorher bekannt sind. Für verschiedene Produktklassen können unterschiedliche Kriterien für die Prognose von Lieferterminen und Preisen relevant sein. Der Einfluß eines einzelnen Kriteriums kann außerdem in verschiedenen Klassen unterschiedlich

³⁴⁾ Vgl. z. B. Scheer (1976).

ausfallen. Da somit schon wenige Kriterien vielfältige Abhängigkeiten bedingen, gestaltet sich der Prozeß der Wissensakquisition und -modellierung bei fallbasierten Systemen besonders schwierig. Zur Verbesserung ist die zuverlässige, möglichst automatisierte Ermittlung der Einflüsse der verschiedenen Kriterien eines zuvor erstellten Kriterienkatalogs auf die unterschiedlichen Produkt- oder Fallklassen wünschenswert.

Als Hilfsmittel für die Klassifizierung bieten sich statistische Methoden wie z. B. Clusteranalysen oder auch konnektionistische Verfahren, beispielsweise auf Basis Neuronaler Netze³⁵⁾, an. Außerdem ist der Einsatz fuzzifizierter Größen in mehreren Bereichen denkbar. Fuzzy-Systeme zur *Datenanalyse* ermöglichen eine Klassifizierung mit unscharfen Merkmalsausprägungen, wie sie gerade im beschriebenen Problemfeld häufig vorkommen. Werden die vergangenen Fälle durch linguistische Variablen beschrieben oder deren Eigenschaften in solche transformiert, lassen sich auch neue Aufträge mit abweichenden Daten klassifizieren.

Ein weiteres Anwendungsfeld für einen Fuzzy-Ansatz bietet die *Bewertung der einzelnen Kundenaufträge*. Anforderungen an die Termintreue von Aufträgen lassen sich mittels linguistischer Variablen bewerten (z. B. 'hoch', 'weniger hoch'). Diese Informationen können bei der Feinplanung im Falle von Terminkonflikten als prioritätsregelnde Größen genutzt werden.

Kalkulation

Aufgabe der Kalkulation ist die Ermittlung der auf eine Produkt- oder Auftragseinheit entfallenden Stückkosten. Damit verbunden ist die Verteilung der Kosten, die bei der betrieblichen Leistungserstellung entstehen. Bei einer kostenorientierten Preisgestaltung dienen die ermittelten Selbstkosten als Basis für die Kalkulation des Angebotspreises.³⁶⁾ Die Vorkalkulation stellt als Planrechnung eine wertmäßige Schätzung der Herstellkosten dar. Je unvollkommener die Informationen sind, desto größer sind die Unsicherheiten, die in den Erwartungen stecken.

In eine fuzzifizierte Kalkulation gehen mit der expliziten Erfassung der bestehenden Unsicherheiten mehr Informationen ein als in eine herkömmliche Kalkulation. So können beispielsweise Ressourcenbedarfe durch Terme linguistischer Variablen ('hoher' bzw. 'niedriger' Bedarf) oder als Fuzzy-Zahlen ('ungefähr 3 kg') ausgedrückt werden. Die Fuzzifizierung der Kalkulation kann sich dabei sowohl auf Mengen- als auch auf Wertgrößen beziehen.

³⁵⁾ Vgl. Becker, Prischmann (1992); Becker, Prischmann (1991).

³⁶⁾ Vgl. Kilger (1987), S. 289ff.

Das unscharf ausgedrückte Kalkulationsergebnis enthält im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren zusätzliche Information. Es beinhaltet die bestehende Unsicherheit, so daß der Disponent stärker als bei scharfen Daten für das mit der Auftragsrealisierung verbundene ökonomische Risiko sensibilisiert wird. Das Risiko wird durch das Ausmaß der Unsicherheit aufgezeigt.

Materialwirtschaft

Die Hauptaufgabe der Materialbedarfsplanung besteht in der Mengenplanung, innerhalb der aus dem gegebenen Primärbedarf (Produktionsprogramm oder vorliegende Aufträge) durch Verfahren der verbrauchs- und bedarfsgesteuerten Disposition der benötigte Sekundärbedarf (Rohmaterialien, Teile, Baugruppen) ermittelt wird.

Ausgehend vom Primärbedarf werden für Eigenfertigungsteile im Rahmen der Stücklistenauflösung Fertigungsaufträge erstellt. Fertigungsaufträge, die pro Teil der Stückliste gebildet werden, geben an, welche Mengen welchen Teils in welcher Periode zu fertigen sind.

Für fremdbezogene Teile müssen optimale Bestellmengen ermittelt und eine ausreichende Lieferbereitschaft sichergestellt werden. Der linguistisch mit 'ausreichend' beschriebene Lieferbereitschaftsgrad eignet sich offensichtlich für eine Fuzzifizierung. Feste Größen (z. B. Sicherheitslagerbestand genau $x\%$ der maximalen Lagermenge) können durch unscharfe Vorgaben basierend auf mehreren Entscheidungsparametern, wie z. B. 'hoher' erwarteter Auftragseingang, 'kurze' Verfallzeit oder 'lange' Wiederbeschaffungszeit realitätsnah ersetzt werden. Dadurch wird die linguistische Unsicherheit realitätsnah abgebildet.

Eine wesentliche Anwendung für die Fuzzy-Logik innerhalb der Materialwirtschaft stellt die *verbrauchsgebundene* (stochastische) *Materialdisposition* dar. Während bei der bedarfsgesteuerten Disposition Unschärfen nur abgeleitet aus den fuzzifizierten Stücklisten auftreten, läßt sich im Rahmen der verbrauchsgesteuerten Disposition durch Einsatz der Fuzzy-Prognose bei der Ermittlung der zukünftigen Bedarfsmengen eine unmittelbare Fuzzifizierung vollziehen. Die Notwendigkeit, statistische Prognosemodelle (z. B. exponentielle Glättung) durch fuzzifizierte Ansätze abzulösen, steigt vor allem mit kürzeren Produktlebensdauern und zunehmender Variantenvielfalt, aufgrund derer immer seltener ausreichend lange Zeitreihen vorhanden sind.

Kapazitätswirtschaft

Zur Kapazitätswirtschaft gehören die Pflege des Kapazitätsangebots, die Berechnung des Kapazitätsbedarfs und der Kapazitätsabgleich - drei durch vielfältige Störgrößen (wie z. B. Maschinenausfälle, Personalengpässe, Instandhaltung und Wartung) mit Unsicherheit belastete Werte.

Für die Ermittlung des Kapazitätsbedarfs werden die Fertigungsaufträge zunächst terminiert. Da Fertigungsaufträge Vorgaben für real und "scharf" durchzuführende Fertigungsprozesse sind, müssen sie scharfe Vorgaben an die Feinplanung liefern. Die Daten, auf denen die Fertigungsauftragsgenerierung operiert, können jedoch fuzzifiziert sein. Fuzzifizierte Arbeitsplandaten sind geeignet, die Auswahl von alternativen Arbeitsgängen abhängig von verschiedenen Einflußfaktoren zu unterstützen.

Weiterhin können fuzzifizierte Stammdaten aus dem Betriebsmittelbereich für eine Bewertung der Sicherheit von Plänen ausgewertet werden. So wird häufig ein hoher Anteil von grobgeplanten Fertigungsaufträgen nicht so ausgeführt, wie ursprünglich geplant. Aus originären fuzzifizierten Größen wie z. B. Störungssicherheit oder Ausfallhäufigkeit von Betriebsmitteln kann dann ein abgeleitetes unscharfes Datum, das sogenannte *Sicherheitsmaß*, berechnet werden, das als Aussage zur Zugehörigkeit eines Plans zur Fuzzy-Menge der sicher durchführbaren Pläne interpretiert werden kann. Dieses Datum gibt dem Disponenten bzw. einem Dispositionsprogramm in der Fertigungssteuerung Anhaltspunkte darüber, wie weit Planungsspielräume ausgenutzt werden können.

Im Rahmen der Auftragsterminierung können originäre Fuzzy-Stammdaten für die *Festlegung der Größe von Zeitpuffern* zusätzlich zu den ohnehin notwendigen (un-)scharfen Daten wie Liefertermin, Kapazität, Leistungsgrad usw. herangezogen werden. Über fuzzifizierte Daten wie Störanfälligkeiten, Personalverfügbarkeit und -qualifikation usw. können betriebsmittelspezifische Zeitpuffer kalkuliert werden, durch die implizit die Sicherheit der Durchführbarkeit erhöht wird. Die Festlegung von Zeitpuffern hat damit einen direkten Einfluß auf die Bewertung von Plänen: Je größer die Puffer gewählt werden, desto sicherer ist ein Plan durchführbar - das ist trivial und bei der Verwendung scharfer Daten auch nicht anders. Allerdings kann nun der Zusammenhang zwischen der Puffergröße p und dem Sicherheitsmaß s quantifiziert werden, so daß die minimale Puffergröße abhängig von einem durch den Disponenten bestimmten Wert für das Sicherheitsmaß eines Fertigungsauftrags anhand einer Funktion f der Art $p = f(s)$ zumindest approximiert werden kann.

Die Festlegung der Fertigungstermine für die Durchlaufterminierung erfolgt ohne Berücksichtigung der tatsächlich vorhandenen Kapazitäten. Damit reserviert das System als Ergebnis einer Durchlaufterminierung (d. h. die Planung der zeitlichen Einordnung der Arbeitsgänge) einen festen Kapazitätsbedarf bzw. eine feste Kapazitätsbelastung. Da diese Festlegung nur in den seltensten Fällen mit dem verfügbaren Kapazitätsangebot genau übereinstimmt, werden aufwendige Anpassungsschritte erforderlich. Meistens sind in den Arbeitsgängen schon implizit Pufferzeiten in Form von pauschalen Sicherheitszuschlägen enthalten. Durch die unscharfe Abbildung der

Arbeitsgänge³⁷⁾ können nun die Puffer- und Wartezeiten als versteckte Kapazitätsreserve mit in Betracht gezogen werden. Das führt, abhängig von der Divergenz zwischen Kapazitätsangebot und -bedarf, zu einer Reduzierung oder im günstigsten Fall zum Wegfall der Anpassungsschritte, da durch den Fuzzy-Ansatz der tatsächliche Spielraum der Pufferzeiten überhaupt erst berücksichtigt werden kann.

So kann zum Beispiel auch eine Durchlaufplanung mit einem 'sehr hohen' Kapazitätsbedarf, (d. h. unscharf etwas größer als 100%) noch ohne Modifikationen durchgeführt werden. Dies entspricht einer Entscheidung, die jeder Fertigungsleiter auch tätigen würde, da in der Fertigung fast immer noch 'versteckte' Kapazitäten³⁸⁾ sind, die es dann zu mobilisieren gilt. Ist die unscharfe Differenz³⁹⁾ zwischen verfügbarer Kapazität und Kapazitätsbedarf auch nach der Fuzzifizierung noch zu groß, wird die Anpassung über die üblichen Wege vorgenommen. Die Übereinstimmung ist hierbei von dem angenommenen Grad der Unsicherheit abhängig, d. h., je größer die Unsicherheit bzgl. der vorgegebenen Kapazität und des Kapazitätsbedarfs ist, desto eher entsteht ein Überschneidungsbereich, für den keine Anpassung vorgenommen werden müßte. Jedoch steigt damit auch das Risiko einer Fehlplanung.

Ein Kapazitätsabgleich vollzieht sich in der Praxis normalerweise in der folgenden Reihenfolge: Angebotsanpassung, Verlagerung auf Auswecharbeitsplätze, Änderung der Auftragsreihenfolge, Alternativfertigerungsverfahren, Fremdvergabe, Mengenänderung der Aufträge, Terminänderungen.⁴⁰⁾ Für die Form der Anpassung lassen sich mit erheblichen Einschränkungen Algorithmen finden, die automatisch einen Abgleich der Kapazitätsspitzen vornehmen. Eine Fuzzifizierung der Abgleichsalgorithmen würde bei einer vorangehenden Fuzzifizierung des Kapazitätsangebots und insbesondere der Arbeitspläne eine bessere Glättung der Kapazitätsauslastung ermöglichen. Die grundlegenden Probleme der Glättungsalgorithmen wie z. B. die Terminierung bei Überlast auf mehreren Betriebsmitteln werden durch die Fuzzifizierung nicht gelöst.

Fertigungsauftragsfreigabe

Die Auftragsfreigabe stellt mit dem Auslösen von Realisierungsaufgaben die Schnittstelle zwischen den Planungs- und Steuerungsfunktionen von PPS-Systemen dar. Fertigungsaufträge oder auch nur einzelne Arbeitsgänge werden nach einer positiven (statischen oder dynamischen) Prü-

³⁷⁾ Vgl. Abschnitt 2.1, S. 16ff.

³⁸⁾ Diese liegen in Form von Wartezeiten und aufgrund von Puffern in der Terminierung vor.

³⁹⁾ Diese unscharfe Differenz ergibt sich als derivative Fuzzy-Größe aus dem fuzzifizierten Kapazitätsangebot und -bedarf. Sie beinhaltet die aggregierte Unsicherheit der Vorgabewerte, Kapazitätsangebot und Kapazitätsbedarf. Diese Unsicherheit ist in einem scharfen Ergebnis nicht enthalten.

⁴⁰⁾ Vgl. Kernler (1993), S. 182ff.

fung der Verfügbarkeit der Fertigungsressourcen (Betriebsmittel, Personal, Material, Werkzeuge, NC-Programme etc.) freigegeben und der Fertigungssteuerung überstellt.

Die besondere Bedeutung der Auftragsfreigabe drückt sich im sog. Durchlaufzeitsyndrom aus: Weil angesetzte Durchlaufzeiten häufig überschritten werden, kommt es zu einer früheren Auftragsfreigabe. Dadurch verlängern sich aber die Warteschlangen von Aufträgen vor den Betriebsmitteln, und die Transparenz über die aktuelle Auftragssituation sinkt. Die Folge sind überproportional zunehmende Durchlaufzeiten, d. h., die Termintreue verschlechtert sich weiter.

Die hervorgehobene Stellung der Auftragsfreigabe macht sich insbesondere die *Belastungsorientierte Auftragsfreigabe* (BoA) zunutze.⁴¹⁾ Hierbei werden Aufträge abhängig von der aktuellen und der voraussichtlichen Bestandssituation freigegeben. Die Steuerungsparameter der BoA sind die Terminschranke, der Einlastungsprozentsatz und die Zeit zwischen zwei Freigabeläufen. Während die Bedeutung der durch DV-technische Bedingungen determinierten Freigabefrequenz mit einer zunehmenden Verkürzung der Planungsläufe sinkt, besitzen die beiden anderen Steuerungsparameter eine besondere Relevanz für die Qualität einer Fertigungssteuerung nach dem Prinzip der BoA.

Die *Terminschranke*, die Aufträge zweiwertig als dringlich oder nicht dringlich klassifiziert, bietet sich für eine Fuzzifizierung an. Eine unscharfe Terminschranke anzusetzen würde bedeuten, diesen Parameter z. B. mit 'ungefähr 30 Tage' im System anzulegen und zu pflegen. Ein Fuzzy-Ansatz kann bei einer scharf formulierten Terminschranke auch Verwendung finden, indem das Ausmaß der Dringlichkeit eines Auftrags⁴²⁾ fuzzifiziert wird. Es wird also nicht mehr nur binär in dringliche und nicht dringliche Aufträge differenziert, sondern es gibt unterschiedliche, kontinuierliche Ausprägungen der Dringlichkeit.

Die dritte Möglichkeit zur Fuzzifizierung der Dringlichkeitsprüfung - neben einer unscharf angegebenen Terminschranke und einer natürlichsprachlichen Auftragsdringlichkeit - besteht in der Verwendung von fuzzifizierten Arbeitsplänen. Damit würde die Fuzzifizierung der Dringlichkeitsprüfung nicht direkt erfolgen, sondern sich aus unscharfen Arbeitsplandaten ableiten.

Analog zur Terminschranke läßt sich auch der aggregatspezifische *Einlastungsprozentsatz* (EPS) durch linguistische Terme ('sehr hohe' oder 'geringe' Belastung, Abbildung 6a) oder als Fuzzy-Zahl (beispielsweise als 'ungefähr 200 %' zu interpretieren, Abbildung 6b) abbilden.

⁴¹⁾ Zur BoA vgl. Kettner, Bechte (1981); Wiendahl (1987).

⁴²⁾ Es können auch nur einzelne Auftragsabschnitte freigegeben werden. Im folgenden wird allerdings stets von der Freigabe von Aufträgen gesprochen.

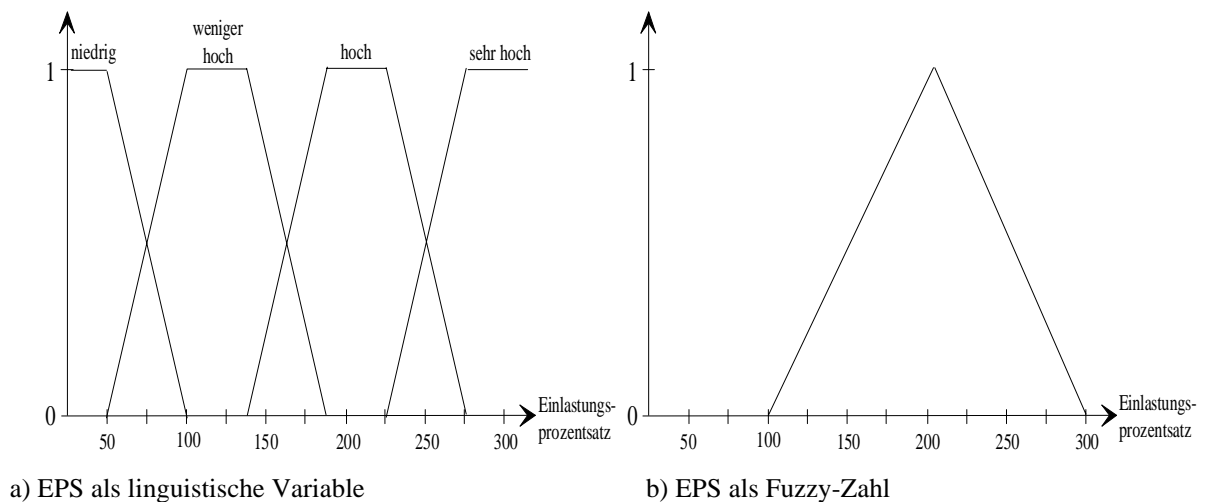


Abb. 6: Möglichkeiten der Fuzzifizierung des Einlastungsprozentsatzes (EPS)

Mit der Fuzzifizierung der Terminalschränke und der Einlastungsprozentsätze wird ein bisheriges Manko der BoA überwunden. Beide Parameter sind interdependent zueinander. Mit der Menge der dringlichen Aufträge werden die zur Einlastung anstehenden Planungseinheiten bestimmt. Entweder werden nun bei der belastungsorientierten Freigabe die Einlastungsprozentsätze erreicht noch bevor alle dringlichen Aufträge eingelastet sind, oder aber es können alle als dringlich kategorisierten Aufträge freigegeben werden, die Einlastungsprozentsätze - und damit die angesetzten Durchlaufzeiten durch die einzelnen Aggregate - werden aber nicht erreicht. Bei fuzzifizierten Steuerungsparametern ist es hingegen möglich, die Menge der dringlichen Aufträge bzw. die Höhe der Einlastungsprozentsätze kontinuierlich zu variieren.

Innerhalb der Auftragsfreigabe wäre zudem eine Fuzzifizierung der *Verfügbarkeitsprüfung* denkbar. Aufträge würden dann nicht abhängig von einer sicheren (statischen oder dynamischen) Verfügbarkeit der Ressourcen freigegeben werden, sondern abhängig vom Grad, mit dem die Verfügbarkeit gesichert ist.

2.3 Fertigungssteuerung und BDE

Fertigungssteuerung

Zentrale Aufgabe der Fertigungssteuerung ist die Feinplanung, in welcher die betriebsmittelgenaue Zuordnung der Arbeitsgänge nach bestimmten Optimierungskriterien (Minimierung der Durchlaufzeiten und Bestände, Maximierung der Auslastung und Termintreue) und in den durch die vorgelagerten Planungsstufen gegebenen Grenzen (Ecktermine) erfolgt. Unzulänglichkeiten

klassischer PPS-Systeme haben insbesondere für diesen Bereich gezeigt, daß sich die PPS nicht durchgehend automatisieren läßt. Als eine Reaktion hierauf erfolgt eine Verlagerung von Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortung in lokale Dispositionsbereiche mit der der Aufbau prozeßnaher Regelkreise einhergeht. Konsequenterweise wäre deshalb die Bezeichnung Fertigungsregelung zu wählen, die sich aber trotz ihrer wissenschaftlichen Korrektheit nicht durchgesetzt hat.⁴³⁾ Elektronische Leitstände stellen zur Bewältigung der lokal anfallenden Aufgaben ein geeignetes Planungsinstrumentarium dar.

Durch die Dezentralisierung der Fertigungssteuerung wird zugleich die Eingriffshäufigkeit zentraler Planungs- und Dispositionsebenen - und somit die Informationsintensität innerhalb der PPS - reduziert.

Im Bereich der Fertigungssteuerung sind folgende Fuzzy-Ansätze denkbar:

- *Fuzzifizierung von (kombinierten) Prioritätsregeln:* Durch eine entsprechende Fuzzifizierung ist es möglich, weitere, über bisherige Ansätze hinausgehende, Informationen in Prioritätsregeln zu verwenden.⁴⁴⁾ So lassen sich unter Verwendung linguistischer Terme Regeln wie "wenn kurze Schlupfzeit⁴⁵⁾ und kurze Operationszeit, dann hohe Priorität", oder "wenn kostengünstige Intensität und qualifizierter Maschinenbediener, dann hohe Betriebspriorität" formulieren.
- *Fuzzifizierung erweiterter Nebenbedingungen:* Die Berücksichtigung reihenfolgeabhängiger Rüstzeiten ist durch geeignete Aggregationen möglich ("wenn hell auf dunkel folgt, dann hohe Rüstzeit"). Dabei wird die Zugehörigkeit eines Werkstücks zu dem Attribut hell bzw. dunkel ebenso fuzzifiziert wie die Rüstzeit. Ebenso ist eine qualitätsabhängige Maschinenbelegungsplanung denkbar ("wenn Produkt zur Zeit bzgl. seiner Qualität an der Toleranzgrenze liegt, dann setze ein Betriebsmittel mit sehr hoher Genauigkeit ein").
- *Bewertung von Maschinenbelegungen:* Die Lösungsqualität eines Ablaufplans kann anhand der Ersatzziele (Maximierung der Termintreue und der Auslastung, Minimierung der Durchlaufzeit und der Bestände) quantifiziert werden (z. B. "wenn hohe Termintreue und kurze Durchlaufzeit, dann guter Belegungsplan"). Durch die Vorgabe von unterschiedlichen Zielerreichungsgraden für die Ersatzziele ("sehr hohe Termintreue und hohe Auslastung") kann

⁴³⁾ Vgl. auch bereits Nissing (1982), S. 9.

⁴⁴⁾ Vgl. Hintz, Zimmermann (1989), S. 321ff.

⁴⁵⁾ Eine auf Standardfunktionen basierende Zugehörigkeitsfunktion für die Schlupfzeit findet man bei Mertens (1993), S. 175. Schmidt u. a. (1993) benutzen die Formulierung der Schlupfzeit und der Anzahl Verrichtungen in linguistischen Variablen, um die Dringlichkeit einer UmDisposition zu ermitteln.

eine qualitative Zielvorgabe⁴⁶⁾ erfolgen, die bei der Genauigkeit eines Ablaufplans berücksichtigt wird. In einem Fuzzy-Leitstand⁴⁷⁾ ist bereits eine fuzzifizierte Auswahl von Maschinenbelegungsalgorithmen realisiert, die eine verbesserte, weil zielorientierte Feinplanung ermöglichen soll. Ferner eröffnet sich durch den Einsatz der Fuzzy-Logik mit der 'Durchführbarkeit eines Plans' eine neue Zieldimension, unter der Belegungspläne - zusätzlich zu den vier klassischen Ersatzzielen - beurteilt werden können.

- *Einplanung von Instandhaltungsaufträgen:* Zum einen kann die (absolute) Notwendigkeit, Instandhaltung zu betreiben, fuzzifiziert werden ("wenn hohes Störverhalten und geringe Auslastung, dann plane Instandhaltungsaufträge ein"). Zum anderen kann die (relative) Priorität von Instandhaltungsaufträgen gegenüber Fertigungsaufträgen unscharf formuliert werden.

Obwohl sich die Fertigungssteuerung als Regelkreis auffassen läßt, bei dem die Parameter als unsichere Eingaben vorliegen, wird zu dessen Beschreibung nicht der Ansatz der Fuzzy-Control⁴⁸⁾ verwendet. An dieser Stelle soll vielmehr die betriebswirtschaftlich-motivierte Fuzzy-Entscheidungsunterstützung und nicht so sehr die ingenieurwissenschaftliche Regelungstechnik im Vordergrund der Betrachtung stehen.

Es sind bereits Fuzzy-Regler entwickelt worden, bei denen unter Verwendung von Termen linguistischer Variablen das zur Störungsbehebung relevante Wissen in Produktionsregeln abgelegt wurde.⁴⁹⁾ Per BDE werden dabei Eingangsdaten wie voraussichtliche Stördauer, Verfügbarkeit, Rüstdauer und Auslastung von Ersatzmaschinen sowie Bestand vor der gestörten Maschine erfaßt und linguistischen Termen zugeordnet. Als Ausgabe erzeugt der Regler Entscheidungswerte für die Aktionen Warten, Um- und Neuplanen.

Betriebsdatenerfassung

Bei einer ersten Betrachtung scheint der Bereich der Betriebsdatenerfassung (BDE) einer Fuzzifizierung nicht zugänglich. Zurückgemeldet werden im wesentlichen scharfe Ist-Daten wie Fertigungszeiten, Anwesenheitszeiten von Mitarbeitern oder Zu- und Abgangsdaten von Materialien.

Jedoch offenbaren sich auch innerhalb der BDE zwei Ansatzpunkte für Fuzzy-Logik. Zum einen können *Qualitätsdaten als Terme linguistischer Variablen zurückgemeldet werden*. Hier bieten

⁴⁶⁾ Vgl. zum Begriff der qualitativen Zielvorgabe Felix (1992), S. 15f.

⁴⁷⁾ Vgl. N. N. (1993).

⁴⁸⁾ Vgl. zur Fuzzy-Control beispielsweise Kruse u. a. (1993).

⁴⁹⁾ Vgl. Wiendahl u. a. (1993), S. 353f.

sich z. B. visuelle Qualitätsprüfungen an, die sich einer Automatisierung zumeist weitgehend entziehen. An Stelle einer einfachen Differenzierung in 'einwandfrei' und 'nicht in Ordnung' können unter Verwendung der Fuzzy-Logik diverse Werkstückmerkmale in gewohnten umgangssprachlichen Formulierungen beschrieben werden. Durch eine Verknüpfung dieser unscharfen Merkmalsbeschreibungen mit Fuzzy-Operatoren wird die ebenfalls unscharf formulierte Notwendigkeit eines Nacharbeitsaufwands ermittelt. Der Disponent kann anhand von Mitteilungen wie 'hoher' oder 'geringer' Nacharbeitsaufwand sowie in Kenntnis der aktuellen Auslastungssituation über die Werkstücke, die einer Nachbehandlung bedürfen, entscheiden. Diese Art der Fuzzifizierung trägt dem Aspekt Rechnung, daß "Qualität kein absoluter Begriff, sondern lediglich ein Maßstab zur Bestimmung des Grades der Zielerfüllung"⁵⁰⁾ ist.

Der zweite Ansatzpunkt für eine fuzzy-basierte BDE sind Rückmeldungen über *voraussichtliche Stördauern*, denen Fuzzy-Zahlen zugrunde liegen. Der lokale Maschinenbediener meldet beispielsweise 'ungefähr 45 Minuten' als voraussichtliche Dauer für die Zeit bis zur Wiedereingangssetzung der Maschine. Dieses unscharfe Datum findet Eingang in ein System zur Fertigungssteuerung, das über Anpassungsmaßnahmen zu entscheiden hat (Fertigung auf einer anderen Maschine, Fertigung nach Wiedereingangssetzung oder aber auch Personalzuteilungen zur Verkürzung der Zeit für die Störungsbehebung). Der Nutzen dieser Fuzzifizierung liegt darin, daß sich die Durchführbarkeit des Planes besser bewerten läßt als bei scharfen Daten, die eine real nicht bestehende Exaktheit vorgeben.

2.4 Weitere Bereiche und Entwicklungsaufgaben

Zu den genannten Einsatzbereichen kommen noch weitere diverse Ansatzpunkte für den Einsatz der Fuzzy-Logik, die hier nicht genannt wurden, da sie nicht originär der PPS zugerechnet werden. Hingewiesen werden soll exemplarisch auf den (Querschnitts-)Bereich der Qualitätssicherung, in dem sowohl die Qualitätsanforderungen der Kunden als auch die Ausprägungen der erreichten Produkt- und Prozeßqualitäten für die Fuzzy-Logik potentiell zugänglich sind.⁵¹⁾

Die Erweiterung der Produktionsplanung und -steuerung um die Fuzzy-Logik erschließt ein großes Potential zur Unsicherheitsbewältigung. Insbesondere löst die Fuzzy-Logik den zwischen dem hohen Genauigkeitsanspruch an die Planung einerseits und der mangelhaften Qualität der Eingangsdaten andererseits bestehenden Konflikt durch expliziten Einbezug der Unsicherheit

⁵⁰⁾ Adelhof u. a. (1991), S. 99.

⁵¹⁾ Teilaspekte der Verbindung von Qualitätssicherung und Fuzzy-Logik finden sich im Abschnitt über Arbeitspläne (S. 16ff.), in dem auf die bezüglich des Nacharbeitsaufwands bestehenden Unsicherheiten hingewiesen wurde, sowie im Abschnitt zur BDE (S. 31), in dem die unscharfe Qualitätsdatenerfassung skizziert wurde.

auf. Dies läßt eine größere Planungssicherheit und mithin eine erhöhte Effizienz der Planung erwarten. Hierfür reichen jedoch partielle Eingriffe in die PPS-Funktionalität bzw. das Datengerüst nicht aus, sondern vielmehr ist erst eine durchgängige und bereichsübergreifende Anwendung der Fuzzy-Logik die Grundlage für die effektive Nutzung dieser Ansätze.

Der Einsatz der Fuzzy-Logik leistet einen Beitrag zur Umgestaltung von PPS-Systemen hin zu anthropozentrischen Planungsverfahren, indem natürlichsprachliche Begriffe operationalisiert und damit innerhalb der PPS verwendbar werden.

Die in diesem Arbeitsbericht aufgeführten Erweiterungen sind als erster Ansatz für eine umfassende Anwendung der Fuzzy-Logik innerhalb von PPS-Systemen zu verstehen. Dabei sind sicherlich noch nicht alle Potentiale ausgeschöpft, und bei näherer Betrachtung einzelner Bereiche ist außerdem zu befürchten, daß Detailprobleme trotz grundsätzlicher Eignung dem Einsatz der Fuzzy-Logik entgegenstehen.

Literatur

- Adam, D.: Planung und Entscheidung. 3. Aufl., Wiesbaden 1993.
- Adelhof, A., Felix, R., Kleiner, M.: Modellierung von zielorientierten Entscheidungen am Beispiel eines Biegeverfahrens. VDI-Z 133 (1991) 9, S. 99-108.
- Becker, J., Prischmann, M.: Konnektionistische Modelle - Grundlagen und Konzepte. Arbeitsberichte des Instituts für Wirtschaftsinformatik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster Nr. 5. Hrsg.: J. Becker, H. L. Grob, K. Kurbel, U. Müller-Funk, R. Unland. Münster 1991.
- Becker, J., Prischmann, M.: Anwendungen konnektionistischer Systeme. Arbeitsberichte des Instituts für Wirtschaftsinformatik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster Nr. 9. Hrsg.: J. Becker, H. L. Grob, K. Kurbel, U. Müller-Funk, R. Unland. Münster 1992.
- Becker, J., Rosemann, M.: Organisatorische Integration von Flexiblen Fertigungssystemen durch CIM und Logistik. In: D. Adam (Hrsg.): Flexible Fertigungssysteme. SzU, Band 46, Wiesbaden 1993, S. 55-80.
- Bilz, F., Bocklisch, S.: Unschärfe Clusterbildung. Wissenschaftliche Zeitschrift der TH Karl-Marx-Stadt (1977) 2, S. 251-253.
- Buscher, U., Roland, F.: Fuzzy Sets in der Linearen Optimierung. WiSt 22 (1993) 6, S. 313-317.
- Felix, R.: Entscheidungen bei qualitativen Zielen. Diss., Uni Dortmund 1992.
- Förster, H.-U., Hirt, K.: PPS für die flexible Automatisierung. Köln 1988.
- Hartertinger, M., Mertens, P., Wedel, T.: Management by Parameters? ZfB 61 (1991) 5/6, S. 569-588.
- Hintz, G. W., Zimmermann, H.-J.: A method to Control Flexible Manufacturing Systems. European Journal for Operational Research 41 (1989), S. 321-334.
- Kern, W.: Industrielle Produktionswirtschaft. 5. Aufl., Stuttgart 1992.
- Kernler, H.: PPS der 3. Generation. Heidelberg 1993.
- Kettner, H., Bechte, W.: Neue Wege der Fertigungssteuerung durch Belastungsorientierte Auftragsfreigabe. VDI-Z 123 (1981) 11, S. 459-466.
- Kilger, W.: Einführung in die Kostenrechnung. 3. Aufl., Wiesbaden 1987.
- Kruse, R., Gebhardt, J, Klawonn, F.: Fuzzy-Systeme. Stuttgart 1993.
- Kühnle, H., Spengler, M. A.: Wege zur "fraktalen Fabrik". io Management Zeitschrift 62 (1993) 4, S. 66-71.
- Kurbel, K.: Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen. 2. Aufl., Berlin u. a. 1992.

- Kurbel, K.: Produktionsplanung und -steuerung. München, Wien 1993.
- Lipp, H.-P.: Flexible Produktionsführung durch unscharfe Prozeßregelung. Spektrum der Wissenschaft (1993) 3, S. 101-103.
- Maier, U.: Arbeitsgangterminierung mit variabel strukturierten Arbeitsplänen. Berlin, Heidelberg 1980.
- Mayer, A., Mechler, B., Schindwein, A., Wolke, R.: Fuzzy Logic. Bonn u. a. 1993.
- Mertens, P.: Integrierte Informationsverarbeitung 1. Administrations- und Dispositionssysteme in der Industrie. 9. Aufl., Wiesbaden 1993.
- Mizumoto, M, Zimmermann, H.-J.: Comparison of fuzzy reasoning methods. Fuzzy Sets and Systems (1982) 8, S. 253-283.
- Nissing, T.: Beitrag zur Entwicklung eines dezentralen Produktionsplanungs- und -steuerungssystems auf der Basis verteilter Datenbestände. Diss., RWTH Aachen 1982.
- N. N.: Omron Fuzzy Leitfaden, o. O. 1990.
- N. N.: Industrielle Integration von Fuzzy Technologien. Broschüre des Fuzzy Demonstrations-Zentrums Dortmund 1993.
- Pabst, H.-J.: Analyse der betriebswirtschaftlichen Effizienz einer computergestützten Fertigungssteuerung mit CAPOSS-E in einem Maschinenbauunternehmen mit Einzel- und Kleinserienfertigung. Frankfurt u. a. 1985.
- Palm, R., Hellendorn, H.: Fuzzy-Control - Grundlagen und Entwicklungsmethoden. KI 4 (1991) 4, S. 18-23.
- Richter, M.: Prinzipien der Künstlichen Intelligenz. Stuttgart 1988.
- Scheer, A.-W.: Produktionsplanung auf der Grundlage einer Datenbank des Fertigungsbereichs. München 1976.
- Scheer, A.-W.: CIM. Der computergesteuerte Industriebetrieb. 4. Aufl., Berlin u. a. 1990a.
- Scheer, A.-W.: Wirtschaftsinformatik. 3. Aufl., Berlin u. a. 1990b.
- Schmidt, G., Jacob, E., Lahl, B., Meyer, J.: Fuzzy Logic für die reaktive Fertigungssteuerung. Zwf 88 (1993) 2, S. 81-83.
- Schneeweiß, C.: Zur Bewältigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung und -steuerung. In: W. Lücke (Hrsg.): Betriebswirtschaftliche Steuerungs- und Kontrollprobleme. Wiesbaden 1988, S. 285-302.
- Stommel, H. J., Kunz, D.: Untersuchungen über Durchlaufzeiten in Betrieben der metallverarbeitenden Industrie mit Einzel- und Kleinserienfertigung. Opladen 1973.

Wiendahl, H.-P.: Belastungsorientierte Fertigungssteuerung. München, Wien 1987.

Wiendahl, H.-P., Pritschow, G., Milberg, J.: Produktionsregelung - interdisziplinäre Zusammenarbeit führt zu neuen Ansätzen. Teil 2. Zwf 88 (1993) 7/8, S. 352-354.

Zadeh, L. A.: Fuzzy Sets. Information and Control 8 (1965), S. 338-353.

Zimmermann, H.-J.: Fuzzy Sets, Decision Making and Expert Systems. Boston 1987.

Zimmermann, H.-J.: Fuzzy Set Theory and its Applications. 2. Aufl., London 1991.

Zimmermann, H.-J.: Fuzzy Technologien. Düsseldorf 1993.

Zimmermann, H.-J., Zysno, R.: Latent Connections in Human Decision Making. Fuzzy Sets and Systems (1980) 4, S. 37-51.

Arbeitsberichte des Instituts für Wirtschaftsinformatik

- Nr. 1 Bolte, Ch., Kurbel, K., Moazzami, M., Pietsch, W.: Erfahrungen bei der Entwicklung eines Informationssystems auf RDBMS- und 4GL-Basis; Februar 1991.
- Nr. 2 Kurbel, K.: Das technologische Umfeld der Informationsverarbeitung - Ein subjektiver 'State of the Art'-Report über Hardware, Software und Paradigmen; März 1991.
- Nr. 3 Kurbel, K.: CA-Techniken und CIM; Mai 1991.
- Nr. 4 Nietsch, M., Nietsch, T., Rautenstrauch, C., Rinschede, M., Siedentopf, J.: Anforderungen mittelständischer Industriebetriebe an einen elektronischen Leitstand - Ergebnisse einer Untersuchung bei zwölf Untenehmen; Juli 1991.
- Nr. 5 Becker, J., Prischmann, M.: Konnektionistische Modelle - Grundlagen und Konzepte; September 1991.
- Nr. 6 Grob, H. L.: Ein produktivitätsorientierter Ansatz zur Evaluierung von Beratungserfolgen; September 1991.
- Nr. 7 Becker, J.: CIM und Logistik; Oktober 1991.
- Nr. 8 Burgholz, M., Kurbel, K., Nietsch, Th., Rautenstrauch, C.: Erfahrungen bei der Entwicklung und Portierung eines elektronischen Leitstands; Januar 1992.
- Nr. 9 Becker, J., Prischmann, M.: Anwendung konnektionistischer Systeme; Februar 1992.
- Nr. 10 Becker, J.: Computer Integrated Manufacturing aus Sicht der Betriebswirtschaftslehre und der Wirtschaftsinformatik; April 1992.
- Nr. 11 Kurbel, K., Dornhoff, P.: A System for Case-Based Effort Estimation for Software-Development Projects; Juli 1992.
- Nr. 12 Dornhoff, P.: Aufwandsplanung zur Unterstützung des Managements von Softwareentwicklungsprojekten; August 1992.
- Nr. 13 Eicker, S., Schnieder, T.: Reengineering; August 1992.
- Nr. 14 Erkelenz, F.: KVD2 - Ein integriertes wissensbasiertes Modul zur Bemessung von Krankenhausverweildauern - Problemstellung, Konzeption und Realisierung; Dezember 1992.
- Nr. 15 Horster, B., Schneider, B., Siedentopf, J.: Kriterien zur Auswahl konnektionistischer Verfahren für betriebliche Probleme; März 1993.
- Nr. 16 Jung, R.: Wirtschaftlichkeitsfaktoren beim integrationsorientierten Reengineering: Verteilungsarchitektur und Integrationschritte aus ökonomischer Sicht; Juli 1993.
- Nr. 17 Miller, C., Weiland, R.: Der Übergang von proprietären zu offenen Systemen aus Sicht der Transaktionskostentheorie; Juli 1993.
- Nr. 18 Becker, J., Rosemann, M.: Design for Logistics - Ein Beispiel für die logistikgerechte Gestaltung des Computer Integrated Manufacturing; Juli 1993.
- Nr. 19 Becker, J., Rosemann, M.: Informationswirtschaftliche Integrationsschwerpunkte innerhalb der logistischen Subsysteme - Ein Beitrag zu einem produktionsübergreifenden Verständnis von CIM; Juli 1993.

- Nr. 20 Becker, J.: Neue Verfahren der entwurfs- und konstruktionsbegleitenden Kalkulation und ihre Grenzen in der praktischen Anwendung; Juli 1993.
- Nr. 21 Becker, J., Prischmann, M.: VESKONN - Prototypische Umsetzung eines modularen Konzepts zur Konstruktionsunterstützung mit konnektionstischen Methoden; November 1993.
- Nr. 22 Schneider, B.: Neuronale Netze für betriebliche Anwendungen: Anwendungspotentiale und existierende Systeme; November 1993.
- Nr. 23 Nietsch, T., Rautenstrauch, C., Rehfeldt, M., Rosemann, M., Turowski, K.: Ansätze für die Verbesserung von PPS-Systemen durch Fuzzy-Logik; Dezember 1993.