

# Diskussion methodischer Ansätze im Rahmen einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung

Stephan Franke und Axel Tuma<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Im Rahmen einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung ist von Bedeutung, Stoff- und Energieströme so zu steuern bzw. aufeinander abzustimmen, daß unter Berücksichtigung von technischen Rahmenparametern vor- und nachgeschalteter Produktionsstufen zur Verfügung stehende Ressourcen möglichst effizient und durch den Produktionsprozeß entstehende Emissionen aller Art, soweit dies technisch möglich ist, vermieden bzw. vermindert werden (Haasis 1996, Tuma 1994, Wagner 1997). Diese Zielsetzung korrespondiert mit einer auch die Wettbewerbsposition stärkenden Umsetzung von Ansätzen einer nachhaltigen Entwicklung in Unternehmen.

In derzeit eingesetzten Produktionssteuerungssystemen bzw. Produktionsleitständen werden i. allg. nur betriebswirtschaftliche Zielsetzungen berücksichtigt (Stadtler/Willhelm/Becker 1995). Notwendig erscheint daher eine Entwicklung umweltschutzorientierter Produktionssteuerungssysteme (Tuma/Haasis/Rentz 1996). Aufgaben solcher Systeme sind insbesondere Entscheidungen bezüglich der freizugebenden Aufträge, der einplanbaren Aggregate bzw. Fertigungsverfahren, Betriebszeiten sowie der zeitlichen Einlastung der Aufträge unter Berücksichtigung betriebswirtschaftlicher und umweltschutzorientierter Kriterien. Aus bisherigen Erfahrungen in Pilotprojekten zeigt sich, daß die Integration umweltschutzorientierter Zielsetzungen (z.B. Steigerung des Aufarbeitungspotentials, Reduktion von Emissionen) nicht notwendigerweise zu höheren Kosten oder einer weniger effizienten Produktion führen muß (Franke/Tuma/Haasis 1998). Etwa im Bereich der Oberflächenbeschichtung kann der Einsatz umweltschutzorientierter Produktionsleitstände durch die Verminderung des Ressourceneinsatzes sowie der Abwasser- und Abfallmengen zu einer deutlichen Reduktion der Kosten führen (Haasis 1996).

Gegenstand dieses Beitrags ist die Konzeption und Analyse von Produktionssteuerungsverfahren zur Umsetzung einer umweltschutzorientierten Produktion. Hierzu werden aufbauend auf bestehenden Verfahren (Belastungsorientierte Fertigungssteuerung, Regelbasierte Verfahren, Mustererkennungsverfahren) umweltschutzorientierte Erweiterungen diskutiert und an Anwendungsbeispielen aus Fertigungs- und Prozeßindustrie evaluiert.

---

<sup>1</sup> Universität Bremen, Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Produktionswirtschaft und Industriebetriebslehre, Postfach 330440, 28334 Bremen, email: sfranke@uni-bremen.de

## 1 Ansatzpunkte einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung

Unter Produktionssteuerung versteht wird das Veranlassen, Überwachen und Sichern der Durchführung von Produktionsaufgaben hinsichtlich Bedarf (Menge und Termin), Qualität, Kosten und Arbeitsbedingungen verstanden (VDI 1983). Aus betriebswirtschaftlicher Sichtweise stehen dabei die Minimierung der Produktions-, Rüst-, Transport- und/oder Zwischen- bzw. Endlagerkosten bei gegebener Lieferbereitschaft im Vordergrund. Aufgrund von Problemen bei der Ermittlung der entscheidungsrelevanten Kosten werden jedoch in der Regel Ersatzziele, wie etwa eine hohe Termintreue, kurze Durchlaufzeiten, eine hohe Kapazitätsauslastung und niedrige Bestände herangezogen. Im Rahmen einer umweltschutzorientierten Erweiterung der Produktionssteuerung wird das Ziel einer wirtschaftlich ergiebigen Produktion um das Ziel einer ökologisch ergiebigen Produktion ergänzt. Die Erweiterung des betriebswirtschaftlichen Zielsystems von Produktionsplanungs- und -steuerungssystemen (PPS-Systeme) um umweltrelevante Zielgrößen zeigt Abbildung 1.

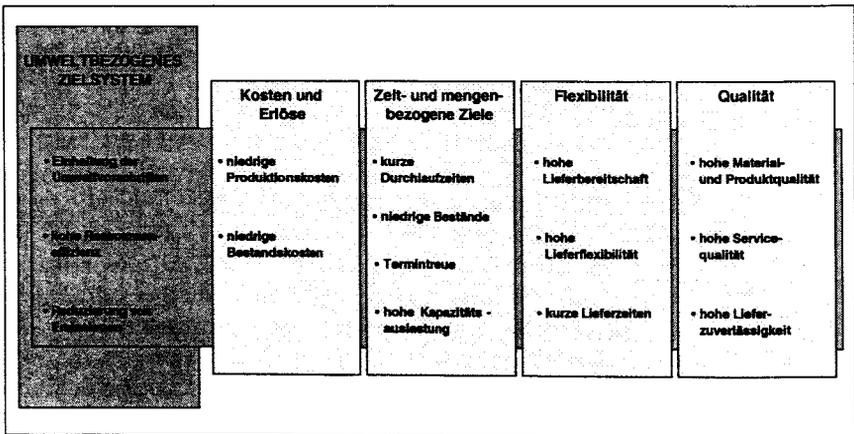


Abbildung 1

Ziele einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung (Haasis 1998)

Zur Umsetzung dieser Zielsetzungen ist ein entsprechendes Aufgaben- bzw. Funktionsmodell zu spezifizieren. Kernaufgaben auf Produktionssteuerungsebene sind die Auftragsfreigabe, Entscheidungen über Kapazitätsanpassungsmaßnahmen im Rahmen einer Fertigungssicherung, die Auftragseinlastung sowie die Produktionsüberwachung.

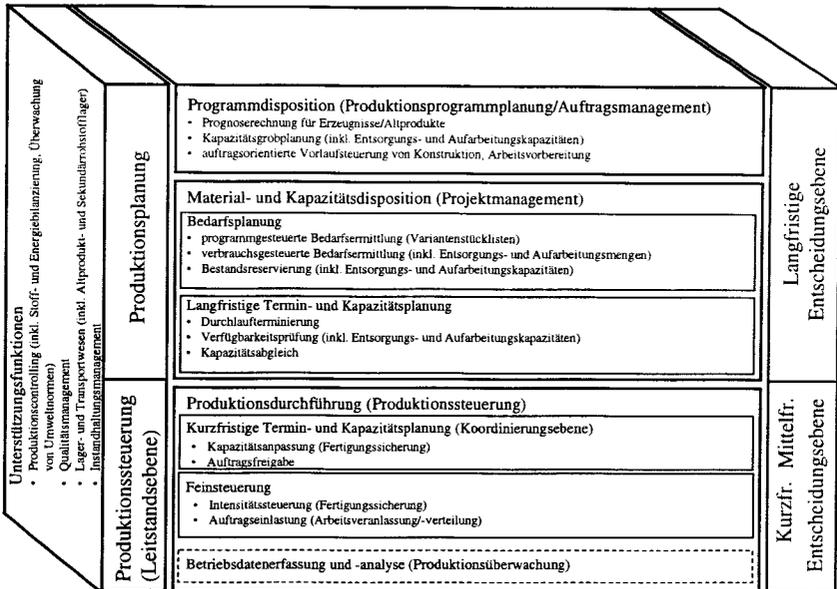


Abbildung 2

### Aufgabenmodell einer umweltschutzorientierten Produktionsplanung und -steuerung

Aus Sicht einer entscheidungsorientierten Betriebswirtschaftslehre impliziert dies Entscheidungen bezüglich

- der Auftragsfreigabe (Auftragsmix),
- der einzusetzenden Arbeitssysteme bzw. Produktionsverfahren und deren Betriebszeiten,
- der zeitlichen Zuordnung einzelner Aufträge bzw. Teilaufträge zu den Arbeitssystemen bzw. Aggregaten (Maschinenbelegung) sowie
- der Festlegung von Intensitäten (Fahrweisen) der Arbeitssysteme bzw. Aggregate.

Eine Analyse der genannten Aufgaben auf Produktionssteuerungsebene zeigt, daß diese unabhängig von einer speziellen Ausprägung des Zielsystems sind. Dies bedeutet, daß die zu berücksichtigenden Entscheidungskategorien auch im Rahmen einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung unverändert Gültigkeit haben. So hängt der Ressourcenverbrauch und der Emissionsanfall vollständig von der Auswahl der einzusetzenden Aggregate, deren Betriebszeiten und Fahrweisen bzw. von der zeitlichen Zuordnung der einzelnen Aufträge (Arbeitsgänge) zu den Aggregaten ab. Dies beinhaltet, daß eine umweltschutzorientierte Produktionssteuerung auf den

Elementaraufgaben traditioneller Produktionssteuerungssysteme beruht.

Dementsprechend läßt sich das Konzept einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung in Analogie zu traditionellen Produktionssteuerungskonzepten (Zäpfel 1989, Hahn 1989) als regelungstechnischer Ansatz darstellen (Abbildung 3).

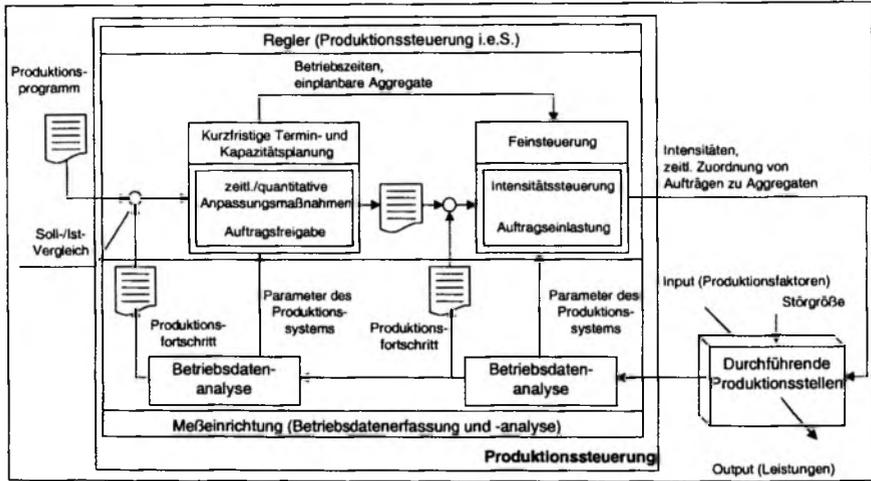


Abbildung 3

Regelungstechnischer Ansatz einer Produktionssteuerung

Hierbei stellt die Produktionssteuerung i. e. S. den Regler dar, dessen Stellgrößen, die zeitliche Zuordnung von Aufträgen zu Aggregaten und deren Fahrweisen (Intensitäten) direkt auf die Regelstrecke (durchführende Produktionsstelle) wirken. Die Meßeinrichtung besteht aus Betriebsdatenerfassung (BDE) und -analyse. Aufgrund des unterschiedlichen zeitlichen Bezugs der oben aufgeführten Aufgaben der Produktionssteuerung empfiehlt es sich, diese in einen längerfristigen Funktionsteil, hier kurzfristige Termin- und Kapazitätsplanung genannt, und einen kurzfristigen Funktionsteil, hier Feinsteuerung genannt, zu unterscheiden. Diese funktionalen Einheiten repräsentieren Entscheidungsmodelle der Produktionssteuerung. Entsprechend manifestiert sich eine umweltschutzorientierte Erweiterung in der Aufnahme zusätzlicher Zielfunktionen (z.B. Minimierung des Abwasseranfalls) bzw. Nebenbedingung (z.B. Einhaltung von Emissionsgrenzwerten).

Methodisch können zur Lösung derartiger Entscheidungsmodelle sowohl optimierende Verfahren (z.B. Dynamische Optimierung, Branch&Bound-Verfahren) als auch Heuristiken verwandt werden. Eine optimale Planung der Auftragsfreigabe, der Kapazitätsanpassung und der Auftragseinlastung (Aggregatebelegung) läßt sich

i. allg. für praktische Problemstellungen nicht durchführen. Daher werden in der industriellen Praxis überwiegend heuristische Planungsverfahren eingesetzt. Besondere Bedeutung auf Ebene der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung hat hierbei etwa das Verfahren der belastungsorientierten Fertigungssteuerung (Wiendahl 1997) erlangt. Auf Feinsteuerungsebene werden insbesondere Prioritätsregelverfahren eingesetzt (Stadtler/Wilhelm/Becker 1995, Glaser/Geiger/Rohde 1992). Aufgrund der Anforderungen realer Produktionssysteme (multikriterielle Zielfunktion, Anzahl und Art verfahrenstechnischer Restriktionen) sowie aufgrund des Umfangs und der Struktur des zur Verfügung stehenden Produktionswissens (z.B. unscharfes, implizites Wissen) sind jedoch auch konventionelle Prioritätsregelverfahren kaum anwendbar. Je nach Struktur des verfügbaren Produktionswissens empfiehlt sich daher eine Verwendung von wissensbasierten Ansätzen oder Methoden des Maschinellen Lernens (z.B. Neuronale Netze).

## **2 Methodische Erweiterung von Verfahren zur Produktionssteuerung zur Integration umweltschutzorientierter Zielvorstellungen**

### **2.1 Entwurf eines Verfahrens zur Umsetzung der Aufgaben einer umweltschutzorientierten Termin- und Kapazitätsplanung auf Produktionssteuerungsebene**

Eine Analyse der Produktionssteuerungsverfahren in Bezug auf die skizzierten Aufgaben der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung zeigt, daß das in der industriellen Praxis häufig eingesetzte Konzept der belastungsorientierten Fertigungssteuerung diese weitgehend adressiert (Schweitzer 1990, Zäpfel 1993, Wiendahl 1997, Wildemann 1997). Aus diesem Grund wird das Konzept einer umweltschutzorientierten Erweiterung der Aufgaben einer kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung exemplarisch auf Basis der belastungsorientierten Fertigungssteuerung nach Wiendahl dargestellt. Im Rahmen dieses Ansatzes werden bislang nur betriebswirtschaftliche Zielsetzungen wie etwa Durchlaufzeiten, Bestände und Termintreue verfolgt. Umweltschutzorientierte Zielsetzungen werden bisher nicht berücksichtigt.

Ein zentraler Ansatzpunkt des Konzepts der belastungsorientierten Fertigungssteuerung ist die Auftragsfreigabe. Damit wird insbesondere eine Entscheidung über den Auftragsmix innerhalb der Planperiode getroffen. Weiter wird eine Entscheidung bezüglich der Kapazitätsabstimmung getroffen. Dies bezieht sich insbesondere auf zeitliche und quantitative Anpassungsmaßnahmen innerhalb der Planperiode.

Im Rahmen einer Diskussion der umweltschutzorientierten Erweiterung des Konzepts der belastungsorientierten Fertigungssteuerung werden zunächst wesentliche Komponenten des Verfahrens skizziert.

### 2.1.1 Darstellung zentraler Elemente des Konzepts der belastungsorientierten Fertigungssteuerung im Hinblick auf eine umweltschutzorientierte Erweiterung

Das Grundkonzept der belastungsorientierten Fertigungssteuerung ist in Abbildung 4 dargestellt.

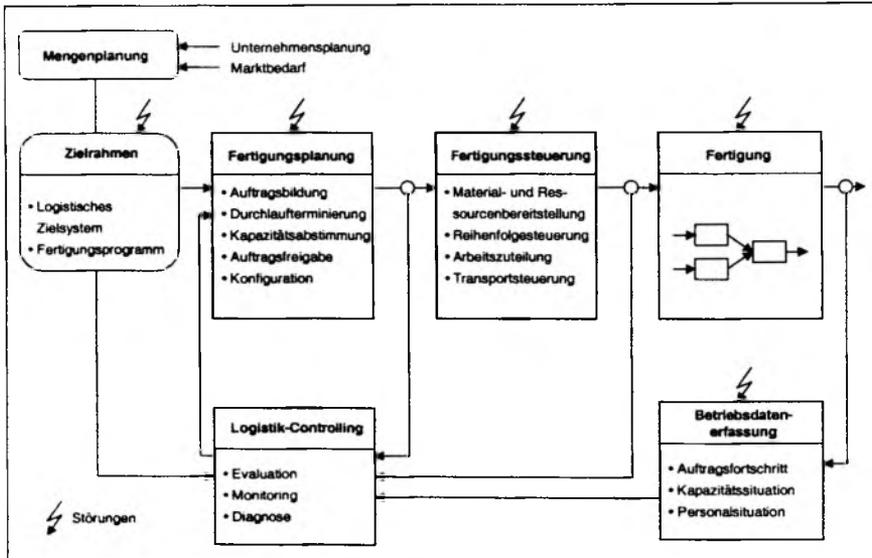


Abbildung 4  
Regelkreis der belastungsorientierten Fertigungssteuerung  
nach Wiendahl (Wiendahl 1997, S. 260)

Hierbei wird in die längerfristige Fertigungsplanung und die kurzfristig orientierte Fertigungssteuerung unterschieden. Die Fertigungsplanung umfaßt die Teilaufgaben

- Auftragsbildung,
- Durchlaufterminierung,
- Kapazitätsabstimmung,
- Auftragsfreigabe und
- Konfiguration.

Im kurzfristigen Bereich (Fertigungssteuerung) spielt die Funktion der Reihenfolgesteuerung eine wesentliche Rolle. Die zentralen Ansatzpunkte im Rahmen einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung liegen, wie in Kapitel 1 dargestellt, in der Freigabe eines entsprechenden Auftragsmix sowie in der Durchführung von kapazitiven Anpassungsmaßnahmen.

## **Kapazitätsabstimmung**

Aufgabe der Kapazitätsabstimmung ist die Ermittlung der benötigten Kapazitäten. Hierzu sind die Plan-Fertigstellungstermine für die einzelnen Arbeitsgänge der Aufträge auf den jeweiligen Arbeitssystemen im Rahmen einer Durchlaufterminierung zu ermitteln. Auf der Basis dieser Daten kann eine sogenannte Abgangskurve für die einzelnen Arbeitsgänge auf einem Arbeitssystem ermittelt werden (Abbildung 5). In diesem Zusammenhang kann die Abgangskurve als kumulierter Kapazitätsbedarf interpretiert werden. Sie wird im weiteren der mittelfristig geplanten Kapazitätskurve gegenübergestellt. Durch den Vergleich der Abgangs- und der Kapazitätskurve wird der wünschenswerte Kapazitätsverlauf unmittelbar deutlich. Die eigentliche Kapazitätsabstimmung auf dieser Stufe beruht auf einer Anpassung des Kapazitätsangebots.

Ein derartiges Vorgehen berücksichtigt insbesondere die stochastischen Einflüsse auf den Arbeitsverlauf, da es eine minutengenaue Planung der einzelnen Arbeitsgänge (Durchlaufelemente) vermeidet. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens bzw. der kumulativen Betrachtung ist die Tatsache, daß Reihenfolgeveränderungen der Arbeitsgänge praktisch keine Veränderung der Abgangskurve implizieren, da es für den Kapazitätsbedarf unerheblich ist, zu welchem Zeitpunkt ein Auftrag in der Warteschlange abgefertigt wird.

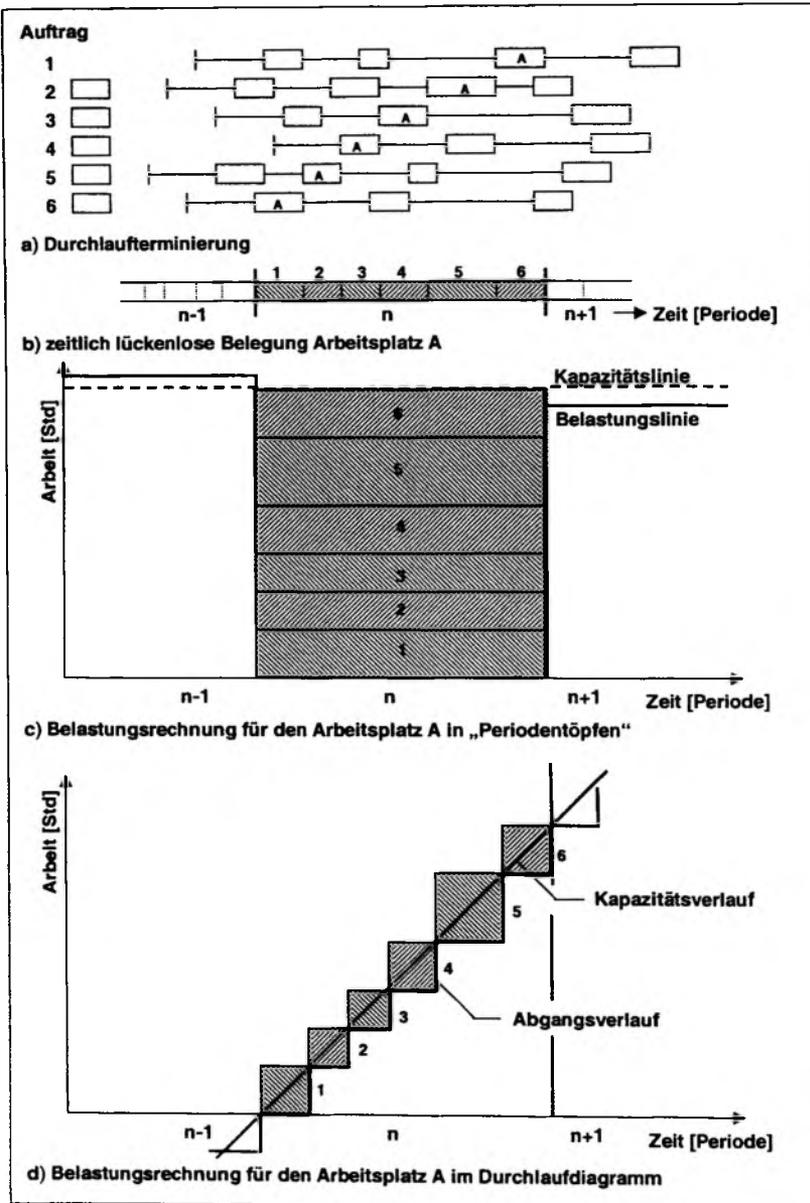


Abbildung 5

Konventionelle Belastungsrechnung in Periodentöpfen und im Durchlaufdiagramm  
nach Wiendahl (Wiendahl 1997, S. 279)

## Belastungsorientierte Auftragsfreigabe

Grundidee des Konzepts der belastungsorientierten Auftragsfreigabe nach Kettner/Bechte/Wiendahl (Bechte 1984, Kettner 1984, Wiendahl 1997) ist die direkte Beeinflussung der Zielgröße Durchlaufzeit über die Steuergröße Bestand. Die Betonung der Zielgröße kurzer Durchlaufzeiten, die nach Wiendahl gleichzeitig die Zielgröße niedriger Bestände und hoher Termintreue adressiert, liegt in einer prinzipiellen Verschiebung der Märkte vom Verkäufer- zum Käufermarkt. Dies korrespondiert, etwa nach Zäpfel (Zäpfel 1993), mit der Notwendigkeit zur stärkeren Berücksichtigung der Kundenwünsche hinsichtlich der Kriterien

- Lieferzeit,
- Lieferfähigkeit,
- Liefertreue,
- Lieferflexibilität,
- Lieferbeschaffenheit und
- Informationsflexibilität.

Der Zusammenhang zwischen der Zielgröße Durchlaufzeit und dem Bestand ist in Abbildung 6 dargestellt. Hierbei verwendet Wiendahl eine gewichtete mittlere Durchlaufzeit, die die Bearbeitungszeit bzw. den Arbeitsinhalt eines Auftrags berücksichtigt.

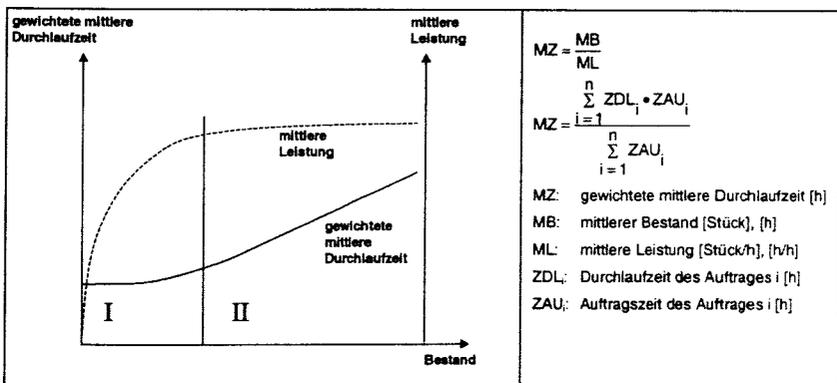


Abbildung 6

Exemplarische Betriebskennlinie eines Arbeitssystems

Prinzipiell kann bei einer Analyse der mittleren gewichteten Durchlaufzeit in Abhängigkeit des Bestandes in zwei Bereiche unterschieden werden. Im Bereich I steigt die mittlere gewichtete Durchlaufzeit unterproportional mit dem Bestand. Dieser Be-

reich ist gekennzeichnet durch ein aufgrund niedriger Bestände im Durchschnitt nicht vollständig ausgelastetes Arbeitssystem. Bereich II zeigt einen linearen Verlauf der mittleren gewichteten Durchlaufzeit. Dieser Bereich ist gekennzeichnet durch eine Überlastung des Arbeitssystems. Ziel nach Wiendahl ist es, die Bestände vor den einzelnen Arbeitssystemen so einzustellen, daß die Systeme im Übergang zwischen den beiden Bereichen gefahren werden. Neben der Problematik der Durchlaufzeit ist in Abbildung 6 der Zusammenhang zwischen Beständen und Leistung eines Arbeitssystems dargestellt. Im Bereich I steigt die Leistung in Abhängigkeit des Bestandes zunächst näherungsweise proportional. Im weiteren Verlauf nähert sich die Leistung asymptotisch einer oberen Grenze an. Dies bedeutet, daß im Bereich II eine weitere Bestandserhöhung nicht zu einer signifikanten Leistungssteigerung des Arbeitssystems führt.

Im Rahmen einer detaillierteren Betrachtung des Verfahrens der belastungsorientierten Auftragsfreigabe empfiehlt sich die Analyse eines Durchlaufmodells für ein Arbeitssystem (Abbildung 7).

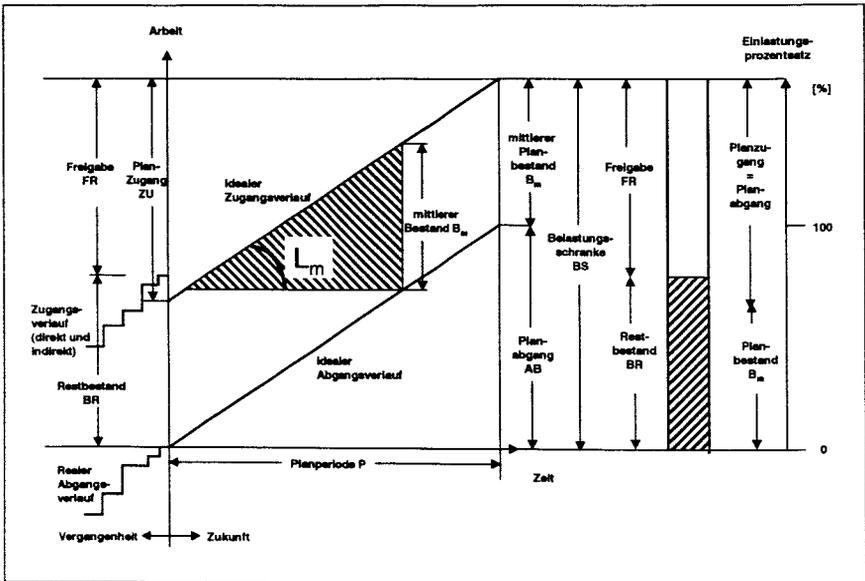


Abbildung 7:

Durchlaufmodell der belastungsorientierten Auftragsfreigabe für ein Arbeitssystem nach Wiendahl (Wiendahl 1997, S. 286)

Dieses zeigt für die Vergangenheit eine reale Zugangs- und Abgangskurve. Die Zugangskurve beschreibt den zeitlichen Verlauf der zugehenden Arbeitsinhalte jedes für das Arbeitssystem freigegebenen Auftrags. Hierbei werden die Arbeitsinhalte beginnend mit einem Anfangsbestand aufsummiert. Die Abgangskurve zeigt entsprechend den zeitlichen Verlauf der abgehenden Aufträge bzw. deren Arbeitsinhalte. Die Differenz aus Zugangs- und Abgangskurve zu Beginn der Planperiode bezeichnet den Restbestand, der sich aus der Vorperiode ergibt. Für die Planperiode wird ein idealisierter Zugangs- und Abgangsverlauf angenommen. Der Planabgang entspricht hierbei einer mittleren Leistung des Arbeitssystems. Im idealisierten Fall verläuft die Zugangskurve parallel zur Abgangskurve. Dies impliziert einen konstanten mittleren Bestand und eine konstante mittlere gewichtete Durchlaufzeit. Die Summe aus Planabgang, die dem Integral der mittleren Leistung des Systems über der Zeit entspricht, und dem mittleren Planbestand ergibt die Belastungsschranke des Arbeitssystems. Diese bezeichnet den theoretisch maximal für das Arbeitssystem freizugebenden Arbeitsinhalt in der Planperiode. Zieht man hiervon der Restbestand aus der Vorperiode ab, ergibt sich der tatsächlich freizugebende Arbeitsinhalt. Die Idee einer derart konstruierten Belastungsschranke ist ein Betrieb der entsprechenden Arbeitssysteme im Übergang zwischen den Bereichen I und II gemäß Abbildung 6.

Das Zusammenwirken der Funktionen Auftragsfreigabe und Kapazitätsabstimmung erläutert Wiendahl an einem Modell verbundener Trichter (Abbildung 8).

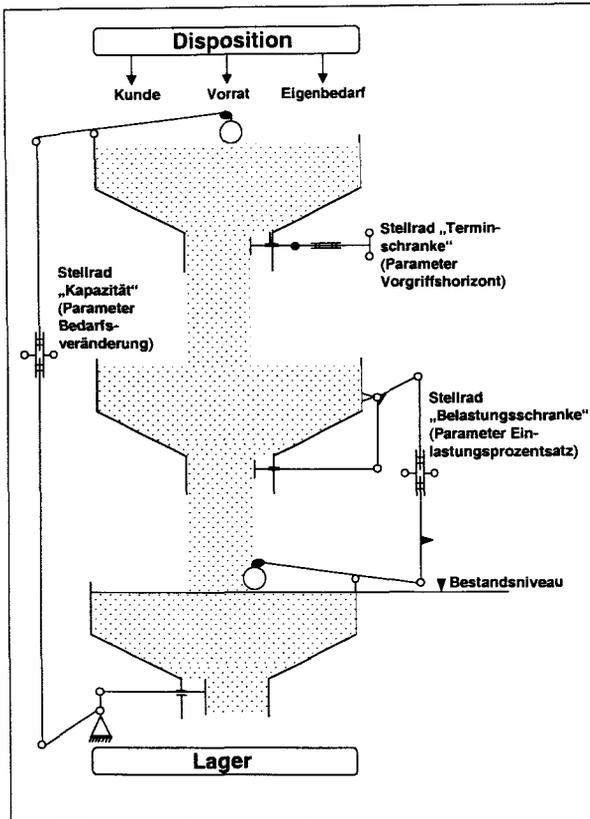


Abbildung 8

Regler-Analogie der belastungsorientierten Fertigungsregelung nach Wiendahl  
(Wiendahl 1997, S. 307)

Der oberste Trichter enthält hierbei den durch die Produktionsplanung vorgegebenen Auftragsbestand als Funktion der Kundenaufträge, des Lagermanagements sowie des Eigenbedarfs (Nettosekundärbedarf). Aus der Menge der so spezifizierten Aufträge werden diejenigen selektiert, die innerhalb eines definierten Vorgriffshorizonts liegen. Die so ausgewählten Aufträge bilden den dringenden Auftragsbestand (sortiert nach Fertigstellungsterminen). Aus diesen werden die freizugebenden Aufträge so bestimmt, daß zu keinem Zeitpunkt die Belastungsschranken der durch den Auftrag betroffenen Arbeitssysteme überschritten werden. Die Bestandshöhe im untersten

Trichter entspricht hierbei der mittleren gewichteten Durchlaufzeit im betrachteten Arbeitssystem. Steigt der Arbeitsinhalt im obersten Trichter (zu bearbeitende Aufträge) sind entsprechende Kapazitätsanpassungsmaßnahmen an den betroffenen Arbeitssystemen durchzuführen (Veränderung der Trichteröffnung im untersten Trichter). Die tatsächliche Auftragsreihenfolge wird nach Wiendahl in einem nachfolgenden Schritt durch die Anwendung traditioneller Prioritätsregeln (z.B. "first-in-first-out", kürzeste Operationszeit, längste Operationszeit) festgelegt.

### 2.1.2 Umweltschutzorientierte Erweiterung des Verfahrens der belastungsorientierten Fertigungssteuerung

Prinzipielle umweltschutzorientierte Zielsetzungen betreffen eine Reduktion des Ressourcenverbrauchs bzw. des Emissionsanfalls. Auf Ebene der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung hängen diese Zielgrößen in erster Linie von den eingesetzten Arbeitssystemen, den Betriebszeiten und Fahrweisen dieser Arbeitssysteme und dem freigegebenen Auftragsmix ab. In diesem Zusammenhang ist zu unterscheiden in Umweltbelastungen, die direkt auf ein Arbeitssystem zurückzuführen sind (anlagenbezogene Sichtweise) bzw. solchen, die allgemeine emissions- und/oder ressourcenbezogene Restriktionen betreffen (stoffbezogene Sichtweise).

Bei der anlagenbezogenen Sichtweise stellt die Kapazitätskurve im Durchlaufdiagramm den Ansatzpunkt für eine umweltschutzorientierte Erweiterung der belastungsorientierten Fertigungssteuerung dar. Hierbei können drei Fälle unterschieden werden:

- *Quantitative Anpassungsmaßnahmen:* hierunter ist allgemein das prinzipielle Zu- bzw. Abschalten additiver Kapazitäten zu verstehen. Aus umweltschutzorientierter Sichtweise bedeutet dies insbesondere eine Deaktivierung von Arbeitssystemen mit spezifisch hohem Ressourcenverbrauch bzw. Emissionsanfall.
- *Zeitliche Anpassungsmaßnahmen:* hierunter ist ein zeitlich begrenztes Zu- bzw. Abschalten von Arbeitssystemen zu verstehen. So kann es erforderlich sein, gewisse Arbeitssysteme zu bestimmten Uhrzeiten abzuschalten (z.B. aus Lärmschutzgründen).
- *Intensitätsmäßige Anpassungsmaßnahmen:* hierunter wird verstanden, mit welcher durchschnittlichen Intensität die jeweiligen Arbeitssysteme im Planungshorizont zu fahren sind. Aus umweltschutzorientierten Gründen ist hierbei eine Intensität zu wählen, die einen möglichst geringen spezifischen Ressourcenverbrauch bzw. Emissionsanfall gewährleistet.

Bezogen auf umweltschutzorientierte Zielvorstellungen führen die oben genannten Anpassungsmaßnahmen zu einer Verringerung des Kapazitätsangebots der betroffenen Arbeitssysteme. Dies äußert sich im Durchlaufdiagramm (vergleiche Abbildung 7) in einer flacheren Abgangskurve. Soll eine Erhöhung der Durchlaufzeit vermieden

werden, sind entsprechend geringere Arbeitsvolumina für die Planperiode freizugeben. Bezogen auf die Betriebskennlinien bedeutet dies, daß sich der in Abbildung 6 skizzierte Übergangsbereich bei geringeren mittleren Beständen einstellt.

Die stoffbezogene Sichtweise erfordert eine substantielle Erweiterung des Ansatzes der belastungsorientierten Fertigungssteuerung. So sind zur Berücksichtigung stoffbezogener Zielvorstellungen sogenannte Emissions- bzw. Ressourcentrichter einzuführen (Abbildung 9). Diese sind grundsätzlich von den von Kettner/Bechte/Wiendahl eingeführten Belastungstrichtern zu unterscheiden. Insbesondere entsprechen Emissions- bzw. Ressourcentrichter nicht einzelnen Arbeitssystemen. So entspricht bei einem Emissionstrichter das Trichtervolumen dem geplanten Emissionsvolumen für eine Planperiode. Die festzusetzende Belastungsschranke stellt damit eine obere Schranke für das geplante Emissionsvolumen dar. Diese kann in besonderen Situationen (etwa Smogfall) entsprechend angepaßt werden. Die Trichteröffnung entspricht hierbei dem Emissionsvolumenstrom.

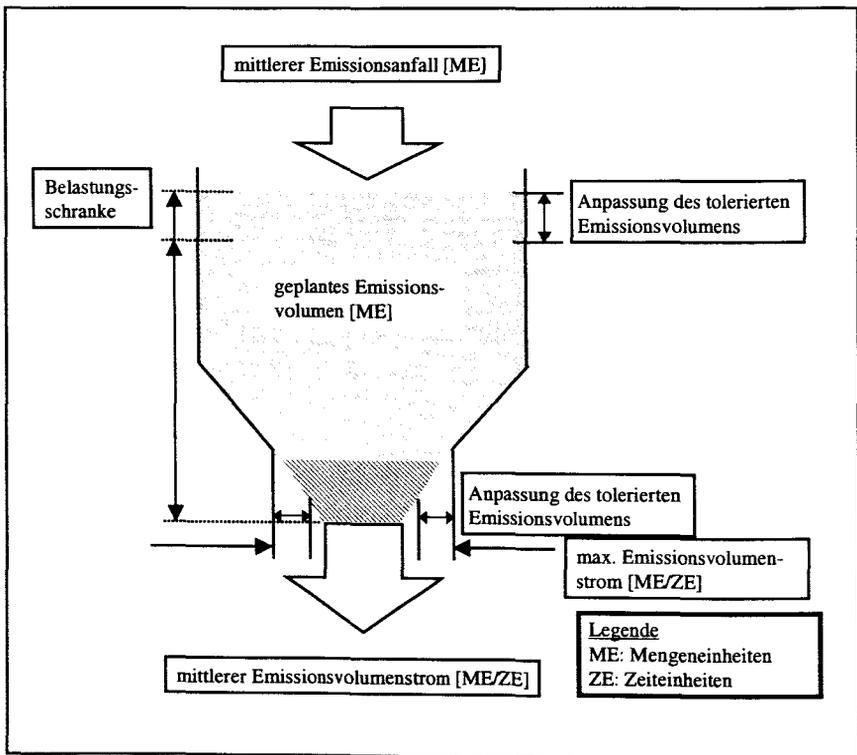


Abbildung 9  
Modell eines Emissionstrichters

In Analogie zu Emissionstrichtern können etwa zur Abstimmung mit einem extern zur Verfügung stehenden Ressourcenangebot sogenannte "Ressourcentrichter" eingeführt werden. In diesem Zusammenhang stellt die Belastungsschranke das maximal für die Planungsperiode zur Verfügung stehende Ressourcenangebot (z.B. externes Energieangebot) dar. Die Trichteröffnung symbolisiert den mittleren Ressourcenstrom (Stoff-/Energiestrom).

Ein spezieller Fall von Emissions- bzw. Ressourcentrichtern liegt vor, wenn das Emissionsvolumen bzw. der Ressourcenverbrauch unmittelbar vom freigegebenen Auftragsmix abhängen. Hierbei handelt es sich um eine Kompensation verschiedener Emissionsarten (z.B. Neutralisation saurer und alkalischer Abwasserfrachten unterschiedlicher Aufträge) bzw. um die Abstimmung eines intern (durch freigegebene Aufträge) zur Verfügung gestellten Ressourcenangebots mit einer entsprechenden Nachfrage.

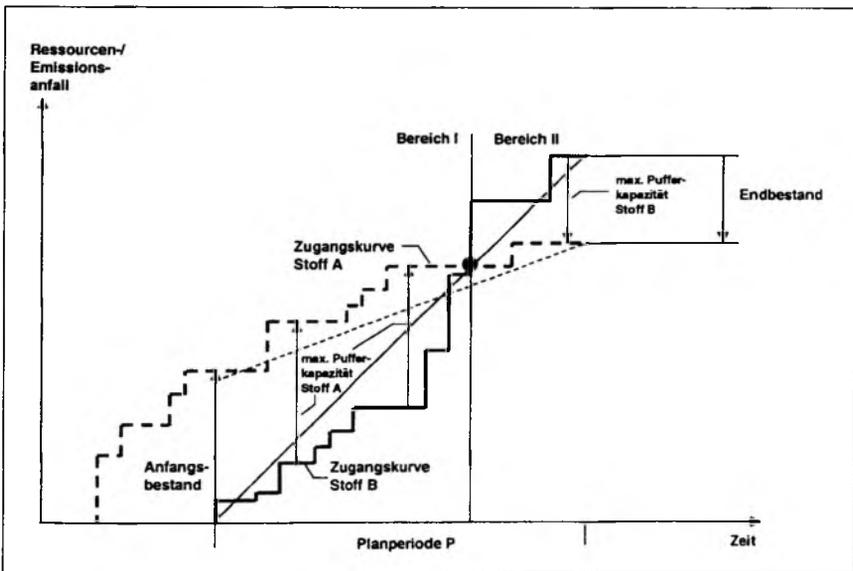


Abbildung 10  
Durchlaufdiagramm mit zwei Zugangskurven

Dieser Zusammenhang kann graphisch etwa gemäß Abbildung 10 dargestellt werden. Hierbei kann für jede betroffene Emissions- bzw. Ressourcenart eine "Zugangskurve" definiert werden, die für die freigegebenen Aufträge den zeitlichen Verlauf des Emissionsanfalls bzw. der Ressourcenbereitstellung und des Ressourcenverbrauchs nachzeichnet. Soll aus umweltschutzorientierter Sichtweise etwa der Ab-

stand zweier "Zugangskurven" einen maximalen Wert nicht überschreiten (z.B. Begrenzung des Abwärmeverlusts durch internes Energierecycling, Selbstneutralisation saurer und alkalischer Abwässer unterschiedlicher Produktionsaufträge), kann hierfür eine "Belastungsschranke" für die entsprechenden Emissions- bzw. Ressourcentrichter konstruiert werden. Im allgemeinen Fall ergeben sich zwei einzuhaltende Grenzwerte, die zwei Belastungsschranken entsprechen. Demgemäß kann in diesem Fall ein "Zwei-Trichter-Modell" definiert werden. Exemplarisch wird dies am Beispiel der Neutralisation saurer und alkalischer Abwässer in einer Entgiftungs- und Neutralisationsanlage (ENA) erläutert (Abbildung 11).

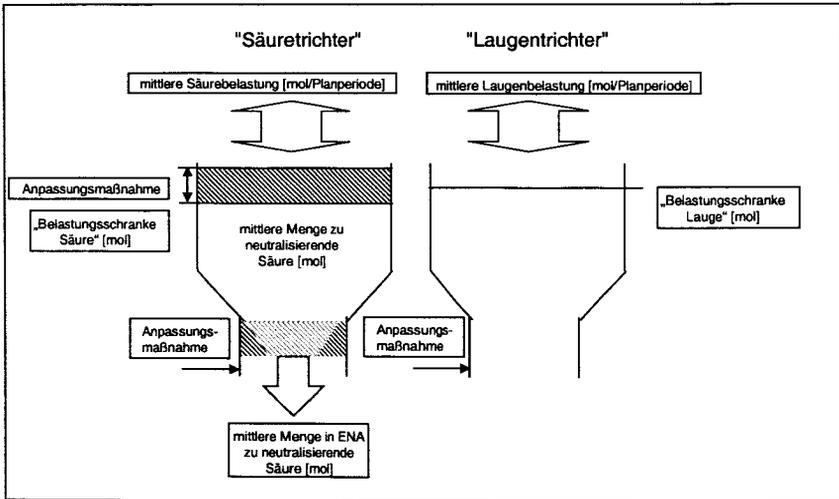


Abbildung 11  
Schematische Darstellung eines "Neutralisationstrichters"

Hierbei symbolisiert ein Trichter einen potentiellen Säureüberschuß, der andere Trichter einen Überschuß an Lauge. Dies korrespondiert mit den beiden Bereichen in Abbildung 10. So bewirkt ein Zugang saurer Abwässer in das Produktionssystem durch die Bearbeitung eines entsprechenden Auftrags bei einem gegebenen Säureüberschuß einen Zuschlag im "Säuretrichter" während die Bearbeitung desselben Auftrags bei einem gegebenen Laugenüberschuß zu einer Reduktion der entsprechend zu neutralisierenden Laugenmenge im "Laugentrichter" führt. Durch die beiden "Belastungsschranken" wird die Einhaltung eines maximalen Puffervolumens saurer bzw. alkalischer Abwassermengen gewährleistet. Dies impliziert darüberhinaus eine maximale Menge an einzusetzenden Fremdchemikalien (z.B. HCl, NaOH) und liefert somit einen Beitrag für die Realisierung eines produktionsintegrierten Umweltschutzes.

## **2.2 Entwurf eines Verfahrens zur Umsetzung der Aufgaben einer umweltschutzorientierten Feinsteuerung**

Zentrale Aufgaben auf Feinsteuerungsebene sind die zeitliche Zuordnung einzelner Aufträge bzw. Arbeitsgänge zu Arbeitssystemen (Maschinenbelegung) sowie die Festlegung der Fahrweisen der einzelnen Arbeitssysteme bzw. Aggregate (Intensitätssteuerung).

Bei der Konzeption von Methoden zur Umsetzung dieser Aufgaben auf Feinsteuerungsebene sind u. a. folgende Kriterien zu berücksichtigen:

- simultane Betrachtung umweltschutzorientierter und betriebswirtschaftlicher Zielkriterien,
- Berücksichtigung verfahrens-/produktionstechnischer Restriktionen und Interdependenzen relevanter Einflußgrößen,
- hinreichende Abbildung des dynamischen Verhaltens von Stoff- und Energieflüssen sowie
- Struktur des zur Verfügung stehenden Planungswissens (z.B. unscharfes Planungswissen, Einplanungsbeispiele aus der Vergangenheit).

Dieser Anforderungskatalog erfordert einen Einsatz heuristischer Verfahren wie etwa:

- unscharfe regelbasierte Systeme,
- Neuronale Netze oder
- hybride Ansätze.

### **2.2.1 Konzeption einer umweltschutzorientierten Feinsteuerung auf Basis eines unscharfen regelbasierten Verfahrens**

Klassischerweise werden zur Maschinenbelegung bzw. Auftragseinlastung in der industriellen Praxis i. allg. Prioritätsregel eingesetzt. Hierbei kann z.B. in:

- ankunftsorientierte Prioritätsregeln (z.B. first come first serve)
- bearbeitungsorientierte Prioritätsregeln (z.B. shortest processing time)
- terminorientierte Prioritätsregeln (z.B. minimum slack time)
- ressourcenorientierte Prioritätsregeln (z.B. greatest resource demand) und
- joborientierte Prioritätsregeln (most worth of job)

unterschieden werden. Spezielle Prioritätsregelverfahren werden u.a. in (Zäpfel 1989, Witte 1988, Adam 1980, Alvares-Valdes Olaguibel/Tamarit Goerlich 1989, Davis/Petterson 1975, Hauk 1973, Haupt 1989, Kurtulus/Davis 1982, Kurtulus/Narula 1985) beschrieben und bezüglich verschiedener Zielkriterien vergleichend bewertet. Die bislang verwendeten Prioritätsregeln hängen i. allg. von einer relativ

geringen Anzahl von Einflußparametern (z.B. der Bearbeitungsdauer eines Auftrages) ab und berücksichtigen in erster Linie rein betriebswirtschaftliche Zielkriterien (z.B. Termintreue). Dies erscheint aufgrund der Interdependenzen und verfahrenstechnischer Restriktionen der zu untersuchenden Produktionssysteme und simultanen Berücksichtigung emissionsorientierter und betriebswirtschaftlicher Zielsetzungen nicht ausreichend. Eine einfache Verknüpfung (additiv/multiplikativ) verschiedener Prioritätsregeln mit dem Ziel einer simultanen Verfolgung mehrerer Zielkriterien (z.B. umweltschutzorientierter und betriebswirtschaftlicher Zielkriterien) hat sich bislang ebenfalls nicht als erfolgversprechend gezeigt (Haupt 1989).

Regelbasierte Systeme (Expertensysteme) erlauben die effiziente Auswertung einer entsprechenden Anzahl von Einzelregeln und Fakten in Abhängigkeit der jeweiligen Produktionssituation und somit eine umfassendere Berücksichtigung der skizzierten Einflußfaktoren. Aufgrund der i. allg. kontinuierlichen Stoff- und Energieflußdaten und des mit Unsicherheit behafteten Planungswissens eignen sich für die Problemstellung insbesondere Expertensysteme, die auch "unscharfe" Daten verarbeiten können. In diesen Zusammenhang empfiehlt sich die Verwendung von unscharfen regelbasierten Systemen (Fuzzy-System).

Das zunächst auf Steuerung bzw. Regelung technischer Prozesse zugeschnittene Konzept von Fuzzy-Reglern ist im Rahmen der Entwicklung emissionsorientierter Produktionsabstimmungsmechanismen um betriebswirtschaftliche Konzepte (z.B. Reduzierung der Durchlaufzeiten, Steigerung der Auslastung) zu erweitern. Hierbei kann folgendermaßen vorgegangen werden:

- Zunächst ist zu prüfen, ob die Gewährleistung betriebswirtschaftlicher Zielkriterien (z.B. Verringerung der Durchlaufzeit) auf technische Beziehungen zurückgeführt werden kann (z.B. pH-Wert anfallender Abwässer, Stoffstromdaten).
- Ist dies nicht möglich, ist die Regelbasis um betriebswirtschaftliche Konzepte (z.B. Fertigungstermine, Prioritäten für einzelne Aufträge) zu erweitern.

Die Integration zusätzlicher Konzepte sowie die Berücksichtigung verschiedener Teilziele bedingen i. allg. eine Strukturierung der Regelbasis analog zu Expertensystemen. Typisch ist hierbei ein hierarchischer Aufbau, bei dem umweltschutzorientierte und betriebswirtschaftliche Teilziele geeignet aggregiert werden. Die Struktur eines derartigen Systems erfordert bei der Konzeption eines Fuzzy-Systems zur umweltschutzorientierten Produktionssteuerung ein Vorgehen, das sowohl Elemente des Reglerentwurfs (z.B. Definition einer Steuer-/Regelstrecke) als auch der Wissensakquisition (z.B. Experteninterviews) umfaßt. Entsprechend können derartige Systeme auch als Fuzzy-Expert-Controller (FEC) bezeichnet werden. Bei der Entwicklung von Fuzzy-Expert-Controllern wird i. allg. wie folgt vorgegangen (Zimmermann 1991):

- *Definition der Input-/Outputvariablen des FEC*: D. h. Identifikation charakteristischer Beschreibungsparameter des Stoff- und Energieflußsystems wie z.B. pH-Wert eines Abwasserbeckens oder verfügbare Kapazitäten vorgelagerter Kraftwerke sowie geeigneter Steuergrößen wie z.B. Kennzahlen zur Verfahrensauswahl.
- *Spezifikation der Terme und Membershipfunktionen der Input-/Outputvariablen*
- *Entwurf der Regelbasis*: D. h. Spezifikation einzelner Konzepte bzw. Teilkriterien wie z.B. Effizienz einer Entsorgungsanlage, Auslastung der Produktionsanlagen, Strukturierung definierter Konzepte.
- *Spezifikation des Inferenzprozesses*: D. h. Auswahl und Parametrisierung der Verknüpfungsoperatoren, Gewichtung der einzelnen Regeln.
- *Selektion der Defuzzifizierungsalgorithmen*: Die Defuzzifizierungsalgorithmen dienen der Transformation der "unscharfen" Steuergrößen in eindeutig definierte Anweisungen.
- *Implementation des FEC*
- *Justierung und Verifikation des FEC*: Die Justierung und Verifikation des FEC wird i. allg. durch Simulationsmodelle (Grobeinstellung) bzw. "on line" am Prozeß (Feineinstellung) durchgeführt.

Prinzipiell sind regelbasierte Verfahren wie Fuzzy-Expert-Controller effizient und leicht validierbar. Die Akquisition des zur Feinabstimmung der Regelbasis (z.B. Auswahl und Parametrisierung von Verknüpfungsoperatoren) benötigten Wissens erweist sich jedoch in vielen Fällen als problematisch. Gründe hierfür liegen u.a. darin, daß es i. allg. schwierig ist, das oftmals in impliziter Form vorliegende Wissen über Produktionsprozesse in explizite Regeln zu fassen bzw. diese geeignet zu parametrisieren. So ist es beispielsweise für einen Fachmann oftmals einfacher, in einer gegebenen Situation aufgrund seiner Erfahrung ein geeignetes Produktionsverfahren zu bestimmen, als allgemeingültige Regeln zur Auswahl von Produktionsverfahren in Abhängigkeit beliebiger Rahmenbedingungen zu formulieren. Dies trifft insbesondere für vernetzte, dynamische Produktionsprozesse zu.

Eine Möglichkeit, diese Problematik zu lösen, besteht in der Kombination anwendungsorientierter Modellierungsmethoden. So ermöglicht die Kombination von FEC und Simulationssystemen, aufgestellte Regeln in mehreren verschiedenen Situationen auf Gültigkeit und Zuverlässigkeit zu testen. Simulationssysteme können hierbei eine Möglichkeit bieten, eventuell vorhandene Wissenslücken zu schließen und somit Fachexpertenwissen zu ergänzen.

Ist es jedoch auch mit dieser Vorgehensweise nicht möglich, detailliertere Kenntnisse über das Systemverhalten zu erlangen, empfiehlt es sich, das Konzept von Fuzzy-Expert-Controllern um adaptive Elemente zu erweitern bzw. auf Verfahren des Maschinellen Lernens wie z.B. Neuronale Netze, zurückzugreifen.

### 2.2.2 Konzeption einer umweltschutzorientierten Feinsteuerung auf Basis Neuronaler Netze

Können keine expliziten Regeln zur umweltschutzorientierten Feinsteuerung angegeben werden, empfiehlt sich ein Einsatz von adaptiven Verfahren wie z.B. Neuronale Netze. In Neuronalen Netzen wird Wissen (z.B. bezüglich einer geeigneten Verfahrensauswahl in Abhängigkeit gegebener System- und Auftragsparameter) nicht explizit (etwa mittels Regeln), sondern implizit durch die zu lernenden Gewichtungsfaktoren des Netzes dargestellt. Nach Adaption dieser Gewichtungsfaktoren in einer Lernphase repräsentiert das Netz den entsprechenden Informationsgehalt der Trainingsbeispiele (z.B. Einplanungentscheidungen aus der Vergangenheit). Dies ermöglicht es, implizit in repräsentativen Planungsentscheidungen enthaltenes Wissen zu nutzen. Implizites Wissen kann u. a. über eine:

- Analyse von Vergangenheitsdaten (Produktionsszenarien, getroffene Entscheidungen, Bewertung dieser im Hinblick auf spezielle Zielkriterien),
- Konstruktion repräsentativer Produktionsszenarien mit verschiedenen Handlungsalternativen und deren Vorlage zur Beurteilung durch einen Experten,
- Simulation verschiedener Handlungsalternativen

gewonnen werden.

Bei der Entwicklung Neuronaler Netze für spezielle Anwendungsgebiete kann grundsätzlich wie folgt vorgegangen werden:

- Einordnung des Anwendungsfalls in eines der potentiellen Einsatzfelder Neuronaler Netze,
- Auswahl eines entsprechenden Netzwerktyps,
- Spezifikation der Parameter des ausgewählten Netzwerktyps,
- Akquisition von Beispieldaten.

An diese grundlegenden Schritte schließen sich eine:

- Lernphase (Training des ausgewählten Netzes mit den Beispieldaten) und
- Testphase (Verifikation des Netzwerkverhaltens mit unbekanntem Testdaten)

an. Dezierte Vorgehensweisen zur Konstruktion Neuronaler Netze finden sich etwa in (Rummelhardt/Mc Clelland 1987, Anderson/Rosenfeld 1988, Grossberg 1988, Domany 1988, Schöneburg/Hansen/Gawelczyk 1990, Eckmiller/Hartmann/Hauske 1991).

Beim Einsatz Neuronaler Netze zur umweltschutzorientierten Feinsteuerung ist insbesondere zunächst zu prüfen, ob die relevanten Entscheidungsprozesse in einer Form beschrieben werden können, die den Einsatz Neuronaler Netze ermöglicht.

Entsprechend ist eine Beschreibung des Entscheidungsproblems auf Feinsteuerungsebene als

- Mustererkennungsproblem,
- Klassifikationsproblem,
- Projektionsaufgabe oder
- Optimierungsproblem

möglich.

Während eine Beschreibung als Optimierungsproblem auf einer Energiefunktion beruht, deren Parameter einerseits als Gewichte eines speziellen Neuronalen Netzes, andererseits als Variablen einer Optimierungsaufgabe (z.B. spezielle Wege beim Travelling-Person-Problem) interpretiert werden können, erfordern die weiteren Ansätze die Beschreibung einer speziellen Produktionssituation mittels betriebswirtschaftlicher, umweltschutzorientierter und technischer Kennzahlen wie etwa:

- Massen-/Volumenströme,
- Konzentrationen,
- verfügbare Kapazitäten,
- Bearbeitungszeiten,
- Rüstzeiten,
- Anzahl ausgefallener Aggregate,
- potentielle Reparaturzeiten,
- Fertigstellungstermine,
- Produktionskennzahlen

Aus diesen Kennzahlen sind Vektoren zu bilden, die die jeweilige Produktionssituation charakterisieren (Mertens 1977):

$$P^T(k_1, \dots, k_b, k_{b+1}, \dots, k_e, k_{e+1}, \dots, k_p)$$

mit  $k_1 \leq k_i \leq k_b$  betriebswirtschaftliche Kennzahlen,  
 $k_{b+1} \leq k_i \leq k_e$  umweltschutzorientierte Kennzahlen und  
 $k_{e+1} \leq k_i \leq k_p$  produktionstechnische Kennzahlen.

Besonders erfolgversprechend erscheint die Interpretation einer umweltschutzorientierten Feinsteuerung als Projektionsproblem (Tuma 1994). Grundidee hierbei ist es, die Auswirkungen verschiedener Handlungsalternativen vorherzusagen. Diejenige Variante, die hierbei in Hinblick auf die Zielkriterien am erfolgversprechendsten ist, wird dann als Entscheidung gewählt. Die zum Training entsprechender Netzwerke benötigten Lerndaten müssen aus korrespondierenden Vektorpaaren  $P^T$  bzw.  $O^T$  bestehen. Falls sich in den Input-/Outputvektorpaaren kausale Zusammenhänge wider-

spiegeln, können diese durch ein Neuronales Netz (z.B. Backpropagation-Netze) operationalisiert werden.

$P^T$  besteht dabei aus:

- Variablen, die die jeweilige Produktionssituation repräsentieren (z.B. pH-Wert im Abwasserbecken, Kapazitäten vor-/nachgeschalteter Ver-/Entsorgungseinrichtungen) und
- Variablen, die eine potentielle Handlungsstrategie charakterisieren (z.B. pH-Wert der Abwasserfrachten, die mit der Wahl eines Produktionsverfahrens zur Bearbeitung eines speziellen Auftrages verbunden sind, Energiebedarf eines potentiellen Auftrages bei Verwendung eines speziellen Produktionsverfahrens).

$O^T$  besteht demhingegen aus:

- Variablen, die Auswirkungen der in  $P^T$  spezifizierten Handlungsalternativen in Abhängigkeit der jeweiligen Produktionssituation darstellen (z.B. Veränderung des pH-Wertes im Abwasserbecken).

Prinzipiell können Neuronale Netze im Gegensatz zu regelbasierten Verfahren auch in schwach strukturierten Gebieten eingesetzt werden, in denen z.B. aufgrund der Anzahl der zu betrachtenden Einflußparameter bzw. deren Interdependenzen keine expliziten Regeln mehr formuliert werden können.

Die Konstruktion von Verfahren zur umweltschutzorientierten Feinsteuerung auf der Basis Neuronaler Netze hängt insbesondere davon ab, ob Beispieldatensätze gefunden werden können, die die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Handlungsalternativen (z.B. Auswahl eines speziellen Produktionsverfahrens) und deren Auswirkungen auf das Produktionssystem hinreichend genau beschreiben. Für eine Akquisition von Trainingsdaten empfiehlt sich der Einsatz von Simulationssystemen. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Definition der Input-/ Outputparameter sowie des Bewertungszeitpunktes.

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich durch die Tatsache, daß Wissen in Neuronalen Netzen nicht explizit wie z.B. in regelbasierten Systemen, sondern implizit durch die zu lernenden Gewichtungsfaktoren der Verbindungen im Netz dargestellt wird. Die vom Neuronalen Netz gefällten Entscheidungen können aus diesem Grund oft nicht erklärt werden und sind schwer nachvollziehbar.

### 2.2.3 Konzeption einer umweltschutzorientierten Feinsteuerung auf Basis hybrider Systeme

Die Entwicklungen von Systemen zur umweltschutzorientierten Feinsteuerung auf der Basis von FECs und Neuronalen Netzen weisen, zumindest teilweise, sich gegenseitig entsprechende Vor- bzw. Nachteile auf (Kosko 1992, Chin-Teng/Lee 1991). Regelbasierte Systeme wie z.B. FECs können in Gebieten, in denen ein hinreichendes Modell zur Abstimmung von Stoff- und Energieströmen aufgestellt werden kann, explizite Regeln verarbeiten. Methoden des Maschinellen Lernens eignen sich hingegen zur Operationalisierung von implizitem Planungswissen in schwach strukturierten Gebieten. Bei umweltschutzorientierten Problemstellungen sind i.allg. eine Vielzahl unterschiedlicher Teilprobleme zu beachten, die sich zumindest teilweise durch stark unterschiedlich strukturierte Wissensquellen auszeichnen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob die charakteristischen Eigenschaften regelorientierter Ansätze (Möglichkeit zur Verwendung expliziten Planungswissens, Erklärungsfähigkeit) und Methoden des Maschinellen Lernens (z.B. Lernfähigkeit Neuronaler Netze) kombiniert werden können.

Ziel solcher hybriden Systeme (Neuro-Fuzzy-Systeme) ist es, aufbauend auf der i. allg. plausiblen Regelstruktur von Fuzzy-Expert-Controllern, die schwierig zu bestimmenden Parameter aus Beispieldaten zu adaptieren. Hierbei kann in drei Stufen vorgegangen werden:

- Zunächst wird ein Fuzzy-Expert-Controller, einschließlich Membershipfunktionen, Regelstruktur, Verknüpfungsoperatoren und einer Defuzzifizierungsmethode, entwickelt.
- In einem zweiten Schritt werden die zu justierenden Parameter (z.B. Plausibilitätswerte der einzelnen Regeln) anhand von repräsentativen Einplanungsentscheidungen analog zum Neuronalen Netz vorjustiert.
- In einer letzten Phase werden Parameter, für die eine hinreichende Theorie existiert, manuell nachjustiert.

Ein solches Vorgehen verbindet die Fähigkeiten von Experten, ein konsistentes Modell für eine begrenzte Planungs-/Steuerungsaufgabe zu entwickeln, mit den Möglichkeiten von Methoden des Maschinellen Lernens, implizites Wissen auszuwerten. Dies ist besonders in Gebieten mit unterschiedlich strukturiertem Wissen vorteilhaft, welches etwa bei der Abstimmung von Stoff- und Energieflüssen unter Berücksichtigung umweltschutzorientierter und betriebswirtschaftlicher Zielkriterien auftritt.

### **3 Evaluierung der vorgeschlagenen Verfahren zur Umsetzung einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung**

#### **3.1 Diskussion des umweltschutzorientiert erweiterten Konzepts einer belastungsorientierten Fertigungssteuerung anhand eines Beispiels aus der Fertigungsindustrie**

##### **3.1.1 Darstellung des Produktionssystems und des Entscheidungsproblems**

Exemplarisch wird das umweltschutzorientiert erweiterte Konzept der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung im Bereich der Oberflächenbeschichtung metallischer Werkstoffe dargestellt. Das betrachtete Produktionssystem (siehe Abbildung 12) besteht aus einer Galvanik, einer Lackiererei sowie einer Anlage zur Behandlung der Abwasserfrachten (Entgiftungs- und Neutralisationsanlage). Vor der Galvanisierung werden in einem Kommissionierbereich die einzelnen Werkstücke, die sich u. a. in Form und Größe unterscheiden, zu Losen zusammengestellt und auf einem Werkstückträger angebracht. Im Anschluß an die Galvanisierung werden die Werkstückträger entkommissioniert und die Werkstücke vor der Lackiererei zu neuen Losen zusammengefaßt. Hierbei werden die Werkstücke den beiden zur Verfügung stehenden Lackiersystemen (Lackierautomat, manuelle Lackierkabine) zugeordnet. Die Galvanik besteht aus einem Bereich zur Bearbeitung von Aluminiumwerkstücken und einem weiteren Bereich zur Behandlung von Stahl-, Edelstahl- und Titanwerkstücken, in denen jeweils unterschiedliche Beschichtungsverfahren eingesetzt werden. In beiden Bereichen der Galvanik fallen sowohl saure als auch alkalische Abwasserfrachten an, die in der Entgiftungs- und Neutralisationsanlage (ENA) behandelt werden.

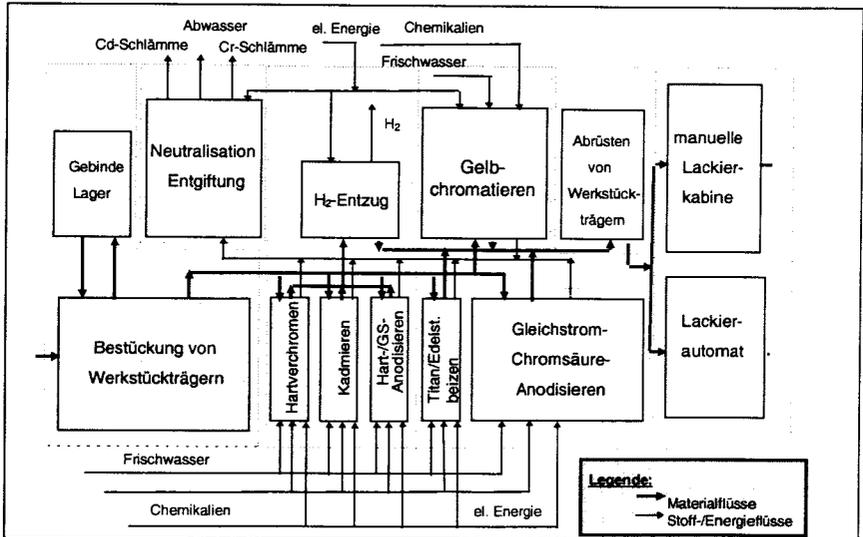


Abbildung 12

Schematische Darstellung des Produktionssystems aus der Fertigungsindustrie

Eine Systemanalyse dieses Produktionssystems ergibt folgende Ansatzpunkte für eine umweltschutzorientierte Produktionssteuerung:

- *Reduktion des Energiebedarfs durch Deaktivierung redundanter Bäder:* Die verschiedenen Verfahren der Aluminium-Galvanik nutzen teilweise die gleichen Vorbehandlungsverfahren (z.B. geheizte alkalische Entfettungsbäder sowie saure Beizbäder). Diese werden für jedes Beschichtungsverfahren getrennt vorgehalten. Aufgrund der vergleichsweise kurzen Prozesszeiten im Bereich der Werkstückvorbehandlung laufen diese Bäder häufig in heißer Redundanz. Durch eine gemeinsame Nutzung dieser Bäder kann der Energiebedarf des Produktionssystems signifikant reduziert werden. Dies kann jedoch zu einer Engpaßsituation in der Galvanik führen, die durch entsprechende Produktionssteuerungsmaßnahmen entschärft werden muß.
- *Verminderung des Einsatzes von Fremdchemikalien zur Neutralisation:* Durch eine entsprechende Abstimmung der sauren und alkalischen Abwasserfrachten der einzelnen Bäder kann der Einsatz von Fremdchemikalien (z.B. HCl) in der ENA reduziert werden.
- *Reduktion von Umrüstemissionen:* Durch eine ungünstige Reihenfolge der Aufträge in der Lackiererei kann es zu vermeidbaren Farbwechseln und damit verbundenen Lösungsmittlemissionen aufgrund von Umrüstvorgängen kommen.
- *Verlängerung der Standzeit der Bäder:* Eine Verlängerung der Standzeit mit

dem Ziel einer Verringerung des Abwasser- und Abfallaufkommens erfordert die Berücksichtigung variabler Prozeßzeiten und damit eine Fahrweise bei sich im Zeitverlauf ändernden Intensitäten.

Die Reduktion des Energiebedarfs bzw. des Bedarfs an Fremdchemikalien läßt sich durch eine Erweiterung des Zielsystems im Rahmen der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung umsetzen. Zu berücksichtigen ist hierbei insbesondere eine hohe Auslastung der Engpaßbäder (gemeinsam genutzte Vorbehandlungsbäder) sowie ein Auftragsmix, der eine Abstimmung saurer und alkalischer Abwässer ermöglicht. Die Reduktion der Umrüstemissionen basiert auf einer entsprechenden Reihenfolgeplanung und ist somit dem Bereich der Feinsteuerung zuzuordnen. Die Verlängerung der Standzeit einzelner Bäder erfordert eine modifizierte Betriebsdatenerfassung bzw. -analyse.

Neben den umweltschutzorientierten Zielsetzungen sind im Anwendungsfall auch betriebswirtschaftliche Zielsetzungen zu beachten. Von besonderer Bedeutung sind im betrachteten Produktionssystem die Reduktion der Durchlaufzeiten, die Erhöhung der Termintreue sowie die Einhaltung der Qualitätsanforderungen. Abbildung 13 zeigt die im folgenden behandelten Ansatzpunkte zur Umsetzung einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung im betrachteten Anwendungsfall.

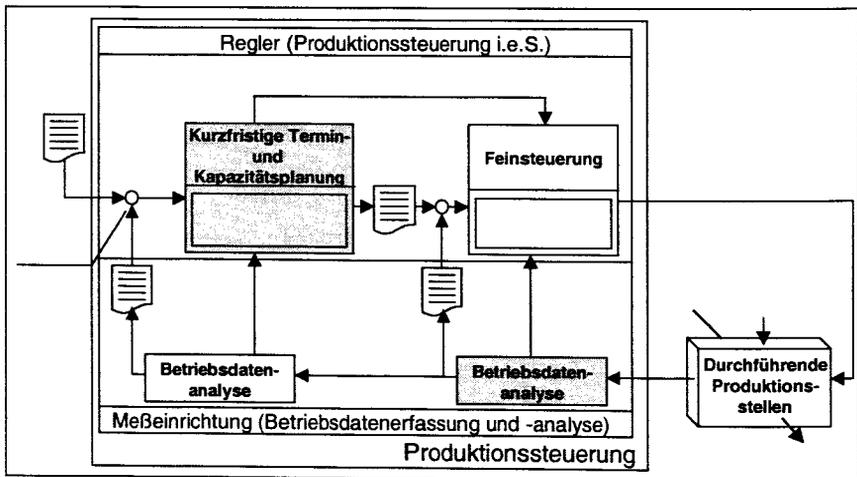


Abbildung 13

Einordnung des skizzierten Entscheidungsproblems in eine Produktionssteuerung

### 3.1.2 Anwendung des umweltschutzorientiert erweiterten Konzepts einer belastungsorientierten Fertigungssteuerung

Die formulierten betriebswirtschaftlichen Zielsetzungen (Verkürzung von Durchlaufzeiten, Erhöhung der Termintreue) sowie die Struktur der Produktionssteueraufgabe (vernetztes, mehrstufiges Produktionssystem) legen eine Anwendung des Konzeptes der belastungsorientierten Fertigungssteuerung zur Erreichung der betriebswirtschaftlichen Ziele nahe. Da, wie gezeigt, eine umweltschutzorientierte Erweiterung des Konzeptes der belastungsorientierten Fertigungssteuerung einerseits auf Kapazitätsanpassungsmaßnahmen (anlagenbezogene Sichtweise), andererseits auf der Einführung zusätzlicher Emissions- bzw. Ressourcentrichter (stoffbezogene Sichtweise) beruht, wird im Anwendungsfall besonderes Augenmerk auf diese Punkte gelegt.

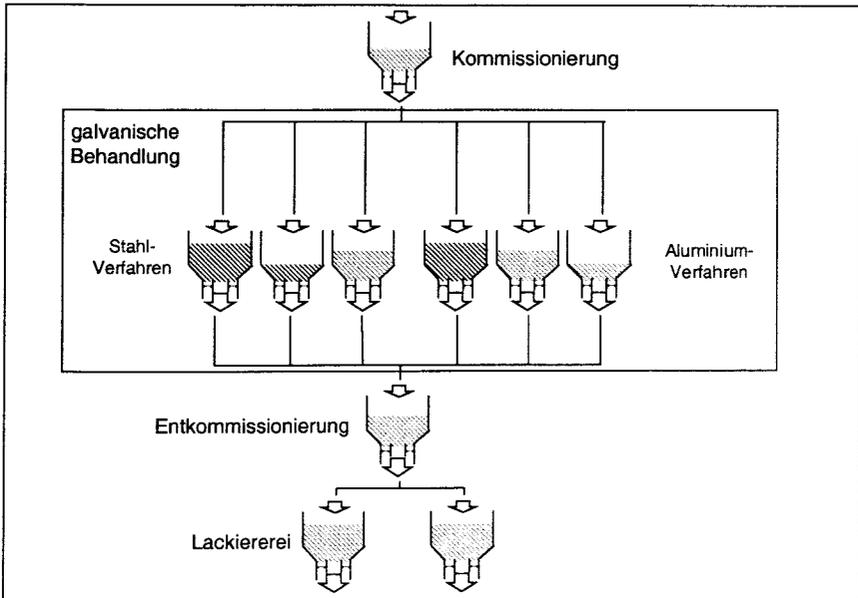


Abbildung 14

Schematische Anwendung des Trichtermodells auf das skizzierte Produktionssystem

Abbildung 14 zeigt eine schematische Modellierung des untersuchten Produktionssystems aus dem Bereich der Oberflächenbeschichtung als Trichtermodell. Hierbei können die Bereiche Kommissionierung, galvanische Behandlung, Entkommissionierung und Lackiererei unterschieden werden.

Kommissionierung: Im Rahmen der Kommissionierung werden sowohl Stahl- als auch Aluminiumteile unterschiedlicher Größe und geometrischer Gestalt manuell auf Haltevorrichtungen bzw. Werkstückträger aufgebunden. Die Kommissionierzeit (Kapazitätsbedarf) eines solchen Trägers hängt dabei stark von der Form und der Anzahl der aufzubindenden Teile ab. Anpassungsmaßnahmen können hierbei insbesondere zeitlicher (Überstunden) und quantitativer (vorübergehender Einsatz zusätzlichen Personals aus anderen Bereichen) Natur sein.

Galvanik: Die galvanotechnische Behandlung der metallischen Werkstücke läßt sich prinzipiell in die Bereiche “Stahlgalvanik” und “Aluminiumgalvanik” unterteilen. Diese umfassen jeweils drei Beschichtungsverfahren, die getrennt modelliert werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß ein Verfahren jeweils wiederum aus mehreren Prozeßschritten besteht. Diese können grob in Vorbehandlungs- und Wirkstufen unterteilt werden. Da die Prozeßschritte eines Verfahrens kontinuierlich, ununterbrochen durchlaufen werden, empfiehlt es sich, jedes Verfahren durch einen Trichter zu modellieren. Die Kapazität eines solchen Systems orientiert sich dabei am Verfahrensschritt mit der längsten Prozeßzeit. Die Prozeßzeit kann hierbei als Variable in Abhängigkeit des Badzustandes interpretiert werden. Zur genauen Modellierung des Kapazitätsangebots ist in diesem Zusammenhang die Berücksichtigung von Informationen aus der Betriebsdatenerfassung und -analyse erforderlich. Abbildung 15 zeigt hierzu exemplarisch ein Neuronales Netz zur Prognose der Prozeßzeit eines Beizbades in Abhängigkeit von Zustandsparametern.

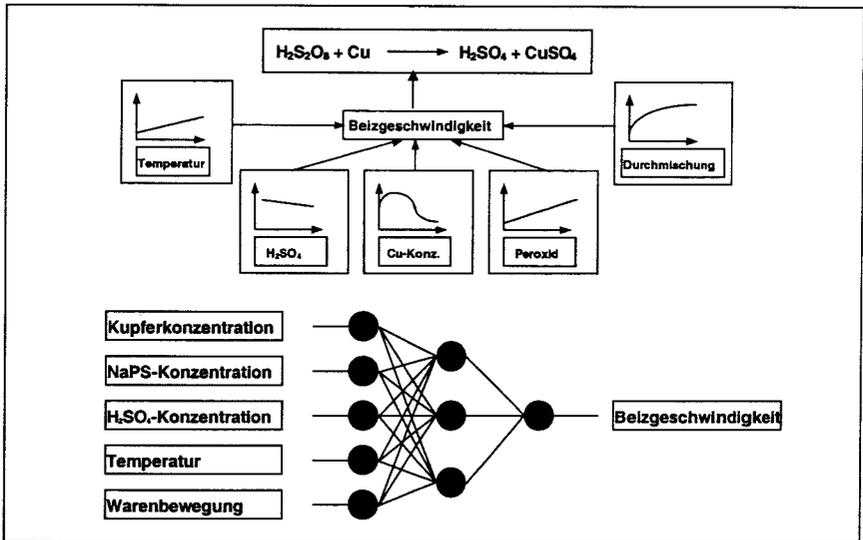


Abbildung 15

Neuronales Netz zur Ermittlung der Beizrate im Rahmen der Betriebsdatenerfassung und -analyse (Hauser et al. 1995)

Auf der Grundlage der so ermittelten Prozeßzeit, der maximalen Badbeladung sowie der Anodenspannung (bei elektro-chemischen Verfahren) wird die Kapazität des Arbeitssystems ermittelt. Geht man von konstanten Prozeßzeiten aus, wie es zur Vermeidung von prozeßbedingten bzw. Qualitätsrisiken in der Praxis häufig vorzufinden ist, sind intensitätsmäßige Anpassungsmaßnahmen nicht möglich. Eine Fahrweise mit konstanten Prozeßzeiten erfordert jedoch ein häufiges Nachschärfen der Bäder<sup>2</sup> (z.B. Zugabe entsprechender Badchemikalien). Da i. allg. keine redundanten Galvanikstraßen vorgehalten werden, impliziert dies den ausschließlichen Einsatz zeitlicher Anpassungsmaßnahmen.

**Entkommissionierung:** Im Rahmen der Entkommissionierung werden die Werkstücke manuell von den Trägern entnommen und für die Lackiererei vorsortiert. Die Zeit für das Entkommissionieren (Kapazitätsbedarf) eines solchen Trägers hängt dabei ebenfalls stark von der Form und der Anzahl der Teile ab. Anpassungsmaßnahmen können hierbei in Analogie zur Kommissionierung insbesondere zeitlicher (Über-

<sup>2</sup> Aus umweltschutzorientierter Sicht erscheint eine Fahrweise bei variablen Prozeßzeiten empfehlenswerter. Dies führt i. allg. sowohl zu einer Reduktion des Chemikalieneinsatzes als auch zu einer Verlängerung der Standzeit der Bäder.

stunden) und quantitativer (vorübergehender Einsatz zusätzlichen Personals aus anderen Bereichen) Natur sein.

Lackiererei: Die Lackiererei besteht aus zwei Lackiersystemen, einem Lackierautomaten sowie einer manuellen Lackierkabine. In der Lackierkabine werden geometrisch komplexe Teile manuell lackiert während im Lackierautomaten ausschließlich planare Teile im Paternosterprinzip lackiert werden. Entsprechend der Heterogenität der Arbeitssysteme wird die Lackiererei auf der Basis von zwei getrennten Trichtern modelliert. Die Kapazität des Lackierautomaten hängt im wesentlichen von der Bandvorschubgeschwindigkeit ab. Intensitätsmäßige Anpassungsmaßnahmen durch Erhöhung der Bandvorschubgeschwindigkeit sind aufgrund der Qualitätsanforderungen i. allg. nicht möglich. Von besonderer Bedeutung bei der Ermittlung der durchschnittlichen Intensität sind die Anzahl der durchschnittlich geplanten Umrüstvorgänge. So impliziert eine Erhöhung der Umrüstvorgänge, etwa im Rahmen einer Flexibilitätsteigerung, eine Erhöhung der umrüstbedingten Stillstandszeiten und führt so zu einer Kapazitätsminderung. Neben zeitlichen Anpassungsmaßnahmen sind auch "quantitative" Anpassungsmaßnahmen möglich. Hierbei handelt es sich nicht um das Zuschalten redundanter Anlagen, sondern um eine Nutzung vorhandener Kapazitäten in der manuellen Lackierkabine. Eine solche Anpassung führt demnach nicht zu einer Veränderung der Kapazitätlinie des Lackierautomaten. Die Lackierzeit in der manuellen Lackierkabine hängt im wesentlichen von der zu lackierenden Fläche ab. Sekundäre Einflüsse liegen in der Geometrie und Teilegröße. Eine Anpassung des Kapazitätsangebots kann hierbei realisiert werden durch zeitliche (Überstunden, Zusatzschicht) und quantitative (vorübergehender Einsatz zusätzlichen Personals aus anderen Bereichen) Maßnahmen.

Ziel einer umweltschutzorientierten Erweiterung des Konzepts der belastungsorientierten Fertigungssteuerung für das untersuchte Produktionssystem ist die Reduktion des Energieeinsatzes sowie die Reduktion des Einsatzes von Fremdchemikalien durch Maßnahmen im Rahmen der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung.

Reduktion des Energieeinsatzes: Ansatzpunkt für eine Reduktion des Energiebedarfs ist ein partielles Abschalten der teilweise in heißer Redundanz laufenden Vorbehandlungsbäder der Aluminium-Galvanik. Dies erfordert eine getrennte Berücksichtigung der Vorbehandlungsstufe der Aluminium-Verfahren. In diesem Zusammenhang empfiehlt sich die Modellierung der gesamten Vorbehandlungsstufe der Aluminium-Verfahren durch einen entsprechenden Trichter (Abbildung 16). Die Kapazität dieses so definierten Arbeitssystems berechnet sich aus der Summe der Kapazitäten der tatsächlich betriebenen Vorbehandlungsbäder. Deren Kapazität ergibt sich aus den entsprechenden Prozeßzeiten bzw. der maximalen Beladung der Bäder (gemessen in Quadratmeter pro Arbeitsgang). Geht man wie oben beschrieben von

konstanten Prozeßzeiten aus, ergibt sich kein Spielraum für intensitätsmäßige Anpassungsmaßnahmen. Im Rahmen von zeitlichen Anpassungsmaßnahmen ist darauf zu achten, daß diese mit den weiteren Prozeßstufen der jeweiligen Verfahren der Aluminium-Galvanik koordiniert werden müssen, da reale Wartezeiten zwischen den einzelnen Bädern prinzipiell zu vermeiden sind. Von besonderem Interesse bei einem derartigen Arbeitssystem sind quantitative Anpassungsmaßnahmen. So kann zu Beginn der Planungsperiode eine Entscheidung über die prinzipiell zu aktivierenden Vorbehandlungsbäder getroffen werden. Durch eine Reduzierung redundanter Vorbehandlungsbäder erscheint eine Reduktion des Energiebedarfs in der Vorbehandlungsstufe der Aluminium-Galvanik um bis zu 50% möglich.

*Reduktion des Fremdchemikalieneinsatzes:* Eine Reduktion des Chemikalieneinsatzes in der Entgiftungs- und Neutralisationsanlage der Galvanik erfordert eine substantielle Erweiterung des Konzepts der belastungsorientierten Fertigungssteuerung um sogenannte Emissionstrichter (stoffbezogene Sichtweise). Ansatzpunkt für eine entsprechende Reduktion ist eine Abstimmung des Anfalls saurer und alkalischer Abwasserströme in der Planperiode. Hierzu werden zwei entsprechende Trichter für die sauren und alkalischen Abwässer definiert (Abbildung 16). Die Maßeinheit dieser Trichter ist problemadäquat zu wählen. Im vorliegenden Beispiel empfiehlt sich etwa die Verwendung von [mol] bzw. eines zu definierenden Neutralisationsäquivalents als Funktion der zugrundeliegenden stöchiometrischen Beziehung zwischen den Neutralisationsreagenzien. Die festzulegenden "Belastungsschranken" dieser Trichter geben die jeweils maximal tolerierbare, fremd zu neutralisierende Abwassermenge, gemessen in der oben spezifizierten Maßeinheit, an. Dies gewährleistet eine effiziente Fahrweise des Produktionssystems im Sinne eines integrierten Umweltschutzes, indem es ceteris paribus zu einer vollständigen Nutzung der zur Eigenneutralisation in der Planperiode zur Verfügung stehenden Ressourcen führt. Kapazitive Anpassungsmaßnahmen implizieren eine Heraufsetzung der Belastungsschranke des im Überschuß vorliegenden Neutralisationspartners und können zur Erreichung betriebswirtschaftlicher Zielsetzungen erforderlich werden.

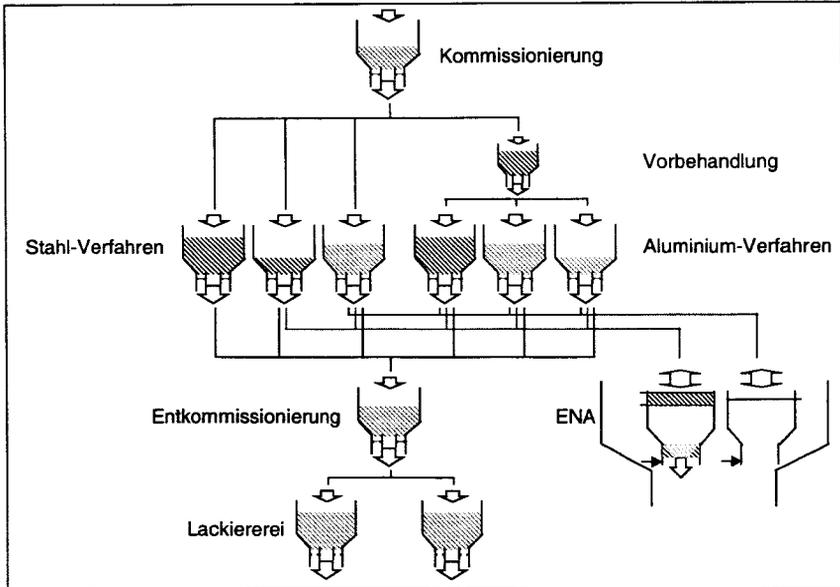


Abbildung 16

Umweltschutzorientierte Erweiterung des Trichtermodells für das untersuchte Produktionssystem

### 3.2 Diskussion einer umweltschutzorientierten Feinsteuerung anhand eines Beispiels aus der Prozeßindustrie

#### 3.2.1 Darstellung des Produktionssystems und des Entscheidungsproblems

Ein Beispiel einer umweltschutzorientierten Feinsteuerung wird anhand eines exemplarischen Produktionssystems (Abbildung 17) aus der Textilindustrie dargestellt (Tuma 1994, Tuma/Haasis/Rentz 1996). Hierbei handelt es sich um eine Färberei mit vorgelagertem Kesselhaus und Wasserkraftwerk.

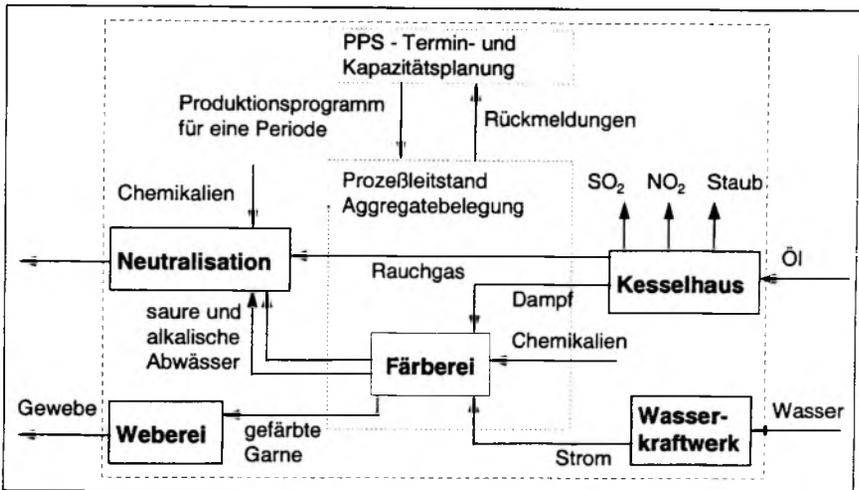


Abbildung 17  
Darstellung eines Produktionssystems aus der Textilindustrie

Die Färberei umfaßt zwei Produktionsstufen, den Färbeprozess sowie das "Trocknen" der gefärbten Garne. Für die Produktion werden u.a. Dampf/Heißwasser und Strom benötigt. Diese Ressourcen werden von zwei Kraftwerken zur Verfügung gestellt. Die im Rauchgas des Kraftwerkes enthaltenen Substanzen CO<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub> werden in einer nachgeschalteten Abwasseraufbereitungsanlage zur Neutralisation der alkalischen Abwässer der Färberei verwandt. Die Speichermöglichkeiten von Dampf/Heißwasser sowie das Fassungsvermögen des Abwasserbeckens vor dem Begasungsturm sind begrenzt. Die Kapazitäten der Ver- bzw. Entsorgungseinrichtungen verhalten sich dynamisch und sind eine Funktion exogener Einflußfaktoren (z.B. der Smoglage oder des Wasserpegels im Zufluß des Wasserkraftwerks). Umweltschutzorientierte und betriebswirtschaftliche Zielsetzungen sind hierbei etwa:

- *Steigerung der Produktionsmengen:* Ziel ist es, durch eine entsprechende Abstimmung der Produktion auf sich im Zeitverlauf ändernde Ressourcenangebote die Ausbringungsmenge des Produktionssystems zu erhöhen.
- *Effizienteren Nutzung des verfügbaren Energieangebots:* Eine effiziente Abstimmung von Energieangebot und -nachfrage führt zu einem erhöhten Nutzungsgrad der eingesetzten Energie und ermöglicht so eine Steigerung der Produktionsmenge bei Ressourcenknappheit.
- *Reduktion der Abwärmeverluste:* Durch eine verbesserte Ausnutzung des Dampf-/Heißwasserangebotes werden Abwärmeverluste vermindert.
- *Steigerung der Effizienz der Neutralisationsanlage:* Die Steigerung des durch

die Nutzung der Rauchgase des Kesselhauses neutralisierten Anteils der Färbereiabwässer führt zu einer:

- *Reduktion des Chemikalieneinsatzes:* Bei einer ungenügenden Abstimmung des Rauchgasvolumenstroms und der alkalischen Abwasserfrachten der Färberei müssen temporär überschüssige alkalische Abwässer mittels Fremdchemikalien, wie z.B. HCl oder H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, neutralisiert werden.
- *Reduktion von CO<sub>2</sub>- und SO<sub>2</sub>-Emissionen:* Der Einsatz von Rauchgas zur Neutralisation der Färbereiabwässer impliziert eine Reduktion von CO<sub>2</sub>- und SO<sub>2</sub>-Emissionen in der Abluft des Kesselhauses.
- *Reduktion problematischer Salze:* Eine Reduktion von HCl oder H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> impliziert eine geringere Chlorid- bzw. Sulfatbelastung.

Eine Systemanalyse hat ergeben, daß die Erfüllung der Zielsetzungen insbesondere von der

- zeitlichen Zuordnung der potentiell zu bearbeitenden Aufträge auf die Aggregate und der
- Auswahl potentiell einsetzbarer Produktionsverfahren<sup>3</sup> zum Färben der Partien

abhängen. Damit werden die zentralen Aufgaben der Feinsteuerung (Auftragseinlastung, Intensitätssteuerung) im Rahmen einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung adressiert (Abbildung 18). Abbildung 18 ordnet die im folgenden behandelten Ansatzpunkte zur Umsetzung einer umweltschutzorientierten Feinsteuerung in den Kontext des skizzierten Produktionssteuerungskonzeptes ein.

---

<sup>3</sup> Die verschiedenen Produktionsverfahren unterscheiden sich insbesondere im Zeit-Temperaturprofil. So kann eine Farbpartie etwa bei höherer Temperatur in einem kürzeren Zeitraum bearbeitet werden. Dies kann als Intensitätssteuerung interpretiert werden.

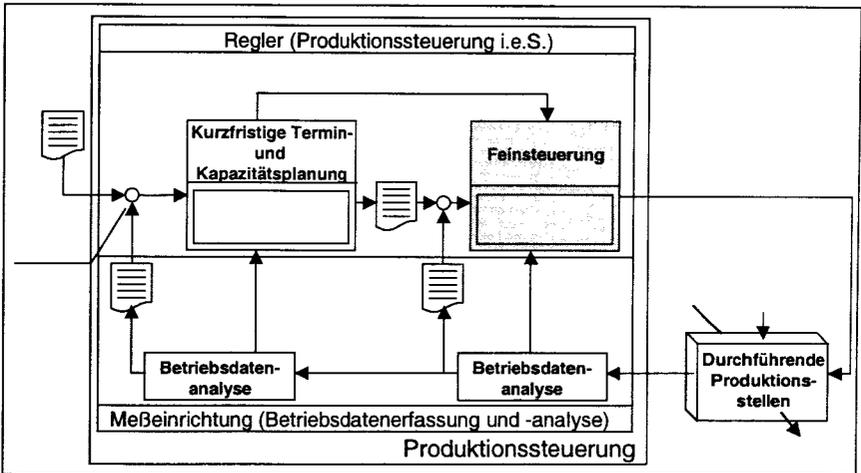


Abbildung 18

Einordnung des skizzierten Entscheidungsproblems in eine Produktionssteuerung

Das skizzierte Entscheidungsproblem zeichnet sich u.a. durch

- eine multikriterielle Zielfunktion,
- die vernetzte Struktur des Produktionssystems (Berücksichtigung vor- bzw. nachgeschalteter Produktionseinheiten),
- eine Vielzahl zu beachtender verfahrenstechnischer Restriktionen,
- ein dynamisches Systemverhalten,
- "unscharfes" Produktionswissen

aus. Diese Struktur legt einen Einsatz heuristischer Verfahren nahe (Tuma 1994). Hierzu werden entsprechend der oben aufgezeigten Diskussion Ansätze aus den Bereichen

- unscharfer regelbasierter Verfahren,
- adaptive Verfahren (Neuronalen Netze) und
- hybrider Verfahren (Neuro-Fuzzy-Systeme)

in Hinblick auf ihre Eignung für den Einsatz im Rahmen einer umweltschutzorientierten Feinsteuerung vergleichend gegenüber gestellt.

### 3.2.2 Vergleichende Analyse methodischer Ansätze auf Feinsteuerungsebene

#### 3.2.2.1 Verfahren einer umweltschutzorientierten Feinsteuerung auf Basis eines unscharfen regelbasierten Ansatzes

Entsprechend der Struktur des Entscheidungsproblems werden in einem ersten Ansatz fuzzyfizierte Expertensysteme zur umweltschutzorientierten Feinsteuerung entwickelt. Die prinzipielle Vorgehensweise läßt sich dabei folgendermaßen charakterisieren. Bei jeder Einlastungsentscheidung ermittelt das Fuzzy-System eine Prioritätskennzahl für jede mögliche Kombination einer noch einplanbaren Färbepartie und eines entsprechenden Färbeverfahrens. Eine hohe Prioritätskennzahl wird einem Auftrag bzw. einem Verfahren dann zugewiesen, wenn dessen Energiebedarf (el. Energie/Dampf) und Abwassercharakteristik mit dem momentanen Zustand des Produktionssystems (z.B. pH-Wert im Abwasserbecken, Energieangebot) korreliert. Abbildung 19 zeigt die Struktur eines entsprechenden Fuzzy-Expert-Controllers mit Regelblöcken zur Abstimmung von Energieangebot und -nachfrage sowie zur Abstimmung von Stoffströmen (z.B. NaOH, CH<sub>3</sub>OOH, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>) für den Neutralisationsprozeß. Die einzelnen Regelblöcke bestehen aus 27 bis 81 Einzelregeln (Tuma/Haasis/Rentz 1994a, Tuma 1994).

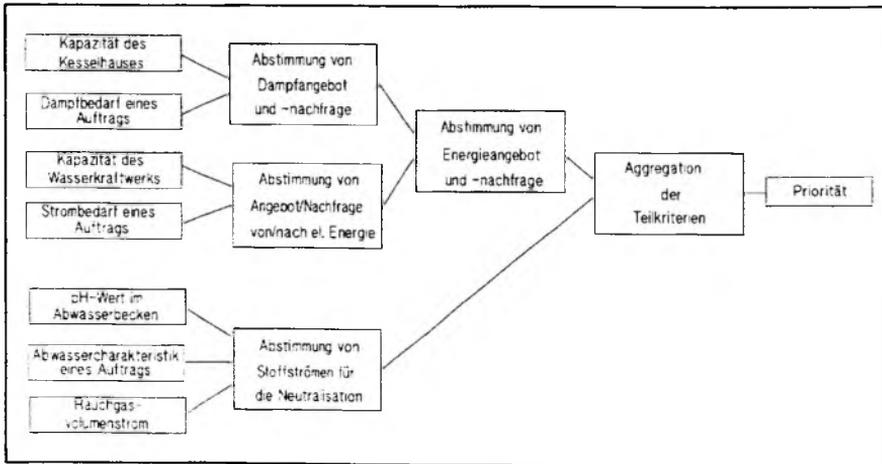


Abbildung 19

Fuzzy-Expert-Controller zur umweltschutzorientierten Feinsteuerung

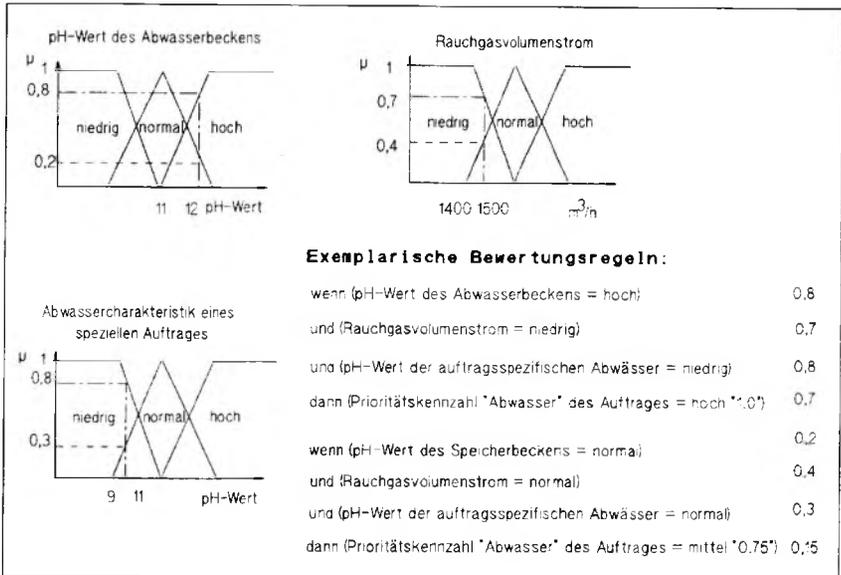


Abbildung 20  
Exemplarische Membershipfunktionen und Regeln

Die Entwicklung eines Fuzzy-Expert-Controllers umfaßt eine Definition von Membershipfunktionen, eine Auswahl von Aggregationsoperatoren, eine Bestimmung der Regelgewichte sowie eine Selektion der Defuzzifizierungsmethode. Abbildung 20 zeigt exemplarische Regeln und Membershipfunktionen eines Fuzzy-Expert-Controllers. Eine Untersuchung verschiedener Typen von Membershipfunktionen, Aggregationsoperatoren, Reglerarchitekturen sowie verschiedener Strategien zur Ableitung der Regelgewichte hat ergeben, daß letzteres der kritische Punkt bei der Entwicklung eines entsprechenden Systems ist (Abbildung 21). Zur Adaption der Plausibilitätsfaktoren wird ein konsistentes Modell des Entscheidungsproblems benötigt. Hierbei empfiehlt es sich insbesondere, Modelle zu verwenden, die auf naturwissenschaftlich-technischen Gesetzmäßigkeiten (z.B. das stöchiometrische Modell der Neutralisation von NaOH und CO<sub>2</sub> zu NaHCO<sub>3</sub> zur Beschreibung der Vorgänge in einer Rauchgasneutralisationsanlage) beruhen. Betriebswirtschaftlich relevante Zusammenhänge sollten, sofern möglich, auf technische zurückgeführt werden. Dies ermöglicht i. allg. die Verwendung eines theoretisch bzw. empirisch abgesicherten Modells und bildet damit eine entsprechende Grundlage bei der Konstruktion von Fuzzy-Expert-Controllern. Ferner muß das eingesetzte Modell die Relevanz der einzelnen Variablen und deren Abhängigkeiten bezüglich der vorgegebenen Zielkriterien widerspiegeln. Auf der Basis eines solchen Modells können Strategien

zur Bestimmung der Plausibilitätswerte der einzelnen Regeln abgeleitet werden.

Ein Beispiel hierfür ist die Gewichtung bzw. Auswahl der Regeln für die Abstimmung der Stoffströme beim Neutralisationsprozeß. Hierbei kann man sich bei der Einlastung "saurer" oder "alkalischer" Aufträge am pH-Wert im Abwasserbecken oder am Rauchgasvolumenstrom orientieren. Aufgrund der zeitlich verzögerten Auswirkung der Einlastungsentscheidung auf den insgesamt relativ stark schwankenden pH-Wert im Abwasserbecken ist eine entsprechende Orientierung nicht empfehlenswert (Abbildung 21, Graph 11 bzw. 12). Sinnvoller erscheint eine Orientierung an dem in längeren Bereichen relativ konstanten Rauchgasvolumenstrom (Abbildung 21, Graph 9 bzw. 11).

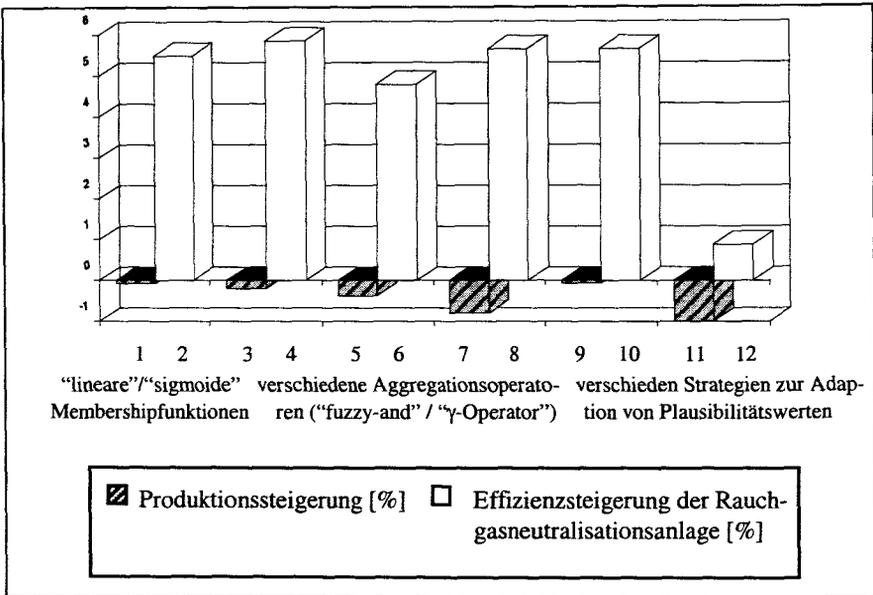


Abbildung 21

Ein Vergleich verschiedener Fuzzy-Expert-Controller (Tuma 1996)

Im Gegensatz zum Zielkriterium "Steigerung der Effizienz der Rauchgasneutralisationsanlage" konnte bisher kein Fuzzy-Expert-Controller für das untersuchte Produktionssystem entwickelt werden, der die betriebswirtschaftlichen Zielsetzungen erfüllt (Abbildung 21). Dies liegt insbesondere daran, daß aufgrund der skizzierten Komplexität des Produktionssystems in Hinblick auf eine Beschreibung der betriebswirtschaftlich relevanten Einflußgrößen bzw. deren Interdependenzen bisher kein konsistentes Modell gefunden werden konnte bzw. die entsprechenden Zusammenhänge nicht auf naturwissenschaftlich-technische Gesetzmäßigkeiten (z.B. Abhängigkeiten

zwischen Energieangebot und ressourcenbedingten Stillstandszeiten) zurückgeführt werden konnten.

### **3.2.2.2 Umweltschutzorientierte Feinsteuerung auf der Basis von Neuronalen Netzen**

In Fällen, in denen es nicht möglich ist, ein konsistentes Modell des Entscheidungsproblems zu konstruieren bzw. explizite Regeln zu formulieren, empfiehlt es sich, auf implizites Wissen zurückzugreifen. Implizites Wissen über den Produktionsprozeß ist etwa in repräsentativen Einplanungsentscheidungen aus der Vergangenheit enthalten. Eine Möglichkeit zur Operationalisierung impliziten Wissens besteht in der Verwendung von Methoden des Maschinellen Lernens (z.B. Neuronale Netze). Die Konstruktion von Verfahren zur Feinsteuerung auf der Basis von Neuronalen Netzen erfordert die Formulierung der Problemstellung in einer Weise, die den Einsatz entsprechender Algorithmen ermöglicht. Darüber hinaus müssen repräsentative Einplanungsbeispiele akquiriert, Netzwerkarchitekturen selektiert sowie die entsprechenden Netzwerke trainiert und getestet werden. Das beschriebene Verfahrensauswahl- und Schedulingproblem kann als Projektionsaufgabe formuliert werden. Bei jeder Einplanungsentscheidung wird das korrespondierende Neuronale Netz aufgerufen, und für jede Kombination eines einplanbaren Auftrages und eines einsetzbaren Färbeverfahrens werden die zu erwartenden Bearbeitungs- und Wartezeiten bzw. die durch die potentielle Entscheidung bedingte Veränderung des pH-Wertes im Abwasserbecken prognostiziert (Tuma/Haasis/Rentz 1993a, Tuma/Haasis/Rentz 1993b). Die Akquisition von Produktionsbeispielen basiert auf einer Analyse von 200 repräsentativ ausgewählten Simulationsszenarien. Diese stellen verschiedene Produktionssituationen dar (z.B. verschiedene Lastprofile der Kraftwerke, Störungen in voroder nachgelagerten Produktionseinheiten) und werden gleichverteilt aus einer Menge von 6912 repräsentativen Produktionsszenarien gezogen. Für jedes dieser 200 Szenarien werden wiederum gleichverteilt über die Produktionszeit (eine Woche im Drei-Schicht-Betrieb) 8 bis 12 "break points" ausgewählt. Diese repräsentieren unterschiedliche Systemzustände (pH-Wert im Abwasserbecken, Rauchgasvolumenstrom, verfügbare Leistungen der Kraftwerke). An den so ermittelten "break points" werden verschiedene Einplanungsalternativen simuliert. Ziel ist es hierbei, den Einfluß unterschiedlicher Aufträge bzw. Färbeverfahren bei einem gegebenen Systemzustand zu untersuchen. Als besonders problematisch in diesem Zusammenhang erscheint die Auswahl der Bewertungs- bzw. Outputparameter des Neuronalen Netzes (Veränderung des pH-Wertes im Abwasserbecken) bzw. des Bewertungszeitpunktes. Wird dieser beispielsweise zu spät gewählt, können die Auswirkungen einer Einplanungentscheidung durch nachfolgende Entscheidungen überdeckt werden.

Entsprechend dem Anforderungsprofil von Projektionsproblemen wird ein Backpropagation-Netz mit drei Schichten für eine Implementierung der Neuronalen Netze (Abbildung 22) gewählt (Rummelhardt 1987). Backpropagation-Netze können in diesem Zusammenhang als nichtlineare Prognosefunktionen interpretiert werden. Die Parameter dieser Funktion (zu lernende Gewichte) werden auf der Basis von Trainingsdaten (repräsentative Produktionsbeispiele) adaptiert. Ziel des Lernvorgangs ist es, den Zusammenhang zwischen entscheidungsrelevanten Daten bzw. Parametern einer potentiellen Entscheidung (system- und auftragsabhängige Daten) auf der einen Seite und deren Auswirkungen (z.B. Veränderung des pH-Wertes im Abwasserbecken) auf der anderen Seite möglichst genau abzubilden bzw. ein entsprechendes Muster in den Trainingsdaten zu erlernen.

Der Backpropagation-Algorithmus dient zur Justierung der zu lernenden Gewichte und kann auch als modifiziertes "Maximum-Likelihood"-Schätzverfahren interpretiert werden (Rummelhardt 1987). In diesem Fall läßt sich der Prozeß der Adaption der Gewichte auch als Suche nach Minima in einer definierten Fehlerfunktion auffassen, die in diesem Fall die Abweichung zwischen gewünschtem und tatsächlichem Output des Netzwerkes in der Trainingsphase beschreibt.

Eine Analyse der eingesetzten Neuronalen Netze zur Steuerung von Stoff- und Energieströmen ergab für das untersuchte Produktionssystem u. a. folgende Ergebnisse (Abbildung 25):

- Auf der Basis eines  $\chi^2$ -Tests für die Verteilung der Referenzdaten kann festgestellt werden, daß die untersuchten Abstimmungsmechanismen (im Gegensatz zu den Fuzzy-Expert-Controllern) zu einer signifikanten Steigerung der Produktionsmenge führen. Die Akquisition der Referenzdaten basiert auf dem entwickelten Simulationsmodell. Hierbei wird die Auswahl der einzelnen Verfahren bzw. Aufträge zunächst gemäß charakteristischer Produktions- bzw. Prioritätsregeln (z.B. Färben von hell nach dunkel) durchgeführt. Stehen nach einer Anwendung entsprechender Regeln mehrere Verfahren bzw. alternative Aufträge zur Disposition, erfolgt eine stochastische Auswahl. Dies entspricht in etwa dem Vorgehen im realen Produktionssystem. Die Ergebnisse des  $\chi^2$ -Tests beziehen sich auf eine Auswertung von je 200 Simulationsläufen von repräsentativen 600 Produktionsszenarien. Die Ergebnisse gemäß Abbildung 25 in Bezug auf die Referenzdaten hängen jedoch stark von den eingesetzten Rezepturen bzw. der jeweiligen Produktionsstruktur ab.
- Die Ergebnisse der untersuchten neuronalen Steuerungen liegen in Bezug auf die Steigerung der Effizienz der Rauchgasneutralisationsanlage ebenfalls signifikant über den Referenzdaten, jedoch unter den Werten der Fuzzy-Expert-Controller.

Dies entspricht der Annahme, daß dann, wenn ein konsistentes Modell (z.B. stöchiometrisches Modell bei der Rauchgasreinigung) einer Steuerungsaufgabe er-

stellt werden kann, regelbasierte Ansätze einer Auswertung impliziten Wissens im allgemeinen überlegen sind. Ist es jedoch aufgrund der Komplexität der Problemstellung nicht bzw. nicht mit vertretbarem Aufwand möglich, explizite Regeln anzugeben, empfiehlt sich der Einsatz von Mustererkennungsverfahren, wie z.B. Neuronaler Netze.

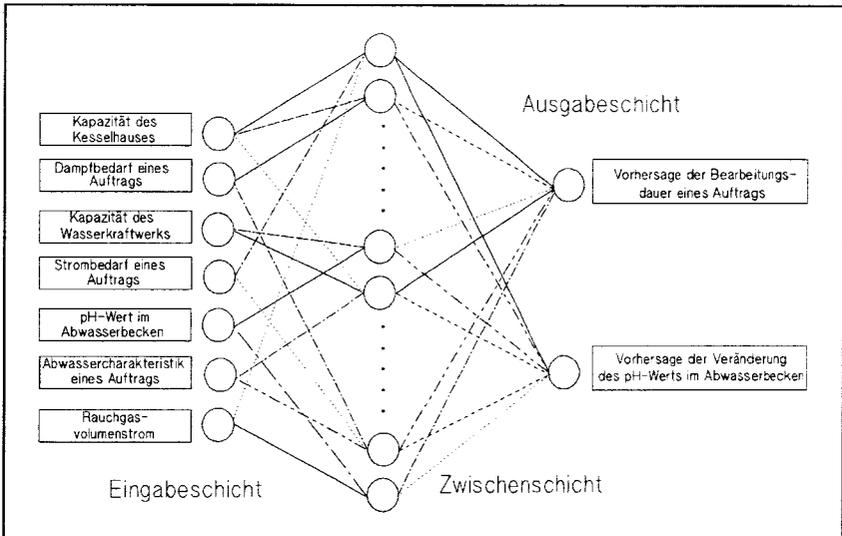


Abbildung 22

Struktur eines Neuronalen Netzes zur umweltschutzorientierten Feinsteuerung

### 3.2.2.3 Umweltschutzorientierte Feinsteuerung auf der Basis von Neuro-Fuzzy-Systemen

Um die Vorteile regelbasierter Systeme (Möglichkeit zur Formulierung expliziter Regeln) und Methoden des Maschinellen Lernens (Fähigkeit zur Auswertung impliziten Wissens) zu verbinden, können Neuro-Fuzzy-Systeme eingesetzt werden. Hierbei empfiehlt es sich, von der Regelstruktur eines Fuzzy-Expert-Contollers auszugehen und diejenigen Regelblöcke, für die kein hinreichendes Modell existiert, auf der Basis einer Auswertung impliziten Wissens zu adaptieren. Unter Neuro-Fuzzy-Systemen werden Systeme verstanden, die sowohl als fuzzyfiziertes Expertensystem als auch als Neuronales Netz interpretiert werden können (vergleiche Abbildungen 22-24). Das heißt, daß in einem Neuro-Fuzzy-System alle Regeln des zugrundeliegenden fuzzyfizierten Expertensystems als eigenständige, lokale Wissens-elemente

implementiert werden können (Berenji 1990, Ichihashi 1992, Tuma/Haasis/Rentz 1993a, Tuma/Haasis/Rentz 1993b). Das Wissen ist also nicht, wie in konnektionistischen Ansätzen (z.B. Neuronalen Netzen) üblich, im gesamten System verteilt. Dies bedeutet eine Einschränkung der Freiheitsgrade im Verhältnis zu "klassischen" Neuronalen Netzen, ermöglicht jedoch die Integration von Regelwissen entsprechender Experten analog zu wissensbasierten Systemen. Auf der anderen Seite kann ein Neuro-Fuzzy-System als partiell vernetztes Neuronales Netz interpretiert werden. Eine Regel kann beispielsweise durch zwei Schichten von Netzwerkknoten dargestellt werden. Die erste Schicht steht für die Prämissen, die zweite für die Hypothesen einer Regel. Die Verbindungen zwischen den einzelnen Knoten (zu lernende Gewichte) können z.B. als Aggregationsoperatoren (Kanten zwischen Prämissen und Hypothesen) oder Plausibilitätswerte (Kanten zwischen Hypothesen und Prämissen einer nachfolgenden Regel) interpretiert werden. Auf diese Weise können etwa die oftmals schwierig zu bestimmenden Plausibilitätsfaktoren analog zu Neuronalen Netzen anhand von Beispieldaten justiert werden.

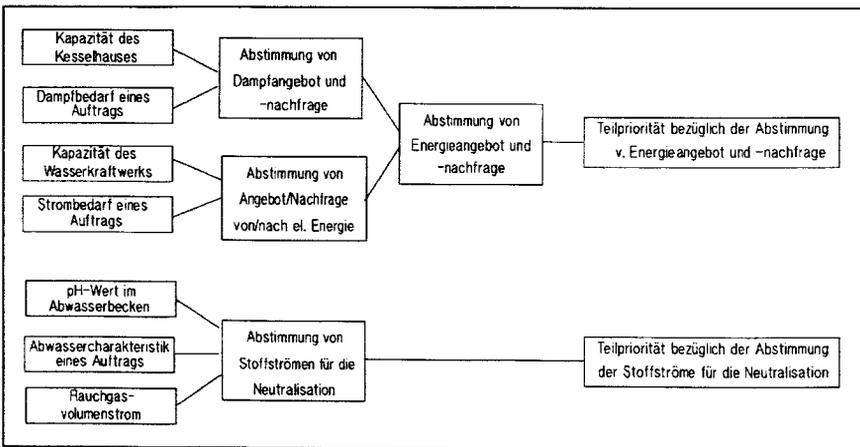


Abbildung 23

Interpretation eines Neuro-Fuzzy-Systems als Fuzzy-Expert-Controller

Abbildung 24 zeigt die Struktur des zur Abstimmung von Stoff- und Energieströmen entwickelten Neuro-Fuzzy-Systems (Tuma/Haasis/Rentz 1994a, Tuma/Haasis/Rentz 1994b, Tuma/Haasis/Rentz 1994c). Input- und Outputvariablen des Neuro-Fuzzy-Systems sind analog zu denen der entwickelten Neuronalen Netze.

Inputvariablen des Neuro-Fuzzy-Systems sind analog zu den Fuzzy-Expert-Controllern und Neuronalen Netzen:

- verfügbare Leistung des Kesselhauses,
- Dampfbedarf einer Partie bzw. eines Färbeverfahrens,
- verfügbare Leistung des Wasserkraftwerkes,
- Strombedarf einer Partie bzw. eines Färbeverfahrens,
- pH-Wert im Abwasserbecken,
- Abwassercharakteristik einer Partie,
- verfügbarer Rauchgasvolumenstrom.

Auf der Grundlage dieser Parameter werden bei jeder Einplanungsentscheidung für alle Kombinationen potentiell einplanbarer Parteien und einsetzbarer Färbeverfahren analog zu den untersuchten Neuronalen Netzen die

- Bearbeitungs- und Wartezeiten einer Partie und
- Veränderung des pH-Wertes im Abwasserbecken

projiziert.

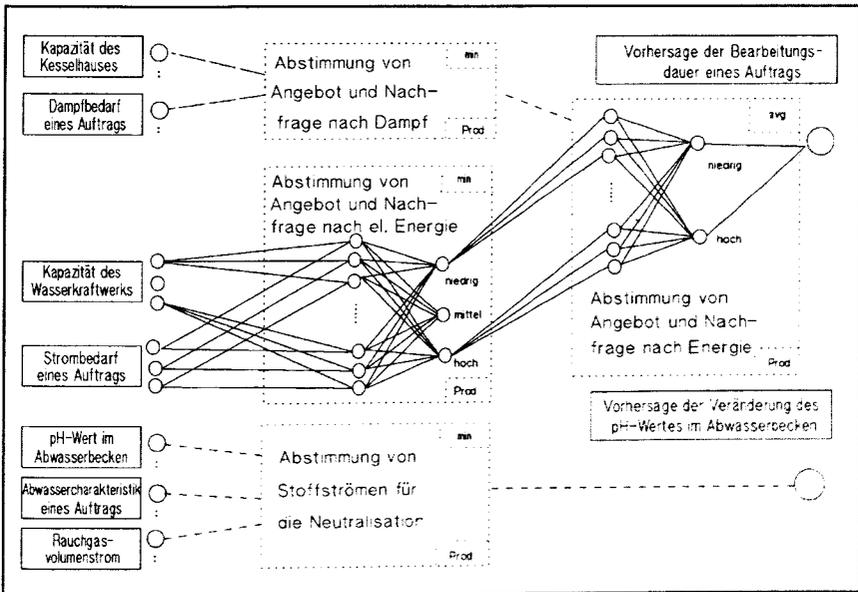


Abbildung 24

Struktur eines Neuro-Fuzzy-Systems zur umweltschutzorientierten Feinstuerung

Die Anzahl der Inputneuronen des Neuronalen Netzes entspricht der Anzahl der Terme der Inputvariablen des korrespondierenden FEC. Die Anzahl der Prozebelemente in den Zwischenschichten des Neuronalen Netzes ist eine Funktion der Terme der linguistischen Variablen der einzelnen Regelblöcke. Sie entspricht der Summe aus dem Produkt der Terme der linguistischen Variablen der Prämissen und den Hypothesen der einzelnen Regelblöcke.

Die Beschreibung der Struktur eines Regelblockes im korrespondierenden Neuronalen Netzwerk erfolgt in zwei Stufen und umfaßt zwei Schichten:

- Zunächst wird für jede Kombination von Inputparametern (Prämissen) einer Regel, die im weiteren durch einen Aggregationsoperator zusammengefaßt werden, ein Prozebelement definiert<sup>4</sup>.
- In einem zweiten Schritt wird in einer darauffolgenden Schicht des Neuronalen Netzes für jede Hypothese ein weiteres Neuron eingeführt.

Die Prozebelemente der ersten Schicht eines Regelblockes sind mit den entsprechenden Termen der vorgelagerten Stufe verbunden. Ferner sind die Hypothesen einer Regel mit allen Regelrümpfen (Prämissen) des jeweiligen Regelblockes verknüpft. Diese Verbindungen stellen die zu lernenden Plausibilitäten des Neuro-Fuzzy-Systems dar und sind eindeutig interpretierbar. Entsprechend ergeben sich im untersuchten Neuro-Fuzzy-System 108 potentiell adaptierbare Verbindungen (Abbildung 25).

---

<sup>4</sup> Die Anzahl der entsprechenden Neuronen ergibt sich aus dem Produkt der Terme der linguistischen Variablen der Prämissen. Diese Neuronen befinden sich im Neuronalen Netz auf der gleichen Ebene (Schicht).



Interpretation als Neuronales Netz <sup>5</sup>		Interpretation als Fuzzy-Expert-Controller	
<b>Eingabeschicht</b>		<b>Inputschnittstelle</b>	
Eingabeparameter	Werte der Inputvariablen	Eingabeparameter	Werte der Inputvariablen
Transferfunktion	Sigmoide Funktion	Membershipfunktionen der Terme der Inputvariablen	sigmoide Funktionen
<b>1. Zwischenschicht</b>		<b>Regelblöcke (1. Stufe) Prämissen</b>	
Eingabefunktion	Minimum-Funktion	Aggregations-Operator	Minimum-Operator
Transferfunktion	Identische Abbildung		
<b>2. Zwischenschicht</b>		<b>Regelblöcke (1. Stufe) Hypothesen</b>	
Eingabefunktion	Maximum-Funktion	Compositions-Operator	Max./Prod.-Inferenz
Transferfunktion	Identische Abbildung		
<b>3. Zwischenschicht</b>		<b>Regelblöcke (2. Stufe) Prämissen</b>	
Eingabefunktion	Minimum-Funktion	Aggregationsoperator	Minimum-Operator
Transferfunktion	Identische Abbildung		
<b>4. Zwischenschicht</b>		<b>Regelblöcke (2. Stufe) Hypothesen</b>	
Eingabefunktion	Maximum-Funktion	Compositionsoperator	Max./Prod.-Inferenz
Transferfunktion	Identische Abbildung		
<b>Ausgabeschicht</b>		<b>Outputschnittstellen</b>	
Eingabefunktion	Average-Operator	Defuzzifikationsmethode	Center of Moment
Transferfunktion	Identische Abbildung		

Tabelle 1  
Interpretation des Neuro-Fuzzy-Systems als FEC und Neuronales Netz

<sup>5</sup> Als Outputfunktion wird für alle Prozeßelemente die identische Abbildung verwandt.

Neben der Festlegung der Struktur des Neuro-Fuzzy-Systems sind die innere Architektur der einzelnen Prozebelemente (Eingabe-, Transfer- und Outputfunktion) bzw. dessen Interpretation im korrespondierenden Fuzzy-Expert-Controller zu präzisieren (Tabelle 1).

Tabelle 2 zeigt die Definition bzw. die Interpretation der Verbindungen bzw. Gewichte zwischen den Prozebelementen.

Inputebene	Outputebene	Typ der Verbindung	Interpretation im FEC
Eingabeschicht	1. Zwischenschicht	Fix	Minimum-Operator (Aggregationsoperator)
1. Zwischenschicht	2. Zwischenschicht	Variable	zu lernende Plausibilitäten (1. Stufe des Compositionsoperators)
2. Zwischenschicht	3. Zwischenschicht	Fix	Minimum-Operator (Aggregationsoperator)
3. Zwischenschicht	4. Zwischenschicht	Variable	zu lernende Plausibilitäten (1. Stufe des Compositionsoperators)
4. Zwischenschicht	Ausgabeschicht	Fix	Maxima der Zugehörigkeitsfunktionen der Outputvariablen (Defuzzifikation nach COM-Verfahren)

Tabelle 2  
Interpretation der Gewichte im Neuro-Fuzzy-System

Die Adaption der Gewichtungsfaktoren der einzelnen Regeln umfaßt zwei Stufen:

- In einem ersten Schritt werden die Gewichtungsfaktoren maschinell auf der Basis der Lerndaten des Neuronalen Netzes vorjustiert (Abbildung 26, Graph 5 bzw. 6).
- In einem zweiten Schritt werden die als Plausibilitätswerte des Neuronalen Netzes interpretierbaren Gewichte derjenigen Regelblöcke, für die ein konsistentes Modell besteht (z.B. Steuerung der Stoffströme für die Neutralisationsanlage), manuell nachjustiert (Abbildung 26, Graph 7 bzw. 8).

Dieses Vorgehen verbindet die Fähigkeit von Experten, ein konsistentes Modell für eine begrenzte Planungs- oder Steuerungsaufgabe zu entwickeln, mit den Möglichkeiten von Methoden des Maschinellen Lernens, implizites Wissen auszuwerten. Dies ist besonders in Gebieten mit unterschiedlich strukturiertem Wissen vorteilhaft.

welches etwa bei der Abstimmung von Stoff- und Energieflüssen unter Berücksichtigung umweltschutzorientierter und betriebswirtschaftlicher Zielkriterien auftritt.

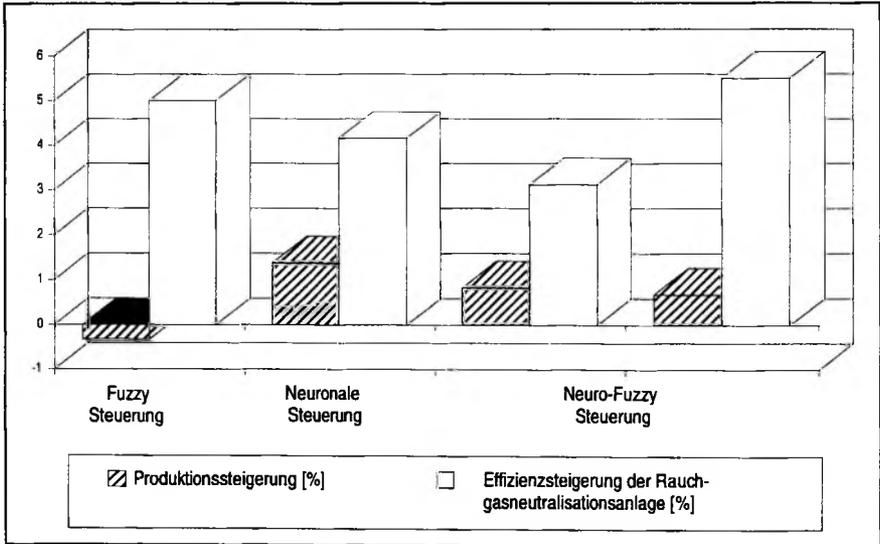


Abbildung 25

Vergleich verschiedener Verfahren zur umweltschutzorientierten Feinsteuerung

## Literaturverzeichnis

- Adam, N. R./Surkis, J. (1980): Priority Update Intervals and Anomalies in Dynamic Ratio Type Job Shop Scheduling Rules, in: *Management Science*, 26(1980)12, pp. 1227-1237.
- Alvares-Valdes Olaguibel, R.; Tamarit Goerlich, J.M (1989): Heuristic Algorithms for Resource-Constraint Project Scheduling, in: Slowinski, R./Weglarz, J.: *Advances in Project Scheduling*, Amsterdam, pp. 113-134.
- Anderson, J. A./Rosenfeld, E. (1988): *Neurocomputing: Foundations of Research*. MIT Press, Cambridge MA, USA.
- Bechte, W. (1984): Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung, in: *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 70*, Düsseldorf.
- Berenji, H. (1990): Neural Networks and Fuzzy Logic in Intelligent Control, in: *5th IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Vol. 2, 1990, pp. 916-920.
- Chin-Teng, L./Lee, C. S. G. (1991): Neural-Network-Based Fuzzy-Logic Control and Decision System. *IEEE Transactions on Computers*, 40(1991)12.
- Davis, E. W./Patterson, J. H. (1975): A Comparison of Heuristics and Optimal Solution in Resource-Constraint Project Scheduling, in: *Management Science* 21(1975)8, pp. 944-955.
- Domany, E. (1988): Neural Networks: A Biased Overview, in: *Journal of Statistical Physics*, 51(1988)5.
- Eckmiller, R./Hartmann, G./Hauske, G. (1991): *Parallel Processing in Neural Systems and Computers*. Elsevier Science, Amsterdam.
- Franke, St./Tuma, A./Haasis, H.-D. (1998): Entwicklung umweltschutzorientierter Produktionsleitstände auf Basis eines belastungsorientierten Kaskadenreglers, in: Bullinger, H.-J. et al. (Hrsg.): *Betriebliche Umweltinformationssysteme in Produktion und Logistik*, S. 153-169, Marburg.
- Glaser, H./Geiger, W./Rohde, V. (1992): *PPS - Produktionsplanung und -steuerung - Grundlagen - Konzepte - Anwendungen*, 2. Aufl., Wiesbaden.
- Grossberg, S. (1988): *Neural Networks and Natural Intelligence*. MIT Press, Cambridge MA, USA.
- Haasis, H.-D. (1996): *Betriebliche Umweltökonomie, Bewerten - Optimieren - Entscheiden*, Berlin et al.
- Haasis, H.-D. (1998): Umweltorientierte Produktionsplanung und -steuerung (UPPS), in: Wildemann, H. (Hrsg.): *Innovationen in der Produktionswirtschaft – Produkte, Prozesse, Planung und Steuerung*, München, S. 115-132.
- Hahn, D. (1989): *Prozeßwirtschaft – Grundlegung*, in: Hahn, D.; Laßmann, G. (Hrsg.): *Produktionswirtschaft - Controlling industrieller Produktion*, Bd. 2, Heidelberg.
- Hauk, W. (1973): *Einplanung von Produktionsaufträgen nach Prioritätsregeln*, Berlin.
- Haupt, R. (1989): A Survey of Priority Rule-Based Scheduling, in: *OR Spektrum*, (1989)11, S. 3-16.
- Hauser et al. (1995): Schließung von Stoffkreisläufen und Automatisierung von galvanotech-

nischen Prozeßstufen. Schlußbericht BMBF-Vorhaben 01ZH915A/8.

- Ichihashi, H. (1992): Fuzzy Systems - Optimisation by Neuro-like Fuzzy Model, Proceedings of the Joint Japanese-European Symposium on Fuzzy Systems, Berlin.
- Kettner, H./Schmidt, J./Greim, H-R. (1984): Leitfaden der systematischen Betriebsplanung, München et al.
- Kosko, B. (1992): Neural Networks and Fuzzy Systems - A Dynamic System Approach to Machine Intelligence. Prentice-Hall International, London et al.
- Kurtulus, I./Davis, E. W. (1982): Multi-Project Scheduling, in: Management Science, 28 (1982)2, pp. 161-172.
- Kurtulus, I./Narula, S. (1985): Multi-Project Scheduling, in: IIE Transcript 17(1985)1, pp. 58-65.
- Mertens, P. (1977): Die Theorie der Mustererkennung in der Wirtschaftstheorie, in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 29(1977)12, S. 777-783.
- Rumelhardt, D. E./McClelland, J. L. et al. (1987): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1 and 2, MIT Press, Cambridge MA, USA.
- Schöneburg, E./Hansen, N./Gawelczyk, A. (1990): Neuronale Netzwerke, München.
- Schweitzer, M. (1990): Industriebetriebslehre, München.
- Stadtler, H./Wilhelm, St./Becker, M. (1995): Entwicklung des Einsatzes von Fertigungsleitständen in der Industrie, in: Management & Computer 3(1995)4, S. 253-266.
- Tuma, A./Haasis, H.-D./Rentz, O. (1993a): Entwicklung emissionsorientierter Produktionsabstimmungsmechanismen auf der Basis von fuzzyfizierten Expertensystemen und Neuronalen Netzen, in: Proceedings des 7. Symposiums Informatik für den Umweltschutz, Ulm.
- Tuma, A./Haasis, H.-D./Rentz, O. (1993b): Emission Oriented Production Control Strategies Based on Fuzzy Expert Systems, Neural Networks and Neuro-Fuzzy Approaches, in: International Joint Conference on Neural Networks 93, Nagoya, Japan.
- Tuma, A. (1994): Entwicklung emissionsorientierter Methoden zur Abstimmung von Stoff- und Energieströmen auf der Basis von fuzzyfizierten Expertensystemen, Neuronalen Netzen und Neuro-Fuzzy-Ansätzen - dargestellt am Anwendungsbeispiel der Produktionssteuerung in einer Färberei der Textilindustrie, Frankfurt am Main.
- Tuma, A./Haasis, H.-D./Rentz, O. (1994a): Development of Emission Oriented Production Control Strategies Based on Fuzzy Expert Systems, Neural Networks and Neuro-Fuzzy-Approaches, in: Proceedings der 22. Jahrestagung der DGOR, Berlin et al.
- Tuma, A./Haasis, H.-D./Rentz, O. (1994b): A Comparison of Fuzzy Expert Systems, Neural Networks and Neuro-Fuzzy Approaches Controlling Energy and Material Flows, in: Ecological Modelling, Amsterdam.
- Tuma, A./Haasis, H.-D./Rentz, O. (1994c): Entwicklung emissionsorientierter Produktionsabstimmungsmechanismen auf der Basis von Fuzzy-Expert-Controllern, Neuronalen Netzen und Neuro-Fuzzy-Ansätzen. In: Information Management.
- Tuma, A./Haasis, H.-D./Rentz, O. (1996): A Comparison of Fuzzy Expert Systems, Neural Networks and Neuro-Fuzzy-Approaches Controlling Energy and Material Flows, in:

Ecological Modelling, 85(1996)1, S. 93-98.

VDI (1983): Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung, Düsseldorf.

Wagner, G. R. (1997): Betriebswirtschaftliche Umweltökonomie, Stuttgart.

Wiendahl, H.-P. (1997): Fertigungsregelung – Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells, München.

Wildemann, H. (1997): Logistik Prozeßmanagement, München.

Witte, T. (1988): Fallstudie zur Fertigungssteuerung mit Prioritätsregeln, in: Adam, D.: Fertigungssteuerung II., Wiesbaden.

Zäpfel, G. (1989): Produktionswirtschaft – Operatives Produktions-Management, Berlin et al.

Zäpfel, G. (1993): Produktionsplanung und -steuerung in der „Fabrik der Zukunft“, in: Milling, P./Zäpfel, G. (Hrsg.): Betriebswirtschaftliche Grundlagen moderner Produktionsstrukturen, Herne u. a.

Zimmermann, H. J. (1991): Fuzzy Set Theory and its Applications. Kluwer Academic Publishers, Boston et al.