

# Entwicklung umweltschutzorientierter Produktionsleitstände auf der Basis eines belastungsorientierten Kaskadenreglers

Stefan Franke, Axel Tuma, Hans-Dietrich Haasis<sup>1</sup>

## 1 Motivation

Zur Umsetzung eines integrierten Umweltschutzes ist es von herausragender 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 genutzt und durch den Produktionsprozeß entstehende Emissionen aller Art, soweit dies technisch möglich ist, vermieden bzw. vermindert werden [Haasis 1996, Tuma 1994].

In derzeit eingesetzten Produktionsleitständen werden i. allg. nur betriebswirtschaftliche Zielsetzungen berücksichtigt. Notwendig erscheint daher eine Entwicklung umweltschutzorientierter Produktionsleitstände [Tuma/Haasis/Rentz 1996]. Aufgaben solcher Systeme sind insbesondere die Terminierung der Produktionsaufträge, die Auswahl der einzusetzenden Produktionsverfahren sowie die Festlegung der Betriebsweise der einzelnen Aggregate unter Berücksichtigung betriebswirtschaftlicher und umweltschutzorientierter Kriterien. Aus bisherigen Erfahrungen in Pilotprojekten zeigt sich, daß die Integration umweltschutzorientierter Zielsetzungen (z. B. Schaffung von Stoffkreisläufen, Steigerung des Aufarbeitungspotentials, Reduktion von Abwasserfrachten, Abfallmengen und Emissionen) nicht notwendigerweise zu höheren Kosten oder einer weniger effizienten Produktion führen muß [Haasis/Tuma/Franke 1997, Tuma 1994]. Etwa im Bereich der Oberflächenbeschichtung kann der Einsatz umweltschutzorientierter

---

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Produktionswirtschaft und Industriebetriebslehre, Universität Bremen, Postfach 33 04 40, D-28334 Bremen

Produktionsleitstände durch die Verminderung des Ressourceneinsatzes sowie der Abwasser- und Abfallmengen zu einer deutlichen Reduktion der Kosten führen [Haasis 1996]. Dies gewährleistet eine entsprechende Akzeptanz beim Nutzer und stellt eine Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung eines integrierten Umweltschutzes dar.

Die Konzeption umweltschutzorientierter Produktionsleitstände erfordert eine Erweiterung der Informationsarchitektur bestehender Leitstandskonzepte. Dies umfaßt neben der Bereitstellung von Informationen bezüglich aller umweltschutzrelevanten Aspekte der Produktion

- die Definition neuer bzw. Erweiterung bestehender Aufgaben zur gemeinsamen Berücksichtigung betriebswirtschaftlicher und umweltschutzorientierter Ziele und
- die Modellierung der zeitlich-logischen Zusammenhänge zwischen diesen Aufgaben bzw. Teilaufgaben.

## **2 Aufgaben- und Prozeßmodell eines umweltschutzorientierten Produktionsleitstandes**

Produktionsleitstände stellen ein wesentliches Element zur Umsetzung einer dezentralen Produktionsplanung und -steuerung dar [Scheer 1995, Kurbel 1995]. Nach [Zäpfel 1993] sind dezentrale PPS-Systeme dadurch gekennzeichnet, daß den durchführenden Produktionsstellen neben Steuerungs- auch bereichsbezogene Planungsaufgaben übertragen werden. Daraus ergeben sich folgende Hauptaufgaben dezentraler Planungsstellen (Produktionsleitstände):

- kurzfristige Termin- und Kapazitätsplanung,
- Feinsteuerung,
- Automatisierung/Betriebsdatenerfassung (BDE).

Aufbauend auf dieser Systematik kann ein Aufgabenmodell eines umweltschutzorientierten Produktionsleitstandes gemäß Abbildung 1 aufgebaut werden.

<p><b>Kurzfristige Termin- und Kapazitätsplanung</b> (inkl. Entsorgungs- und Aufbereitungskapazitäten)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auftragsüberprüfung (Übernahme von Variantenarbeitsplänen und -stücklisten)</li> <li>• Verfügbarkeitsprüfung (inkl. Sekundärrohstoffe)</li> <li>• Kapazitätsabgleich (z.B. Vermeidung von Energiebedarfsspitzen)</li> <li>• Reservierung</li> </ul>	<p><b>Querschnittsaufgaben</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grunddatenverwaltung</li> <li>• Variantestücklisten, Variantenarbeitspläne</li> <li>• Ressourcen (inkl. Entsorgungs- und Aufbereitungskapazitäten)</li> <li>• Datenanalyse</li> <li>• Qualitätssicherung (inkl. Einhaltung von Umweltstandards)</li> </ul>
<p><b>Feinsteuerung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verfügbarkeitsprüfung</li> <li>• Auftrags einlastung (emissions-/ressourcenorientierte Auftragsallokation) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verfahrensauswahl</li> <li>• Aggregateauswahl/Maschinenbelegung</li> </ul> </li> <li>• Intensitätssteuerung (Vermeidung von Belastungsspitzen)</li> </ul>	
<p><b>Automatisierung/BDE</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aggregatesteuerung</li> <li>• Lager- und Transportsteuerung (inkl. Altprodukt- und Sekundärrohstofflager)</li> <li>• Stoff- und Energiebilanzierung</li> <li>• Arbeitsgangrückmeldung</li> <li>• Lagerbewegungen</li> <li>• Störungen</li> </ul>	

Abb. 1: Aufgabenmodell eines umweltschutzorientierten Produktionsleitstandes

Zentrale Aufgabe auf Leitstandsebene ist die Umsetzung einer ressourcenschonenden und emissionsarmen Produktion. Dies umfaßt eine kurzfristige Termin- und Kapazitätsplanung, die die Einhaltung von Umweltstandards gewährleistet, eine Abstimmung interner und externer Ressourcen (z. B. Nutzung von Abwärme) sowie eine emissionsorientierte und ressourcenschonende Fahrweise von Aggregaten.

Zur weiteren Präzisierung eines umweltschutzorientierten Leitstandes empfiehlt sich die Darstellung in Form eines Prozeßmodells [Scheer 1995, Wildemann 1997]. Hierbei werden etwa die in Abbildung 1 spezifizierten Aufgaben zu Prozessen (Abläufen) angeordnet. Durch die Abbildung von Geschäftsprozessen werden die durch einen umweltschutzorientierten Produktionsleitstand auszuführenden Aufgaben bzw. deren zeitlich-logische Interdependenzen bestimmt (Abbildung 2).

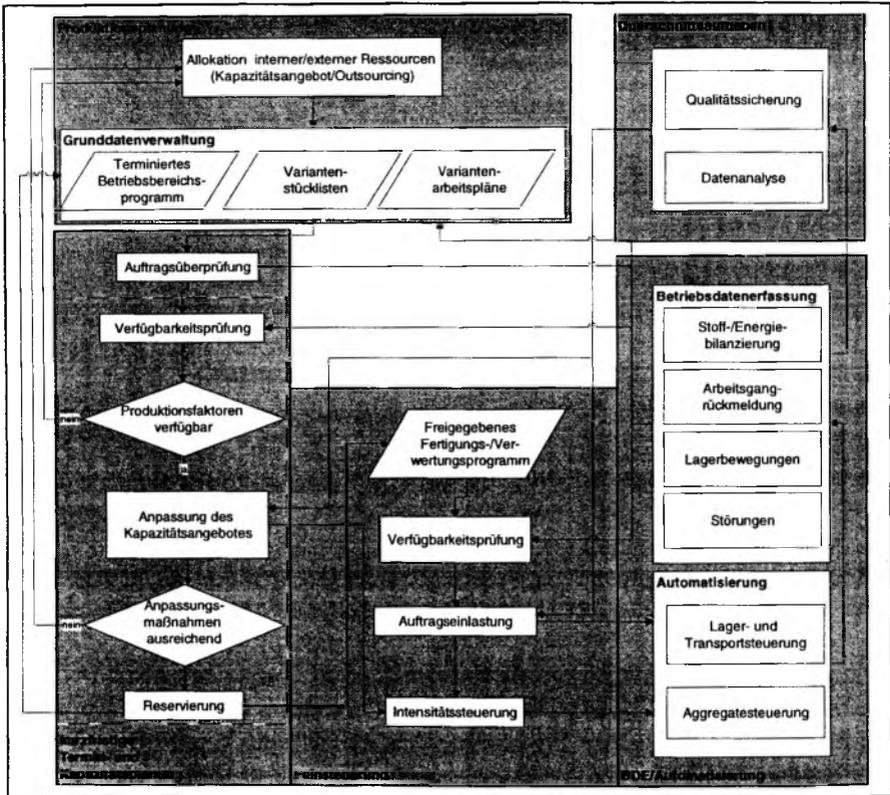


Abb. 2.: Exemplarisches Prozeßmodell eines Leitstandes (vgl. [Hornung et al. 1996])

Auf Ebene der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung werden folgende Funktionen durchgeführt:

- Auftragsüberprüfung: Diese Funktion bildet eine Schnittstelle zur übergeordneten Produktionsplanung. Hier wird für einen vorgegebenen Planungshorizont das für den Betriebsbereich relevante Produktionsprogramm einschließlich der Referenzen zu Stücklisten und Arbeitsplänen übernommen.
- Verfügbarkeitsprüfung und Kapazitätsanpassung: Basierend auf dem vorgegebenen Produktionsprogramm, den Stücklisten und den Arbeitsplänen wird überprüft, ob die benötigten Produktionsfaktoren in ausreichender Menge

zum benötigten Zeitpunkt zur Verfügung stehen. Aus umweltschutzorientierter Sicht ist hierbei etwa auch die Verfügbarkeit von

- Sekundärrohstoffen,
- umweltverträglichen Hilfs- und Betriebsstoffen,
- Kapazitäten von Aufbereitungs- und Entsorgungseinrichtungen bzw. von Lagerstätten für Abfallstoffe sowie von
- Personal mit entsprechender Qualifikation in den Bereichen Arbeitssicherheit und Umweltschutz

zu überprüfen.

Falls Kapazitätsangebot und -nachfrage differieren, sind entsprechende Anpassungsmaßnahmen durchzuführen. Bezüglich des Kapazitätsangebotes besteht die Möglichkeit der zeitlichen (Überstunden, Zusatzschichten), intensitätsmäßigen und/oder quantitativen (Nutzung zusätzlicher externer Aufbereitungs- und Entsorgungskapazitäten) Anpassung. Zeitliche Anpassungsmaßnahmen können auch mit dem Ziel der Vermeidung von Emissionsspitzen durchgeführt werden. Falls Anpassungsmaßnahmen des Kapazitätsangebotes, etwa auch aus umweltschutzorientierten Gründen nicht ausreichen, können auch entsprechende Maßnahmen bezüglich der Kapazitätsnachfrage realisiert werden. Dies bedeutet, daß in Abhängigkeit des Autonomiegrades des Leitstandes auch Fertigungsaufträge an die übergeordneten Planungsinstanzen zurückverwiesen oder fremdvergeben werden.

- Reservierung: Nach Durchführung der Verfügbarkeitsprüfung und der Kapazitätsanpassung sind die für die Durchführung des Produktionsprogramms benötigten Kapazitäten und Ressourcen zu reservieren.

An die kurzfristige Termin- und Kapazitätsplanung schließt sich die Ebene der Feinststeuerung an. Hierbei sind im Zuge einer umweltschutzorientierten Erweiterung folgende Funktionen zu berücksichtigen:

- Auftragseinlastung: Aufgabe der Auftragseinlastung ist die zeitliche Zuordnung der Fertigungsaufträge bzw. Arbeitsgänge zu den Arbeitsplätzen und Aggregaten. Dies umfaßt insbesondere auch eine Auswahl der einzusetzenden Produktionsverfahren. Umweltschutzorientierte Zielsetzungen bei dieser Funktion sind beispielsweise die Vermeidung von Liege- und Umrüstemis-

sionen, die Abstimmung von Stoffströmen (etwa bei Neutralisationsprozessen) sowie die Vermeidung von auslastungsbedingten Emissionen.

- Intensitätssteuerung: Aufgabe der Intensitätssteuerung ist der Ausgleich stochastischer Schwankungen bezüglich des Kapazitäts- und Ressourcenangebotes. Prinzipielles Ziel ist eine emissions- bzw. ressourcenoptimale Fahrweise der einzelnen Aggregate. Zur Erreichung betriebswirtschaftlicher Ziele (z. B. Durchführung des gegebenen Produktionsprogramms) kann es erforderlich werden, kurzfristig den optimalen Betriebspunkt zu verlassen. Zur Ermittlung eines geeigneten Betriebspunktes sind hierbei die in Abhängigkeit des Verschleißzustandes und der Nutzungsintensität anfallenden Abfälle, Emissionen und Ressourcenverbräuche zu berücksichtigen. Die hierfür notwendigen Informationen (Verbrauchsfunktionen, Emissionsfunktionen, Verschleißzustand) werden der Arbeitsplandatei bzw. der Betriebsmitteldatei entnommen.

Auf Automatisierungs- und BDE-Ebene werden folgende umweltschutzorientierte Erweiterungen vorgesehen:

- Stoff- und Energiebilanzierung: Aufgabe der Stoff- und Energiebilanzierung ist die systematische Erfassung aller umweltrelevanten Stoff- und Energieströme. Damit schafft sie die Voraussetzung für eine umweltschutzorientierte Gestaltung von Produktionsprozessen insbesondere auf taktischer (z. B. Entscheidung über Eigen- bzw. Fremdfertigung) und operativer Ebene (z. B. ressourcen- und emissionsorientierte Auftragseinplanung).
- Arbeitsgangrückmeldung: Neben der Fertigstellung der einzelnen Aufträge sind hier die mit dem Leistungserstellungsprozeß verbundenen Emissions-, Abwasser- und Abfallmengen zurückzumelden.
- Lagerbewegungen: Ziel dieser Funktion ist neben der Erfassung der Bestände an Hilfs-, Roh-, Betriebsstoffen und Produkten die Dokumentation der Rest-, Abfall- und Gefahrstoffe. Besonderer Überwachung bedürfen hierbei die Gefahrstofflager.
- Störungen: In diesem Zusammenhang kann prinzipiell in dispositions-, personal-, betriebsmittel- und materialbedingte Störungen unterschieden werden. Von besonderer Bedeutung aus umweltschutzorientierter Sicht sind hierbei betriebsmittelbedingte Störungen, wie etwa Ausfälle von Aufbearbeitungskapazitäten und materialbedingte Störungen (z. B. fehlende Sekundärrohstoffe).

- Lager- und Transportsteuerung: Aufgabe der Lager- und Transportsteuerung ist die Realisierung eines emissionseffizienten innerbetrieblichen Transportes. Dies umfaßt eine entsprechende Transporteinsatz- und Routenplanung.
- Aggregatesteuerung: Aufbauend auf den Vorgaben der Intensitätssteuerung werden hier die Vorgaben für die Automatisierungsebene generiert. Dies umfaßt insbesondere die Gewährleistung aggregatebezogener Grenzwerte.

Neben den skizzierten Hauptaufgaben eines umweltschutzorientierten Produktionsleitstandes sind aus umweltschutzorientierter Sicht vor allem folgende Querschnittsaufgaben zu berücksichtigen:

- Qualitätssicherung: Die Erweiterung der Funktionen der Qualitätssicherung bezieht sich auf die Gewährleistung der Einhaltung von Umweltnormen und umweltschutzrelevanten Betriebsvereinbarungen (DIN/ISO 14000 ff.).
- Datenanalyse: Besondere Bedeutung im Rahmen einer umweltschutzorientierten Erweiterung von Produktionsleitständen kommt der Datenanalyse zu. Eine ihrer Funktionen ist die Interpretation umweltrelevanter Daten (z. B. Ermittlung des Badzustandes von galvanischen Bädern basierend auf gemessenen Sensordaten wie etwa Kupferkonzentration, Temperatur, Dichte etc.). Damit schafft die Datenanalyse die Voraussetzungen für eine umweltschutzorientierte Auftragseinlastung und Intensitätssteuerung.

### **3 Darstellung des Produktionsleitstandes als regelungstechnisches Modell**

Die in Abbildung 2 skizzierten Abläufe auf Leitstandsebene sind gemäß der Darstellungsform von Prozeßmodellen weitgehend als sequentielle Prozesse abgebildet. Faktisch stellen diese Abläufe jedoch ein System vermaschter Regelkreise dar [Zäpfel 1989]. Abbildung 3 zeigt eine entsprechende Transformation wesentlicher Elemente des beschriebenen Prozeßmodells in ein regelungstechnisches Modell. Hierbei stellen die Führungsgrößen Sollwerte in Form des erforderlichen Kapazitätsbedarfs bzw. der benötigten Intensitäten zur Realisierung des gegebenen Betriebsbereichsprogramms dar.

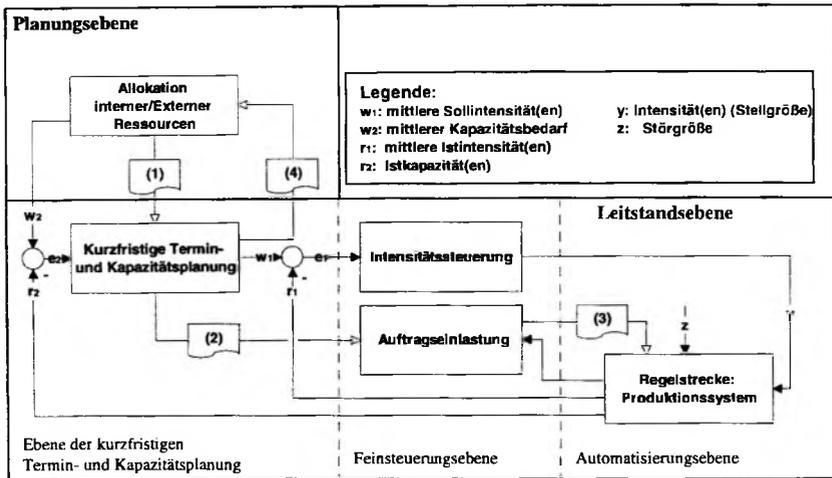


Abb. 3: Regelungstechnisches Modell eines Produktionsleitstandes

Neben dem Kapazitätsbedarf erhält die kurzfristige Termin und Kapazitätsplanung von der übergeordneten Planungsebene das für den Planungshorizont relevante Betriebsbereichsprogramm in Form einer terminierten Auftragsliste (1). Basierend auf diesen Informationen sowie den realisierten Istkapazitäten werden mittlere Sollintensitäten für die Intensitätssteuerung berechnet. Des Weiteren werden entsprechend der Kapazitätssituation die im Planungszeitraum zu fertigenden Aufträge (2) an die Auftragseinlastung übergeben. Ist eine Anpassung des Kapazitätsangebotes nicht ausreichend, wird eine Anpassung der Kapazitätsnachfrage durch Rückgabe von Fertigungsaufträgen (4) durchgeführt. Um auf Schwankungen des Produktionsprozesses entsprechend reagieren zu können, wird die kurzfristige Termin- und Kapazitätsplanung rollierend durchgeführt.

Wesentliche Teilprozesse auf Feinsteuerungsebene sind die Intensitätssteuerung sowie die Auftragseinlastung. Aufgabe der Intensitätssteuerung ist es, auf Basis der vorgegebenen Sollintensitäten sowie der vom Produktionssystem zurückgemeldeten Istintensitäten stochastische Schwankungen im Produktionsablauf, soweit möglich, kurzfristig auszugleichen. Aufgabe der Auftragseinlastung ist es, Aufträge bzw. Arbeitsgänge (3) aus der vorgegebenen Liste „online“ den Bearbeitungsstationen zuzuweisen. Dies kann auch die Auswahl des einzusetzenden Fertigungsverfahrens beinhalten.

## **4 Präzisierung des Konzeptes eines umweltschutzorientierten Produktionsleitstandes**

Eine weitere Präzisierung der in Abbildung 2 skizzierten Teilmodelle „Kurzfristige Termin- und Kapazitätsplanung“ und „Feinsteuerung“ muß in Abhängigkeit der zugrundeliegenden Fertigungsorganisation geschehen. Unterstellt man ein Produktionssystem, daß durch eine Serienproduktion und eine Organisation nach dem Verrichtungsprinzip (Werkstattfertigung) gekennzeichnet ist (vgl. das im folgenden skizzierte Anwendungsbeispiel), erscheint im Rahmen der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung das Prinzip der belastungsorientierten Fertigungssteuerung besonders geeignet [Kurbel 1995, Wiendahl 1987]. Zur Umsetzung der Feinsteuerung (Maschinenbelegung) können neben Prioritätsregelverfahren wissensbasierte Systeme und/oder Mustererkennungsverfahren eingesetzt werden [Tuma 1994].

### **4.1 Umweltschutzorientierte kurzfristige Termin- und Kapazitätsplanung auf Leitstandsebene**

Ziel der belastungsorientierten Fertigungssteuerung ist es, die Anzahl der für eine Planperiode freizugebenden Aufträge auf die verfügbaren Kapazitäten abzustimmen. Zur Darstellung des Verfahrens wird häufig die Analogie eines Trichtermodells herangezogen [Wiendahl 1987, Scheer 1995, Kurbel 1995]. Hierbei stellt das Trichtervolumen, begrenzt durch eine festzusetzende Belastungsschranke, den mittleren Arbeitsinhalt der vor einer Bearbeitungsstation wartenden Aufträge dar. Die Belastungsschranke drückt den maximal zulässigen Arbeitsvorrat aus. Die Trichteröffnung entspricht der Leistung der Bearbeitungsstation pro Zeiteinheit, d.h. der tatsächlich nutzbaren Kapazität. Die Trichterhöhe symbolisiert die mittlere Durchlaufzeit, definiert als Quotient aus mittlerem Bestand und mittlerer Leistung [Wiendahl 1987].

Die sich im Rahmen der Fertigungssteuerung aus umweltschutzorientierter Sichtweise ergebenden Problemstellungen betreffen neben der Einhaltung gesetzlich vorgegebener Grenzwerte in erster Linie eine Begrenzung von Emissionen, Abwasserfrachten und Abfallmengen. Ansatzpunkte hierfür auf Ebene der Produktionssteuerung sind hierbei insbesondere eine entsprechende Abstimmung interner und/oder externer Ressourcen sowie eine umweltorientierte Fahrweise einzelner Aggregate. Dies kann durch eine entsprechende Erweiterung des Konzeptes der belastungsorientierten Fertigungssteuerung angegangen werden. So können etwa zur Einhaltung geplanter Emissions-, Abwasser- und Abfallmengen stoffbezogene „Emissionstrichter“ auf Betriebs- bzw. Betriebsbereichsebene (vgl. Abbildung 4)

definiert werden. Hierbei entspricht das Trichtervolumen dem Emissionsvolumen für eine Planperiode. Die festzusetzende Belastungsschranke stellt eine obere Schranke für das geplante Emissionsvolumen dar. Diese kann in besonderen Situationen (etwa Smogfall) entsprechend angepaßt werden. Die Trichteröffnung entspricht dem entsprechenden Emissionsvolumenstrom.

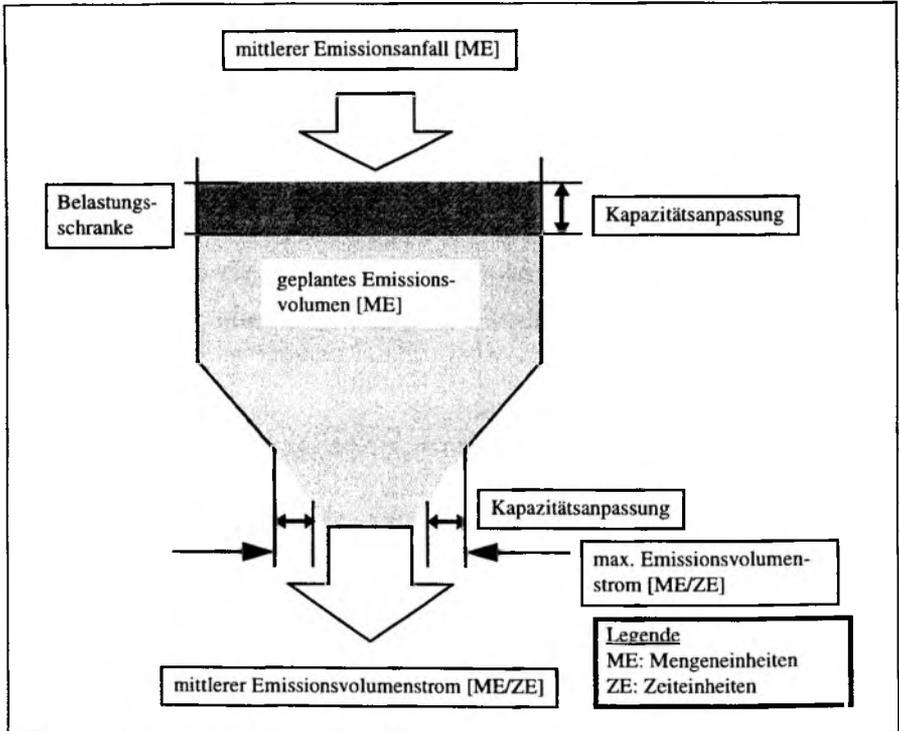


Abb. 4: Modell eines Emissionstrichters

Im Sinne einer umweltschutzorientierten Produktion können zur Abstimmung mit einem intern und/oder extern zur Verfügung stehenden Ressourcenangebot in Analogie zu Emissionstrichtern „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).

Durch eine Erweiterung der oben dargestellten Konzepte können neben der Einhaltung von Grenzwerten folgende, auf Leitstandsebene charakteristische, umweltschutzorientierte Problemstellungen bearbeitet werden:

- *Intensitätsabhängige Emissionen*: Durch eine Einplanung von Aufträgen auf Aggregaten mit spezifisch geringen Emissionen und einer emissionseffizienten Fahrweise kann der Schadstoffausstoß reduziert werden.
- *Umweltschutzorientierte Abstimmung mit externen Kapazitäten bzw. Ressourcen*: Vermeidung von Emissionen durch Abstimmung der Stoffströme und/oder Energieströme vor- und nachgelagerter Produktionseinheiten im Rahmen eines überbetrieblichen Umweltmanagements (z. B. Vermeidung von zusätzlichem Ressourcenbedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen durch eine Abstimmung der Produktion auf zur Verfügung stehenden Prozeßdampf einer externen Produktionseinheit).
- *Umweltschutzorientierte Abstimmung mit internen Kapazitäten bzw. Ressourcen*: Vermeidung von Emissionen durch Abstimmung der Stoffströme und/oder Energieströme einzelner Aggregate einer Produktionseinheit (z. B. Vermeidung von Fremdchemikalien zur Neutralisation durch Abstimmung alkalischer und saurer Abwässer).

Damit schafft die Ebene der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung durch die Festlegung der zu fertigenden Aufträge innerhalb des Planungszeitraums die Voraussetzung zur Erfüllung der oben genannten Zielvorgaben auf Feinsteuerungsebene.

#### 4.2 Umweltschutzorientierte Feinsteuerung auf Leitstandsebene

Aufgabe der Feinsteuerung ist es, durch eine entsprechende Aggregatebelegung, Festlegung der Auftragsreihenfolge, Verfahrensauswahl und Intensitätssteuerung die vorgegebenen Zielsetzungen auf übergeordneter Ebene (Einhaltung vorgegebener Grenzwerte, Vermeidung/Reduzierung technologie- und intensitätsabhängiger Emissionen, umweltschutzorientierten Abstimmung mit externen/internen Kapazitäten bzw. Ressourcen) im realen Produktionsprozeß umzusetzen. Darüber hinaus sind folgende umweltschutzorientierte Problemstellungen zu nennen:

- *Reihenfolgeabhängige Emission (Umrüstemissionen)*: Durch Vermeidung von Umrüstvorgängen können Ressourcen eingespart und Emissionen reduziert werden.
- *Wartezeitabhängige Emissionen*: Durch eine entsprechende Losbildung können Emissionen/Ressourcenverbräuche vermieden werden, die durch die Aufrechterhaltung der Betriebsfähigkeit zeitweise nicht benutzter Aggregate bedingt sind.
- *Liegeemissionen*: Durch eine zeitlich abgestimmte Einlastung aufeinanderfolgender Bearbeitungsschritte können Liegeemissionen verringert (z. B. Vermeidung von Abwärmeverlusten und Wiederaufheizprozessen bei der Wärmebehandlung von Metallteilen).

Methodisch können Verfahren zu einer diese Zielsetzungen berücksichtigende Auftragsbelastung etwa auf Prioritätsregelverfahren, auf wissensbasierten Ansätzen (z. B. fuzzyfizierte Expertensysteme) und/oder Methoden des Maschinellen Lernens basieren.

Beim Einsatz konventioneller Prioritätsregelverfahren (z. B. termin- oder ressourcenorientierte Prioritätsregeln) erscheint insbesondere die Beachtung multikriterieller Zielfunktionen kritisch. Zwar können unterschiedliche Prioritätsregeln etwa mittels dynamischer Gewichtungsfaktoren miteinander verbunden werden. Die Verknüpfungsfaktoren können dabei von dem Knappheitsgrad der Ressourcen abhängen. Entsprechende Untersuchungen haben jedoch gezeigt, daß eine additive oder multiplikative Verknüpfung einzelner Prioritätsregeln nicht unbedingt eine bessere Zielerfüllung gegenüber elementaren Regeln impliziert; auch das Gegenteil kann der Fall sein [Davis/Patterson 1975].

Ferner läßt sich das für entsprechende Experten der Produktionssteuerung charakteristische „unscharfe“ Regel- oder Erfahrungswissen nur unzureichend bzw. überhaupt nicht in die bisher verwandten Verfahren integrieren.

Wissensbasierte Ansätze ermöglichen es dem gegenüber, Regelwissen in den Leitstand einzufügen. So kann etwa durch empirisch ermittelte Membershipfunktionen auch „unscharfes“ Produktionswissen abgebildet werden [Tuma 1994, Zimmermann 1991]. Sind keine expliziten Produktionsregeln verfügbar, muß auf implizites Wissen (z. B. Erfahrungswissen, ausgewählte Produktionssituationen aus der Vergangenheit) zurückgegriffen werden. Zur Operationalisierung von im-

plizitem Wissen eignen sich insbesondere Mustererkennungsalgorithmen, wie z. B. Neuronale Netze. In Gebieten mit unterschiedlich strukturiertem Wissen können weiterhin Kombinationen dieser Verfahren eingesetzt werden. Eine detaillierte Beschreibung dieser Ansätze im Hinblick auf die Feinsteuerung findet sich etwa in [Tuma 1994].

Aufgabe der Intensitätssteuerung auf Feinsteuerungsebene ist der Ausgleich stochastischer Schwankungen bezüglich des Kapazitäts- und Ressourcenangebots. Prinzipielles Ziel ist eine emissions- bzw. ressourcenoptimale Fahrweise der einzelnen Aggregate. Zur Erreichung betriebswirtschaftlicher Ziele (z. B. Durchführung des gegebenen Produktionsprogramms) kann es erforderlich werden, kurzfristig diesen optimalen Betriebspunkt zu verlassen. Zur Ermittlung eines geeigneten Betriebspunktes sind hierbei die in Abhängigkeit des Verschleißzustandes und der Nutzungsintensität anfallenden Abfälle, Emissionen und Ressourcenverbräuche zu berücksichtigen. Die hierfür notwendigen Informationen (Verbrauchsfunktionen, Emissionsfunktionen, Verschleißzustand) werden der Arbeitsplandatei bzw. der Betriebsmitteldatei entnommen.

## **5 Anwendungsbeispiel aus der metallbearbeitenden Industrie**

Das in Abbildung 2 dargestellte Prozeßmodell eines umweltschutzorientierten Produktionsleitstandes wird anhand eines Beispiels aus der Fertigungsindustrie präzisiert. Exemplarisch wird hierbei der Bereich Oberflächenbeschichtung dargestellt. Das betrachtete Produktionssystem 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 Werkstückträger entkommissioniert und die Werkstücke vor der Lackiererei zu neuen Losen zusammengefaßt. 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. Eine Systemanalyse dieses Produktionssystems ergibt folgende Ansatzpunkte für einen umweltschutzorientierten Produktionsleitstand:

- *Einhaltung von Abwassergrenzwerten:* Vordringliche Aufgabe ist die Einhaltung der vorgegebenen Grenzwerte bezüglich des Abwasseraufkommens bzw. der Abwasserzusammensetzung (z. B. pH-Wert).
- *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 Bestimmung der jeweiligen Prozeßzeiten erfordert eine Analyse des Badzustands (z. B. Beizrate). Dieser hängt insbesondere von der Konzentration der Inhaltsstoffe (z. B. Kupferkonzentration,  $H_2SO_4$ -Konzentration, Temperatur, Badbewegung) ab. Da es zwischen diesen Daten und dem Badzustand i. allg. keinen expliziten funktionalen Zusammenhang gibt, empfiehlt sich hier der Einsatz von Mustererkennungsverfahren (z. B. Neuronale Netze). Dies erfordert eine entsprechende Präzisierung der Funktion der Datenanalyse im Rahmen des Prozeßmodells des Leitstandes.
- *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) reduziert werden.
- *Liegeemissionen:* Bei einer ungenügenden Abstimmung von Stahlgalvanik und  $H_2$ -Entzugsöfen bzw. bei einer entsprechenden Überschreitung maximaler Liegezeiten einzelner Werkstücke müssen diese erneut galvanisiert werden. Dies führt zu einem zusätzlichen Anfall von Abwasserfrachten und Ressourcenbedarf.
- *Leerlaufemissionen:* Aufgrund des unterschiedlichen Nutzungsgrades einzelner Bäder kann es bei einer ungünstigen zeitlichen Auftragseinlastung zu Leerlaufemissionen (Abwärme) kommen.
- *Umrüstemissionen:* Durch eine ungünstige Reihenfolge der Aufträge in der Lackiererei kann es zu vermeidbaren Farbwechseln und damit verbundenen Abwassermengen aufgrund von Umrüstvorgängen kommen.

Die genannten Problemstellungen des skizzierten Produktionssystems betreffen im wesentlichen die Einhaltung vorgegebener Grenzwerte, eine umweltorientierte Fahrweise einzelner Aggregate (Intensitätssteuerung) sowie eine entsprechende Abstimmung interner Ressourcen. Neben diesen umweltorientierten Zielen ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht insbesondere eine Verkürzung der Durchlaufzeiten sowie eine Einhaltung der gegebenen Fertigungstermine vordringlich.

Hierfür kann das beschriebene Konzept des umweltschutzorientierten Produktionsleitstandes eingesetzt werden (siehe Abbildung 5).

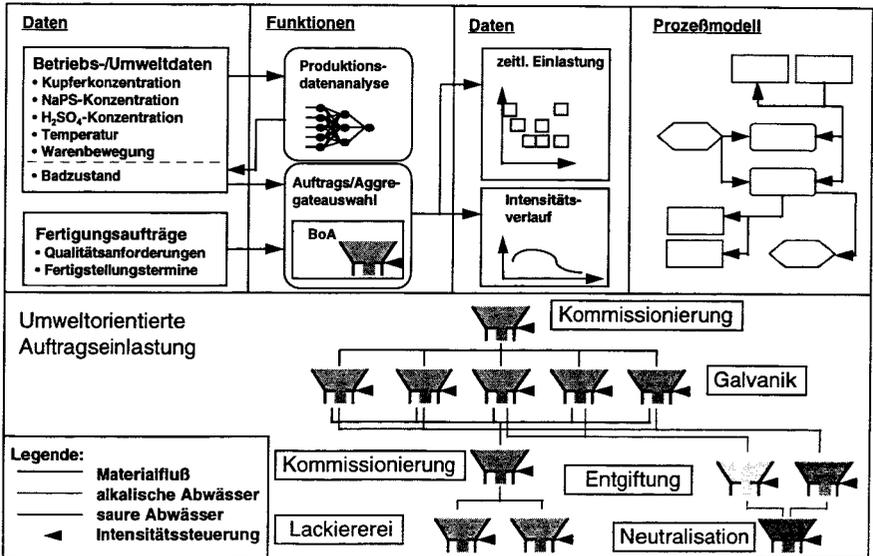


Abb. 5: Exemplarische Darstellung des Teilprozesses des internen Produktionsmanagements

## 6 Zusammenfassung

Umweltschutzorientierte Produktionsleitstände stellen ein wesentliches Element zur Gestaltung emissionsarmer und ressourcenschonender Produktionssysteme dar. Damit greifen sie eine wesentliche Forderung der Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages „Schutz des Menschen und der Umwelt“ auf, Methoden zur Verfügung zu stellen, die es erlauben Stoff- und Energieströme so aufeinander abzustimmen, daß Emissionen aller Art, soweit technisch möglich, vermieden, vermindert bzw. zur Verfügung stehende Ressourcen möglichst effizient eingesetzt werden.

Zur Konzeption umweltschutzorientierter Produktionsleitstände ist es zunächst notwendig, die relevanten Geschäftsprozesse in ihrer zeitlich-logischen Struktur darzustellen. Hierbei sind die Ebenen der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung, der Feinsteuerung (Auftragseinlastung, Intensitätssteuerung) und der Automatisierung/BDE zu unterscheiden. Aus methodischer Sichtweise können die

**Aufgaben der Termin- und Kapazitätsplanung in Abhängigkeit der Fertigungsorganisation etwa auf der Basis einer entsprechenden Erweiterung des Konzeptes der belastungsorientierten Fertigungssteuerung modelliert werden. Auf Feinsteuerungsebene empfehlen sich in Abhängigkeit der Struktur des zur Verfügung stehenden Produktionswissens Online-Verfahren, etwa auf der Basis von wissensbasierten Verfahren und Mustererkennungsverfahren.**

Das dargestellte Konzept eines umweltschutzorientierten Produktionsleitstandes wird anhand eines realen Anwendungsbeispiels aus dem Bereich der Oberflächenbearbeitung metallischer Werkstoffe evaluiert. Eine Übertragbarkeit auf andere Produktionssysteme ist prinzipiell dann möglich, wenn Emissionsanfallmengen bzw. Ressourcenverbräuche durch Maßnahmen auf Produktionssteuerungsebene (z. B. Abstimmung saurer und alkalischer Abwässer, Abstimmung mit Stoff- und Energieströmen vor- und nachgelagerter Produktionseinheiten, emissionsorientierte Fahrweise von Aggrgaten) signifikant beeinflusst werden können. Beispiele hierfür finden sich etwa in [Siestrup/Kriwald/Förster/Haasis 1997, Tuma 1994]

## Literaturverzeichnis

- 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, S. 944-955
- Haasis, H.-D. (1996): Betriebliche Umweltökonomie, Bewerten - Optimieren - Entscheiden, Berlin u. a. 1996
- Haasis, H.-D./Tuma, A./Franke, St. (1997): Anforderungen an umweltschutzorientierte Produktionsleitstände, in: Bullinger H.-J. (Hrsg.): Anforderungen an Methoden und Systeme für eine umweltorientierte Auftragsabwicklung, Stuttgart 1997
- Hornung et al. 1996: Aachener PPS-Modell - Das Prozeßmodell, Sonderdruck 10/95, Hrsg.: Forschungsinstitut für Rationalisierung an der RWTH Aachen, Aachen 1996
- Kurbel, K. (1995): Produktionsplanung und -steuerung, München u.a. 1995
- Scheer, A.-W. (1995): Wirtschaftsinformatik, Berlin u. a. 1995
- Siestrup, G. /Kriwald, T./Förster, M./Haasis, H.-D. 1997: Strategische Umweltkostenrechnung zur Bewertung von Produktions- und Produktkreislaufsystemen, in: Fraunhofer-ICT (Hrsg.): Produzieren in der Kreislaufwirtschaft, Karlsruhe 1997
- 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 1994
- 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
- Wiendahl, H.-P. (1987): Belastungsorientierte Fertigungssteuerung, München 1987
- Wildemann, H. (1997): Logistik Prozeßmanagement, München 1997
- Zäpfel, G. (1989): Produktionswirtschaft - Taktisches Produktions-Management, Berlin u. a. 1989
- Zäpfel, G. (1993): Produktionsplanung und -steuerung in der „Fabrik der Zukunft“, in: Milling, P./Zäpfel, G. (Hrsg.): Betriebswirtschaftliche Grundlagen moderner Produktionsstrukturen, Herne u. a. 1993
- Zimmermann, H.-J. (1991): Fuzzy Set Theory and its Applications, Boston u. a. 1991