Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *75(2004), 155–173*

Hans-Jürgen Jacobs

Fertigungsprozess-Modelle in der Einheit von Fertigungstechnik und Fertigungsorganisation

1 Einführung

Mit diesem Beitrag soll ein mögliches Modellgebäude als ingenieurtechnische Entscheidungshilfe für industrielle Fertigungsprozesse, die man auch als Prozessketten bezeichnet, vorgeschlagen werden. Betrachtungsgegenstand ist die Teilefertigung (engl. machining). Dabei werden allgemeingültige Modellebenen unabhängig von den eingesetzten Fertigungsverfahrensgruppen, wie z. B. Zerspantechnik und Umformtechnik, definiert. Für die Fertigungsverfahren der Zerspantechnik als dominierende Verfahrensgruppe in der Teilefertigung werden detailliert den Modellebenen zugeordnete Modelle mathematisch und verfahrensneutral beschrieben. Dieser erste Verallgemeinerungsversuch sei auch als ein Beitrag zur Gestaltung der „Allgemeinen Technologie“ eingeordnet.

Die Fertigungstechnik und die für industrielle Fertigungsprozesse eng mit ihr verbundene Fertigungsorganisation sind ein Teilgebiet der Produktionstechnik. Die mit dem Terminus „Fertigung“ verbundenen wesentlichen Begriffe sollen erläutert werden:

- *Fertigungstechnik (Was; Wie; Womit):* Gesamtheit der Fertigungsverfahren – Zerspan-, Umformverfahren u. a.; *Wie* – und Fertigungsmittel – Werkzeugmaschinen, (Werkstück)-Spanner, Werkzeug; *Womit* – zur industriellen Fertigung geometrisch bestimmter, montagebereiter Produktteile – Werkstücke oder Teile; *Was* –.
- *Fertigungsprozess (oder Prozesskette):* Diskrete Folge der zur Fertigung eines definierten Werkstückes erforderlichen fertigungstechnischen Operationen. Diese sind Arbeitsplätzen zugeordnet, die über die erforderlichen Fertigungsmittel mit den durch sie realisierten Fertigungsverfahren verfügen.
- *Fertigungsorganisation (Wann; Wieviel; Wo):* Struktur des Fertigungsprozesses nach zeitlichen (*Wann*; *Wieviel*) und räumlichen (*Wo*) Ordnungsprinzipien.

Mit dem Hintergrund leistungsfähiger Automatisierungs-, Informations- und Kommunikationstechnik und eines aktuellen „Kosten- und Zeitdrucks“ auf die produzierenden Unternehmen, der die Dynamik der Fertigungsprozesse deutlich gesteigert hat, ist die Entwicklung wissenschaftlicher Grundlagen der Fertigungstechnik und -organisation für eine ganzheitliche, situationsangepasste Optimierung der Fertigungsprozesse erfolgreich befruchtet worden.

Die zu definierenden Modellebenen gelten für solche Fertigungsverfahren der Teilefertigung, die in zulässigen Wertebereichen frei wählbare, durch Werkzeugmaschinen einstellbare Parameter besitzen.

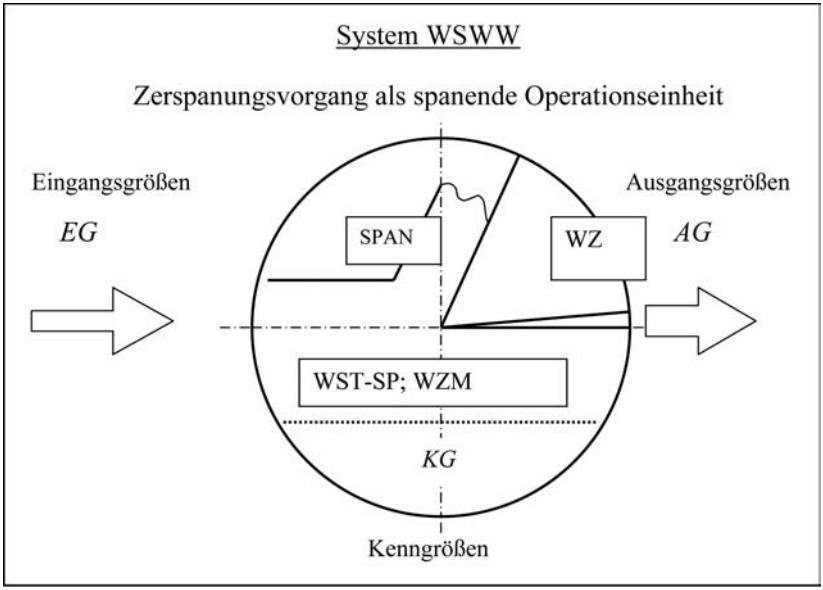

Abb. 1: Systemdarstellung des Zerspanungsvorgangs und Aufgabe der Fertigungsprozess-Modelle. – Modellaufgabe: $AG = F_1(KG)$ und $KG = F_2(EG) \Rightarrow AG = F_1(F_2(EG))$; zu finden sind EG_{opt} für min. Fertigungskosten u. –zeiten bei gesicherter Werkstück- und Prozessqualität sowie gesicherten Stückzahlen und Terminen

Abb. 1 zeigt eine Systemdarstellung des Zerspanungsvorgangs als Basiselement eines Fertigungsprozesses zur Ableitung der Aufgaben von Fertigungsprozess-Modellen. Solche Basiselemente werden als noch zu definierende spanende Operationseinheiten bezeichnet.

Technisch realisiert wird der Zerspanungsvorgang durch das Zusammenwirken von Werkzeugmaschine *W*ZM, Spanner *S*P, Werkzeug *W*Z und Werk-

stück *W*ST. Mit den kursiv gekennzeichneten Anfangsbuchstaben der Kurzbezeichnungen wird dieses Zusammenwirken von Fertigungsmitteln (WZM, SP, WZ) und Fertigungsaufgabe (WST) als *System WSWW* bezeichnet.

Fertigungsprozess-Modelle haben nach Abb. 1 die Aufgabe, Funktionen für die Abhängigkeit der Zerspanungs-Kenngrößen KG von den Zerspanungs-Eingangsgrößen EG, für die Abhängigkeit der Zerspanungs-Ausgangsgrößen AG von den Kenngrößen und schließlich für den Zusammenhang der Ausgangsgrößen von den Eingangsgrößen zu formulieren. Mit diesen Funktionen können die gewünschten Extremwerte für die Ausgangsgrößen Fertigungskosten und Fertigungszeit gefunden werden. Dabei sind für die Kenngrößen zur Sicherung der erforderlichen Werkstück- bzw. Produktqualität durch eine entsprechende technisch-organisatorische Prozessqualität zulässige Wertebereiche einzuhalten.

Zu den Eingangsgrößen des Zerspanungsvorganges gehören neben den organisatorischen Größen Auftragstermin und Auftragsstückzahl der Fertigungsaufgabe alle Parameter des verfügbaren Systems WSWW. Dazu zählen auch die zur Spanabnahme durch das Werkzeug und zur Erzeugung der gewünschten Werkstückgeometrie erforderlichen Relativbewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück. Diese Bewegungen werden durch zwei Geschwindigkeitskomponenten realisiert:

- Die Schnittgeschwindigkeit v_c, ausgeführt durch das Werkzeug (z. B. beim Bohren, Fräsen oder Schleifen) oder durch das Werkstück (z. B. beim Drehen).
- Die Vorschubgeschwindigkeit v_f, ausgedrückt durch den Schneidenvorschub f_z als in Vorschubrichtung zurückgelegter Weg pro Werkzeugschneide und Umdrehung des Werkzeuges (z. B. beim Bohren, Fräsen oder Schleifen) oder des Werkstückes (z. B. beim Drehen, Rundfräsen).

Die kinematischen Schnittgrößen v_c und f_z spielen bei der Darstellung von Prozessmodellen in allen zu definierenden Ebenen eine wesentliche Rolle. Sie sind für eine Prozessoptimierung bei gegebenen WSWW-Systemen in zulässigen Wertebereichen frei wählbare Optimierungsvariable, die mit der Werkzeugmaschine eingestellt werden können.

Zu den Kenngrößen zählen z. B. die Zerspankraftkomponenten, die Schnittleistung, die Werkzeugstandzeit, die durch den Schneidenvorschub und die Schneidengeometrie entstehende Rauheit der Werkstückoberfläche und die Kennzeichnungen für technische und organisatorische Prozessstörungen.

2 Fertigungsplanung als auftragsneutrale externe Prozessgestaltung

Mit der Fertigungsplanung wird zeitlich vor der eigentlichen Fertigung der technisch-ökonomisch optimale Fertigungsprozess in ökonomisch bewerteten, möglichen Alternativen mit den Modellebenen 1 bis 5 für eine mit dem Werkstück gegebene Fertigungsaufgabe determiniert, ohne das bereits zeitlich und stückzahlmäßig Aufträge definiert sind, d. h. *Was* ist *Wie* und *Womit* zu fertigen.

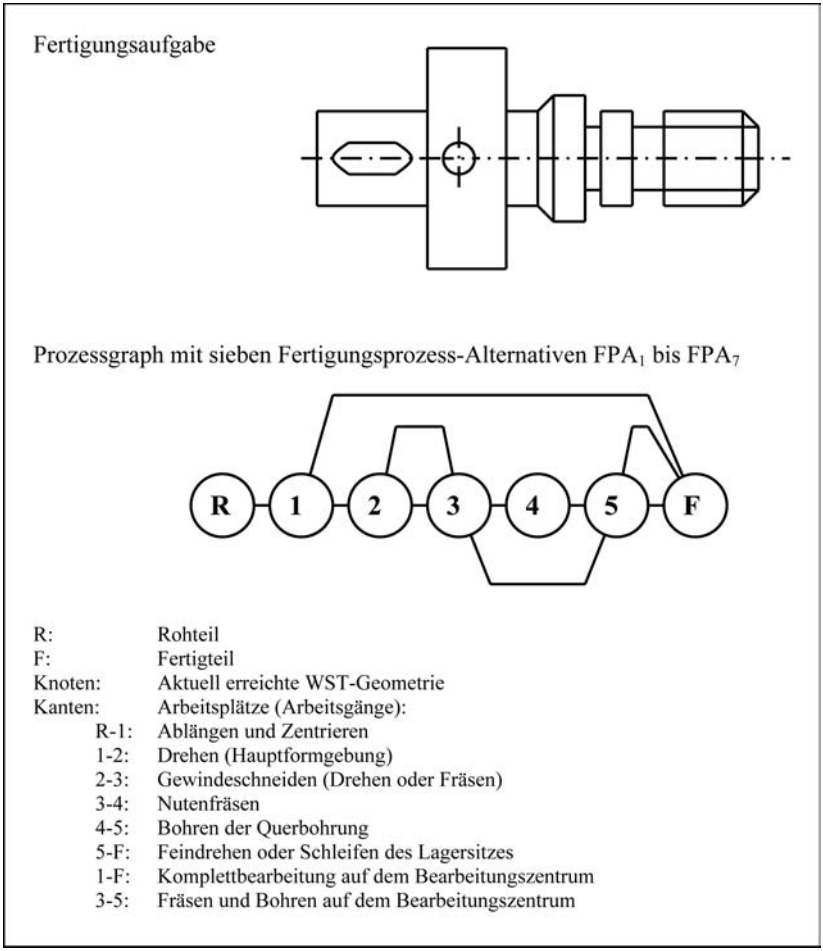

Abb. 2: Gegebene Basis für die Fertigungsplanung als externe Prozessgestaltung

Abb. 2 zeigt die gegebene Basis. Sie besteht aus der auftragsneutralen Fertigungsaufgabe und der verfügbaren, für diese Aufgabe geeigneten, alternativen Fertigungsprozess-Strukturen. In diesen Strukturen dokumentiert sich das gesicherte Erfahrungswissen des Fertigungsingenieurs, des Werkstattmeisters und des Facharbeiters. Es gestattet für das aktuelle Werkstück die direkte Zuordnung von Alternativstrukturen bis hin zu den erforderlichen Folgen definierter spanender Operationseinheiten.

Die zweckmäßige Darstellung alternativer Prozessstrukturen erfolgt durch mehrdeutige, gerichtete Prozessgraphen. In Abb. 2 bedeuten bei solchen Graphen die Kanten die Arbeitsplätze mit den Arbeitsgängen, die eine oder meist mehrere spanende Operationseinheiten enthalten. Den Graphenknoten ist die nach einem Arbeitsgang erreichte Werkstückgeometrie zugeordnet.

Im Folgenden werde die der Fertigungsplanung zugeordneten fünf Modellebenen erläutert (vgl. Jacobs/Dürr 2002).

2.1 Basismodelle für Kenngrößen der Zerspantechnik – Erste Modellebene

Beispiele für Basismodelle

Schnittkraft $F_c = F(f_z)$
Schnittleistung $P_c = F(f_z, v_c)$
Werkzeug-Standzeit $T = F(v_c, f_z)$

Beispiel für explizite Modellgleichung

$$T = \frac{t_{cg}}{\int_o^{t_{cg}} \left\{ A_5^{-1} \cdot [v_c(t_c)]^{-A_2} \cdot [f_z(t_c)]^{-A_4} \cdot [a_p(t_c)]^{-A_6} \right\} dt_c}$$

t_{cg}: geplante und werkzeugbezogene Gesamtschnittzeit (die Schnittgrößen können – den praktischen Gegebenheiten entsprechend – über der Schnittzeit t_c veränderlich sein)
A_2, A_4, A_5, A_6: empirische, von der Werkstoff-Schneidstoff-Paarung abhängige Gleichungskonstanten
a_p: gegebene Schnittiefe

Abb. 3: Verfahrensneutrale Basismodelle für Kenngrößengleichungen als erste Modellebene

Basismodelle als unterste Modellebene beschreiben die Abhängigkeit der Kenngrößen KG von den kinematischen Schnittgrößen als KG = $F(v_c; f_z)$

bzw. KG = F(f_z). Abb. 3 zeigt Beispiele und eine exemplarische, explizite Modellgleichung. Basismodelle der Zerspantechnik können verfahrensneutral dargestellt werden (vgl. Jacobs 2003). Die Entwicklung praktikabler Kenngrößengleichungen ist seit Beginn des vorigen Jahrhunderts ein wesentliches Forschungsgebiet der Zerspantechnik (vgl. Taylor 1906).

2.2 Technische Lösungsfelder für Fertigungsmittel – Zweite Modellebene

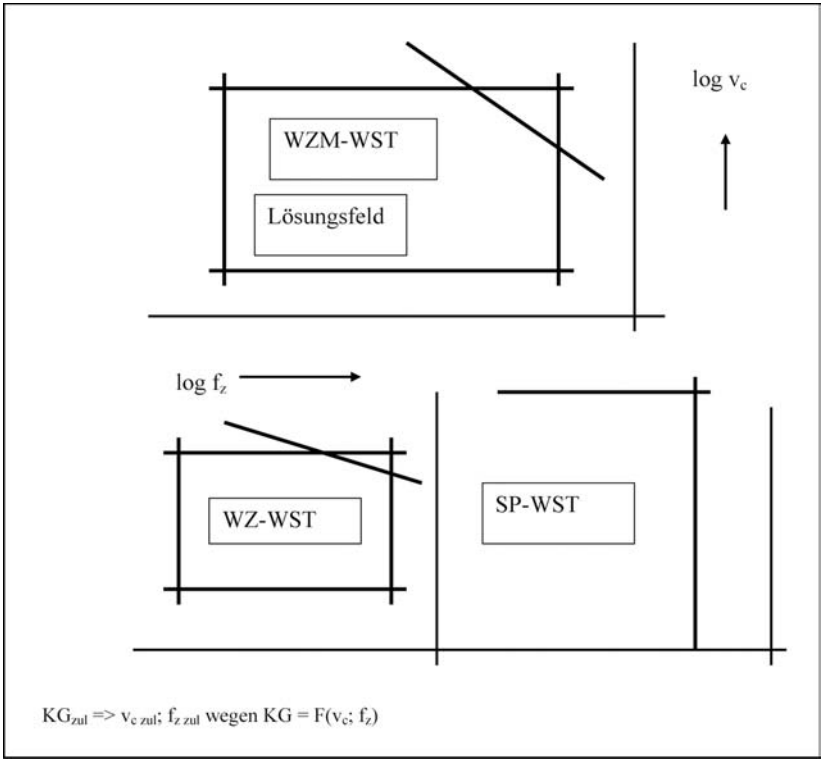

Abb. 4: Lösungsfelder für definierte Fertigungsmittel (WZM, SP, WZ) bei gegebener Fertigungsaufgabe (WST) als zweite Modellebene

Zur Lösung der Fertigungsaufgabe werden die Basismodelle in Verbindung mit dem gegebenen Werkstück WST zu Lösungsfeldern der Fertigungsmittel WZM, SP und WZ zusammengeführt. Diese Lösungsfelder WZM-WST, SP-WST und WZ-WST werden durch technische Grenzen (Restriktionen) gebil-

det, die mit den fertigungsmittel- und werkstückabhängigen zulässigen Wertebereichen der Zerspanungskenngrößen, abgebildet als Basismodelle, gegeben sind. Diese Bereiche führen auch zu zulässigen Wertebereichen für die kinematischen Schnittgrößen v_c und f_z als Variable in den Basismodellen. Die graphische Darstellung der Lösungsfelder in Abb. 4 erfolgt deshalb im (logarithmischen) Koordinatensystem mit der Schnittgeschwindigkeit als Ordinate und dem Schneidenvorschub als Abszisse. Dieses Koordinatensystem ist auch der „gemeinsame Nenner“ der unterschiedlichen Fertigungsmittel WZM, SP und WZ während ihres Zusammenwirkens im Zerspanungsvorgang und stellt ihre „Vergleichbarkeit“ her.

2.3 Zuordnung und Bewertung der ausgewählten Fertigungsmittel im WSWW-Lösungsfeld – Dritte Modellebene

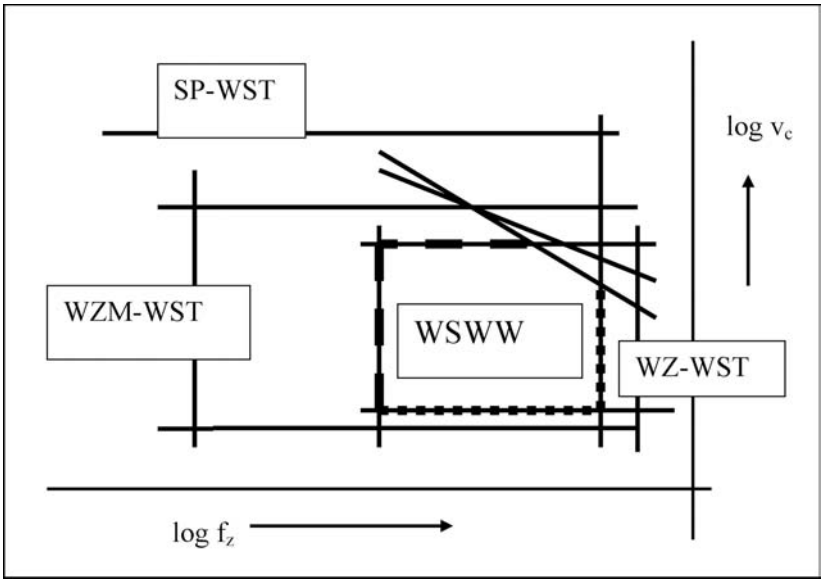

Abb. 5: Lösungsfeld des Systems WSWW als dritte Modellebene

Mit Abb. 5 entsteht durch Überdeckung der zugeordneten Lösungsfelder WZM-WST, SP-WST und WZ-WST nach Abb. 4 das resultierende Lösungsfeld des ausgewählten WSWW-Systems. Mit solchen WSWW-Lösungsfeldern kann die noch ausstehende Definition einer spanenden Operationseinheit gegeben werden: *Eine spanende Operationseinheit ist ein Zerspanungsvor-*

gang mit zeitlich konstantem WSWW-Lösungsfeld; sie ist ein organisationsneutrales Element des Fertigungsprozesses.

Der Überdeckungsgrad der Fertigungsmittel-Lösungsfelder ist das Kriterium für eine fertigungstechnisch optimale Fertigungsmittel-Zuordnung. Mit dieser sich im WSWW-Lösungsfeld demonstrierenden Überdeckung ist eine aktuelle fertigungstechnische Bewertung der Fertigungsmittelauswahl möglich. Exemplarisch sei vermerkt, dass sich mit dieser Bewertung die praktische Erfahrung „Eine Werkzeugmaschine leistet nur so viel wie ihr Werkzeug“ offenbart.

Das WSWW-Lösungsfeld ist als Darstellung einer spanenden Operationseinheit eine wesentliche Basis für alle folgenden Modellebenen.

2.4 Technisch-ökonomische Optimierung spanender Operationseinheiten – Vierte Modellebene

Für eine durch das WSWW-Lösungsfeld gegebene spanende Operationseinheit verbleiben nur die innerhalb des Lösungsfeldes frei wählbaren kinematischen Schnittgrößen v_c und f_z als Optimierungsvariable (Schnittwertoptimierung).

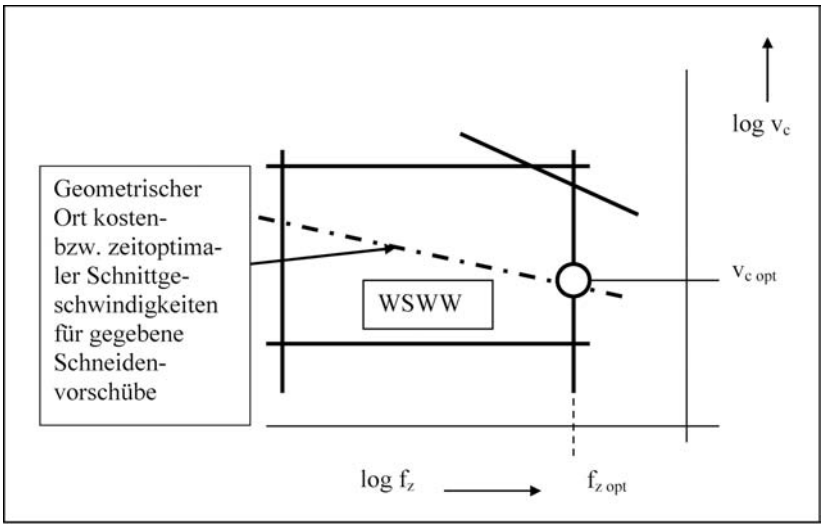

Abb. 6: Verfahrensoptimierung spanender Operationseinheiten als vierte Modellebene ($v_{c\,opt}$: kosten- bzw. zeitoptimale Schnittgeschwindigkeit; $f_{z\,opt}$: kosten- und zeitoptimaler Schneidenvorschub)

Für das WSWW-Lösungsfeld lässt sich der geometrische Ort der kosten- bzw. zeitminimalen Schnittgeschwindigkeiten für die zugelassenen Schneidenvorschübe mathematisch ableiten. Dieser Ort ist in Abb. 6 in exemplarischer Lage dargestellt. Dabei ergeben sich für maximal mögliche Schneidenvorschübe die kleinsten Werte für die Kosten- bzw. Zeitzielfunktionen. Der zugeordnete optimale Betriebspunkt einer Werkzeugmaschine, für den die Schnittwerte einzustellen sind, ist in Abb. 6 eingetragen. Dabei können für diese prozessexterne Optimierung nur ökonomische Zielfunktionen für die volle Auslastung der verfügbaren Zeiten verwendet werden, da sich die tatsächliche Zeitauslastung erst nach der Belegung der Arbeitsplätze mit den aktuellen Fertigungsaufträgen als Gegenstand höherer Modellebenen ergibt. Mit der vierten Modellebene liegen optimierte Fertigungsprozess-Alternativen vor.

2.5 Mehrkriterielle Bewertung der optimierten Fertigungsprozessalternativen – Fünfte Modellebene

Die mit den bisherigen Modellebenen der Fertigungsgestaltung unterstützte Prozessoptimierung stellt Fertigungsprozess-Alternativen zur Verfügung, die alle die anstehende Fertigungsaufgabe lösen können. Diese Alternativen sind mehrkriteriell mit den Optimalitätskriterien Fertigungskosten K und Fertigungszeit t zu bewerten. Dies kann mittels der diskreten Polyoptimierung nach Abb. 7 erfolgen. Untersucht werden die sieben Fertigungsprozessalternativen FPA_1 bis FPA_7 nach Abb. 2. FPA_1 bis FPA_4 sind als Punkte im normierten und damit dimensionslosen Koordinatensystem K/K_{min} und t/t_{min} eingetragen. Dabei ist K_{min} der Prozessalternative mit den kleinsten Kosten und t_{min} der mit der kleinsten Zeit zugeordnet. Die Alternativen FPA_5 bis FPA_7 haben mit gleichzeitig höheren Kosten und Zeiten gegenüber den ersten vier Alternativen eindeutige ökonomische Nachteile und scheiden bei der weiteren Betrachtung aus. Die in Abb. 7 eingezeichneten vier Alternativen liegen im Kompromissgebiet der Polyoptimierung, d. h. sie sind im Sinne einer eindeutigen Lösung nicht wertend miteinander vergleichbar. Der in Abb. 7 eingezeichnete Punkt mit den Koordinaten $K/K_{min} = 1$ und $t/t_{min} = 1$ ist der real nicht zu erreichende „utopische“ Punkt im Sinne des gewünschten Optimums. Die Prozessalternative mit dem geringsten geometrischen Abstand kann als die ökonomisch beste Prozesslösung angesehen werden. Mit dieser geometrischen Entscheidungsregel kann also auch bei der Polyoptimierung

trotz Kompromissgebiet eine eindeutige Lösung gefunden werden (vgl. Peschel 1980, S. 46f.)

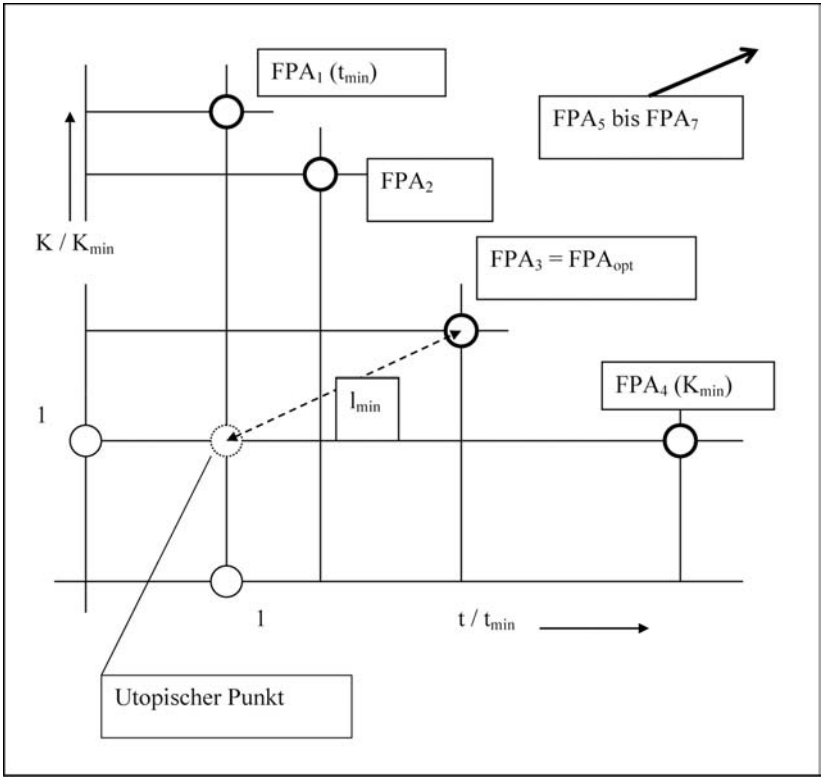

Abb. 7: Mehrkriterielle, ökonomische Bewertung des gestalteten, mehrdeutigen Prozessgraphen nach Abb. 2 mit sieben Fertigungsprozess-Alternativen (Prozessalternativen FPA_5 bis FPA_7 liegen nicht im Kompromissgebiet der diskreten Polyoptimierung! Optimaler Prozess bei l_{min}: geometrische Entscheidungsregel)

Mit den Modellebenen 1 bis 5 der Fertigungsplanung liegt für die gegebene Fertigungsaufgabe ein gestalteter und optimierter mehrdeutiger Fertigungsprozessgraph vor, dessen Alternativen ökonomisch mehrkriteriell bewertet sind. Dieser Graph bildet die komplexe technische Übergabegröße der Fertigungsplanung an die im Folgenden zu betrachtende Fertigungssteuerung als auftragsgebundene interne Prozessgestaltung.

3 Fertigungssteuerung als auftragsgebundene interne Prozessgestaltung

Diese zweite Etappe der Prozessgestaltung, gekennzeichnet durch zeitlich und stückzahlmäßig definierte Aufträge, findet während der Fertigung als technisch-ökonomische *und* organisatorisch-ökonomische Prozessoptimierung statt, d. h. die Fertigungssteuerung „steuert" bei definiertem Planungszeitraum und Termin t_T nach Abb. 8 sowie bei nicht zu vermeidenden Prozessstörungen Aufträge in das Fertigungssystem durch Soll-Ist-Vergleich des erreichten Fertigungsergebnisses. Damit wird dynamisch entschieden, *Wann*, *Wieviel* und *Wo* zu fertigen ist, um alle Aufträge, die sich gleichzeitig im Fertigungssystem befinden, termingerecht fertig zu stellen.

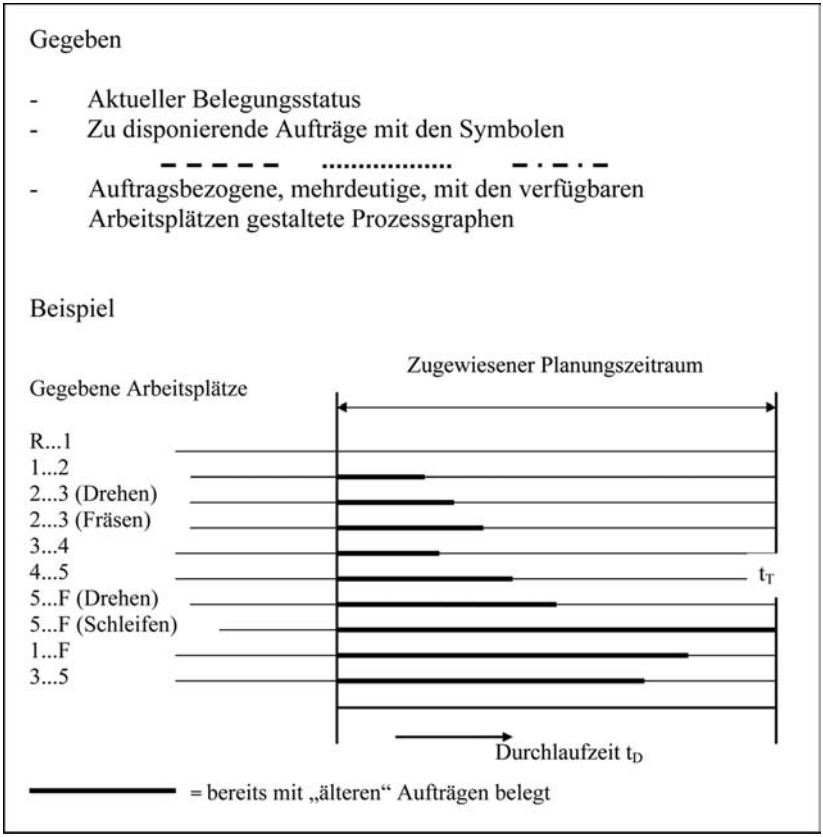

Abb. 8: Gegebene Basis für die Fertigungssteuerung als interne Prozessgestaltung

Der Fertigungssteuerung sind die im Folgenden darzustellenden Modellebenen 6 bis 8 zugeordnet (vgl. Jacobs/Dürr 2002). Abb. 8 zeigt die für die Fertigungssteuerung gegebene Basis am Beispiel der als Fertigungssystem definierten Arbeitsplätze nach Abb. 2. Danach sind für jeden zu fertigenden Auftrag neben dem mehrdeutigen Prozessgraphen der Fertigungsplanung Termin und Stückzahl verbindlich vorgegeben; in Abb. 8 sind exemplarisch drei in dem definierten Fertigungssystem zu steuernde Aufträge dargestellt. Zu beachten sind der verbindliche Planungszeitraum und die bereits mit „älteren“ Aufträgen belegten Zeitabschnitte der entsprechenden Arbeitsplätze. Die graphische Darstellung erfolgt nach Abb. 8 mit einen Durchlaufdiagramm (Gannt-Diagramm), wobei auf der diskreten Ordinate die Arbeitsplätze mit einer Durchlaufrichtung von oben nach unten eingetragen sind und die Abszisse die Durchlaufzeit t_D abbildet.

3.1 Dispositive Fertigungssteuerung – Sechste Modellebene

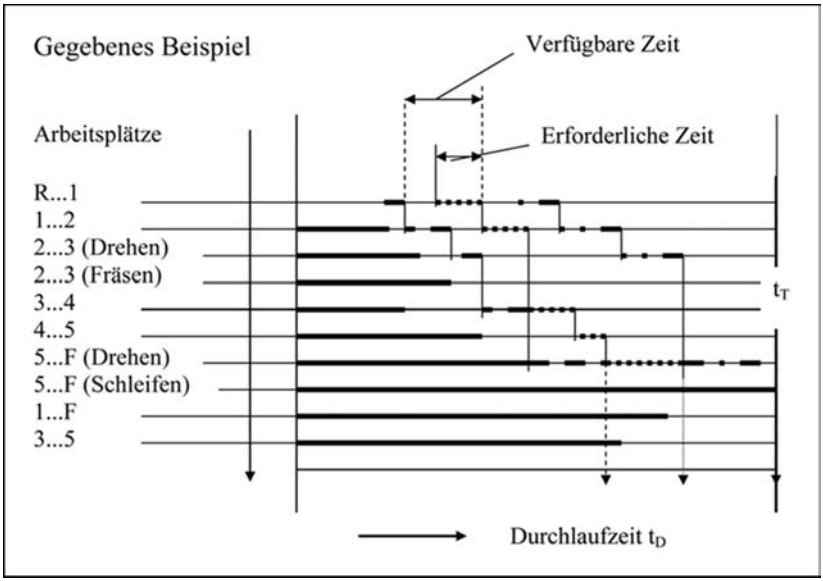

Abb. 9: Ergebnis der dispositiven Fertigungssteuerung mit der gegebenen Basis nach Abb. 8

In Abb. 9 ist für das nach Abb. 8 gegebene Beispiel das Ergebnis der dispositiven Fertigungssteuerung dargestellt. Bei dieser Disposition als zeitlich definierte Zuordnung von Aufträgen und Arbeitsplätzen stellt die Mehrdeutig-

keit der Prozessgraphen der zu steuernden Aufträge eine wirksame diskrete Steuervariable dar. Sie trägt zur gewünschten hohen Belegungsdichte als hohe zeitliche Arbeitsplatzauslastung, zur Minimierung der Durchlaufzeit eines Auftrages und zur Termintreue bei. Diese drei genannten Optimalitätskriterien stellen gegenläufige Ziele dar. Deshalb sind zeitliche Belegungslücken unvermeidbar. Die heute verwendeten Dispositionsmodelle wie das belastungsunabhängige und belastungsabhängige Schiebeprinzip sowie das Ziehprinzip (Kanbanprinzip) sollen hier nicht erläutert werden. Die entsprechenden Steueralgorithmen werden zunehmend auf sogenannten Leitständen implementiert.

Insgesamt erkennt man, dass erst mit der dispositiven Fertigungssteuerung die durch die Fertigungsplanung gegebenen mehrdeutigen Fertigungsprozessgraphen in eindeutige Graphen überführt werden.

3.2 Arbeitsplatzbezogene Auslastungsoptimierung – Siebente Modellebene

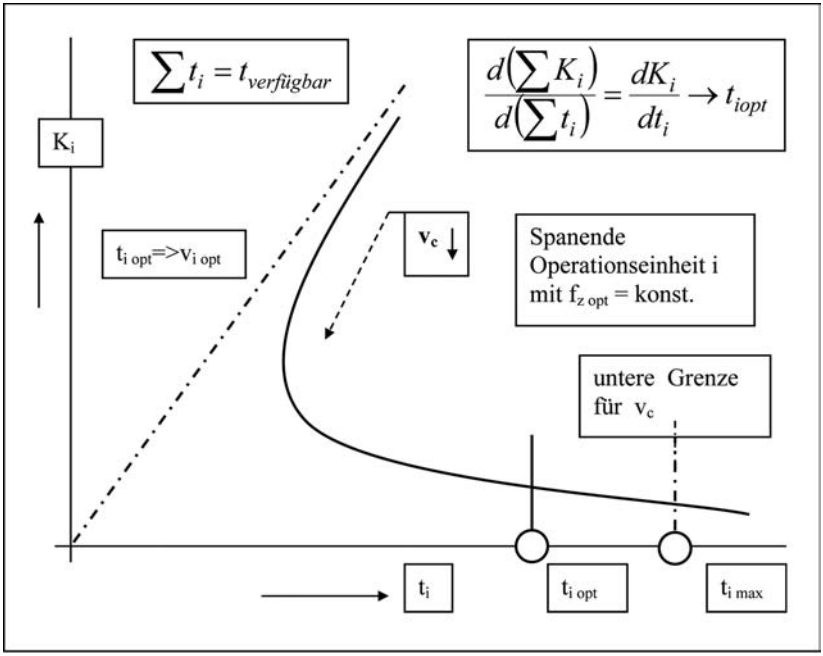

Abb. 10: Auslastungsoptimierung der spanenden Operationseinheiten bei gegebener arbeitsplatzbezogener verfügbarer Fertigungszeit (K_i: Fertigungskosten; t_i: Fertigungszeit)

Für Arbeitsplätze, bei denen nach der dispositiven Fertigungssteuerung die verfügbaren Zeiten größer als die erforderlichen Fertigungszeiten bleiben, bietet sich die Bestimmung einer kostenoptimalen zeitlichen Arbeitsplatzauslastung an. Sie erfolgt durch eine im Vergleich zur vierten Modellebene „sekundäre“ Optimierung der dem betrachteten Arbeitsplatz zugeordneten spanenden Operationseinheiten mit definierten WSWW-Lösungsfeldern, d. h. die kinematischen Schnittgrößen Schnittgeschwindigkeit und Schneidenvorschub stellen auch hier die Optimierungsvariablen dar. Abb. 10 zeigt die Anwendung der Polyoptimierung mit dem Zweierkompromiss Fertigungskosten und Fertigungszeit zur Lösung des Optimierungsproblems, das in der kostengünstigen Verteilung der verfügbaren Zeit auf die arbeitsplatzbezogenen, spanenden Operationseinheiten besteht. Dabei muss als fertigungsorganisatorische Nebenbedingung die arbeitplatzbezogene Summe aller ermittelten kostenoptimalen Fertigungszeiten $t_{i\ opt}$ der Operationseinheiten gleich der verfügbaren Zeit sein. Die mathematische Optimierregel ist in Abb. 10 angedeutet.

3.3 Operative Fertigungssteuerung mit holonischen Merkmalen

Die operative Fertigungssteuerung hat die Aufgabe, nicht zu vermeidende technische und organisatorische Prozessstörungen zeitlich zu kompensieren. Prozessstörungen sind z. B. Werkzeugbruch, Werkzeugmaschinenhavarie oder kurzfristige, in der Disposition nicht berücksichtigte Eilaufträge. Zwei prinzipielle Möglichkeiten der operativen Fertigungssteuerung lassen sich nennen:

- Reaktivierung der zentralen dispositiven Fertigungssteuerung, um die durch die Störung verlorene Zeit zu kompensieren. Solche ereignisorientierten Umdispositionen sind aufwendig und erschweren die Transparenz der Fertigung.
- Lokale, zeitliche Störungskompensation ohne Reaktivierung der zentralen Disposition mittels Werkzeugmaschinensteuerungen mit *holonischen* Merkmalen.

Das Kunstwort *Holon* (vgl. Koestler 1982) setzt sich aus „w*hol*e“ (ganz) und der Endung „*on*“ der Bezeichnungen von Elementarteilchen (Elektr*on*, Neutr*on*, ...) zusammen. In Analogie zu biotischen und sozialen Systemen sollen Holone die hybride Natur von Teilen als Subganzes beschreiben. Holone sind danach autonome Ganzheiten gegenüber ihnen untergeordneten Teilen. Sie können miteinander kooperieren und sind gleichzeitig auch von

übergeordneten Ganzheiten abhängig. Holone müssen also mindestens die Kompetenzmerkmale Autonomie und Kooperation aufweisen.

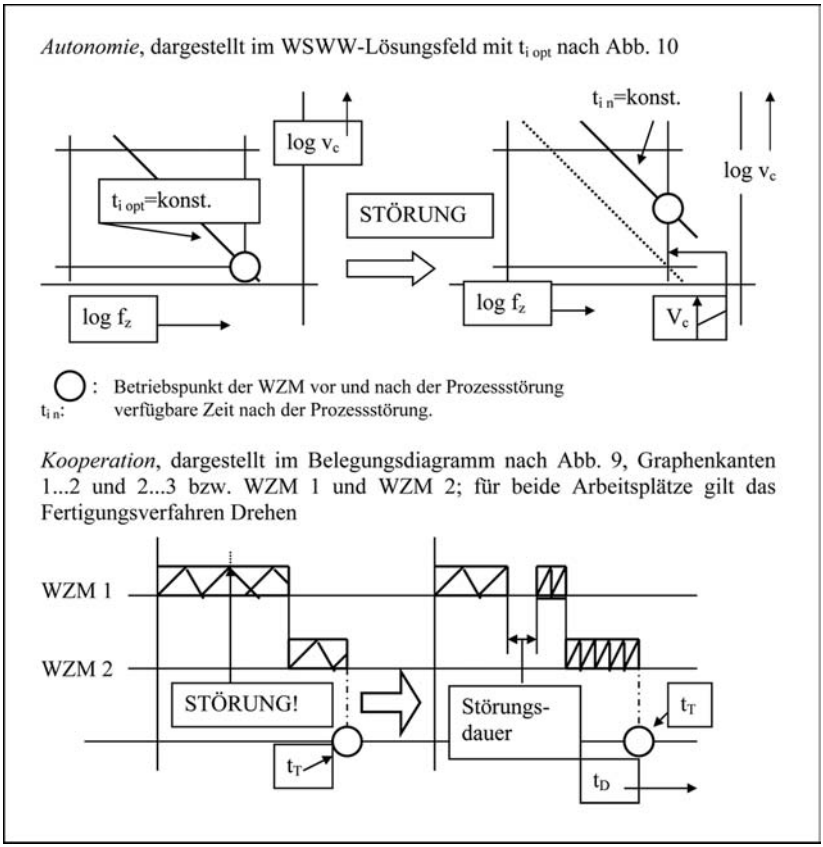

Abb. 11: Operative Fertigungssteuerung zur zeitlichen Störungskompensation mittels holonischer Autonomie- und Kooperationskompetenz der Werkzeugmaschinensteuerungen

Mit Abb. 11 wird demonstriert, wie diese holonischen Merkmale für eine operative Fertigungssteuerung realisiert wurden (vgl. Bengoa/Gluch/Jacobs 1996):

- *Autonomie*: Das von der Störung betroffene WSWW-System entscheidet über die Werkzeugmaschinensteuerung autonom, was zur Einhaltung der übergeordneten Ziele Auftragstermin und Auftragsstückzahl nach der Störungsbehebung zu tun ist. Im in Abb. 11 dargestellten WSWW-Lö-

sungsfeld für die störungsbetroffene Operationseinheit i ist der geometrische Ort der durch die Auslastungsoptimierung gegebenen, optimalen werkstückbezogenen Fertigungszeit $t_{i\ opt}$ als verfügbare Zeit eingetragen. Die Störungsdauer verringert diese Zeit, gekennzeichnet durch die in Abb. 11 ebenfalls eingetragene restliche verfügbare Zeit $t_{i\ n}$ nach der Störungsbehebung. Diese Zeit ist kleiner als die für den Restauftrag durch die Auslastungsoptimierung gegebene erforderliche Zeit. Um diesen Zeitverlust zu kompensieren, werden die Werte für die kinematischen Schnittgrößen v_c und f_z so weit erhöht, dass die dadurch gesenkte erforderliche Zeit wieder gleich der verringerten verfügbaren Zeit ist. Damit sind Termin und Stückzahl gesichert. Dies bedeutet, dass der durch die Fertigungsplanung, die dispositive Fertigungssteuerung und die Auslastungsoptimierung gegebene eindeutige Prozessgraph nicht mehr statisch, sondern dynamisch ist (Steuerung als dynamische Planung).

- *Kooperation:* Wenn nach Abb. 11 die Prozessstörung trotz autonomer, dynamischer Schnittwertplanung die Störung am Arbeitsplatz mit der Werkzeugmaschine WZM 1 zeitlich nicht kompensiert werden kann, wird die Werkzeugmaschine WZM 2 eines technologisch alternativen Arbeitsplatzes aufgefordert, den von WZM 1 nach der Störung nicht mehr termingerecht zu schaffenden Restauftrag zusätzlich mit zu übernehmen. Dazu plant auch WZM 2 modellgestützt höhere kinematische Schnittwerte innerhalb ihrer WSWW-Lösungsfelder, d. h. kürzere Fertigungszeiten für ihren ursprünglichen Auftrag, damit die dadurch frei werdende Fertigungszeit für den von WZM 1 zu übernehmenden Restauftrag verfügbar wird. Diese prozessinternen Erhöhungen der Schnittwerte sind in Abb. 11 durch eine dichtere Schraffur der Auftragsbalken im Durchlaufdiagramm dargestellt.

Ein erster experimenteller Software-Holon für Werkzeugmaschinensteuerungen ist verfügbar (vgl. Heinrich 2004).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Abb. 12 zeigt das durch die erläuterten acht Modellebenen strukturierte Gesamtmodell für die Fertigungsplanung und Fertigungssteuerung. Die Modellebenen mit den exemplarischen Prozessmodellen für die Zerspantechnik haben bisher erst partiell Eingang in die industrielle Praxis gefunden. Die zugeordneten technischen und organisatorischen Entscheidungsebenen sind jedoch allgemeingültig für die industrielle Teilefertigung. Ihnen liegen heute unterschiedliche Methoden zugrunde. Sie reichen vom Erfahrungswissen der

Ingenieure, Meister und Facharbeiter sowie den Empfehlungen der Fertigungsmittelhersteller bis hin zu den dargestellten Prozessmodellen.

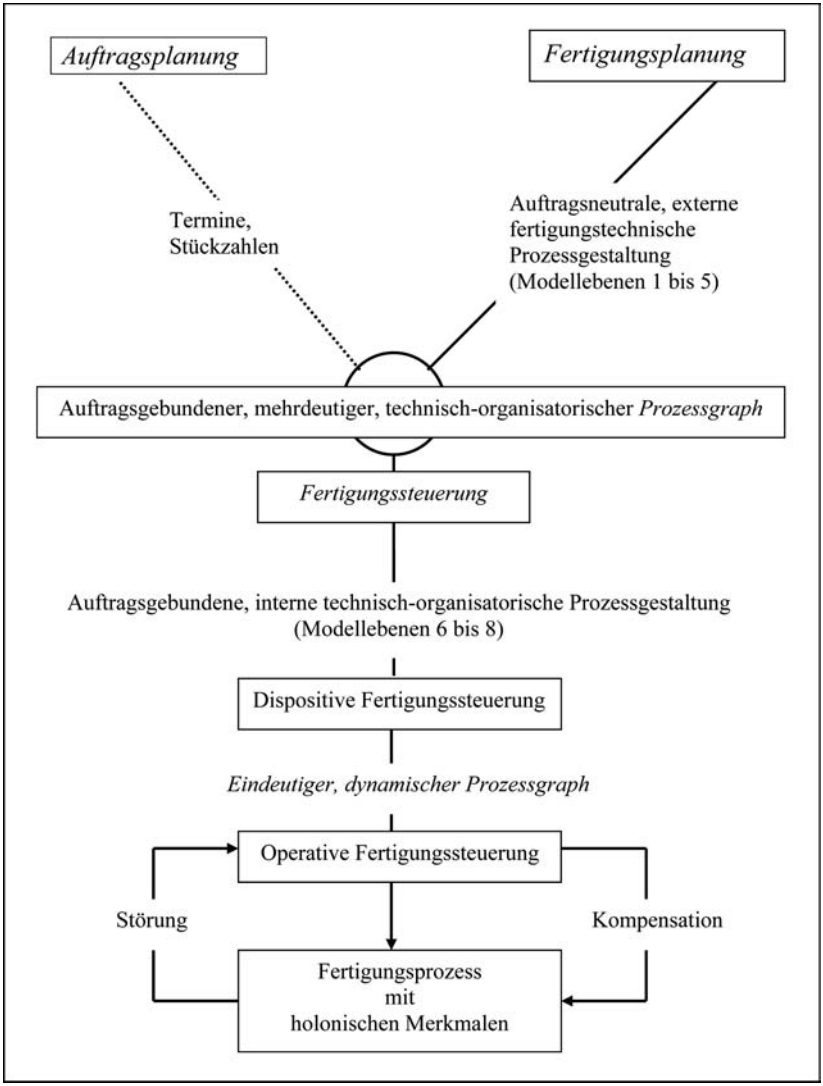

Abb. 12: Gesamtmodell für Fertigungsplanung und Fertigungssteuerung

Die „Konstruktionsbausteine“ der vom Autor für die Zerspantechnik vorgeschlagenen Prozessmodelle sind

- die in zulässigen Wertebereichen frei wählbaren und einstellbaren kinematischen Schnittgrößen als Funktionsvariable der Kenngrößengleichungen und als Koordinaten der WSWW-Lösungsfelder zur Darstellung der spanenden Operationseinheiten mit den gegebenen technischen Restriktionen der WSWW-Systeme und mit den durch die dispositive und operative Fertigungssteuerung gegebenen verfügbaren Zeiten als organisatorische Restriktionen;
- die eindeutigen bzw. mehrdeutigen sowie die statischen bzw. dynamischen Fertigungsprozessgraphen;
- die ökonomischen Zielfunktionen für die Fertigungskosten bei unterschiedlichen Fertigungsorganisationen und für die Fertigungszeit zur technisch-ökonomischen und organisatorisch-ökonomischen Optimierung spanender Operationseinheiten mit den kinematischen Schnittgrößen als Optimierungsvariable.

Als Ausblick sei angemerkt, dass sich mit den vorgestellten Prozessmodellen erste Konturen einer „intelligenten“, flexiblen Fertigung offenbaren.[1] Sie seien in Verbindung mit den vorgelegten Lösungsvorschlägen durch folgende Merkmale geplanter und gesteuerter Fertigungsprozesse belegt:

- *Dynamik*: Ständige Berücksichtigung der aktuellen technischen und organisatorischen Prozesssituation (Lernfähigkeit der WSWW-Systeme);
- *Varianz*: Fertigungsprozesse mit alternativen WSWW-Systemen (Redundanz durch mehrdeutige Prozesslösungen);
- *Autonomie*: Unabhängigkeit von der starren zentralen Fertigungsplanung und Fertigungssteuerung (technisch-organisatorische Selbstoptimierung);
- *Kooperation*: Fähigkeit zweier oder mehrerer technologisch alternativer Arbeitsplätze zur gegenseitigen Unterstützung bei der Realisierung von technisch und organisatorisch definierten Fertigungsaufträgen.

Mit solchen Merkmalen verwandeln sich die heutigen starren Planungs- und Steuerungshierarchien der industriellen Fertigung in sog. *Holarchien*,[2] mit denen an Stelle von Befehlsstrukturen Verhandlungskonzepte treten.

---

1 Siehe: IMS – Intelligent Manufacturing System. – www.ims.org. [April 2004].

2 Siehe: The Holonic Manufacturing and Controls Concepts. Western Reserve Controls. – www.wrcakron.com/holonic.html. [April 2004].

Literatur

Bengoa, A.; Gluch, St.; Jacobs, H.-J. (1996): An Approach to Holonic Components in Control of Machine Tools. In: Annals of the CIRP. Zeitschrift der internationalen Forschungsgemeinschaft für mechanische Produktionstechnik CIRP, vol. 45, no. 1, pp. 437–440

Jacobs, H.-J.; Dürr, H. (2002): Entwicklung und Gestaltung von Fertigungsprozessen. Planung und Steuerung der spanenden Teilefertigung. Leipzig

Jacobs, H.-J. (2004): Mathematische Basismodelle der Zerspantechnik. Universitäts- und Hochschulkompendium für das fortgeschrittene Studium des Lehrgebietes Fertigungstechnik. Dresden (Technischen Universität, Institut für Produktionstechnik, Professur Prozessautomatisierung, Zerspan- und Abtragtechnik), Manuskriptdruck (Preprint)

Heinrich, St. (2004): Operative technisch-organisatorische Planung und Steuerung der spanenden Teilefertigung mit holonischen Merkmalen. Dissertation. Chemnitz (Technische Universität, Fakultät für Maschinenbau)

Koestler, A. (1982): The Ghost in the Machine. New York

Peschel, M. (1980): Ingenieurtechnische Entscheidungshilfen. Modellbildung und Steuerung mit Hilfe der Polyoptimierung. Berlin

Taylor, F. (1906): On the Art of Cutting. In: Transaction of ASME (American Society of Mechanical Engineering), vol. 28, November, pp. 31–279, 281–350