

# Raum-Zeit-Systeme in der Fertigungsphysik

Multifunktional genutzte Arbeitsräume am Beispiel des Square Foot Manufacturing

Jens P. Wulfsberg, Tobias Redlich, Jörg Lehmann, Franz-L. Bruhns

Die wachsende Individualisierung von Produkten und die damit einhergehende Komplexität der Fertigung erfordern neue wandlungsfähige Produktionssysteme. In diesem Beitrag wird das Konzept multifunktional genutzter Arbeitsräume am Beispiel des Square Foot Manufacturing vorgestellt. Die Zielstellung dieses speziellen Fertigungskonzeptes ist der simultane Einsatz mehrerer funktionell reduzierter Maschinen auf kleinstem Raum zur Fertigung kleiner Teile. An diesem Beispiel wird deutlich, dass mit einer solchen Fertigung zusätzliche Freiheitsgrade im Rahmen der Fertigungsplanung gewonnen werden können. Dabei ist zu prüfen, ob die gängigen Denkmodelle der Fertigungsphysik ihre Gültigkeit behalten oder gegebenenfalls erweitert werden müssen.

## Einführung

Der Begriff "Fertigungsphysik" umschreibt ein Forschungsgebiet, in dessen Mittelpunkt nach [1] besonders Fragestellungen zur Wechselwirkung zwischen Werkzeug und Werkstück stehen. Untrennbar mit Werkzeug und Werkstück ist jedoch auch der jeweilige Arbeitsraum verbunden, in dem diese angeordnet sind.

Ausgehend von konventionellen Werkzeugmaschinen existiert ein Arbeitsraum<sup>1</sup> mit festgelegter geometrischer Ausdehnung, der durch die maximale Verfahrbewegung der Maschinenachsen begrenzt wird. Diesem Maschinenarbeitsraum werden sowohl Werkstücke als auch Werkzeuge zugeführt. Das Werkstück wird in der Aufspannung festgehalten und die Werkzeuge werden nacheinander zur Bearbeitung eingebracht. In der Regel ist für einen Technologiewechsel hier auch ein Arbeitsraumwechsel des Werkstücks notwendig (z.B. von spanender Bearbeitung zu Laserbearbeitung). Die Einspannung im neuen Arbeitsraum erfordert dann eine erneute Referenzierung des Werkstückes.

Da die zunehmende Individualisierung von Produkten zu steigender Fertigungskomplexität [2] bei gleichzeitiger Verringerung der Losgrößen, im Extremfall bis zur Stückzahl "Eins" [3], führt, nimmt der Anteil der Nebenzeiten somit stetig zu. Eine nachhaltig wirtschaftliche Fertigung erfordert somit flexible sowie schnell und einfach rekonfigurierbare Fertigungseinrichtungen. Einsparpotential bietet hierbei die Reduktion von Referenziervorgängen von Werkstücken, Werkzeugen.

Eine Möglichkeit dazu besteht in der Vereinigung mehrerer Technologien im Arbeitsraum einer konventionellen Maschine, wodurch eine Fertigungseinrichtung mit multifunktionalem Arbeitsraum entsteht [4]. Neben den verschiedensten Fertigungstechnologien beinhaltet dieser auch Messtechnik und Handhabungstechnik.

## Raum-zeitliche Modellvorstellungen

Beim Einsatz eines multifunktionalen Arbeitsraumes wird das zu bearbeitende Werkstück in einem Bereich aufgespannt, in dem sich die einzelnen Sub-Arbeitsräume der im Maschinenarbeitsraum vorhandenen Technologien überlappen (**Bild 1**). Bei einer größeren Anzahl zu verknüpfender Technologien bzw. Arbeitsräume besteht neben der einfachen Überlappung von Arbeitsräumen die Möglichkeit der Kaskadierung als Sonderform der Verschachtelung, mehrerer Arbeitsräume. Die möglichen Wechselwirkungen zwischen Werkzeug(en) und Werkstück sind somit komplexer, eine separate Betrachtung der

---

<sup>1</sup> Arbeitsraum / working space / work space (Definition nach [5]): „Der dreidimensionale Raum in der Maschine, der durch Schnittbewegung, Zustellung und Vorchubbewegung erzeugt wird, welche die Form von linearer, rotatorischer, kontinuierlicher oder schrittweiser Bewegung annehmen.“

herkömmlichen Arbeitsräume ist nun unzureichend. Daher muss für die Betrachtung derartig verknüpfter Arbeitsräume die Fertigungsphysik um eine raum-zeitliche Komponente erweitert werden.

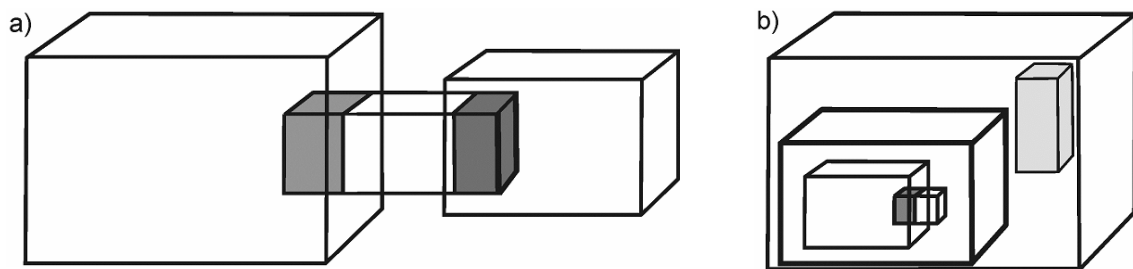


Bild 1: Beispiele für die Verknüpfung von Arbeitsräumen:  
a) Teilüberlappung eines Arbeitsraumes mit zwei sich nicht überlappenden Arbeitsräumen  
b) Kaskadierung mehrerer Arbeitsräume in einem Arbeitsraum

In Anlehnung an die klassische Physik werden im konventionellen Maschinenbau Geometrien und Abläufe allgemein dem anschaulichen dreidimensionalen euklidischen Raum zugeordnet. Die "absolute Zeit" läuft dabei unabhängig von jedem äußeren Einfluss ab, was den meisten Anforderungen gerecht wird, da hiermit auch relativ komplexe Planungsvorgänge dargestellt werden können.

Durch die Spezielle Relativitätstheorie hat die Vorstellung von Raum und Zeit einen Paradigmenwechsel erfahren. Danach ist die Welt des physikalischen Geschehens vierdimensional im raumzeitlichen Sinne, d. h. die sogenannte "Minkowski-Welt" stellt eine "Union von Raum und Zeit" her. Da sich das vierdimensionale Geschehen aus Einzelereignissen zusammensetzt, die beliebig dicht aufeinander folgen, spricht man von Kontinuum. Die vierte Koordinate repräsentiert den Zeitwert  $t$ . Die Umrechnung der Koordinaten eines Ereignisses von einem Bezugssystem auf das andere regelt dabei die sogenannte Lorentz-Transformation. Für relativ zueinander gleichförmig-geradlinig bewegte Systeme ist der raumzeitliche Abstand zweier Ereignisse vom Bewegungszustand des Bezugssystems unabhängig. Da der Mensch durch seine psychologisch bedingte subjektive Betrachtungsweise dieses Raum-Zeit-Kontinuum wieder aufspaltet, führt dies zu Einschränkungen in Bezug auf die Nutzung von raum-zeitlichen Lösungen. [6]

Eine Übertragung dieser Erkenntnis auf das Konzept der multifunktionalen Arbeitsräume bedeutet: Es werden verschiedenste Maschinen in Arbeitsräumen, die jeweils eigenen Zeitvektoren zugeordnet sind, miteinander kombiniert bzw. zusammengeführt. So kann die Darstellung der Raum-Zeit-Systeme bei multifunktionalen Arbeitsräumen analog zu einer relativistischen Physik begrifflich erweitert werden kann, während z.B. die Überführung der einzelnen Koordinatensysteme analog zur klassischen Physik erfolgt. Tabelle 1 stellt die Auffassungen der klassischen und relativistischen Physik analog denen einer relativistisch erweiterten Fertigungsphysik gegenüber. Der gesamte Arbeitsraum kann so als ein mathematischer Phasenraum<sup>2</sup> aufgefasst werden, welcher von den zeitlich veränderlichen Variablen verschiedener dynamischer Systeme (zum Beispiel Positionen von Werkzeugen und Werkstücken) aufgespannt wird.

<sup>2</sup> auch Zustandsraum: hierbei handelt es sich um die Lösung von Differentialgleichungssystemen, wobei jede Kombination einzelner Werte der Variablen einem Punkt in diesem Raum entspricht und einen Zustand zugeordnet werden kann.

	<b>Klassische Physik bzw. Fertigungsphysik</b>	<b>Relativistische Physik</b>	<b>Relativistisch erweiterte Fertigungsphysik</b>
	Raum, Zeit	Raum-Zeit (Welt)	Raum-Zeit-Systeme
	Drehung des Koordinatensystems	Lorentz-Transformation	Drehung bzw. Verschiebung des Koordinatensystems
<b>absolute Größen</b>	räumlicher Abstand zweier Punkte	Weltlinienelement (Abstand zweier Weltpunkte)	Arbeitsräume
<b>relative Größen</b>	Horizontal- und Vertikalabstand zweier Punkte von Bezugslinien	räumlicher und zeitlicher Abstand zweier Punkt ereignisse	räumlicher und zeitlicher Abstand zweier Fertigungsereignisse

Tabelle 1: Vergleich von Elementen der klassischen und relativistischen Physik mit Elementen einer relativistisch erweiterten Fertigungsphysik (nach [4], erweitert)

In der Fertigungspraxis sind die Räume zum Zeitpunkt  $t$  mit denen zum nächst folgenden Zeitpunkt  $t+1$  „verwandt“, d.h. sie vererben bedingt ihre Eigenschaften. Die Eigenschaften bestehen in diesem Fall aus eingprägten Geometrien, Massen und Energien. Besondere Bedeutung für die Produktion hat, dass zu einem Zeitpunkt  $t+x$  ein fest definierter Zustand erwartet wird, den es zu erreichen gilt. Dabei werden die Zeitpunkte, zu dem dieser Zustand erreicht wird, nicht mehr absolut der Weltzeitachse sondern einer Zustandsachse zugeordnet.

### **Realisierung multifunktionaler Arbeitsräume mittels Square Foot Manufacturing**

Am Laboratorium Fertigungstechnik wurde zur Nutzung dieses Ansatzes ein wandlungsfähiges Fabrik- und Fertigungskonzept für die Herstellung von Mikroteilen entwickelt, dessen Bezeichnung Square Foot Manufacturing (SFM) auf die Abmessung seiner Grundplatte zurückzuführen ist (Bild 2). Die Grundfläche einer Square Foot Factory (SFF) soll demnach ein Quadratfuß (engl. square foot) nicht überschreiten.

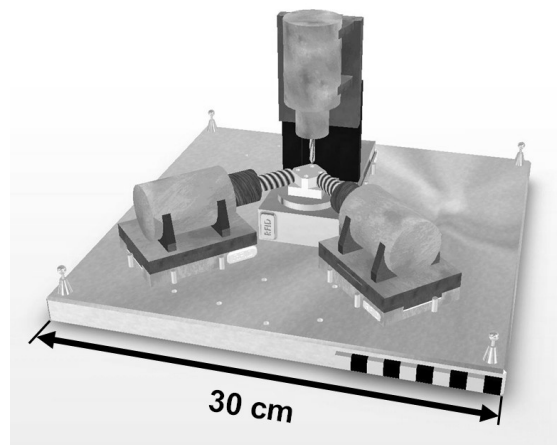


Bild 2: Square Foot Manufacturing

Auf der Basis eines „Selbstjustierenden koordinatentreuen Spannsystems“ [7] werden miniaturisierte Werkzeugmaschinen ortsflexibel auf einer Basisplatte angeordnet. Dazu wird auf der dafür vorgesehenen Basisfläche eine Reihe von möglichen Positionen für die Platzierung von miniaturisierten Werkzeugmaschinen (operationsspezifisch) vordefiniert,

wobei die jeweilige Maschinenposition durch drei zylinderförmige Anschlagstifte auf der Basisfläche in Bezug auf das entsprechende Maschinenbett für die Bearbeitung festgelegt wird. Die Einspannung von Werkstücken und Werkzeugen kann kraftschlüssig beispielsweise durch die Verwendung von Magnetspanntechnik erfolgen [8]. Die miniaturisierten Werkzeugmaschinen können dadurch abhängig von der Bearbeitungsaufgabe an das Werkstück herangeführt und auf geeigneten Aufstellplätzen so positioniert werden, dass sich ihr Arbeitsraum mit dem zu bearbeitenden Raumausschnitt des Werkstücks überlagert. Grundsätzlich ist dabei der Einsatz mehrerer Miniwerkzeugmaschinen am gleichen Werkstück möglich, so dass eine Überlagerung oder Kaskadierung der einzelnen Arbeitsräume entsteht.

Da nicht nur die Fertigungseinheiten sondern auch die Werkstückcarrier über das beschriebene Spannsystem positionierbar sind, ist das Werkstück während der Transport- und Bearbeitungszyklen somit sicher und fest auf dem Carrier fixiert, d.h. die Werkstückposition auf dem Carrier ist an jeder Bearbeitungsstation bekannt. Für eine evtl. erforderliche Mehrseitenbearbeitung kann der Carrier immer in Stufen gekippt werden, so dass z.B. auch Querbohrungen durch ein einfaches Vertikalbohrwerk in das Werkstück eingebracht werden können.

Zwischen Werkstück und Bearbeitungsmaschine entsteht dabei eine feste oder auch starre Kopplung, wie sie aus konventionellen Werkzeugmaschinen bekannt ist [9]. Durch die bedarfsabhängige Umpositionierung bzw. den Austausch der miniaturisierten Werkzeugmaschinen wird diese Kopplung dynamisch aufgelöst, d.h. entsprechend der Bearbeitungsaufgabe werden benötigte Maschinen an das Werkstück herangeführt, was den Vorteil bietet, dass mehrere Maschinen seriell oder parallel das Werkstück bearbeiten können.

Baustellenfertigung und Werkstattfertigung  
 In Bild 3 wird das Prinzip einer Produktion mittels SFM grafisch dargestellt. Hier ist die Werkstückwechsoption durch die hinter der Basisplatte angeordneten, bereits bestückten (links) und zum Teil auch schon bearbeiteten (rechts) zusätzlichen Carrier angedeutet.

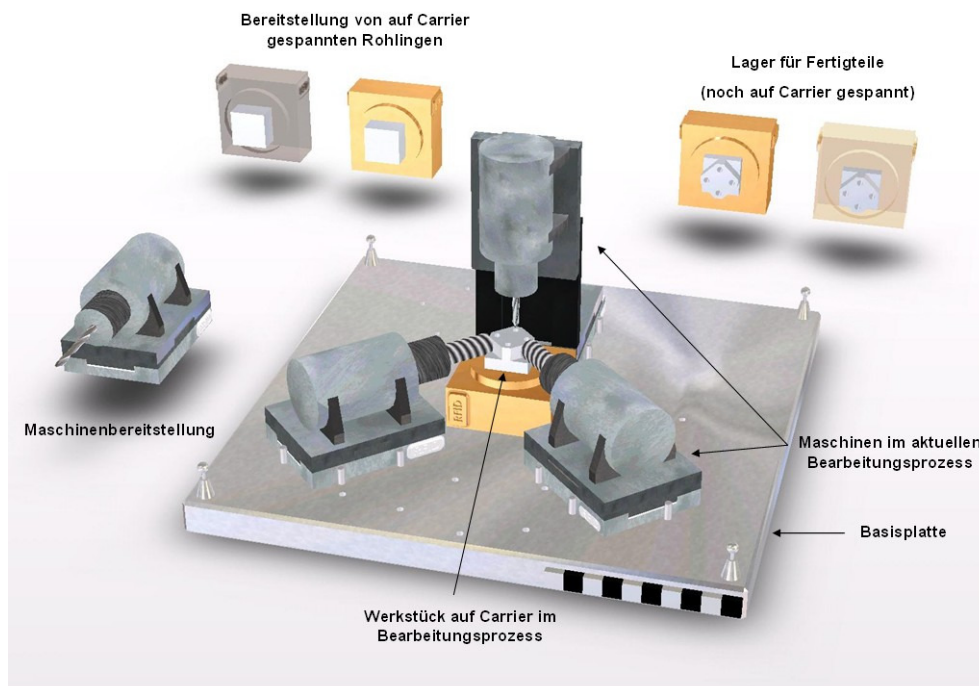


Bild 3: Prinzip des Square Foot Manufacturing – Baustellenfertigung

Links neben der Basisplatte wird die benötigte Maschinenbereitstellung in Form einer weiteren Werkzeugmaschine dargestellt. Hier befinden sich die zurzeit nicht benötigten

Fertigungseinheiten bzw. es werden hier Einheiten zur Verfügung gestellt, die in späteren Arbeitsschritten benötigt und gegen auf der Basisplatte befindliche Einheiten ausgetauscht werden. Je nach Organisation der Fertigung kann ein zentrales Lager für die Maschinen vorhanden sein oder, wie angedeutet, ein dezentrales Lager direkt neben der Basisplatte eingerichtet werden. Ebenfalls angedeutet wird die beschriebene Möglichkeit, eine zweite Fertigungseinheit auf der Basisplatte zu platzieren, die zeitgleich zur ersten Einheit das Werkstück bearbeitet.

Der Einfachheit halber wurde bisher davon ausgegangen, dass sich nur eine Basisplatte im Einsatz befindet. Im Allgemeinen ist jedoch davon auszugehen, dass zeitgleich verschiedene Produktionsprozesse ablaufen, so dass auch mehrere verschieden konfigurierte, mit Maschinen bestückte Basisplatten zeitgleich im Einsatz sind. Je nach Organisation der Fertigung steht dabei an jeder Basisplatte ein eigenes Lager zur Verfügung, oder es werden alle aktiven Basisplatten aus einem zentralen Lager versorgt. Grundsätzlich können in einem zentralen Lager auch derzeit nicht verwendete oder speziell für einen Fertigungsauftrag konfigurierte Basisplatten eingelagert sein. Neben der beschriebenen Umsetzung des SFM als eine Art Baustellenfertigung, bietet das Konzept aber auch die Möglichkeit, eine Werkstattfertigung zu realisieren. Hierzu sind dann aber u.U. mehrere Basisplatten notwendig, da die benötigten Miniwerkzeugmaschinen nicht mehr als mobil zu betrachten sind sondern einen festen Platz auf der Basisplatte erhalten. Der prinzipielle Aufbau einer Werkstattfertigung mit dem SFM ist in Bild 4 dargestellt.

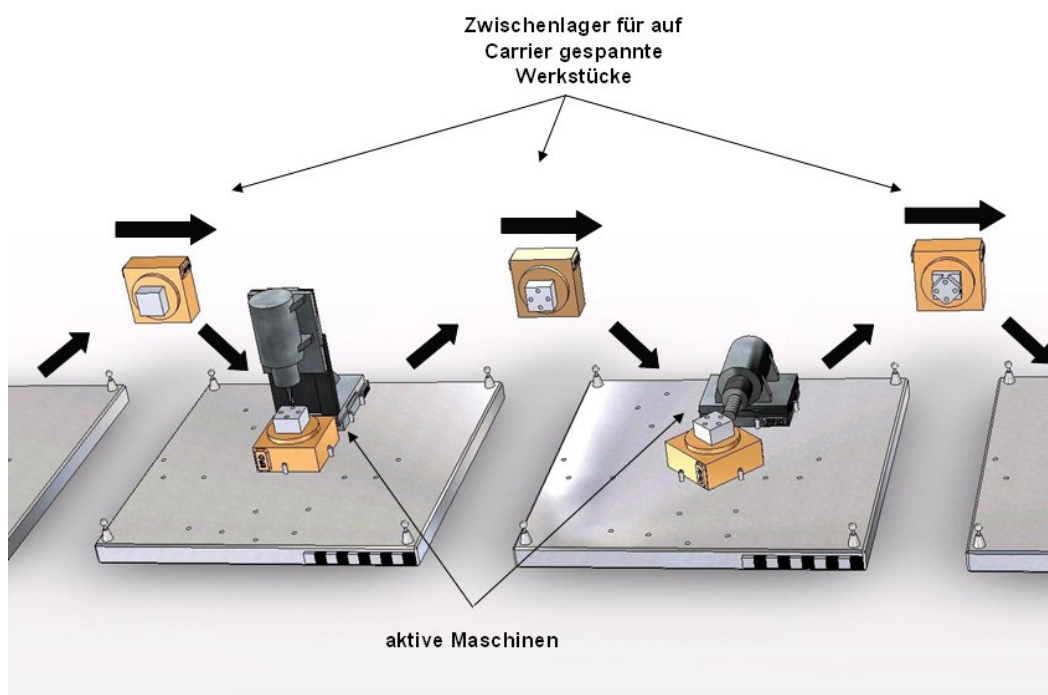


Bild 4: Werkstattfertigung mit Komponenten des Square Foot Manufacturing

Durch eine Reduktion der Komplexität der Systemkomponenten und einer zeitparallelen multifunktionalen Nutzung des Arbeitsraumes wird die Wandlungsfähigkeit dieses Systems gewährleistet. Die bisher vorhandenen Strukturen und Kinematiken von Werkzeugmaschinen werden raum-zeitlich aufgelöst und vollkommen neu konzipiert. Dabei wird die zeitliche Zuordnung von Produktionsabläufen relativiert und durch die Betrachtung von Fertigungsereignissen in den multifunktionalen Arbeitsräumen ersetzt.

Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass simultan verschiedene Produktionsprozesse ablaufen, so dass auch mehrere verschieden konfigurierte, mit Maschinen bestückte Basisplatten zeitgleich im Einsatz sein können.

Die als "Minkowski-Welt" beschriebene Betrachtungsweise der "Union von Raum und Zeit" trifft auf das Konzept des Square Foot Manufacturing zu. Eine Übertragung dieses Ansatzes auf das SFM bedeutet: Es werden verschiedenste Minimaschinen in durch Basisplatten geordneten Arbeitsräumen, die jeweils eigenen Zeitvektoren bzw. Zustandsachsen zugeordnet sind, miteinander kombiniert bzw. zusammengeführt. Verschachtelungen entstehen entsprechend durch raum-zeitlich parallelen, seriellen oder überlappenden Einsatz der Systemelemente. Die einzelnen Basisplatten des SFM können dabei als jeweils unabhängige Welt betrachtet werden, die zunächst in ihrer Funktion dreidimensional ordnend auf die Positionierung der einzelnen Arbeitsräume bzw. Maschinen wirken. In Erweiterung der relativistischen Physik lassen sich entsprechend der Anzahl von eingesetzten Basisplatten durch das SFM beliebig viele unabhängige parallele Welten, bezogen auf den Zeitvektor, beschreiben und ggf. miteinander verknüpfen.

Neben den vielen Möglichkeiten zu weiteren Realisierungen von multifunktionalen Arbeitsräumen eröffnet das neue Konzept, insbesondere unter Berücksichtigung der fertigungsphysikalischen Raum-Zeit-Verknüpfung von Arbeitsräumen, weiteren Forschungsbedarf insbesondere bezüglich seiner Auswirkungen auf die Produktionsplanung und -steuerung.

### **Auswirkungen auf die Produktionsplanung und -steuerung (PPS)**

Bei der Fertigungsplanung sind für die Herstellung eines Werkstücks beim SFM neben der Technologie auch die zu verwendende Maschine und deren Position auf der Basisplatte anzugeben. Es ist daher für jedes zu produzierende Werkstück eine Art Bestückungsplan für die Positionen auf Basisplatte erforderlich. Je nach zu bearbeitendem Werkstück kann dann die Position der Bearbeitungsmaschine über Anschlagstifte grob vorpositioniert werden. Bei einer sich wiederholenden Produktion können die Anschläge für die benötigten Maschinen und ihre Positionen problemlos wieder eingerichtet werden. Des Weiteren ist bei der Fertigungsplanung zu berücksichtigen, dass mehrere Maschinen zeitgleich operieren können. Es besteht daher die Planungsaufgabe, den Fertigungsprozess hinsichtlich der raumzeitlichen Verkettung einzelner Arbeitsgänge zu optimieren und Kollisionen zu vermeiden. In diesem Zusammenhang tritt die herkömmliche Betrachtungsweise eines einzigen Maschinenarbeitsraumes in den Hintergrund. Für den Fertigungsprozess ist allein die Koordination der entstehenden Job-Arbeitsräume (**Bild 5**) von Bedeutung, die einzelnen Arbeitsgängen (AG) zugeordnet sind [10]. Hierbei wird auch der Vorteil des zusätzlichen planerischeren Freiheitsgrades bei der Gestaltung von Fertigungsprozessen in multifunktionalen Arbeitsräumen deutlich. Er führt bereits für das dargestellte einfache Modellwerkstück zu einer wesentlichen Verkürzung des Fertigungsprozesses. Während für die Fertigung mit einer konventionellen Werkzeugmaschine drei nacheinander folgende Arbeitsgänge notwendig sind, laufen diese im multifunktionalen Arbeitsraum zum Teil parallel ab.

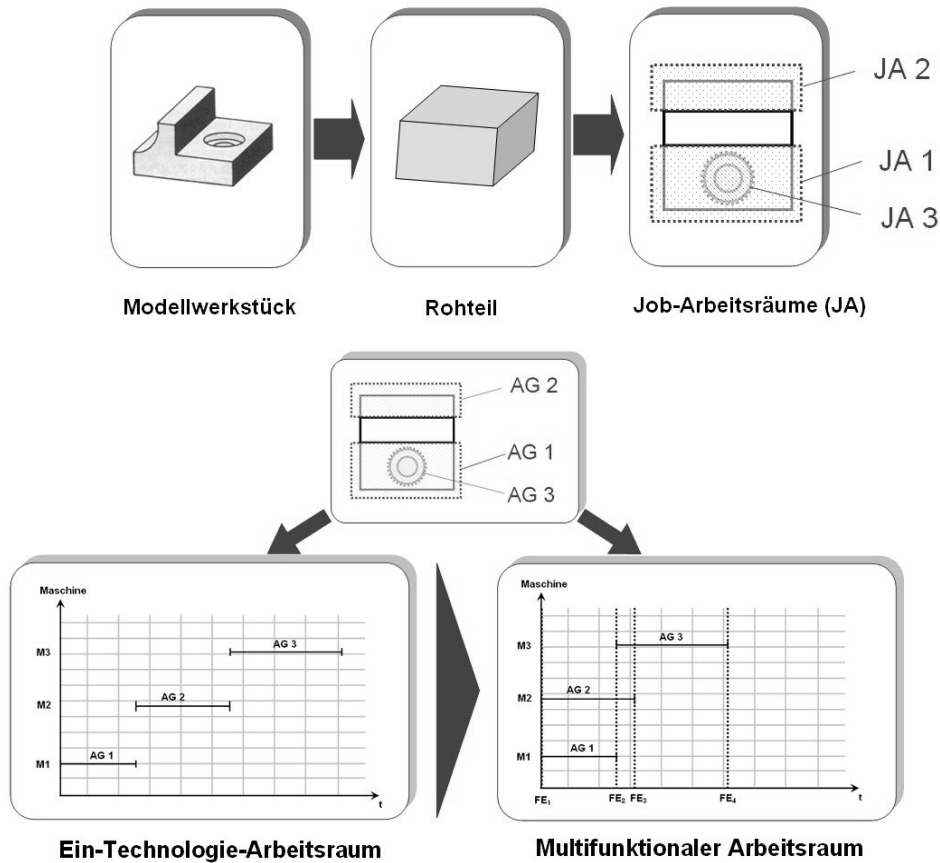


Bild 5: Job-Arbeitsräume im multifunktionalen Arbeitsraum

Durch die hohe Beweglichkeit kleiner Maschinen ergibt sich ein weiterer Freiheitsgrad bei der Planung von Fertigungsprozessen. Da die Maschinenteknik somit (wie bei der Baustellengerichtung) um ein Werkstück herum bewegt werden kann, erfährt die Fertigungsstrukturierung einen grundlegenden Wandel. Eine sukzessive Planung ist unter Umständen nicht mehr zielführend sondern bedarf einer individuellen (temporären) Konfiguration. Die dazu notwendigen Verfahren und Methoden für die PPS gilt es zu erforschen, um der neu entstandenen Veränderungsfähigkeit gerecht zu werden.

Eine Möglichkeit zur Untersuchung der Probleme bei der PPS bietet die Methode der Petri-Netze. Dabei handelt es sich um ein mathematisches Modell von nebenläufigen Systemen. Grundsätzlich besteht ein Petri-Netz aus sogenannten Stellen (Darstellung als Kreis), Transitionen (Darstellung als Rechteck) und Kanten / Pfeilen. Transitionen symbolisieren Bedingungen, bei deren Erfüllung eine durch das Petri-Netz wandernde Marke von einer Stelle zur nachfolgenden wechseln kann. Als Konstruktionsregel für die Netze ist zu beachten, dass niemals eine Transition direkt auf eine weitere Transition verweist und dass auch niemals auf eine Stelle direkt eine weitere Stelle folgen kann.

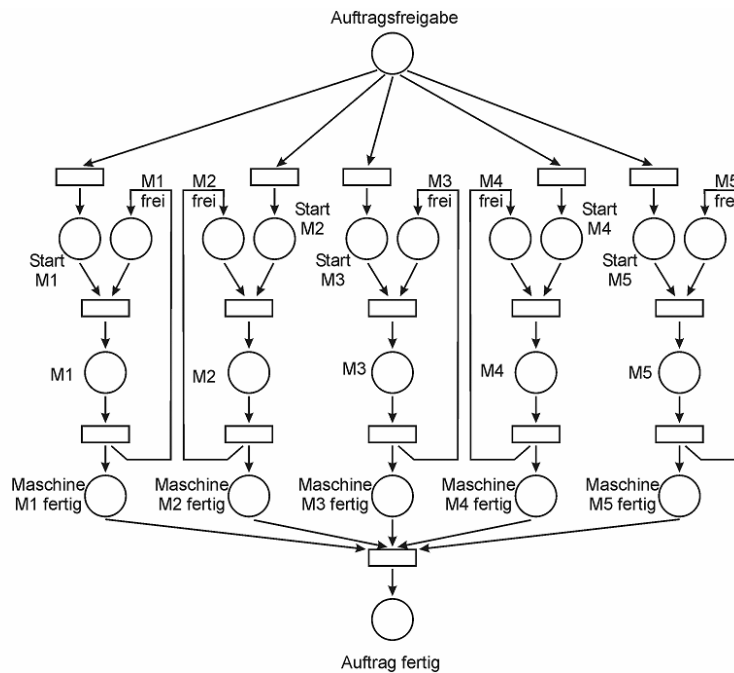


Bild 6: Petrinetzdarstellung des Fertigungsprozesses

Ein Auftrag wird freigegeben, indem in die Stelle Auftragsfreigabe eine Marke eingefügt wird. Die Marken sind in **Bild 6** nicht dargestellt, da sie sich als dynamische Komponenten durch das Netz bewegen. Durch die Marke ist die Schaltbedingung für die der Stelle nachfolgenden Transitionen erfüllt, so dass der an die Maschinen M1 bis M5 weitergegeben wird. Als Folge erhalten alle Stellen mit der Bezeichnung Start Mx eine Marke, während die Marke aus der Stelle Auftragsfreigabe verschwindet. Da zum Start der Bearbeitung auf der jeweiligen Maschine diese auch frei sein muss, muss auch in der Stelle Mx frei eine Marke vorhanden sein, damit die nachfolgende Transition schalten kann (Synchronisation). Ist dies der Fall, „wandert“ die Marke weiter in die Stelle Mx. Wenn der Bearbeitungsauftrag an der jeweiligen Maschine erfüllt ist, schaltet die nachfolgende Transition und meldet die Maschine wieder frei bzw. den Bearbeitungsprozess als fertig. Haben alle Maschine ihren Bearbeitungsauftrag erfüllt, kann auch die letzte Transition schalten und den Auftrag als fertig melden. Für jeden weiteren Auftrag ist eine Stelle Auftragsfreigabe wieder mit einer entsprechenden Marke zu füllen. Dies kann bereits erfolgen, während die Bearbeitung des voran gegangenen Auftrages noch erfolgt, da über die Stellen Mx frei die Bearbeitung von mehreren Aufträgen an einer Maschine blockiert wird. Über ähnliche Konstruktionen kann z.B. auch der Zugriff zweier Maschinen auf eine Werkstückstelle innerhalb sich überlappender Räume verhindert werden.

### Zusammenfassung

Die Produktion ist durch eine steigende Fertigungskomplexität bei gleichzeitiger Verringerung der Losgrößen gekennzeichnet. Dies erfordert flexible sowie schnell und einfach rekonfigurierbare Fertigungseinrichtungen. Hierbei ermöglicht die Verwendung multifunktionaler Arbeitsräume die Reduktion von Referenzvorgängen bei Werkstücken und Werkzeugen. Jedoch müssen die bisherigen raum-zeitlichen Modellvorstellungen aufgegeben beziehungsweise erweitert werden. Der Maschinenarbeitsraum spielt in der erweiterten Fertigungsphysik nur noch eine untergeordnete Rolle. Ferner rückt bei der Fertigungsstrukturierung bei der Verwendung multifunktionaler Arbeitsräume die Betrachtung von Job-Arbeitsräumen in den Vordergrund. Eine zukzessive Planung im Rahmen der PPS ist hierbei nicht mehr zielführend und muss durch eine individuelle Konfiguration abgelöst werden.



Die zur Anwendung multifunktionaler Arbeitsräume notwendigen Verfahren und Methoden gilt es zukünftig zu erforschen. Erste Ansätze hierzu bieten die verfügbare Automatentheorie.

### **Summary**

The increasing individualization of products and the consequential complexity of the manufacturing process require new versatile production systems. In this paper, the concept of multifunctional work spaces on the example of the Square Foot Manufacturing is introduced. The objective of this particular production concept is the simultaneous use of several functional reduced machines for the manufacturing of small parts. This particular example makes clear that additional degrees of freedom in the context of the production planning and control (PPC) can be obtained by working with multifunctional work spaces. But consequently also the current model of manufacturing physics has to be reconsidered due to the more complex manufacturing process.

### **Literatur**

- [1] Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G.: Ausblick: Und wie sieht die Zukunft aus? In: 100 Jahre Produktionstechnik – Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen von 1906 bis 2006. Berlin: Springer 2006, S. 707
- [2] Spur, G.: Technologische Komplexität als Herausforderung. ZWF Jahrg. 102 (2007) 10, Carl Hanser Verlag, München, S. 606-607
- [3] Lindemann, U.; Zäh, M.; Gahr, A.; Pulm, U.; Ulrich, C.; Wagner, W.: Massenproduktion mit Losgröße 1. ZWF Jahrg. 97 (2002) 5, Carl Hanser Verlag, München, S. 269 – 237
- [4] Lehmann, J.: Kombinierte multifunktionale Arbeitsräume zur Restrukturierung der Mikroproduktion. Berichte aus dem Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik. Aachen: Shaker 2006
- [5] Internationale Forschungsgemeinschaft für Mechanische Produktionstechnik CIRP (Hrsg.): Produktionssysteme - Wörterbuch der Fertigungstechnik Bd. 3, Springer, Berlin 2004
- [6] Melcher, H.: Relativitätstheorie. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften 1974
- [7] Wulfsberg, Lehmann, Bruhns: Selbstjustierendes koordinatentreues Spannsystem für die Mikroproduktion, Patentanmeldung, Offenlegung 14.06.2006, Aktenzeichen 10 2004 059 456.2
- [8] Wulfsberg, J. P.; Lehmann, J.: Spanntechnik für die Mikrofertigung. In: wt Werkstatttechnik, Jahrg. 93 (2003), S. 146-149
- [9] Wulfsberg, Lehmann, Bruhns: Dynamisch-starre Kopplung von hybriden Bearbeitungsräumen bei Desktopmanufacturing-Maschinen, Patentanmeldung 30.5.2005, Aktenzeichen 10 2005 024 693.1
- [10] Wulfsberg, J. P.; Redlich, T.; Lehmann, J.; Bruhns, F.-L.: Square Foot Manufacturing - Ein wandlungsfähiges Produktionssystem für die Fertigung von Mikroteilen. In: wt Werkstatttechnik online, Jahrgang 98, Ausgabe 5-2008, S. 337-344

### **Die Autoren des Beitrags**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg ist Leiter des Lehrstuhls Fertigungstechnik an der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg in Hamburg.

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Tobias Redlich studierte an der Helmut-Schmidt-Universität Wirtschaftsingenieurwesen mit der Vertiefungsrichtung Fertigungstechnik. Seit 2007 ist er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Fertigungstechnik.

Dr.-Ing. Jörg Lehmann war bis 2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Fertigungstechnik.

Dipl.-Ing. Franz-L. Bruhns arbeitet seit 1980 als Laboringenieur an der Helmut-Schmidt-Universität.