

Square Foot Manufacturing

Ein wandlungsfähiges Produktionssystem für die Fertigung von Mikroteilen

J. P. Wulfsberg, T. Redlich, J. Lehmann, F.-L. Bruhns

Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg, Dipl.-Wi.-Ing. Tobias Redlich, Dipl.-Ing. Jörg Lehmann, Dipl.-Ing. Franz-Ludwig Bruhns
Helmut-Schmidt-Universität – Universität der Bundeswehr Hamburg
– Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik – Laboratorium Fertigungstechnik
Holstenhofweg 85, D-22043 Hamburg
Tel. +49 (0)40 / 6541-2490 oder -2720
Fax +49 (0)40 / 6541-2839
E-Mail: jens.wulfsberg@hsu-hh.de; tobias.redlich@hsu-hh.de
Internet: <http://laft.hsu-hh.de>; www.mikromaschinenbau.com

Während der wissenschaftliche Diskurs um die Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen weiter andauert, wird sich einer Lösung im Wesentlichen über theoretische Konzeptionen und Modellierungen angenähert. Im folgenden Beitrag wird nun ein Ansatz für die praktische Umsetzung eines wandlungsfähigen Produktionssystems vorgestellt, der am Laboratorium Fertigungstechnik (LaFT) entwickelt wurde.

Square Foot Manufacturing - adaptable production system for manufacturing of micro parts

While the scientific discourse about the adaptability of production systems continues, a solution seems mainly to be approached by means of theoretical concepts and models. The following contribution presents now an approach for the practical implementation of an adaptable production system developed by Laboratorium Fertigungstechnik (LaFT).

1 Einleitung

Langfristig prognostizierbare Marktbedingungen und eine überwiegend von der Angebotsseite bestimmte Produktlandschaft gehören der Vergangenheit an. Die Absatzmärkte unterliegen in Zeiten der Globalisierung starken Schwankungen und sind durch größere Macht des Kunden und Marktsättigung bestimmt. Damit geht ein rasant steigender Bedarf an individualisierten Produkten einher, was Strategien der Kostenreduktion durch reine Massenproduktion nicht mehr zeitgemäß erscheinen lässt.

Einerseits existieren zweckbestimmte Produktionssysteme, die durch ihre Massenproduktionsfähigkeit aus Kostensicht sehr wirtschaftlich sein können, aber nicht in der Lage sind, adäquat auf kontinuierliche Produktänderungen zu reagieren. Andererseits gibt es außerordentlich anpassungsfähige Produktionssysteme, deren Flexibilität zum Teil nicht ausgenutzt wird, was sich wiederum negativ auf die Kosten auswirkt. Bei der Gestaltung von Produktionssystemen ist es jedoch notwendig, sich dem „Primat der Wirtschaftlichkeit“ [3] unterzuordnen, um dem Anspruch unternehmerischen Handelns gerecht werden zu können. Daher wurde die Wandlungsfähigkeit als zentrales Ziel ihrer Gestaltung herausgestellt [1]. Der Handlungsbedarf zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen wurde identifiziert und bereits konzeptionellen Betrachtungen unterzogen [1,2,3].

Mit diesem Beitrag wird ein praktischer Ansatz zur Gestaltung von Produktionssystemen mit der beschriebenen Zielsetzung vorgestellt. Zunächst werden dazu die Begriffe Produktionssystem und Wandlungsfähigkeit definiert und in den Zusammenhang eingeordnet. Anschließend erfolgt die Beschreibung des Konzeptes, dessen Eignung als wandlungsfähiges Produktionssystem untersucht und bewertet wird.

2 Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen

2.1 Definition Produktionssystem

Bei dem Betrachtungsgegenstand „Produktionssystem“ handelt es sich um ein abstraktes Konstrukt dessen Beschreibung sich durch eine systemtheoretische Betrachtungsweise auf eine Blackbox reduzieren

lässt. In dieser Blackbox wird Input (Informationen, Know-how, Methoden, Material, Finanzmittel, Energie) durch komplexe Transformationsprozesse in Output (Informationen, Produkte, Kosten, Reststoffe) umgewandelt. Neben Maschinen, Betriebsmitteln und Produktionsstätten können so auch Methoden und das Regelwerk für Prozessabläufe, zu den Komponenten eines Produktionssystems gerechnet werden. Die Systemgrenze wird häufig an der legalen Entität eines Unternehmens ausgerichtet [15] und kann sogar ganze Unternehmensnetze umfassen. Klassifizierungsmöglichkeiten ergeben sich beispielsweise nach Unterscheidungsmerkmalen wie Fertigungsstruktur, Produktionsstruktur und Organisationsprinzip.

Formuliert man die Aufgabe eines Produktionssystems jedoch ganz einfach als die wirtschaftliche Herstellung eines Produktes mit dem Ziel der Wertschöpfung, so entsprechen bereits einzelne Fertigungsmaschinen oder ein Fertigungssystem dieser Definition. In diesem Beitrag wird daher auf Produktionssysteme im engeren Sinn Bezug genommen, d.h. Systeme, die von den Grenzen ihres technologischen Umsystems umschlossen und losgelöst von dem umgebenden soziökonomischen und ökologischen Umsystemen [16] betrachtet werden (**Bild 1**).

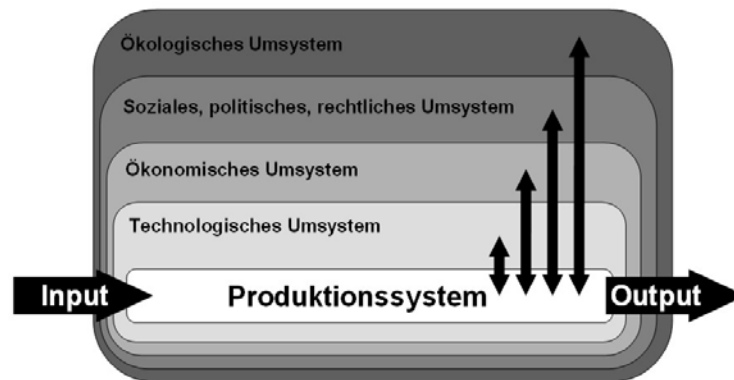


Bild 1. Das Produktionssystem in Wechselwirkung mit seinen Umsystemen (nach [16])

2.2 Begriff der Wandlungsfähigkeit

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Definitionen der Begriffe Wandlungsfähigkeit, Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit, die sich zum Teil überschneiden. Eine anschauliche begriffliche Einordnung bietet die objektorientierte Klassendarstellung in **Bild 2**. Dazu wird „Veränderungsfähigkeit“ als übergeordnete Klasse gewählt [2], die sämtliche Klasseneigenschaften an die nachrangigen (Sub-) Klassen Wandlungsfähigkeit, Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit vererbt. Diese verfügen wiederum über spezifische Eigenschaften, die sie von benachbarten Klassen unterscheidet.

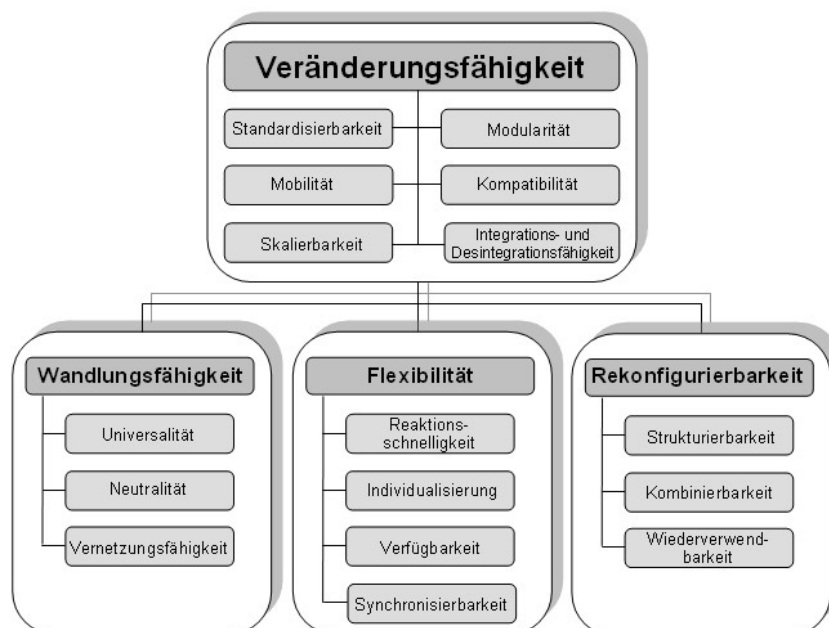


Bild 2. Klassendarstellung der Veränderungsfähigkeit und ihrer Subklassen (nach [2],[10-14])

Flexibilität beschreibt die Eigenschaft von Produktionssystemen, sich schnell und mit geringem Aufwand, in den Grenzen eines vorgegebenen „Flexibilitätskorridors“ an geänderte Rahmenbedingungen anzupassen [4]. Rekonfigurierbare Systeme oder Maschinen zeichnen sich dadurch aus, dass durch die Schaffung autonomer und standardisierter Funktionseinheiten deren schneller Austausch gewährleistet werden kann. Ein wandlungsfähiges System entsteht jedoch erst dann, wenn zum Zeitpunkt der Planung nicht vorhandene Funktionseinheiten später noch integriert werden können [1] und aufgrund von Nutzenneutralität auch Änderungen verarbeitet werden können, die ein vorab geplantes Ausmaß übersteigen.

2.3 Zentrale Eigenschaften für die Befähigung zur Wandlungsfähigkeit

Zu den zentralen zum Wandel befähigenden Systemeigenschaften gehören Universalität und Neutralität, Mobilität, Skalierbarkeit sowie Modularität und Kompatibilität. Aufgrund ihrer grundsätzlichen Bedeutung für die Wandlungsfähigkeit, können sie auch als Wandlungsbefähiger bezeichnet werden [1].

Wenn ein (Fabrik-) Objekt für unterschiedliche Aufgaben eingesetzt werden kann, je nach Anforderung gestaltbar und dimensionierbar ist und unabhängig von anderen Objekten agieren kann, trägt es die Eigenschaft **Universalität**. **Neutralität** beschreibt hingegen die Eigenschaft eines Objektes, keinen (negativen) Einfluss auf die Fähigkeiten anderer Objekte zu nehmen. Alle Merkmale eines Objektes, die zu einer uneingeschränkten räumlichen Bewegbarkeit von Objekten beitragen, sind der Eigenschaft **Mobilität** zuzuordnen. **Skalierbarkeit** bezeichnet die Fähigkeit von Objekten sowohl räumlich als auch technologisch erweiter- und reduzierbar zu sein. Die Eigenschaft **Modularität** bezieht sich auf den inneren Aufbau eines Systems und steht für dessen unabhängige funktionsfähige Einheiten. **Kompatibilität** ist hingegen ein Merkmal, das den äußeren Aufbau eines Systems beschreibt und ein Ausdruck für dessen Fähigkeit ist, an seinen Schnittstellen mit anderen Systemen verknüpft werden zu können [2].

3 Square Foot Manufacturing - Ein wandlungsfähiges Produktionssystem

3.1 Konzept

Unter Berücksichtigung vorstehend skizzierter Überlegungen wurde am Laboratorium Fertigungstechnik (LaFT) 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 3**). Die Grundfläche einer Square Foot Factory (SFF) soll demnach ein Quadratfuß (*engl. square foot*) nicht überschreiten.

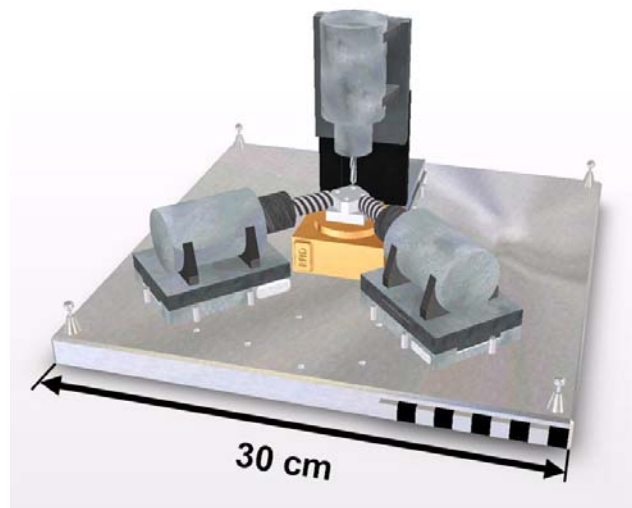


Bild 3. Square Foot Manufacturing

Während in der Forschung die Annahme weite Verbreitung findet, dass ein maximaler Erfüllungsgrad der Wandlungsfähigkeit nicht notwendig sei, da dieser stets mit Mehrkosten in Verbindung stehe [5,6,7], beruht dieses Konzept hingegen auf der Grundlage systemimmanenter Wandlungsfähigkeit, die durch eine Reduktion der Komplexität der Systemkomponenten und einer zeitparallelen multifunktionalen Nutzung des Arbeitsraumes erreicht wird.

Da sich das Konzept somit in den skizzierten Lösungsraum für wandlungsfähige Produktionssysteme

einordnen lässt, wird im Anschluss an die Beschreibung des Konzeptes auf die zur Wandlungsfähigkeit qualifizierenden Merkmale abgehoben.

3.2 Positionier- und Carriersystem

Auf der Basis eines „Selbstjustierenden koordinatentreuen Spannsystems“ [8] können miniaturisierte Werkzeugmaschinen ortsflexibel angeordnet werden. Dazu wird auf einer 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 benötigten 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.

Nicht nur die Fertigungseinheiten sondern auch die Werkstückcarrier sind über das beschriebene Spannsystem positionierbar. Während der Transport- und Bearbeitungszyklen ist das Werkstück 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. 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 [9].

3.3 Baustellenfertigung und Werkstattfertigung

In **Bild 4** 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.

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.

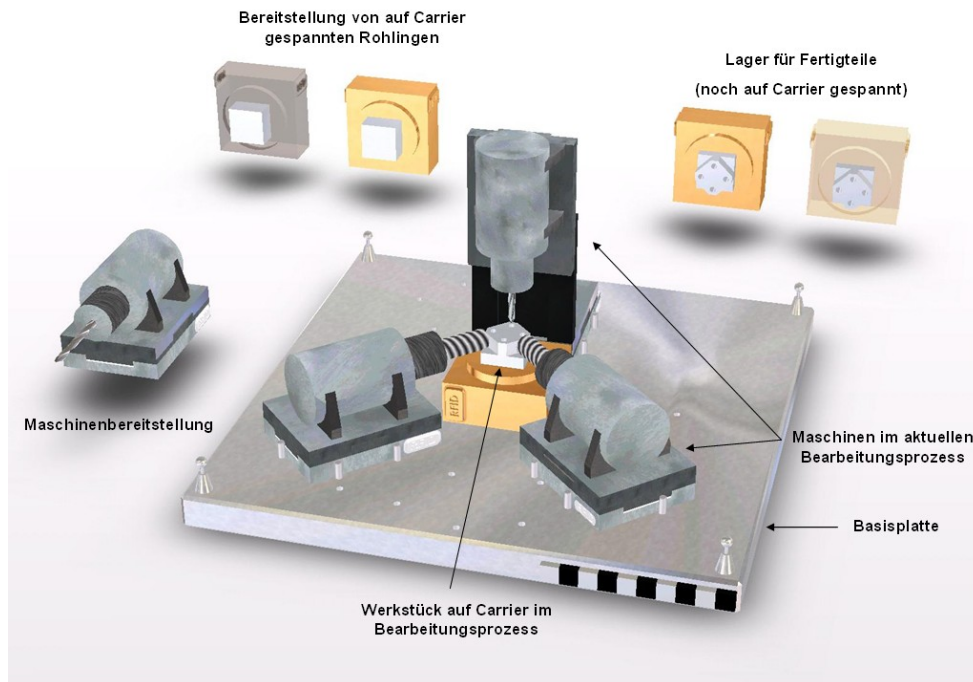


Bild 4. Prinzip des Square Foot Manufacturing – Baustellenfertigung

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 5** dargestellt.

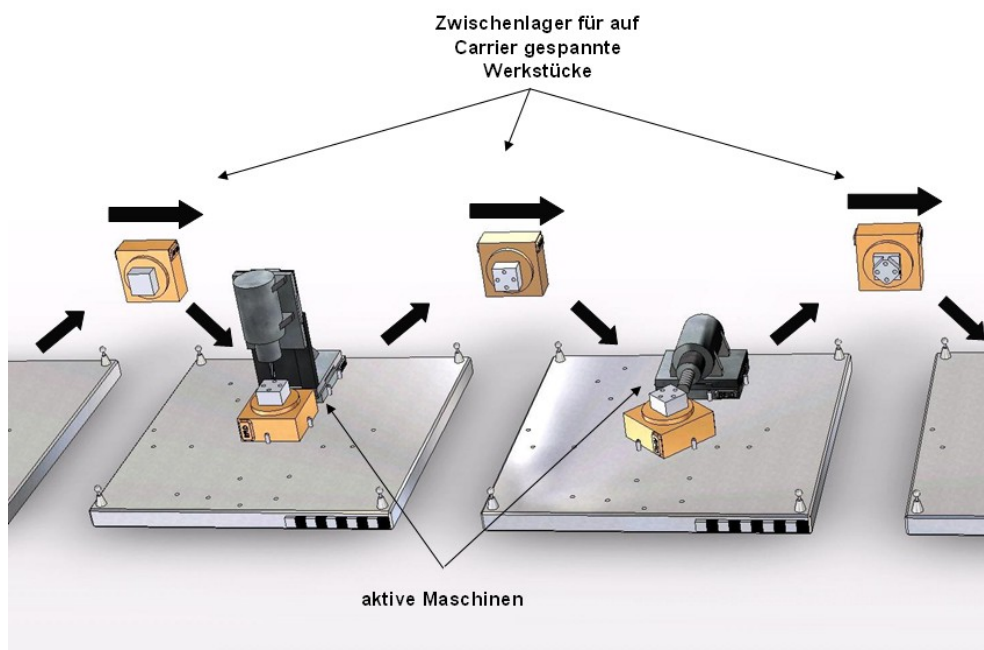


Bild 5. Fließfertigung mit Komponenten des Square Foot Manufacturing

3.4 Einfluss auf die Fertigungsplanung – Betrachtung von Job-Arbeitsräumen

Bei der Fertigungsplanung ist 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. Bei einer möglichst flexibel verwendbaren Basisplatte sind die Positionen der Anschlagstifte nicht festgelegt. Dies bedeutet, dass auf der Basisplatte in einem festgelegten Raster Bohrungen vorhanden sind, in die die Anschlagstifte je nach Bedarf gesteckt werden können. Je nach zu bearbeitendem Werkstück kann dann die Position der Bearbeitungsmaschine über die Stifte grob positioniert werden. Durch das SFM wird so eine vollständig rekonfigurierbare Fertigungseinrichtung realisiert. 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 (JA, **Bild 6**) von Bedeutung, die einzelnen Arbeitsgängen (AG) zugeordnet sind. 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.

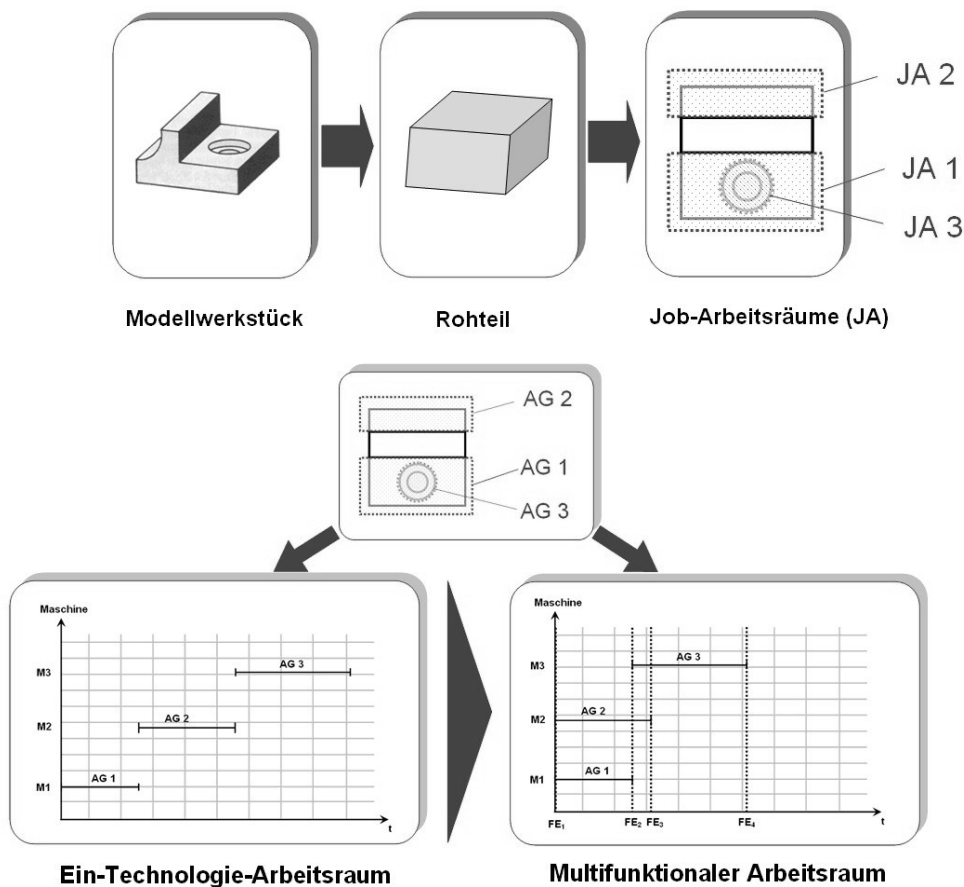


Bild 6. Job-Arbeitsräume im multifunktionalen Arbeitsraum

3.5 Abgrenzung zu anderen Fertigungsprinzipien

Um das SFM-Konzept gegen die Rundtaktfertigung, die konventionelle Fertigung allgemein und die Fertigung in einem mehr-technologie Arbeitsraum abzugrenzen, sind in **Tab. 1** die markantesten Eigenschaften der einzelnen Fertigungsansätze vergleichend gegenübergestellt.

	Konventionelle Fertigung		Rundtakt-fertigung	Mehr-technologie Arbeitsraum	SFM
	Werkstattprinzip	Fließprinzip			
Werkstück	während der Fertigung nicht ortsfest	während der Fertigung nicht ortsfest	wird mittels Rundtisch zu verschiedenen Fertigungssystemen befördert; nicht ortsfest auf Carrier	bleibt bei Technologiewechsel im Arbeitsraum; ortsfest	<i>während der Fertigung ortsfest; Vorgehensweise wie bei konv. Fertigung ebenfalls möglich</i>
Fertigungs-einrichtung	ortsfest unverkettet	ortsfest verkettet	wie konv. Fertigung; aber mit vereinfachten, spezialisierten Maschinen an jeder Bearbeitungsstelle	wie konv. Fertigung; verfügt aber über mindestens zwei Bearbeitungstechnologien im Arbeitsraum	<i>sind mobil und können nahezu beliebig umpositioniert oder getauscht werden</i>
Komplett-bearbeitung	bezogen auf die eine (!) zur Verfügung stehende Technologie möglich	bezogen auf die eine (!) zur Verfügung stehende Technologie möglich	möglich; Anzahl der verschiedenen Technologien u.a. abhängig vom Durchmesser des Rundtellers	erweiterte Komplettbearbeitung möglich; abhängig von der Anzahl der verfügbaren Fertigungstechnologien	möglich
Referenz-erhaltung	innerhalb einer Fertigungseinrichtung nur bis zum Technologiewechsel	innerhalb einer Fertigungseinrichtung nur bis zum Technologiewechsel	auch bei Technologiewechsel	auch bei Technologiewechsel	auch bei Technologiewechsel
wirtschaftliche Losgröße	kleine Stückzahlen / Lose	große Stückzahlen / Lose	große Stückzahlen / Lose	kleine oder mittlere Stückzahlen / Lose	kleine oder mittlere Stückzahlen / Lose

Tabelle 1. Gegenüberstellung der wichtigsten Eigenschaften von bekannten Fertigungsansätzen mit dem Square Foot Manufacturing

Das beschriebene Konzept der beweglichen miniaturisierten Werkzeugmaschinen stellt eine Weiterentwicklung des Desktop Manufacturing dar. Das SFM realisiert den multifunktionalen Arbeitsraum auf Basis der „Fabrik auf dem Schreibtisch“. Aufgrund der austauschbaren Maschinen können diese, im Gegensatz zu den Maschinen des Desktop Manufacturing, jedoch als funktional stark beschränkte miniaturisierte Werkzeugmaschinen ausgeführt werden. Dies bietet den Vorteil, dass die Maschinenkinematik vereinfacht werden kann, was wiederum positiven Einfluss auf die Herstellungskosten der einzelnen Maschinen hat. Reicht die (eingeschränkte) Funktionalität einer Maschine nicht mehr aus, kann sie einfach ausgetauscht werden. **Bild 7** stellt die wichtigsten Eigenschaften des Desktop Manufacturing denen des Square Foot Manufacturing gegenüber und zeigt nochmals deutlich die Unterschiede der beiden Konzepte auf.

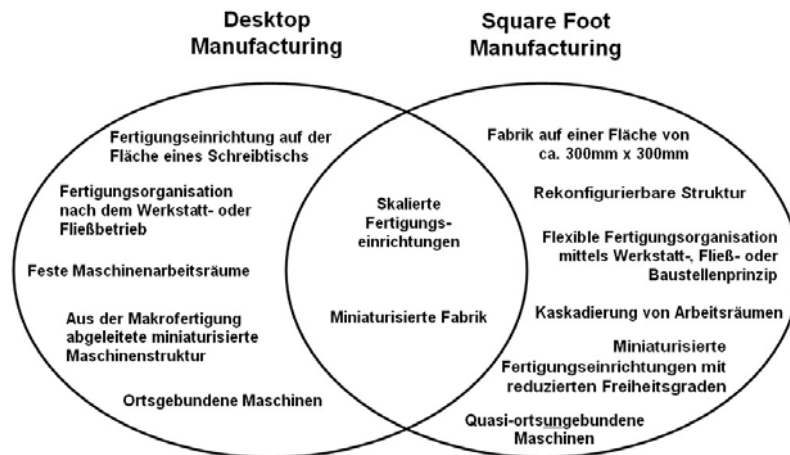


Bild 7. Eigenschaften des Desktop Manufacturing und des Square Foot Manufacturing

4 Bewertung der Wandlungsfähigkeit des Square Foot Manufacturing

Um die Wandlungsfähigkeit des vorgestellten Konzeptes zu beurteilen, muss es in den Lösungsraum für wandlungsfähige Produktionssysteme eingeordnet werden. Dazu wird geprüft, welche Wandlungsbefähiger ihm zugeordnet werden können.

Die Neutralität und Universalität des Systems sind an verschiedenen Stellen erkennbar. Zum einen ermöglicht sein „selbstjustierendes und koordinatentreues Spannsystem“ dem Anwender, das Systemlayout auf beliebige Werkstücke flexibel zu (re-) konfigurieren, in dem sowohl Werkstück als auch Werkzeugmaschine flexibel positioniert und während der Bearbeitung fest eingespannt werden können. Zusätzlich sind die Werkzeugmaschinen funktional einfach gestaltet und durch Kombination universell einsetzbar.

Aufgrund seiner kleinen Abmessung und einfachen Handhabbarkeit ist das Gesamtsystem transportabel und erfüllt somit den Anspruch der Mobilität.

Das genormte Spannsystem ist ein Ausdruck standardisierter Schnittstellen im SFM. Die Minimaschinen und Werkstückcarrier können insgesamt als Submodule zu einem Grundmodul (Basisplatte) betrachtet werden, das wiederum mit weiteren Grundmodulen kompatibel ist.

Die modulare Gestaltungsmöglichkeit einer Square Foot Factory bildet gleichzeitig die Grundlage für die Befähigung zur Skalierbarkeit. So kann eine Werkstattfertigung durch die Verknüpfung mehrerer „Baustellen“ erreicht werden. Der Einsatz mehrerer Maschinen auf einer Basisplatte und die raumzeitliche Verknüpfung der Fertigungsprozesse ist Ausdruck einer Skalierung auf Grundmodulebene.

Als abschließende Bewertung des Konzeptes kann konstatiert werden, dass es sich bei dem Ansatz des Square Foot Manufacturing um ein flexibles und vollständig rekonfigurierbares Produktionssystem handelt, das darüber hinaus den Anspruch an ein wandlungsfähiges Produktionssystem genügt, da es alle, dem theoretischen Verständnis nach notwendigen [1], Wandlungsbefähiger realisiert (**Bild 8**).

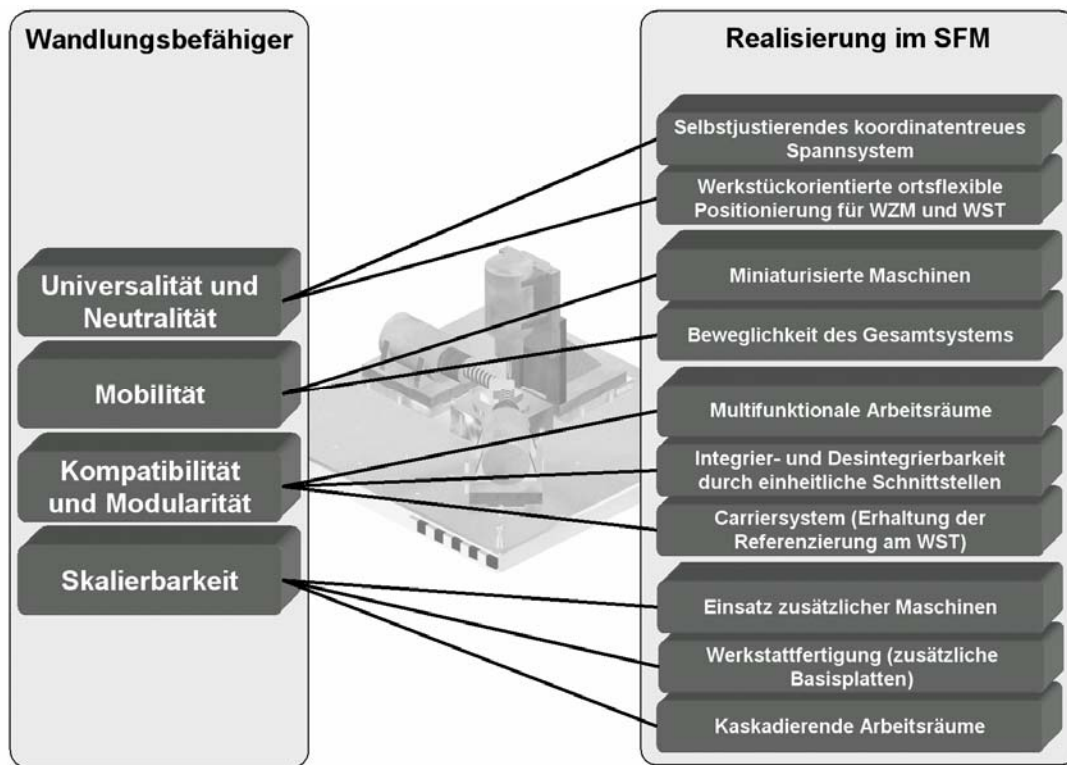


Bild 8. Realisierung der Wandlungsfähigkeit im Square Foot Manufacturing

5 Zusammenfassung

Wandlungsfähigkeit stellt als vorgedachter Freiraum eine Eigenschaft von Produktionssystemen dar, um auf geänderte Anforderungen reagieren zu können. Um diesem Anspruch genügen zu können, sollten daher bei der Implementierung von Systemen keine expliziten Grenzen vorgegeben und eine lösungsneutrale Gestaltung angestrebt sein [17]. Häufig wird davon ausgegangen, dass Wandlungsfähigkeit nur mit zusätzlichen Investitionskosten und Zeitaufwand verbunden erreicht werden kann. Auch wenn dies auf konventionelle Produktionssysteme prinzipiell zutrifft, ist dies bei SFM nicht der

Fall. Die Wandlungsfähigkeit ist hier systemimmanent. Hier bilden universell einsetzbare autonome und standardisierte Funktionseinheiten die Grundlage für eine schnelle und einfache Systemkonfiguration. Bei dem Ansatz des Square Foot Manufacturing handelt es sich um ein flexibles und vollständig rekonfigurierbares Produktionssystem, das darüber hinaus dem Anspruch an ein wandlungsfähiges System genügt.

Literatur

- [1] Nyhuis, P.; Heinen, T.; Reinhart, G.; Rimpau, C.; E. Abele, E.; Wörn, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme - Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. wt Werkstattstechnik online 98 (2008) Nr. 1/2, S. 85 – 91. Internetadresse: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [2] Heger, C. L.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Dissertation, Universität Hannover, 2006 (Berichte aus dem IFA 01/2007). Garbsen: PZH 2007
- [3] Westkämper, E.: Wandlungsfähigkeit: Herausforderungen und Lösungen im turbulenten Wettbewerb. In: Westkämper, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2002, S. 17–46
- [4] Eversheim, W., Schuh, G., Fricker, I.: Autonome Produktionszellen: Ein Weg zur Emanzipation der Produktion (2004) in Klocke, F. et al.: Autonome Produktion. Berlin: Springer, 2004. (Engineering online library), S. 535-546.
- [5] Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F.; Moriwaki, T.; Pritschow, G.; Ulsoy, G.; Van Brussel, H.: Reconfigurable Manufacturing Systems. Annals of the CIRP 48 (1999) No. 2, pp. 527-540
- [6] Schuh, G.; Harre, J.; Gottschalk, S.; Kampker, A.: Design für Changeability (DFC). wt Werkstattstechnik online 94 (2004) Nr. 4, S. 100–106. Internetadresse: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [7] Westkämper, E.: Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Fabriken. 4. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung, Stuttgart, 06.11.–07.11.2002
- [8] Wulfsberg, J. P.; Lehmann, J.: Spanntechnik für die Mikrofertigung. wt Werkstattstechnik online 3/2003 S. 146 – 149, Springer-Verlag, Düsseldorf, 2003
- [9] Wulfsberg, Jens P.; Lehmann, Jörg; Bruhns, Franz–L.: Dynamisch-starre Kopplung von hybriden Bearbeitungsräumen bei Desktop Manufacturing-Maschinen Deutsches Patent– und Markenamt, München, 2005, Aktenzeichen 10 2005 024 693.1
- [10] Nyhuis, P.; Kolakowski, M.; Heger, C. L.: Evaluation of Factory transformability In: Tagungsband 3rd International CIRP Conference on Reconfigurable Manufacturing, University of Michigan, Ann Arbor, USA, 11.05.2005
- [11] Wiendahl, H.-P.; Heger, C. L.: Justifying Changeability – A Methodical Approach to Achieving Cost Effectiveness. In: The International Journal For Manufacturing Science & Production, Jahrgang 6, Nr 1/2, 2004
- [12] Klußmann, Jan; Nofen, Dirk; Löllmann, Frederik: Wandlungsfähigkeit ohne Turbulenzen In: phi Produktionstechnik Hannover informiert 4. Jahrgang, Ausgabe 2, April 2003
- [13] Große-Heitmeyer, Volker; Mühlenbruch, Helge: Jedem das Seine In: phi Produktionstechnik Hannover informiert 4. Jahrgang, Ausgabe 3, Juli 2003
- [14] Fiebig, Christian: Modularität gibt den Ton an In: phi Produktionstechnik Hannover informiert 4. Jahrgang, Ausgabe 2, April 2003
- [15] Friedli, T.: Technologiemanagement - Modelle zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit. Springer 2006 S. 106
- [16] Corsten, H.: Produktionswirtschaft – Einführung in das industrielle Produktionsmanagement. Oldenbourg Verlag München 2004
- [17] Cisek, R.; Habicht, C.; Neise, P.: Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. ZWF 97 (2002) H. 9, S. 441-445

Bild 1. Das Produktionssystem in Wechselwirkung mit seinen Umsystemen (nach [16])

Bild 2. Klassendarstellung der Veränderungsfähigkeit und ihrer Subklassen (nach [2],[10-14])

Bild 3. Square Foot Manufacturing

Bild 4. Prinzip des Square Foot Manufacturing – Baustellenfertigung

Bild 5. Fließfertigung mit Komponenten des Square Foot Manufacturing

Bild 6. Job-Arbeitsräume im multifunktionalen Arbeitsraum

Bild 7. Eigenschaften des Desktop Manufacturing und des Square Foot Manufacturing

Bild 8. Realisierung der Wandlungsfähigkeit im Square Foot Manufacturing

Tabelle 1. Gegenüberstellung der wichtigsten Eigenschaften von bekannten Fertigungsansätzen mit dem Square Foot Manufacturing