

# Referenzfallstudie Produktionstechnik (PA) v2.0

Titel

**Spezifikation des verteilten Steuerungskonzeptes für den holonischen Materialfluss in einem werkstatorientierten Fertigungssystem auf der Basis autonomer, freifahrender Transportsysteme**

Kurztitel

**Holonischer Materialfluss**

Autoren

**Dipl.-Ing. Arnulf Braatz, IFF Universität Stuttgart**

**Dipl.-Ing. Arno Ritter, Fraunhofer IPA, Stuttgart**

Status: Vollständiger Vorschlag

Stand: September 2001

- Änderung zu 1.3:
1. Layout nach VDI-Richtlinie 3694 Lastenheft für den Einsatz von Automatisierungssystemen
  2. Begriffspräzisierung HTS -> HTF
  3. AUS verfügt über Tages-Soll und beendet Fertigung
  4. Präzisierung: WZM haben keine Kenntnis über Aufträge
  5. Präzisierung: Lastaufnahmemittel ist eine Arm-Kinematik
  6. Verhandlungszeit beträgt durchschnittlich 1.5 Sekunden
  7. Neustart der Aktorik und Sensorik nach Störung des HTF braucht 30 Sekunden
  8. In der Ausbaustufe werden die WZM dupliziert, dynamische Anzahl von HTF bis max. 6 HTF
  9. Zwei Typen von Werkstücken mit unterschiedlicher Reihenfolge und Art von Bearbeitungsschritten (V-6-Motoren und Kurbelwellen) in der Ausbaustufe
  10. Überlauf bzw. Unterschreitung des EIN und AUS sind nicht möglich
  11. Abmessungen und Zeitverhalten der WZM werden spezifiziert

<b>1</b>	<b>Einführung in das Projekt</b>	<b>3</b>
1.1.	Veranlassung	3
1.2.	Zielsetzung des Automatisierungsvorhabens	3
1.3.	Technologisches Umfeld	3
1.4.	Wesentliche Aufgaben	5
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung (Sollzustand)</b>	<b>6</b>
2.1.	Aufgabenbeschreibung	6
2.1.1	Aufgabenbeschreibung der dezentralen Werkzeugmaschinen (WZM)	6
2.1.2	Aufgabenbeschreibung der Batterieladestation BL (Ausbaustufe)	6
2.1.3	Aufgabenbeschreibung des Blockstrecken-Management-Systems BMS	7
2.1.4	Aufgabenbeschreibung des Lagers EIN	7
2.1.5	Aufgabenbeschreibung des Lagers AUS	8
2.1.6	Aufgabenbeschreibung der HTF	8
2.2.	Ablaufbeschreibung (Fertigungssystem)	9
2.2.1	Regulärer Betrieb	9
2.2.2	Irregulärer Betrieb	12
2.3.	Datendarstellung und Mengengerüst	14
2.3.1	Kommunikationsdaten	14
2.3.2	Prozessdaten	15
<b>3</b>	<b>Schnittstellen</b>	<b>16</b>
3.1.	Systemschnittstelle des HTF	16
3.2.	Systemschnittstelle der WZM	17
3.3.	Systemschnittstelle des Lagers EIN	18
3.4.	Systemschnittstelle des Lagers AUS	18
<b>4</b>	<b>Anhang: Begriffe und Definitionen</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>Weiterführende Literatur</b>	<b>20</b>

# 1 Einführung in das Projekt

## 1.1. Veranlassung

In einer von zwei Referenzfallstudien für das DFG-Schwerpunktprogramm „*Integration von Techniken der Softwarespezifikation für ingenieurwissenschaftliche Anwendungen*“ wird ein werkstatorientiertes Fertigungssystem vorgestellt, das in der Grundstufe aus drei autonomen Transportfahrzeugen und drei Werkzeugmaschinen (WZM), einer Drei-Achsen-Fräsmaschine (3-FRÄS), einer Fünf-Achsen-Fräsmaschine (5-FRÄS) und einer Waschmaschine (WASCH) besteht. Zusätzlich sind ein automatisches Hochregallager als Eingangslager (EIN) und ein Ausgangszwischenlager (AUS) vorhanden. Aufgabe des Fertigungssystems ist das Entgraten von Gussteilen (V6-Motoren in der Grundstufe und ergänzend Kurbelwellen in der Ausbaustufe).

Der Materialfluss wird in der Grundstufe von den drei autonomen Transportfahrzeugen realisiert. Da keine zentrale Fahrzeugsteuerung vorgesehen ist und sie über den gleichen Aufbau und identische Fähigkeiten verfügen, wird von holonischen Transportfahrzeugen (HTF) gesprochen. Die Gesamtheit aller HTF im Fertigungssystem wird holonisches Transportsystem (HTS) genannt. Pro Transportfahrt kann vom HTF aufgrund des Lastaufnahmemittels (LAM) und des Werkstückträgers immer nur ein einzelnes Werkstück (Gussteil) übernommen und transportiert werden.

Die hier beschriebene Referenzfallstudie umfasst das Lastenheft für eine Grund- und eine Ausbaustufe des Fertigungssystems. In der Ausbaustufe ist von jedem WZM-Typ eine zweite Maschine vorhanden, um somit einen alternativen Materialfluss zu ermöglichen. Zusätzlich umfasst sie eine Batterieladestation (BL), einen Parkbereich (PB) für die nicht aktiven HTF und ein Blockstrecken-Management-System (BMS). Die Anzahl der insgesamt verfügbaren HTF wird auf sechs erhöht.

## 1.2. Zielsetzung des Automatisierungsvorhabens

Die Erreichung eines maximalen Durchsatzes an Werkstücken unter Beibehaltung vereinfachter Konfigurierbarkeit des Fertigungssystems ist Ziel dieses Vorhabens. Hierfür müssen die Steuerungen für das HTS, die WZM und die Lager EIN und AUS entsprechend spezifiziert werden. Die Batterieladestation und der Parkbereich verfügen über keine zu spezifizierende Steuerung.

## 1.3. Technologisches Umfeld

Das Fertigungssystem ist eingebunden in ein flexibles Produktionssystem, das aus weiteren Fertigungssystemen besteht. Dieses umgebende Produktionssystem ist dafür verantwortlich, dass die Lagerplätze des EIN stets gefüllt sind, d.h. mindestens ein zu entgratendes Werkstück zur Verfügung steht. Dies gilt für Grund- und Ausbaustufe. Das AUS wird von einem nachgeschalteten Fertigungssystem zum Zweck der Montage geleert. Es kann in der Grund- und Ausbaustufe davon ausgegangen werden, dass stets ein freier Lagerplatz vorhanden ist, um ein Werkstück aufzunehmen. Zudem hat das AUS Kenntnis über die Anzahl der Werkstücke, die vom Produktionssystem als Tages-Soll vorgegeben sind. Erreicht die Anzahl der entgrateten Werkstücke das Tages-Soll, wird die Fertigung in Grund- und Ausbaustufe gestoppt.

In der Grundstufe wird vorausgesetzt, dass die Batteriekapazität eines HTF so ausgelegt ist, dass ein Aufladen während des Betriebes nicht notwendig ist, sondern von Hand in der Stillstandzeit des Produktionssystems erfolgt. Für die WZM wird in der Grundstufe störungsfreier Betrieb zugesichert. Störungen im Antriebsmodul eines HTF sind aber möglich. In der Ausbaustufe ist eine Batterieladung vorzusehen und zusätzlich die Störung einer WZM durch Werkzeugbruch zu berücksichtigen.

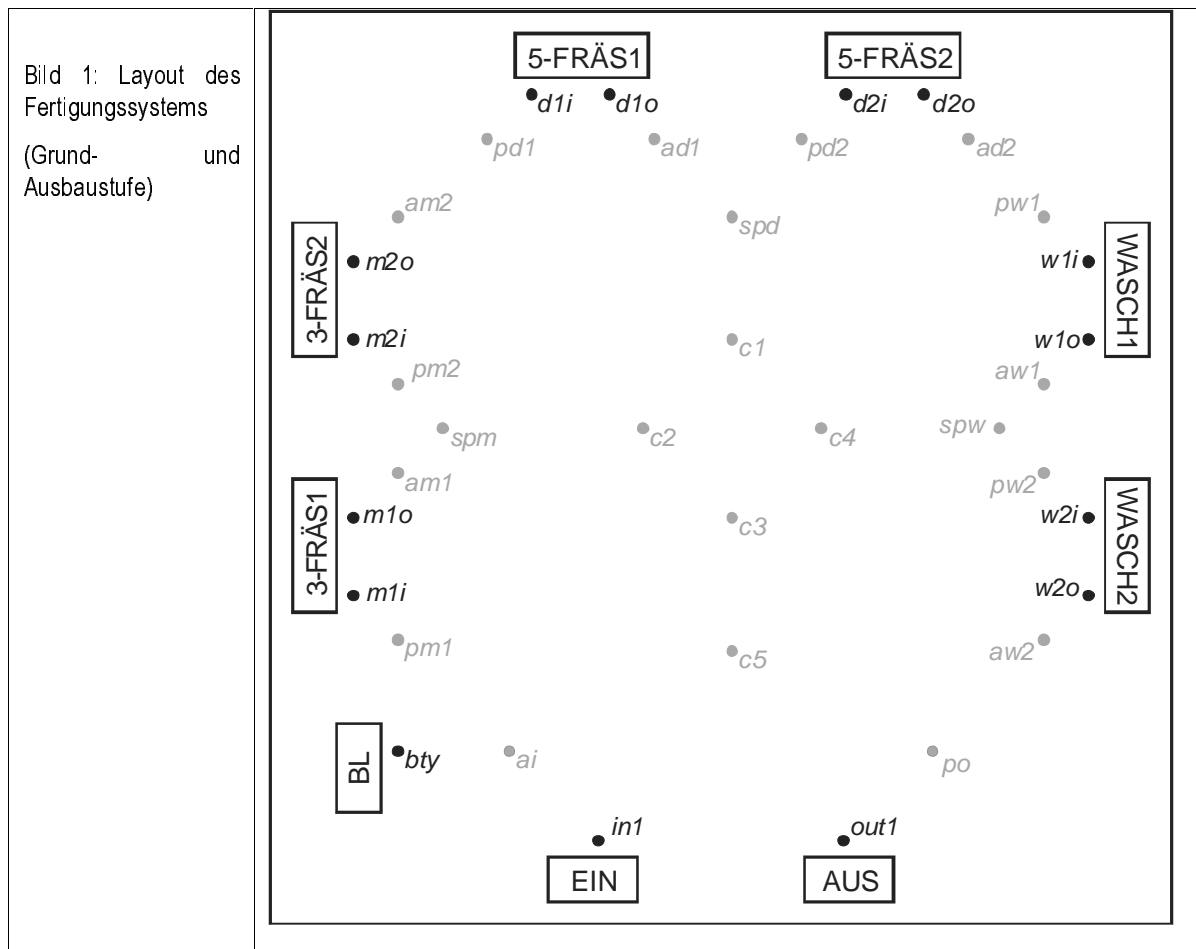
Die Einbettung des Fertigungssystems in ein flexibles Produktionsumfeld bringt es mit sich, dass wechselnde Produkte das Fertigungssystem durchlaufen und somit geänderte Konfigurationen im Layout der Werkzeugmaschinen und in der Zusammensetzung der Transportfahrzeuge nötig werden. Um diese Konfigurationen mit minimalen Eingriffen in die bestehende Software zu ermöglichen, erhalten alle Teilsysteme des Fertigungssystems eine dezentrale Steuerung. Die Synchronisation dieser Teilsysteme erfolgt über ein funkgestütztes Broadcast-Kommunikationssystem, über das die Kommunikationspartner Telegramme (mit eindeutigem Zeitstempel) ver-

senden. In der Grundstufe wird von verlustfreier Kommunikation ausgegangen. In der Ausbaustufe sind Störungen des Kommunikationssystems möglich. Es ist dabei der Spezifikation der Steuerungen überlassen, welche Telegramme von einem Teilsystem ausgewertet werden, da wesentlich von der Strategie der Teilsysteme abhängt, welche Informationen benötigt und welche ignoriert werden können.

Es ist zu beachten, dass einzig die dezentralen Steuerungen der HTF als holonisch, d.h. autonom, ausgeführt werden.

Das Layout des Fertigungssystems ist in Bild 1 dargestellt. In der Ausbaustufe erhält das Fertigungssystem ein Gitternetz mit Blockstrecken (grau markiert), da nicht mehr von Kollisionsfreiheit der HTF ausgegangen werden kann. Um Kollisionen zu vermeiden, müssen die HTF vor einer Transportfahrt einen Streckenabschnitt oder die gesamte Strecke beim BMS reservieren. Fest definiert sind lediglich die Übergabepunkte vor den Eingangs- und Ausgangspuffern der WZM und Lager (schwarz markiert). Dies gilt auch für die Ladeposition an der BL.

Die Wartepositionen für HTF ohne einen Auftrag müssen von der Spezifikation festgelegt werden.



Maschinentyp		Abmessung (L x T x H)
WZM	Drei-Achsen Fräsmaschine	4 m x 1.5 m x 2 m
	Fünf-Achsen-Fräsmaschine	5 m x 2 m x 2 m
	Waschmaschine	4 m x 2.5 m x 2 m
HTF		1.8 m x 1 m x 1.5 m
EIN, AUS		3 m x 4 m x 6 m
BL		1.2 m x 2m x 1.5 m
PB (für 6 HTF dimensioniert)		6 m x 1m

Tabelle 1: Abmessungen der Maschinen

#### 1.4. Wesentliche Aufgaben

- Entgraten der Werkstücke, d.h. Fräsen der Gussgrate, Glätten der Bohrungen und Auswaschen der Metallspäne
- Verhandlung und Ausführung der Transportaufträge, d.h. die Werkstücke aus dem automatischen Hochregallager (EIN) zu entnehmen und in der richtigen Ablauffolge den jeweiligen Bearbeitungsmaschinen und schließlich dem Ausgangszwischenlager AUS zuzuführen.
- Vermeidung bzw. Auflösung von Dead-Lock-Situationen der HTF (**Ausbaustufe**)
- Vermeidung von Kollisionen zwischen den HTF (**Ausbaustufe**)

## 2 Aufgabenstellung (Sollzustand)

### 2.1. Aufgabenbeschreibung

Durch die geforderte dezentrale Steuerungsarchitektur des Fertigungssystems werden ihre Aufgaben anhand der Aufgaben der einzelnen dezentralen Maschinen beschrieben.

#### 2.1.1 Aufgabenbeschreibung der dezentralen Werkzeugmaschinen (WZM)

Eine WZM (Drei-Achsen-, Fünf-Achsen-Fräsmaschine oder Waschmaschine) besteht in der Grundstufe aus einem zweistufigen Eingangspuffer für Werkstücke, einer Bearbeitungseinheit und einem einstufigen Ausgangspuffer.

In der Ausbaustufe enthält jede WZM einen zweistufigen Ausgangspuffer.

Um die einfache Konfigurierbarkeit des Systems aufrecht zu halten, verfügen die WZM über kein Wissen bezüglich des Prozesses des Fertigungssystems. Sie beschränken sich auf das Senden (Broadcast) ihres Maschinenstatus und die Ausführung ihres jeweiligen Bearbeitungsschrittes. Ein Status wird immer dann gesendet, sobald sich die Belegung des Eingangs- oder Ausgangspuffers ändert oder ein leerer Eingangspuffer bzw. voller Ausgangspuffer die WZM blockiert.

Aufgaben	Eingabe	Verarbeitung	Ergebnis
<b>Bearbeitung (Bohren, Fräsen, Waschen)</b>	Unfertiges Werkstück	Bearbeitungsschritt ausführen	Bearbeitetes Werkstück
<b>Status der Maschine senden</b>	Maschinen-daten	Ermittlung und Versendung des Maschinenstatus	Gesendeter Maschinenstatus
<b>Verbringung der Werkstücke</b>	Werkstück	Transport vom Eingangspuffer auf den Bearbeitungsplatz der WZM oder von diesem auf den Ausgangspuffer	Anzahl der Werkstücke im Puffer sind um 1 erhöht bzw. verringert

Tabelle 2: Aufgabenbeschreibung der WZM

Maschinenfunktion	Dauer [s]	
<b>Verbringen des Werkstückes vom Eingangspuffer auf den Bearbeitungsplatz bzw. vom Bearbeitungsplatz auf den Ausgangspuffer</b>	2	
<b>Ausführung des Bearbeitungsschrittes</b>	<b>Fräsen der Gussgrate (Fünf-Achsen-Fräsmaschine)</b>	30
	<b>Glätten der Bohrungen (Drei-Achsen-Fräsmaschine)</b>	20
	<b>Auswaschen der Metallspäne</b>	35

Tabelle 3: Zeitliche Spezifikationen der WZM

#### 2.1.2 Aufgabenbeschreibung der Batterieladestation BL (Ausbaustufe)

Die Batterieladestation verfügt über keine zu spezifizierende Steuerungssoftware. Der Ladevorgang wird vom HTF über seine Kommunikationseinrichtung gesteuert. Die Batterieladestation ist nur in der Ausbaustufe der Referenzfallstudie Teil des Fertigungssystems.

Aufgaben	Eingabe	Verarbeitung	Ergebnis
<b>Aufladen der Batterie eines HTF</b>	HTF in Ladeposition	Laden der Batterie bis zur Maximalkapazität	Vollständig geladene Batterien des HTF

Tabelle 4: Aufgabenbeschreibung der BL

Maschinenfunktion	Dauer [min]
<b>Maximale Ladedauer an der Batterieladestation bei entleerter Batterie</b>	20

Tabelle 5: Zeitliche Spezifikation der BL

### 2.1.3 Aufgabenbeschreibung des Blockstrecken-Management-Systems BMS

Das BMS ist ein zentraler Prozess, der lediglich über eine Kommunikationseinrichtung verfügt. Er wird nur in der Ausbaustufe der Referenzfallstudie eingesetzt.

Aufgaben	Eingabe	Verarbeitung	Ergebnis
<b>Reservierung und Freigabe von Blockstrecken für HTF</b>	Reservierungswunsch eines HTF	Prüfen des Reservierungswunsches, Reservieren der Strecke oder Zurückweisung des Reservierungswunsches	Reservierte Blockstrecke oder zurückgewiesener Reservierungswunsch

Tabelle 6: Aufgabenbeschreibung des BMS

### 2.1.4 Aufgabenbeschreibung des Lagers EIN

Das Lager verfügt über eine unbestimmte Anzahl von Lagerplätzen für Werkstücke (inklusive der Werkstückträger). Zudem ist ein einstufiger Ausgangspuffer vorhanden. Werkstücke werden entsprechend dem Werkstücktyp nach Anforderung durch ein HTF aus einem Lagerplatz in den Ausgangspuffer verbracht, wo sie vom HTF entnommen werden.

Aufgaben	Eingabe	Verarbeitung	Ergebnis
<b>Positionierung des Werkstückes</b>	Werkstück und Anforderung des Werkstücktyps durch HTF	Verbringen eines Werkstückes auf den Ausgangspuffer des Lagers	Anzahl der Werkstücke im Lager um 1 verringert

Tabelle 7: Aufgabenbeschreibung des EIN

Aufgabe/Maschinenfunktion	Dauer [s]
<b>Positionierung des Werkstückes im Ausgangspuffer (abhängig vom Lagerplatz)</b>	5 - 10

Tabelle 8: Zeitliche Spezifikationen des EIN

### 2.1.5 Aufgabenbeschreibung des Lagers AUS

Das Lager AUS verfügt über eine unbestimmte Anzahl von Lagerplätzen für Werkstücke (inklusive der Werkstückträger). Zudem ist ein einstufiger Eingangspuffer vorhanden. Die HTF transportieren die fertig entgrateten Werkstücke in das AUS, von wo sie zur Montage in nachgeschaltete Fertigungssysteme transportiert werden.

Darüber hinaus ist die Verwaltung der aktiven HTF des Fertigungssystems und die Überwachung des Tages-Solls im AUS integriert.

Aufgaben	Eingabe	Verarbeitung	Ergebnis
<b>Verbringung des Werkstückes</b>	Werkstück	Verbringen eines Werkstückes vom Eingangspuffer in die Lagerposition	Anzahl der Werkstücke erhöht sich um 1
<b>Beendigung der Fertigung</b>	Anzahl der entgrateten Werkstücke, Tages-Soll	Prüfen der Anzahl der entgrateten Werkstücke $\geq$ Tages-Soll	Beendigung der Fertigung
<b>An- und Abmelden eines HTF</b>	Telegramm, Liste der aktiven HTF	Registrierung oder Austragung des HTF	HTF an- oder abgemeldet und Vorgang gesendet

Tabelle 9: Aufgabenbeschreibung des AUS

Aufgabe/Maschinenfunktion	Dauer [s]
<b>Verbringung des Werkstückes auf einen Lagerplatz (abhängig vom Lagerplatz)</b>	5 - 10
<b>An- und Abmelden eines HTF</b>	max. 1

Tabelle 10: Zeitliche Spezifikationen des AUS

### 2.1.6 Aufgabenbeschreibung der HTF

Ein HTF besteht aus einer Bewegungskinematik (Antrieb und Lenkung), einem LAM (Roboterarm mit einer Arretierung für den Werkstückträger) und einer sensorischen Einrichtung zur Lokalisierung und Hinderniserkennung. Die Zusammensetzung der Sensoren und Aktoren sowie ihre Ansteuerung ist für die Steuerung des HTF transparent (siehe 3.1). Die maximale Fahrgeschwindigkeit des HTF beträgt 1.5 m/s und die Beschleunigung beim Anfahren und bremsen wird mit 0.7 m/s<sup>2</sup> angenommen.

Zusätzlich verfügt ein HTF über die Fähigkeit, in den Energiesparmodus zu schalten. In diesem Modus sind alle Geräte des HTF auf minimalen Energieverbrauch geschaltet und nicht betriebsbereit. Lediglich die Kommunikationseinrichtung ist hierbei betriebsbereit.

Ein HTF verfügt über Prozesswissen, da ihm die Richtung und Reihenfolge des Materialflusses innerhalb des Fertigungssystems bezogen auf einen Werkstücktyp bekannt ist (Produktionsdatenbank). Auch die aktuellen Zustände der Maschinen und ihre Positionen im Fertigungssystem werden in der Produktionsdatenbank abgelegt.

In der Grundstufe der Referenzfallstudie ist die Anzahl der HTF auf drei begrenzt. In der Ausbaustufe ist die Anzahl der aktiven HTF dynamisch, d.h. HTF aus dem Parkbereich melden sich am AUS an. Ebenfalls gilt für die Ausbaustufe, dass ein HTF nach Beendigung eines Transportauftrages die Position zur Werkstückübergabe bzw. -entnahme verlässt, um eine definierte, nächstliegende Warteposition anzufahren.

Aufgaben	Eingabe	Verarbeitung	Ergebnis
<b>Werkstückentnahme</b>	Werkstück im Ausgangspuffer der WZM oder des EIN	Anforderung an EIN oder WZM, Transport des Werkstückes vom Ausgangspuffer der WZM oder des EIN auf HTF	Werkstück im LAM
<b>Werkstückübergabe</b>	Werkstück	Anforderung an WZM oder AUS, Transport des Werkstückes vom LAM des HTF auf Eingangspuffer der WZM oder des AUS	Werkstück im Eingangspuffer der WZM oder des AUS
<b>Senden eines Angebotes</b>	Position des HTF	Berechnung des Angebotes	Telegramm mit Angebot gesendet
<b>Moderation eines Transportauftrages</b>	Produktionsdatenbank	Berechnung des Transportauftrages (Hol-auftrag), Angebot senden, Verhandlung beenden und Zuschlag geben	Verhandelter Transportauftrag
<b>Herunterfahren des HTF</b>	-	Auftrag zu Ende ausführen und in Energiesparmodus gehen.	HTF im Energiesparmodus
<b>Neustart der Sensorik/Aktorik</b>	Störung im Antrieb	Die Sensorik und Aktorik wird nach einer Fehlfunktion im Antrieb neu gestartet	HTF betriebsbereit

Tabelle 11: Aufgabenbeschreibung eines HTF

Aufgabe/Maschinenfunktion	Dauer [s]
<b>Werkstückentnahme oder Werkstückübergabe</b>	3
<b>Verhandlungsdauer (durch den Moderator bestimmt)</b>	durchschnittlich 1.5
<b>Neustart der Sensorik/Aktorik</b>	30

Tabelle 12: Zeitliche Spezifikationen eines HTF

## 2.2. Ablaufbeschreibung (Fertigungssystem)

### 2.2.1 Regulärer Betrieb

Nach der Initialisierung des Fertigungssystems und Anmeldung der HTF beginnen die Maschinen ihren Status zu senden. Ein HTF (Rolle des Moderators) erkennt den Transportauftrag (Hol-Auftrag) und sendet seine Auftragsausschreibung. Nach einer festgelegten Zeitspanne beendet der Moderator die Verhandlung und erteilt den Zuschlag. Die Ausführung eines Transportauftrages beinhaltet eine Hol- und eine Bring-Fahrt. Während der Transportfahrt nimmt ein HTF nicht an der Verhandlung teil. Die Fertigung endet bei Erreichung des Tages-Solls.

Die Detaillierung der Ablaufbeschreibung des Fertigungssystems ist in der folgenden Tabelle 9 beschrieben:

Szenarien	Vorbedingungen	Schritte	Nachbedingungen
<b>1. Initialisierung des Fertigungssystems</b>	HTS ist im Energiesparmodus, HTF haben keine Werkstücke geladen, WZM, AUS und EIN sind gestoppt.	<ol style="list-style-type: none"> <li>Ein externes Leitsystem sendet ein Telegramm (Aktion: START) zum Start der Fertigung in dem Fertigungssystem.</li> <li>HTS, d.h. die einzelnen HTF, fährt aus dem Energiesparmodus in die Betriebsbereitschaft hoch. WZM, AUS und EIN werden gestartet.</li> </ol>	HTS und WZM sind betriebsbereit.
<b>2. Anmeldung eines HTF an AUS</b>	WZM, HTS, EIN und AUS sind betriebsbereit, mind. ein HTF ist noch nicht angemeldet und verfügt über Produktionsdatenbank des Fertigungssystems.	<ol style="list-style-type: none"> <li>EIN HTF meldet sich per Telegramm (Aktion: ANMELDUNG) bei AUS an.</li> <li>Nach der Registrierung wird dem HTF die Meldung per Telegramm (Aktion: ANMELDUNG_OK) bestätigt.</li> <li>Antwortet das AUS nicht, wird die Anmeldung vom HTF wiederholt → Schritt 1. (Es kann sich stets nur ein HTF zur selben Zeit anmelden)</li> </ol>	HTF ist angemeldet.
<b>3. Abmeldung eines HTF beim AUS</b>		<ol style="list-style-type: none"> <li>HTF entscheidet aufgrund seiner Produktionsdatenbank und seiner implementierten Regeln, dass zu viele HTF im Fertigungssystem angemeldet sind.</li> <li>HTF sendet ein Telegramm zur Abmeldung (Aktion: ABMELDUNG). Das AUS bestätigt dies mit einem entsprechenden Telegramm (Aktion: ABMELDUNG_OK).</li> <li>Das HTF fährt in den Parkbereich (PB) und geht dort in den Energiesparmodus.</li> </ol>	Anzahl der HTF im PB erhöht sich um 1.
<b>4. Auftragsverhandlung</b>	Mind. ein HTF ist angemeldet und betriebsbereit. (Gilt für die Grundstufe immer.)	<ol style="list-style-type: none"> <li>Senden des Maschinenstatus per Telegramm (Aktion: WZM_STATUS), dieses wird nur vom HTS ausgewertet.</li> <li>Ein HTF erkennt aus dem Maschinenstatus einen Transportauftrag.</li> <li>Das HTF übernimmt die Rolle des Moderators und sendet den erkannten Transportauftrag verbunden mit dem eigenen positionsgebundenen Kostenfaktor per Telegramm (Aktion: AUFTRAG)</li> <li>Moderator wartet auf bessere Angebote, d.h. Kostenfaktoren der anderen HTF per Telegramm (Aktion: ANGEBOT) und beendet die Verhandlung nach ca. 1.5 Sekunden mit dem expliziten Versenden des Zuschlages. Andere HTF antworten nur bei besserem Angebot.</li> </ol>	Transportauftrag verhandelt und einem HTF zugeteilt

<b>5. HTF fährt</b>	HTF hat einen Transportauftrag oder einen Fahrauftrag (z.B. zur BL in der Ausbaustufe).	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Übergeben des Fahrzieles (Maschinenkennung) an Steuerung des HTF. In der Ausbaustufe muss vorher am BMS die geplante Strecke reserviert werden und ggf. eine Alternative berechnet und reserviert werden.</li> <li>2. Steuerung signalisiert das Erreichen des Zieles.</li> </ol>	HTF ist an Zielposition.
<b>6. Werkstückübergabe oder –entnahme</b>	Werkstückentnahme: HTF steht an Werkstückentnahmeeinheit einer WZM/EIN, mind. ein Werkstück ist im Ausgangspuffer.	Werkstückentnahme: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. HTF sendet an WZM/EIN Telegramm (Aktion: WS_ENT), dies enthält auch die Information zum Werkstücktyp.</li> <li>2. WZM/EIN sendet ein Telegramm zur Bestätigung (Aktion: WS_OK). EIN verbringt davor das entsprechende Werkstück auf seinen Ausgangspuffer.</li> <li>3. LAM des HTF verbringt das Werkstück auf seine Halterung. Danach sendet das HTF ein Telegramm (Aktion: WS_ENDE) zum Abschluss der Entnahme.</li> </ol>	Werkstückentnahme: Im Ausgangspuffer der WZM oder des EIN ist die Anzahl der Werkstücke um 1 reduziert.
	Werkstückübergabe: HTF steht an der Werkstückübergabeeinheit einer WZM oder AUS, mind. ein Platz im Eingangspuffer ist frei.	Werkstückübergabe: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. HTF sendet an WZM/AUS ein Telegramm (Aktion: WS_ÜB).</li> <li>2. WZM/AUS sendet ein Telegramm (Aktion: WS_OK).</li> <li>3. LAM des HTF verbringt das Werkstück in den Eingangspuffer von WZM/AUS.</li> <li>4. HTF sendet ein Telegramm (Aktion: WS_ENDE) zum Abschluss der Übergabe.</li> </ol>	Werkstückübergabe: Im Eingangspuffer der WZM oder des AUS ist die Anzahl der Werkstücke um 1 erhöht.
<b>7. Eine WZM bearbeitet Werkstück</b>	Werkstück im Eingangspuffer einer WZM, ein Platz im Ausgangspuffer frei	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. WZM holt Werkstück aus dem Eingangspuffer auf den Bearbeitungsplatz. Ist kein Werkstück vorhanden, wird der Maschinenstatus gesendet. Dieser wird im 3 Sekunden Abstand wiederholt gesendet, bis ein Werkstück im Eingangspuffer ist.</li> <li>2. Ausführen des entsprechenden Arbeitsschrittes am Werkstück.</li> <li>3. Verbringen des Werkstückes auf den Ausgangspuffer. Ist dieser blockiert, so wird ebenfalls alle 3 Sekunden der Maschinenstatus gesendet.</li> </ol>	Anzahl der Werkstücke im Ausgangspuffer um 1 erhöht
<b>8. Beendigung der Fertigung</b>	Tages-Soll erreicht	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. AUS sendet Telegramm zur Beendigung der Fertigung (Aktion: FERT_ENDE)</li> <li>2. HTS empfängt Telegramm und jedes HTF meldet sich beim AUS per Telegramm (Aktion: ABMELDUNG) ab. AUS sendet die Bestätigung (Aktion:</li> </ol>	Fertigung beendet.

		<p>ABMELDUNG_OK). HTF, die noch ein Werkstück transportieren, führen den Transportauftrag zu Ende aus und melden sich dann ab. WZM führen den aktuellen Bearbeitungsschritt zu Ende aus.</p> <p>3. HTS geht in den Energiesparmodus. WZM stoppen.</p>	
--	--	---	--

Tabelle 13: Beschreibung der Szenarien des Fertigungssystems im regulärem Betrieb (Aktion: XYZ bezieht sich auf die Struktur der Broadcast-Telegramme, siehe 2.3.1)

## 2.2.2 Irregulärer Betrieb

Irregulärer Betrieb definiert sich durch die Störung einer Maschine, worunter auch das Laden der Batterie einer HTF fällt.

Szenario	Vorbedingungen	Schritte	Nachbedingungen
<b>1. Einfacher Störfall</b>	HTF hat eine Störung im Antrieb und kein Werkstück geladen.	<ol style="list-style-type: none"> <li>Neustart der Sensorik und Aktorik. Während dieser Zeit wird an keiner Verhandlung teilgenommen und ein aktuell vorhandener Transportauftrag gelöscht. Es wird in der Grundstufe davon ausgegangen, dass das HTF an keiner kritischen Position steht (Werkstückübergabe- oder -entnahmeposition).</li> <li>Nach ca. 30 Sekunden melden die HTF ihre Betriebsbereitschaft und HTF kann wieder an den Verhandlungen teilnehmen.</li> </ol>	HTF ist betriebsbereit und angemeldet.
<b>2. Erweiterter Störfall (Ausbaustufe)</b>	HTF hat eine Störung im Antrieb, HTF kann an einer kritischen Position stehen	<ol style="list-style-type: none"> <li>Gestörtes HTF sendet ein Telegramm (Aktion: STÖRUNG), welches die Information der Störung des HTF und die aktuelle Position enthält. HTS wertet dieses Telegramm aus und berücksichtigt es bei den Verhandlungen. War das HTF auf einer Holfahrt eines Transportauftrages, wird der Auftrag neu ausgeschrieben mit dem gestörten HTF als Moderator.</li> <li>Neustart der Sensorik und Aktorik des HTF. Während dieser Zeit wird an keiner Verhandlung teilgenommen.</li> <li>Nach ca. 30 Sekunden meldet das HTF seine Betriebsbereitschaft per Telegramm (Aktion: BEREIT) und HTF kann wieder an den Verhandlungen teilnehmen bzw. seinen Transportauftrag zu Ende ausführen.</li> </ol>	HTF ist betriebsbereit und angemeldet.
<b>3. Störung einer WZM – Werkzeugbruch</b>	Eine WZM hat einen Werkzeugbruch.	<ol style="list-style-type: none"> <li>WZM sendet Telegramm mit Störungsmeldung (Aktion: STÖRUNG) und HTS wertet es aus.</li> </ol>	WZM betriebsbereit

<b>(Ausbaustufe)</b>		<ol style="list-style-type: none"> <li>2. WZM wird nicht freigeräumt. Werkstücke verbleiben in den Puffern und am Bearbeitungsplatz.</li> <li>3. Servicetechniker beheben den Fehler durch Werkzeugwechsel.</li> <li>4. WZM sendet Telegramm mit Betriebsbereitschaft (Aktion: BEREIT) und danach den Maschinenstatus (Aktion, STATUS).</li> </ol>	
<b>4. Laden der Batterie (Ausbaustufe)</b>	Batterieladestand eines HTF kritisch	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. HTF prüft Batterieladestand.</li> <li>2. Batterieladestand ist kritisch und HTF sendet Anmeldetelegramm an BL.</li> <li>3. BL bestätigt mit Telegramm und ist damit für andere HTF verriegelt.</li> <li>4. Weist BL die Anmeldung zurück, geht HTF für 10 min in den Energiesparmodus. Danach wird eine erneute Anmeldung gestartet → Schritt 2.</li> <li>5. HTF fährt zur BL.</li> <li>6. HTF startet Ladevorgang per Telegramm (Aktion: LADE).</li> <li>7. HTF prüft die Ladung und beendet den Ladevorgang bei maximaler Ladung (Aktion: LADE_OK).</li> </ol>	HTF ist vollständig geladen

Tabelle 14: Beschreibung der Szenarien des Fertigungssystems im irregulärem Betrieb (Aktion: XYZ bezieht sich auf die Struktur der Broadcast-Telegramme, siehe 2.3.1)

## 2.3. Datendarstellung und Mengengerüst

### 2.3.1 Kommunikationsdaten

Datentyp	Struktur	Einheit
<b>Maschinenkennung</b>	Kennung (Grundstufe)	[EIN, AUS, 3-FRÄS, 5-FRÄS, WASCH, HTF1..3]
	Kennung (Ausbaustufe)	[EIN, AUS, 3-FRÄS1..2, 5-FRÄS1..2, WASCH1..2, HTF1..6]
<b>Maschinenstatus</b>	Belegung des Eingangspuffers	[BELEGT, FREI]
	Belegung des Bearbeitungsplatzes	[BELEGT, FREI]
	Belegung des Ausgangspuffers	[BELEGT, FREI]
<b>Broadcast-Telegramm</b>	Absenderkennung	<i>Maschinenkennung</i>
	Aktion	[START, ANMELDUNG, ANMELDUNG_OK, WS_ÜB, WS_ENT, WS_OK, LADE, LADE_OK, WS_ENDE, AUFTRAG, WZM_STATUS, FERT_ENDE, ABMELDUNG, ABMELDUNG_OK, ANGEBOT, STÖRUNG, BEREIT]
	Empfänger	[ <i>Maschinenkennung</i> , ALLE_HTF, ALLE]
<b>Transportauftrag (Hol-Auftrag)</b>	Transportauftrags-ID	[ohne Einheit]
	Quelle	<i>Maschinenkennung</i>
	<i>Werkstück</i>	(Siehe Prozessdaten)
	Senke	<i>Maschinenkennung</i>
<b>Angebot</b>	<i>Transportauftrag</i>	[ohne Einheit]
	<i>Kostenfaktor</i>	[ohne Einheit]
<b>Auftrag</b>	Moderator	<i>Maschinenkennung</i>
	<i>Transportauftrag</i>	[ohne Einheit]
	<i>Kostenfaktor</i> (Moderator)	[ohne Einheit]

Tabelle 15: Beschreibung der Kommunikationsdaten des Fertigungssystems (kursive Bezeichnungen sind Referenzen auf bereits definierte Datentypen)

### 2.3.2 Prozessdaten

<b>Datentyp</b>	<b>Struktur</b>	<b>Einheit</b>
<b>Werkstück</b>	Kennung	[ohne Einheit]
	Bearbeitungsstatus	[unbearbeitet, gebohrt, gefräst, gewaschen]
	Reihenfolge der Bearbeitung: V6-Motor Kurbelwelle	konstant [I N-3-FRÄS-5-FRÄS-WASCH-AUS] [I N-5-FRÄS-WASCH-AUS]
<b>Tages-Soll</b>	Maximale Anzahl der zu entgratenden Werkstücke pro Tag	[ohne Einheit]
<b>Kostenfaktor</b>	Wert	[ohne Einheit]
<b>Batterieladung</b>	Ladestand	[%]
<b>Position</b>	x-Koordinate	[ohne Einheit]
	y-Koordinate	[ohne Einheit]
<b>Produktionsdatenbank</b>	Enthält alle Positionen von Maschinen und sonstigen Einrichtungen des Fertigungssystems, die Richtung und Reihenfolge des Materialflusses	-
<b>Liste der aktiven HTF</b>	Listennummer	[ohne Einheit]
	Kennung	<i>[Maschinenkennung]</i>

Tabelle 16: Beschreibung der Prozessdaten des Fertigungssystems (kursive Bezeichnungen sind Referenzen auf bereits definierte Datentypen)

### 3 Schnittstellen

Alle Maschinen (WZM, HTS, EIN, AUS) verfügen über eine Steuerung, die es zu spezifizieren gilt, und eine weitgehend transparente Systemtechnik, bestehend aus Sensoren zur Navigation und Hinderniserkennung und Aktoren, zum Antrieb, zur Lenkung und zum Werkstück-Handling. Die Schnittstelle einer Steuerung zur Systemtechnik wird Systemschnittstelle genannt.

Darüber hinaus sind die Maschinen in der Lage, miteinander Kommunikationstelegramme auszutauschen. Dies geschieht über eine Kommunikationsschnittstelle.

In der für die Referenzfallstudie verfügbaren *3-D Animation* ist es möglich, mittels einer definierten Animationschnittstelle die Animation des Fertigungssystems zu steuern. Die Animationschnittstelle umfasst aber nur die Summe der Systemschnittstellen der Maschinen. Tabelle 13 und Tabelle 14 beschreiben die Systemschnittstellen der Maschinen. Die Batterieladestation und der Parkbereich enthalten keine zu spezifizierende Steuerungssoftware und weisen somit auch keine Systemschnittstelle auf.

#### 3.1. Systemschnittstelle des HTF

Systemfunktionen	Parameter	Rückgabewert	Befehl an die Animationschnittstelle
<b>Fahren in absoluter Richtung</b>	Relativer Winkel [Grad]	Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>agvStartMoveAbs</i>
	Fahrweg [cm]		<i>agvPerformMoveAbs</i>
	Geschwindigkeit [km/h]		
<b>Fahrt in relativer Richtung</b>	Relativer Winkel [Grad]	Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>agvStartMoveRel</i>
	Fahrweg [cm]		<i>agvPerformMoveRel</i>
	Geschwindigkeit [km/h]		
<b>Anhalten</b>		Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>agvStopMoving</i>
<b>Werkstückentnahme oder –übergabe starten</b>	Richtung [Übergabe, Entnahme]	Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>agvStartHandOver</i> <i>agvPerformHandOver</i>
<b>Aufladen der Batterie</b>		Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>agvStartRechargeBattery</i> <i>agvPerformRechargeBattery</i>
<b>In den Energiesparmodus schalten</b>		Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>für diese Aktion ist kein Animationsbefehl nötig (es wird nur Energie bei Bewegungen verbraucht)</i>
<b>Neustart der Sensorik/Aktorik</b>		Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>agvRestart</i>
<b>Status lesen</b>		Zustand des HTF [WARTEN, FAHREN, WS_ÜBER, WS_ENT, LADEN, FEHLER]	<i>agvGetState</i>
<b>Batterieladestand lesen</b>		<i>Batterieladung [%]</i>	<i>agvGetBatteryLoad</i>

<b>Messen der Entfernung zum nächsten Hindernis</b>		Entfernung [cm]	agvGetNextObstacle
<b>Messen der aktuellen Position</b>		x-Position [cm]	agvGetPosition
		y-Position [cm]	
<b>Messen der aktuellen Ausrichtung</b>		Absolute Ausrichtung [Grad]	agvGetDirection

Tabelle 17: System- und Animationsschnittstelle des HTF

### 3.2. Systemschnittstelle der WZM

<b>Systemfunktionen</b>	<b>Parameter</b>	<b>Rückgabewert</b>	<b>Funktion der Animations-schnittstelle</b>
<b>Starten der WZM</b>		Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>mtStart</i>
<b>Werkstück aus dem Eingangspuffer holen und bearbeiten</b>		Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>mtStartWork</i> <i>mtPerformWork</i>
<b>Anhalten der WZM</b>		Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>mtStopWorking</i>
<b>Wiederanlaufen nach Maschinenstopp</b>		Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>mtRestart</i>
<b>Lesen der Anzahl der freien Plätze im Eingangspuffer</b>		Anzahl [0..2]	<i>mtGetInputBufferNumber</i>
<b>Lesen der Anzahl der belegten Plätze im Ausgangspuffer</b>		Anzahl [0..2]	<i>mtGetOutputBufferNumber</i>

Tabelle 18: System- und Animationsschnittstelle der WZM

### 3.3. Systemschnittstelle des Lagers EIN

Systemfunktionen	Parameter	Rückgabewert	Funktion der Animations-schnittstelle
Start des Eingangslagers		Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>inStart</i>
Ein Werkstück auf die Ent-nahmeposition verbringen	Werkstücktyp	Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>inStartSupplyItem</i> <i>inPerformSupplyItem</i>
Anhalten des Eingangsla-gers		Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>inStopWorking</i>
Wiederanlaufen des Ein-gangslagers		Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>inRestart</i>
Lesen des Status		Maschinenstatus [WARTEN, ARBEITEN, ANGEHALTEN, FEHLER]	<i>inGetState</i>

Tabelle 19: System- und Animationsschnittstelle des EIN

### 3.4. Systemschnittstelle des Lagers AUS

Systemfunktionen	Parameter	Rückgabewert	Funktion der Animations-schnittstelle
Start des Ausgangslager		Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>outStart</i>
Anhalten des Ausgangsla-gers		Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	<i>outStopWorking</i>
Wiederanlaufen des Aus-gangslagers		Bestätigung der Funktion [OK, FEHLER]	
Lesen des Status		Maschinenstatus [WARTEN, ARBEITEN, ANGEHALTEN, FEHLER]	<i>outGetState</i>

Tabelle 20: System- und Animationsschnittstelle des AUS

## 4 Anhang: Begriffe und Definitionen

### **Fertigungssystem**

Ein Fertigungssystem ist eine Fertigungseinrichtung, die über mehrere NC-Werkzeugmaschinen und Bearbeitungszentren verfügt. Neben einem Werkstückspeicher enthalten Fertigungssysteme ein automatisches Werkstücktransportsystem (Materialfluss). Fertigungssysteme sind auf ein breites Werkstückspektrum ausgerichtet.

### **Maschinen**

Alle dezentralen Teilsysteme eines Fertigungssystems, z. B. Transportfahrzeuge, Lager, Werkzeugmaschinen, werden allgemein, ohne ihre Funktion zu nennen, als Maschinen bezeichnet.

### **Steuerung**

Eine Steuerung umfasst alle Aktionen, welche erforderlich sind, um sicherzustellen, dass die Ausgabe des Systems den vorgegebenen Plänen und Aufgaben entspricht.

### **Autonomie**

Die Autonomie eines Systems oder Teilsystems ist der Grad der Unabhängigkeit von der Steuerung höherer Instanzen.

### **Fahrerloses Transportsystem (FTS)**

Ein FTS ist ein Verbund von mobilen Transportfahrzeugen (FTF, engl. AGV) mit einem zentralen Leitsystem, das für den Transport von Material innerhalb von Fabriken zuständig ist.

### **Holon, Holonisches Transportfahrzeug (HTF)**

Ein Holon ist ein autonomer, intelligenter, flexibler und zeitweise kooperativer Agent. Die Aufgabe eines Holons ist das Transformieren von Objekten, zu denen auch Informationen gezählt werden. Diese Transformation besteht im Verarbeiten, Montieren, Verpacken oder Transportieren der Objekte. Jedes Holon gehört zu einem dynamisch strukturierten Verbund, der sog. Holarchie (allg. Multi-Agenten-System).

Im Zusammenhang mit einem FTS werden die einzelnen Fahrzeuge als Holonische Transportfahrzeuge (HTF, engl. H-AGV) bezeichnet.

Der Begriff "Holon" stammt vom griechischen "holos" (= ganz) ab. Die Endung "-on" lehnt sich an die Bezeichnungen für Elementarteilchen (Neutron, Proton etc.) an. Der Begriff "Holon" wurde von Arthur Koestler in seinem Buch "The Ghost in the Machine" eingeführt.

### **Holonisches fahrerloses Transportsystem (HTS)**

Ein holonisches, fahrerloses Transportsystem ist ein FTS, das nicht von einer Leitstelle (PPS, Dispositionssteuerung o.ä.) beauftragt wird, sondern aufgrund zugänglicher Informationsquellen sowie interner Maßgaben und Verhaltensregeln eigenständig und eigenverantwortlich einen Fahrauftrag auswählt.

## 5 Weiterführende Literatur

- /1/ Suda, H.: Future Factory System Formulated in Japan (1). In: Techno Japan, Vol.22, (1989), No. 10, pp. 15-25
- /2/ Suda, H.: Future Factory System Formulated in Japan (2). In: Techno Japan, Vol.23, (1990), No.3, pp. 51-61
- /3/ N.N.: Joint International Research Programs into an Intelligent Manufacturing System. In: IROFA, January 1990
- /4/ Ritter, A.; Braatz, A.; Winz, G.: Agent systems in manufacturing. In: Tagungsband SPS/IPC/DRIVES, Nürnberg, November 2000, 11. Fachmesse und Kongress, Heidelberg: Hüthig, 2000
- /5/ Ritter, A.; Braatz, A.; Baum, W.: Transport Agents in manufacturing. In: Tagungsband SPS/IPC/DRIVES, Nürnberg, November 2001, 12. Fachmesse und Kongress, Heidelberg: Hüthig, 2001
- /6/ Koestler, A.: The Ghost in the Machine. London: Arcana books, 1989
- /7/ Dilts, D. M.; Boyd, N. P.; Whorms, N. H.: The Evolution of Control Architecture for Automatic Manufacturing Systems. In: Journal of Manufacturing Systems, Volume 10/No.1, pp.7993
- /8/ Okino, N.: A Prototyping of Bionic Manufacturing System. In: Proceedings of the ICOOMS -92, (1992), pp. 297-302
- /9/ Westkämper, E.; Höpf, M.; Schaeffer, C.: Holonic Manufacturing Systems (HMS). In: Holonic Manufacturing Systems (HMS) Plenary, HMS Consortium, Test Case 5. Proceedings, Lake Tahoe, CA, USA, 9-16 February 1994 Holonic Manufacturing Systems (1994, Lake Tahoe, CA), Lake Tahoe, 1994
- /10/ Flake S., Müller W.: Schnittstellendefinition zur 3D-Animation eines holonischen Fertigungssystems, Technischer Bericht, C-LAB Bericht 09/2001, Paderborn, August 2001.  
URL: <http://www.c-lab.de/vis/people/flake/publications/Schnittstellendefinition-2.0.ps.gz>