

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis .....   | v         |
| Tabellenverzeichnis .....   | ix        |
| Abkürzungsverzeichnis .....   | xi        |
| <b>1 Einleitung .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2 Die einheitliche Beschreibung von Informationen für die Fertigungssteuerung .....</b>                            | <b>5</b>  |
| X 2.1 Grundlagen für den Aufbau eines Informationsmodell der Fertigungssteuerung .....                                | 7         |
| X 2.1.1 Problembereich Fertigungssteuerung .....  | 8         |
| X 2.1.2 Informationsbedarf der Fertigungssteuerung .....  | 15        |
| 2.2 Anforderungen an ein Fertigungsinformationsmodell der Fertigungssteuerung .....                                   | 19        |
| 2.2.1 Anforderungen an ein generisches Fertigungsinformationsmodell<br>der Fertigungssteuerung .....                  | 20        |
| 2.2.2 Anforderungen an ein anwendungsspezifisches Fertigungs-<br>informationsmodell der Fertigungssteuerung .....     | 22        |
| 2.3 Anforderungen an eine Sprache zur Modellierung von Fertigungs-<br>informationen für die Fertigungssteuerung ..... | 28        |
| <b>3 Stand der Technik .....</b>  | <b>33</b> |
| 3.1 Anwendungsneutrale Methoden zur Modellierung betrieblicher Systeme .....  | 34        |
| 3.1.1 Basis- und kombinierte Techniken .....  | 36        |
| 3.1.1.1 Struktur- und Datenmodellierung .....   | 36        |
| 3.1.1.2 Funktions- und Aktivitätenmodellierung .....  | 39        |
| 3.1.1.3 Verhaltensmodellierung .....  | 40        |
| 3.1.1.4 Kombinierte Techniken .....   | 43        |
| 3.1.1.5 Methoden der Wissensrepräsentation .....  | 44        |
| 3.1.1.6 Zusammenfassende Bewertung .....  | 46        |
| 3.1.2 Integrierte Ansätze zur Gestaltung betrieblicher Informationssysteme .....                                      | 47        |
| 3.1.2.1 Die Architektur Integrierter Informationssysteme .....  | 48        |
| 3.1.2.2 Das Semantische Objektmodell .....  | 49        |
| 3.1.2.3 CIMOSA .....  | 51        |
| 3.1.2.4 Zusammenfassende Bewertung .....  | 54        |
| 3.1.3 Methoden der Geschäftsprozeßmodellierung .....  | 55        |
| 3.2 Methoden zur Modellierung von Produktionssystemen .....   | 57        |
| 3.2.1 Methoden zur Modellierung von Fertigungsprozessen .....   | 57        |
| 3.2.2 CIM-Planungs- und Analyse-Tools .....   | 59        |
| 3.2.3 Standards zur Informationsmodellierung im Produktionsbereich .....  | 61        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.3      | Methoden zur Modellierung von FST-Systemen .....   | 63        |
| 3.3.1    | Konzeptuelle Informationsmodelle für FST-Systeme .....   | 63        |
| 3.3.1.1  | Traditionelle Darstellungstechniken für FST-Informationen .....  | 63        |
| 3.3.1.2  | Referenzmodelle für FST-Informationen .....  | 64        |
| 3.3.1.3  | Modellierung der Schnittstellen von FST-Systemen .....   | 65        |
| 3.3.1.4  | Zusammenfassende Bewertung .....   | 66        |
| 3.3.2    | Modellierung von Fertigungsprozessen als Gestaltungsgrundlage<br>für FST-Systeme .....                         | 67        |
| 3.3.3    | Ganzheitliche Ansätze zur Modellierung von FST-Systemen .....  | 68        |
| <b>4</b> | <b>Zu leistende Arbeiten und weiteres Vorgehen .....</b>   | <b>71</b> |
| <b>5</b> | <b>Konzepte und Notation eines generischen Fertigungsinformationsmodells<br/>der Fertigungssteuerung .....</b> | <b>73</b> |
| 5.1      | Grundlegender Modellaufbau und Argumentationsbasis .....   | 73        |
| 5.2      | Die Modellierung von Fertigungselementen aus Sicht der Fertigungssteuerung .....                               | 80        |
| 5.2.1    | Fertigungselemente .....   | 80        |
| 5.2.2    | Eigenschaften von Fertigungselementen .....  | 83        |
| 5.2.2.1  | Zustandsbeschreibende Eigenschaften von Fertigungselementen ..   | 83        |
| 5.2.2.2  | Das Leistungsangebot von Fertigungselementen .....   | 87        |
| 5.2.3    | Beziehungen zwischen Fertigungselementen .....   | 96        |
| 5.3      | Die Modellierung von Fertigungsaktivitäten aus Sicht der Fertigungssteuerung ...                               | 109       |
| 5.3.1    | Fertigungsaktivitäten .....  | 109       |
| 5.3.2    | Eigenschaften von Fertigungsaktivitäten .....  | 114       |
| 5.3.2.1  | Zustandsübergangsbeschreibende Eigenschaften von<br>Fertigungsaktivitäten .....                                | 114       |
| 5.3.2.2  | Der Leistungsbedarf und -verbrauch von<br>Fertigungsaktivitäten .....  | 120       |
| 5.3.3    | Beziehungen zwischen Fertigungsaktivitäten .....   | 124       |
| 5.4      | Die Modellierung von Zeit aus Sicht der Fertigungssteuerung .....  | 135       |
| 5.4.1    | Physikalische Grundlagen zur Zeitmessung .....   | 137       |
| 5.4.2    | Die Repräsentation von Zeit im Fertigungsinformationsmodell<br>der Fertigungssteuerung .....                   | 142       |
| 5.4.2.1  | Die Modellierung individueller, diskreter Zeitskalen .....   | 144       |
| 5.4.2.2  | Die Transformation von Zeitaussagen auf diskreten<br>Zeitskalen .....  | 153       |
| 5.4.2.3  | Die Modellierung zeitlicher Reihenfolgen .....   | 157       |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.5      | Die Integration der Konzepte zu einem Fertigungsinformationsmodell der Fertigungssteuerung .....                         | 160        |
| 5.5.1    | Aufbau eines einstufigen Fertigungsinformationsmodells der Fertigungssteuerung .....                                     | 160        |
| 5.5.1.1  | Aufbau der Restriktionsebene .....   | 160        |
| 5.5.1.2  | Aufbau der Realisationsebene .....   | 165        |
| 5.5.2    | Der Aufbau eines Fertigungsinformationsmodells der Fertigungssteuerung am Beispiel der „Fabrik 2000“ .....               | 169        |
| 5.5.2.1  | Der Fertigungsablauf .....   | 169        |
| 5.5.2.2  | Das graphische Modell der Restriktionsebene .....  | 171        |
| 5.5.2.3  | Die Beschreibung ausgewählter Modellkomponenten der Restriktionsebene .....  | 172        |
| 5.5.2.4  | Die Beschreibung ausgewählter Modellkomponenten der Realisationsebene .....  | 188        |
| 5.5.3    | Aufbau eines mehrstufigen, verteilten Fertigungsinformationsmodells der Fertigungssteuerung .....                        | 193        |
| 5.5.3.1  | Horizontale Dekomposition eines Fertigungsinformationsmodells der Fertigungssteuerung .....                              | 195        |
| 5.5.3.2  | Vertikale Dekomposition eines Fertigungsinformationsmodells der Fertigungssteuerung .....                                | 198        |
| 5.5.4    | Submodelle und Sichten .....   | 203        |
| <b>6</b> | <b>Formale Spezifikation der Konzepte des generischen Fertigungsinformationsmodells der Fertigungssteuerung .....</b>    | <b>207</b> |
| 6.1      | Phase 1: Basisobjekte .....  | 208        |
| 6.2      | Phase 2: Beziehungen und Attribute .....   | 222        |
| 6.3      | Phase 3: Zwangsbedingungen .....   | 228        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>  | <b>231</b> |
|          | Literaturverzeichnis .....   | 235        |
|          | <b>Anhang .....</b>  | <b>257</b> |
|          | Anhang A: Überblick über die Sprachelemente von EXPRESS und EXPRESS-G .....  | 257        |
|          | A.1 EXPRESS .....  | 257        |
|          | A.2 EXPRESS-G .....  | 260        |
|          | Anhang B: Formale Spezifikation der Bausteine des Fertigungsinformationsmodells der Fertigungssteuerung in EXPRESS ..... | 263        |
|          | B.1 Schemadefinition <i>support_schema</i> .....   | 263        |
|          | B.2 Schemadefinition <i>property_schema</i> .....  | 264        |

---

|   |   |     |
|---|---|-----|
| B.3   | Schemadefinition <i>time_schema</i> .....                                       | 267 |
| B.4   | Schemadefinition <i>element_and_operation_definition_schema</i> .....           | 270 |
| B.5   | Schemadefinition <i>production_planning_and_control_constraint_schema</i> ..... | 275 |
| B.6   | Schemadefinition <i>event_documentation_schema</i> .....                        | 282 |
| Anhang C: Spezifikation der Bausteine des Fertigungsinformationsmodells der<br>Fertigungssteuerung in EXPRESS-G ..... |   | 287 |

## Abbildungsverzeichnis

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Abb. 2-1:  | Das „Meaning triangle“ (in Anlehnung an [Gie192, S. 271]) .....   | 5  |
| Abb. 2-2:  | Beschreibungsebenen von FST-Informationen .....   | 8  |
| Abb. 2-3:  | Komponenten eines Fertigungssystems .....   | 10 |
| Abb. 2-4:  | Schematische Einordnung des Fertigungssystems in ein Unternehmen .....  | 11 |
| Abb. 2-5:  | Grundmodell der FST als betrieblicher Regelkreis .....  | 14 |
| Abb. 2-6:  | Informationsbedarf der FST über die Fertigung .....   | 19 |
| Abb. 2-7:  | Sichten, Teilmodelle, Planungsebenen .....  | 25 |
| Abb. 2-8:  | Beschreibungsebenen eines rechnergestützten Informationssystems<br>[Sche95, S.14] .....                       | 28 |
| Abb. 3-1:  | Petri-Netz-Modell eines Fertigungsprozesses .....   | 41 |
| Abb. 3-2:  | Beschreibungsebenen und Zerlegungssichten in ARIS [Sche95, S. 82] .....                                       | 48 |
| Abb. 3-3:  | Das V-Modell zum SOM mit Darstellungstechniken [FeSi91] .....   | 50 |
| Abb. 3-4:  | Die CIMOSA-Referenzarchitektur mit generischen Konstrukten<br>der Anforderungsdefinitionsebene [TöJü92] ..... | 52 |
| Abb. 3-5:  | Konzeptuelle Ebene des GRAI-Rahmenwerks mit Modellierungs-<br>techniken .....                                 | 59 |
| Abb. 3-6:  | Aufbau von STEP .....   | 62 |
| Abb. 5-1:  | Basiskomponenten des generischen Fertigungsinformationsmodells<br>der FST .....                               | 74 |
| Abb. 5-2:  | Übertragung des Petri-Netz-Ansatzes auf das Fertigungsinformations-<br>modell der FST .....                   | 75 |
| Abb. 5-3:  | Grundlegender Aufbau des generischen Fertigungsinformationsmodells<br>der FST .....                           | 76 |
| Abb. 5-4:  | Klassifikation der Fertigungselemente .....   | 81 |
| Abb. 5-5:  | Die Modellierung von Fertigungselementen und FE-im-FST-Zustand .....  | 85 |
| Abb. 5-6:  | Ausschnitt aus dem FST-relevanten Lebenszyklus eines Werkzeugs .....  | 86 |
| Abb. 5-7:  | Das Leistungsangebot eines Fertigungselements am Beispiel eines BAZ .....                                     | 89 |
| Abb. 5-8:  | Alternative Belegungsfolgen eines BAZ .....   | 92 |
| Abb. 5-9:  | Darstellung verschiedener Kapazitätsverläufe .....  | 94 |
| Abb. 5-10: | Klassifizierung von Fertigungselementen zu FE-Klassen .....   | 97 |
| Abb. 5-11: | FE-Klassenhierarchie für Transportmittel .....  | 98 |

|  |     |
|--|-----|
| Abb. 5-12: Arbeitsplan und Stückliste eines Stahlrohrtisches<br>[GGR92, S. 1 u. S. 150] .....        | 99  |
| Abb. 5-13: Alternativen zur Auswahl einer Menge an Fertigungselementen .....                         | 101 |
| Abb. 5-14: Konzepte zur Beschreibung einer FE-Kategorie .....  | 103 |
| Abb. 5-15: Modellierung einer FE-Kategorie am Beispiel eines Waren-<br>eingangslagers .....          | 106 |
| Abb. 5-16: Ein FE-Knoten als Repräsentant einer Hierarchie an FE-Kategorien .....                    | 107 |
| Abb. 5-17: Fertigungsvorgang .....   | 111 |
| Abb. 5-18: Die Aggregation von Fertigungsverfahren .....   | 113 |
| Abb. 5-19: Fertigungselemente im Übergang vom Input zum Output eines<br>Fertigungsvorgangs .....     | 116 |
| Abb. 5-20: Modell zum Beispiel, Fall a) .....  | 118 |
| Abb. 5-21: Modell zum Beispiel, Fall b) .....  | 119 |
| Abb. 5-22: Modell zum Beispiel, Fall c) .....  | 119 |
| Abb. 5-23: Leistungsbedarf und -verbrauch eines Fertigungsvorgangs .....                             | 124 |
| Abb. 5-24: Klassifikation von Fertigungsverfahren [Warn93b, S. 3] .....                              | 126 |
| Abb. 5-25: Modellierung einer FV-Kategorie am Beispiel einer Wellenfertigung .....                   | 131 |
| Abb. 5-26: Ein FV-Knoten als Repräsentant einer Hierarchie an FV-Kategorien .....                    | 133 |
| Abb. 5-27: Aufbau einer Zeitskala .....  | 138 |
| Abb. 5-28: Bestimmung von Zeitpunkten anhand einer Zeitskala .....                                   | 139 |
| Abb. 5-29: Die Projektion auf eine diskrete Zeitskala .....  | 140 |
| Abb. 5-30: Klassifikation von Zeitmodellen .....   | 144 |
| Abb. 5-31: Eigenschaften einer originären Zeitskala am Beispiel einer<br>Taktzeitskala .....         | 146 |
| Abb. 5-32: Lückenlos und partiell abgeleitete Zeitskalen .....                                       | 148 |
| Abb. 5-33: Sukzessive Ableitung eines Schichtkalenders .....   | 151 |
| Abb. 5-34: Reihenfolgen von Zeitpunkten und Projektionsintervallen .....                             | 154 |
| Abb. 5-35: Zuordnungsbeziehungen zwischen Bezugs- und abgeleiteter Zeitskala .....                   | 154 |
| Abb. 5-36: Transformation von Zeitpunkten zwischen Bezugs- und lückenlos<br>abgeleiteter Skala ..... | 155 |
| Abb. 5-37: Transformation von Zeiträumen zwischen Bezugs- und lückenlos<br>abgeleiteter Skala .....  | 156 |
| Abb. 5-38: Transformation von Zeitpunkten zwischen Bezugs- und partiell<br>abgeleiteter Skala .....  | 157 |

|   |     |
|---|-----|
| Abb. 5-39: Modellierung zeitlicher Reihenfolgen als Graph .....                                   | 159 |
| Abb. 5-40: Grundlegender Aufbau des generischen Fertigungsinformationsmodells der FST .....       | 161 |
| Abb. 5-41: Elementarmodell eines Fertigungsprozesses .....  | 162 |
| Abb. 5-42: Alternatives Prozeßmodell zur Abb. 5-41 .....  | 163 |
| Abb. 5-43: FE-Knoten mit parallel verlaufenden Input- und Outputpfaden .....                      | 164 |
| Abb. 5-44: Mit Marken belegtes Elementarmodell eines Fertigungsprozesses .....                    | 166 |
| Abb. 5-45: Dokumentation des Elementflusses .....   | 168 |
| Abb. 5-46: Enderzeugnis Pyramide und ihre Komponenten .....                                       | 170 |
| Abb. 5-47: Modellgraph „Fabrik 2000“ .....  | 173 |
| Abb. 5-48: Modellabschnitt „Fertigung der Aluminiumsockel“ .....                                  | 174 |
| Abb. 5-49: Modellabschnitt „Transport“ .....  | 179 |
| Abb. 5-50: Modellabschnitt „Fertigung der Elektronikbaugruppen“ .....                             | 182 |
| Abb. 5-51: Modellabschnitt „Endmontage“ .....   | 185 |
| Abb. 5-52: Horizontale und vertikale Dekomposition eines Fertigungs-<br>informationsmodells ..... | 194 |
| Abb. 5-53: Modellierung der verschiedenen Schnittstellenvarianten .....                           | 197 |
| Abb. 5-54: Zulässige Verknüpfungen über vertikale FST-Informationspfade .....                     | 200 |
| Abb. 5-55: Einbettung eines Teil-Informationsmodells am Beispiel der<br>„Fabrik 2000“ .....       | 202 |
| Abb. 5-56: Sub-, Meta- und Teilsysteme .....  | 203 |
| Abb. 5-57: Anwendung des Submodellkonzepts auf das Beispiel „Fabrik 2000“ .....                   | 204 |
| Abb. 5-58: Sichten und Zielgruppen am Beispiel der „Fabrik 2000“ .....                            | 206 |
| Abb. 6-1: Schema-Level-Diagramm zum generischen Fertigungsinformations-<br>modell der FST .....   | 230 |
| Abb. A-1: Darstellungssymbole EXPRESS-G .....   | 261 |
| Abb. A-2: Beispielmmodell EXPRESS-G: Schema-Level-Diagramm .....                                  | 261 |
| Abb. A-3: Beispielmmodell EXPRESS-G: Entity-Level-Diagramm zum<br><i>typen_schema</i> .....       | 261 |
| Abb. A-4: Beispielmmodell EXPRESS-G: Entity-Level-Diagramm zum<br><i>personen_schema</i> .....    | 262 |
| Abb. C-1: Fertigungselement und FE-Klasse .....   | 287 |
| Abb. C-2: FE-im-FST-Zustand und Klasse an FE-im-FST-Zustand .....                                 | 287 |

---

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Abb. C-3: | Fertigungsverfahren und Verfahrensklasse ..... | 288 |
| Abb. C-4: | Fertigungsvorgang und FV-Klasse .....          | 288 |
| Abb. C-5: | Kategorien und Knoten .....                    | 289 |
| Abb. C-6: | Pfade und Schnittstellen .....                 | 290 |
| Abb. C-7: | Ereignisse .....                               | 291 |
| Abb. C-8: | Ereignis-Zeit-Leisten .....                    | 292 |
| Abb. C-9: | Zeitskalen .....                               | 293 |



## Tabellenverzeichnis

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| Tab. 3-1:  | Synonyme Begriffe der Systemmodellierung .....                                       | 34  |
| Tab. 5-1:  | Betriebliche Strukturmatrix nach [GGR92, Tab. 144, S. 392] .....                     | 77  |
| Tab. 5-2:  | Die Zusammensetzung der aktuellen Verfügbarkeit am Beispiel<br>eines Werkers .....   | 91  |
| Tab. 5-3:  | Beziehungen in der betriebstypologischen Matrix .....                                | 108 |
| Tab. 5-4:  | Arbeitsplan zur Herstellung eines Stahlrohrtisches [GGR92, S. 150] .....             | 110 |
| Tab. 5-5:  | Gruppen an Fertigungsvorgängen bei Einzelfertigung .....                             | 127 |
| Tab. 5-6:  | Gruppen an Fertigungsvorgängen bei Massenfertigung .....                             | 128 |
| Tab. 5-7:  | Start-/Endtermin-Leisten Kategorie FERTIGUNG_ALU .....                               | 189 |
| Tab. 5-8:  | Start-/Endtermin-Leisten Kategorie FERTIGUNG_ALU_TYP1 .....                          | 191 |
| Tab. 5-9:  | Start-/Endtermin-Leisten Kategorie FERTIGUNG_ALU_TYP2 .....                          | 191 |
| Tab. 5-10: | Zugangstermin-Leiste PORT_I1 der Kategorie FTS_FREI .....                            | 192 |
| Tab. 5-11: | Abgangstermin-Leiste PORT_O1 der Kategorie FTS_FREI .....                            | 192 |
| Tab. 5-12: | Abgangstermin-Leiste PORT_O2 der Kategorie FTS_FREI .....                            | 192 |
| Tab. 5-13: | Abgangstermin-Leiste PORT_O3 der Kategorie FTS_FREI .....                            | 193 |
| Tab. 5-14: | Einbettung von horizontalen Schnittstellen .....                                     | 196 |
| Tab. 6-1:  | Bausteine und ihre Eigenschaften zur Modellierung von<br>Fertigungselementen .....   | 209 |
| Tab. 6-2:  | Bausteine und ihre Eigenschaften zur Modellierung von<br>Fertigungsaktivitäten ..... | 214 |
| Tab. 6-3:  | Bausteine und ihre Eigenschaften zur Modellierung von Zeit .....                     | 218 |
| Tab. 6-4:  | Bausteine und ihre Eigenschaften zur Modellierung der<br>Verbindungselemente .....   | 221 |