

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Maschinenbau und Fertigungstechnik, danke ich für die wohlwollende Förderung bei der Durchführung dieser Arbeit und für das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Fakultät Maschinenwesen an der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Meinen Kollegen am Lehrstuhl und den Projektpartnern im Bayerischen Forschungsverbund Simulationstechnik FORSIM danke ich für die sehr gute fachliche und kollegiale Zusammenarbeit. Besonders hervorheben möchte ich dabei Herrn Dipl.-Ing. Frank Christoph für seine fachlichen Anregungen sowie die Korrekturen und Herrn Dipl.-Inf. Thomas Collisi für die konstruktive Zusammenarbeit am Lehrstuhl und in FORSIM. Weiterhin möchte ich den Kollegen am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der TU München für die gute Zusammenarbeit in den gemeinsamen Projekten danken.

Viele engagierte Studenten waren mir eine große Hilfe bei der Ausarbeitung und Implementierung der neuen Konzepte. Im Besonderen möchte ich dabei Herrn Dipl.-Ing. Bernd Aures, Frau Dipl.-Ing. Sylvia Endlein, Herrn Dipl.-Ing. Thomas Harasim und Herrn Dipl.-Inf. Andrei Riazanov hervorheben.

Besonderer Dank gebührt Herrn Dr. Norbert Autenrieth für die prompten Korrekturen, vor allem hinsichtlich der Tücken der neuen deutschen Rechtschreibung. Auch danke ich meinen Eltern für die Unterstützung während meiner Zeit am Lehrstuhl.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Freundin Julia Autenrieth für die aktive und moralische Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit und in der Zeit der Prüfungsvorbereitung.

Erlangen, September 2000

Wolfgang Schlögl

*Für Julia*

# Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung

- Inhaltsverzeichnis -

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Simulationsdaten-Management für den durchgängigen Einsatz virtueller Maschinen	1
1.2	Ausgangslage und Zielsetzung der Arbeit	3
1.3	Vorgehensweise bei der Ausarbeitung	7
<b>2</b>	<b>Einsatzfelder und Methoden der Simulation in der Produktionstechnik</b>	<b>10</b>
2.1	Einsatz von Simulation in Produktentwicklung, Anlagenplanung und -betrieb	11
2.1.1	Simulation des Bauteilverhaltens mit numerischen Berechnungsmethoden	13
2.1.2	Mehrkörpersimulation zur Ermittlung dynamischer Maschineneinflüsse	15
2.1.3	3D-Kinematik Simulation / Digital Mock-up	17
2.1.4	Steuerungssimulation	19
2.1.5	Ablaufsimulation der Fertigung	23
2.2	Simulationsdaten in den Planungsbereichen	25
2.2.1	CAD-basierte Simulationsdaten in der Produktentwicklung	26
2.2.2	Datenerhebung für die Ablaufsimulation	29
2.3	Notwendigkeit eines integrierten Simulationsdaten-Managements	30
2.3.1	Aufwandsabschätzung für die Datenerhebung	31
2.3.2	Vorteile der entwicklungsbegleitenden Erhebung und Speicherung von Planungsdaten	32
<b>3</b>	<b>Maschinennahes Referenzmodell für die Simulation</b>	<b>34</b>
3.1	Referenzmodelle in der Simulationstechnik	34
3.1.1	Begriffsbestimmung und Klassifikation	34
3.1.2	Beschreibungsmethoden für maschinennahe Referenzmodelle	37
3.1.3	Anwendung von maschinennahen Referenzmodellen in Entwicklung, Einsatz und Vertrieb	39
3.2	Referenzmodell maschinennaher Simulationskomponenten	42
3.2.1	Grundstruktur und Einsatzfelder des Referenzmodells maschinennaher Simulationskomponenten	43
3.2.2	Integration von FEM-, 3D-Kinematik, Steuerungs- sowie Ablaufsimulation in das Referenzmodell	51
3.2.3	Maschinennahe Simulationskomponenten für die Ablaufsimulation	59

3.3 Anforderungen an den betrieblichen Einsatz des maschinennahen Referenzmodells für der Ablaufsimulation .....	62
3.3.1 Betriebliche Einflüsse auf den Referenzmodelleinsatz .....	62
3.3.2 Abstimmung der Zielsetzung auf die Benutzeranforderungen ...	62
<b>4 Maschinennahe Simulation am Beispiel der Elektronikproduktion ....</b>	<b>65</b>
4.1 Simulationsdaten der Maschinenentwicklung .....	66
4.1.1 Simulation von Bestückvorgängen .....	67
4.1.2 Simulation der Bestückautomatensteuerung .....	68
4.1.3 3D-Kinematik Simulation von Bestückautomaten .....	69
4.2 Analyse und Strukturierung der Anlagenkomponenten für die Systemintegration .....	71
4.2.1 Analyse der Abläufe in der Elektronikproduktion .....	71
4.2.2 Bestimmung relevanter Komponenten .....	72
4.2.3 Definition von Abhängigkeiten .....	74
4.2.4 Systematische Katalogisierung der Komponenten .....	75
4.3 Erforderliche Parameter für die Ablaufsimulation .....	75
4.3.1 Bestimmung relevanter Anlagenparameter für die Ablaufsimulation .....	76
4.3.2 Erweiterung des Komponentenkatalogs um Simulationsparameter und maschinenspezifische Logikbausteine .....	79
<b>5 Realisierung des Teilmodells Systemintegration auf Basis einer relationalen Datenbank .....</b>	<b>83</b>
5.1 Modellierung der Anlagenkomponenten, Produkte und Arbeitspläne ..	83
5.1.1 Datenbankentwurf und Datenmodellierung .....	84
5.1.2 Hierarchische Modellierung der Bearbeitungsprozesse sowie Einbindung von Produkten und Arbeitsplänen .....	90
5.1.3 Modellierung der Strukturelemente .....	91
5.2 Umsetzung des Implementationsentwurfs der Datenbank .....	92
5.2.1 Implementierung der Datenbank in Microsoft ACCESS .....	92
5.2.2 Datenbankerweiterung .....	94
5.2.3 Erstellung der Benutzeroberfläche .....	95
5.2.4 Initialisierung der Datenbank mit den Anlagenkomponenten ....	96
5.3 Parametrierung der Simulationskomponenten aus externen Datenquellen .....	99
5.3.1 Internetbasierte Datenbankeingabe der Simulationskomponenten	99
5.3.2 Parameterbestimmung durch on-line Übertragung von Fertigungsdaten .....	100

---

<b>6</b>	<b>Generierung von Arbeitsplänen für die Ablaufsimulation</b>	<b>105</b>
6.1	Analyse von Fertigungsabläufen und Wissensakquisition	105
6.1.1	Analyse der Arbeitsplanung zur Fertigung elektronischer Baugruppen	106
6.1.2	Aufbau einer Wissensbasis für die Arbeitsplanung	108
6.2	Automatisierte Generierung von Arbeitsplänen	111
6.2.1	Einsatz der Wissensbasis zur Fertigungsfolgeermittlung	113
6.2.2	Arbeitsplanung mit dem interaktiven Prozess Flow-Chart	115
6.2.3	Zusammenwirken von Arbeitsplanungs- und PPS-System	120
6.3	Arbeitspläne zur Initialisierung von Simulationsmodellen	121
6.3.1	Einsatz von Arbeitsplänen in der Ablaufsimulation	121
6.3.2	Generierung von Arbeitsplänen für die Referenzmodell-Datenbank	122
<b>7</b>	<b>Schnittstellen zur Simulation und Werkzeuge für die Anwendung</b>	<b>124</b>
7.1	Art und Funktionalität der Schnittstellen	125
7.1.1	Strukturierung der Zieldaten für die Simulation	126
7.1.2	Ermittlung von Taktzeiten in der Ablaufsimulation	129
7.1.3	Konzeption einer flexiblen Datenschnittstelle	130
7.1.4	Schnittstellen zu den Simulationssystemen QUEST und SIMPLE++	132
7.2	Konzeption eines Strukturierungswerkzeugs zur Definition von Fertigungslinien	134
7.3	Optimierte Auftragseinlastung für die Simulation	137
7.3.1	Optimierung der Auftragseinlastung am Beispiel der Elektronikproduktion	138
7.3.2	Auftragseinlastung für die Simulation auf Basis der Referenzmodell-Datenbank	139
<b>8</b>	<b>Exemplarische Anwendung des Teilmodells Systemintegration</b>	<b>147</b>
8.1	Beschreibung der Simulationsaufgabe	147
8.2	Aufbau des Simulationsmodells mit Hilfe der Referenzmodell-Datenbank	149
8.2.1	Hinzuladen einzelner Komponenten aus der Datenbank	149
8.2.2	Interaktiver Aufbau einer Fertigungsstruktur	151
8.2.3	Generierung einer voroptimierten Auftragseinlastung	153
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>156</b>
	<b>Abkürzungen</b>	<b>158</b>
	<b>Literatur</b>	<b>159</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Simulationsdaten-Management für den durchgängigen Einsatz virtueller Maschinen

Ingenieurmäßiges Handeln ist seit jeher geprägt durch die systematische Ausarbeitung neuer Ideen hin zu gebrauchsfähigen Produkten oder Verfahren. Dabei war die Arbeit am Reißbrett immer eng gekoppelt mit der Erprobung und Überprüfung der Entwicklungen anhand von Funktionsmodellen oder Prototypen. Berechnungen oder neue Funktionsprinzipien mussten in ihrer Gültigkeit und Anwendbarkeit zunächst anschaulich am realen Objekt nachvollzogen werden, bevor ein Praxiseinsatz in Frage kam. Ein solches Vorgehen ist jedoch sehr aufwendig, da der Bau von Prototypen sehr viel Zeit und Materialeinsatz erfordert. Dies war bis vor wenigen Jahren nicht zu umgehen, da bei komplexen Produkten oder Systemen die vorhergesagte und sichere Funktion nicht ohne Tests am realen Objekt sicherzustellen war oder Lösungen nicht ohne Versuche gefunden werden konnten.

Die entscheidende Wandlung dieser Vorgehensweise der Erprobung anhand von realen Modellen begann mit dem Rechneinsatz in der Konstruktion, speziell mit dem Einsatz von CAD-Systemen, die räumliche Modelle darstellen konnten. Nun war die Möglichkeit gegeben zunächst die äußere Form von Teilen, Baugruppen oder kompletten Produkten am Computerbildschirm zu überprüfen. Parallel dazu wurden andere Systeme entwickelt, die auf den räumlichen Modellen basieren und mit denen weitere Analysen und Überprüfungen möglich sind. Das Nachbilden realer Funktionalität am Rechner wird mit dem Begriff Computersimulation zusammengefasst, die Zielsetzungen und Vorgehensweisen bei der Simulation können jedoch sehr unterschiedlich sein. In der maschinennahen Simulation reichen die Einsatzgebiete von Berechnung und Auslegung mechanischer und dynamischer Eigenschaften von Bauteilen und Baugruppen, über Kinematik- und Zusammenbau-Untersuchungen bis zur Nachbildung ganzer Produktionsanlagen inklusive ihrer Steuerung.

Die Simulation erschließt für die Maschinenentwicklung deutliche Einsparungspotentiale, da Ergebnisse schneller verfügbar werden und der aufwendige Bau von realen Versuchsmodellen entfällt. Außerdem können neue, komplexe Anlagen teilweise nicht mehr mit herkömmlichen Methoden geplant und entwickelt werden. Heute sind resultierend aus der verfügbaren Rechnerleistung bereits sehr leistungsfähige Simulationssysteme für die genannten Aufgaben im Einsatz. Um den Ansatz einer komplett rechnerbasierten Entwicklung konsequent weiterzuführen, müssen diese Systeme sowohl methodisch als auch datentechnisch verknüpft werden. Dazu ist ein integriertes Simulationsdaten-Management erforderlich. So kann im weitest gehenden Fall aus einer Idee eine virtuelle Maschine entstehen, die direkt in ein verkaufsfertiges Produkt umgesetzt wird.

Die einzelnen Simulationsanwendungen sind im Umfeld des Concurrent Engineerings eingebettet, bei dem die Entwicklung und Konstruktion einer neuen Maschine oder Anlage in zeitlich überlagerter Zusammenarbeit der Entwicklungsbereiche erfolgt. Bei der Integration der Simulationsaktivitäten müssen die Entwicklungsprozesse angepasst und das betriebliche Datenmanagement muss um neue Funktionen erweitert werden. Das Simulationsdaten-Management wird so Bestandteil der Prozessketten im Unternehmen.

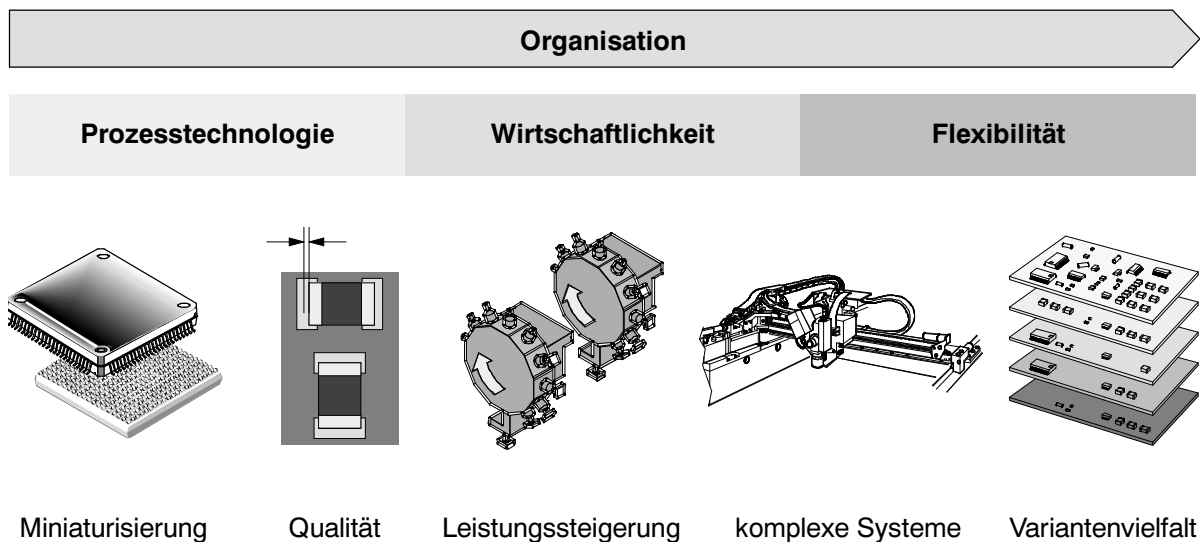
Die Einsatzmöglichkeiten einer virtuellen Maschine enden nicht mit der Herstellung ihrer realen Entsprechung. Virtuelle Maschinen können auch zur Planung von Produktionssystemen herangezogen werden. Dabei werden diese in der Ablaufsimulation oder der Steuerungssimulation des Systems verwendet. So sind virtuelle Maschinen auf Seiten der Anlagenhersteller Versuchsmodelle für die Maschinenentwicklung und auf Seiten der Maschinenanwender Simulationskomponenten für die Systemplanung. Das Simulationsdaten-Management muss alle Entwicklungsschritte beim Aufbau der virtuellen Maschine bis zu dem Punkt unterstützen, an dem die Maschine als Simulationskomponente an den Anwender übergeben wird.

An der Schnittstelle zwischen Maschinenentwicklung und Anlagenplanung wechselt die Betrachtungsweise der Simulationskomponenten aus einer funktionsbezogenen in eine systembezogene Sicht. Wo zuvor Aspekte der Konstruktions- und Steuerungstechnik im Vordergrund standen, werden Aufgaben der Systemplanung relevant. Beim Aufbau von Produktionssystemen aus virtuellen Maschinen für die Systemsimulation müssen nun auch Gesichtspunkte der Ablaufsteuerung berücksichtigt werden, wobei die zu fertigenden Produkte und Fertigungsabläufe entscheidenden Einfluss auf Systemaufbau und -verhalten haben. Wenn virtuelle Maschinen als Bausteine für Produktionssysteme dienen sollen, müssen somit auch kompatible Produkt- und Ablaufbausteine geschaffen werden.

Für die Konzeption eines integrierten Simulationsdaten-Managements ist eine ganzheitliche Betrachtung der simulationsgestützten Maschinenentwicklung sowie der Anwendung von virtuellen Maschinen in der Anlagenplanung erforderlich. Diese Betrachtung führt zu einem Referenzmodell, in dem das Zusammenwirken der simulationsbasierten Entwicklungsprozesse in Verbindung mit den Entwicklungsdaten beschrieben wird. Das Referenzmodell verknüpft Informationen aus der Simulation von Bauteilmechanik, Maschinenkinematik und -dynamik, des Steuerungsverhaltens sowie des Verhaltens der Maschine im System. Anhand des Referenzmodells kann eine durchgängige Entwicklungsmethodik realisiert werden. Die Basis bilden weiterverwendbare Simulationskomponenten; der Ablauf der Entwicklungsprozesse und der Datenaustausch wird in das betrieblichen Prozess- und Datenmanagement integriert.

## 1.2 Ausgangslage und Zielsetzung der Arbeit

Der Maschinenbau unterliegt heute anspruchsvollen Herausforderungen was die geforderte Qualität und Leistungsfähigkeit der Maschinen und die Schnelligkeit und Effizienz ihrer Entwicklung betrifft. Dabei kommt der integrierenden Organisation aller Entwicklungsbereiche besondere Bedeutung zu. Eine Sparte des Maschinenbaus, die Herstellung von Bestückmaschinen für die Elektronikproduktion, kann als Beispiel für einen innovativen, wachsenden Markt herangezogen werden. Bestückautomaten müssen zum einen immer leistungsfähiger werden, um höhere Bestückraten realisieren zu können, zum anderen wird mit fortschreitender Miniaturisierung der elektronischen Bauelemente eine steigende Präzision gefordert [26]. Die dabei entstehenden komplexen mechatronischen Bestücksysteme werden schließlich im Betrieb für meist variantenreiche Produktspektren eingesetzt, was fortschrittliche Produktionsplanungs- und -optimierungsmethoden erfordert (Abb. 1).



**Abb. 1** Aktuelle Herausforderungen für fortschrittliche Entwicklungs- und Planungsverfahren am Beispiel der Elektronikproduktion

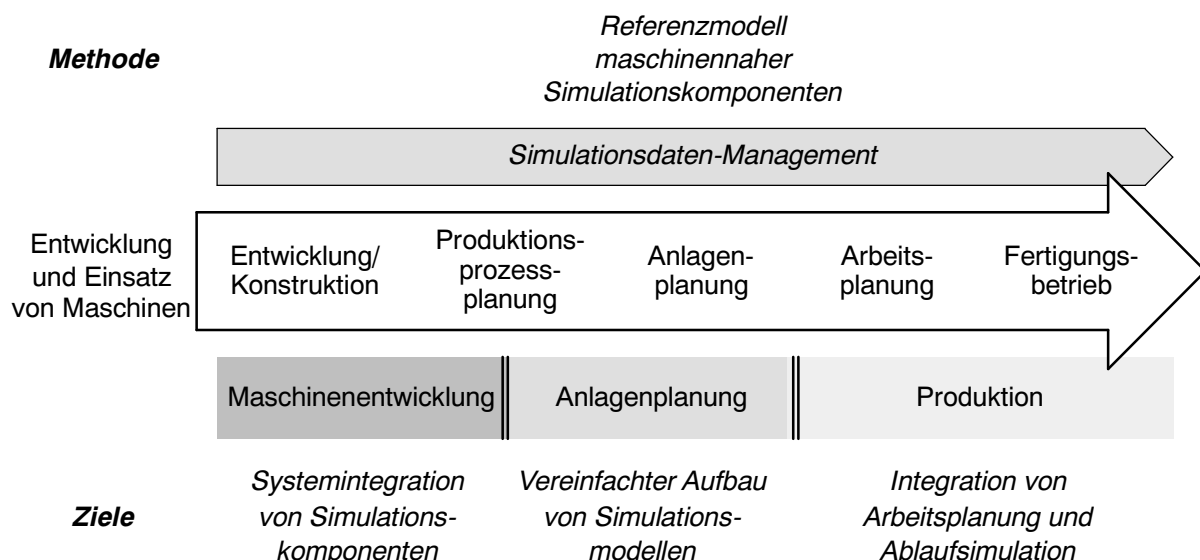
Für die Entwicklung solcher komplexer, hochautomatisierter Systeme müssen Maschinenbauer immer stärker auf moderne, rechnerbasierte Planungswerkzeuge und -methoden zurückgreifen, um wettbewerbsfähig bleiben zu können. Dabei nimmt die Simulationstechnik einen hohen Stellenwert ein. Sie ist als leistungsfähiges Werkzeug zur Unterstützung in der Planungs- und Realisierungsphase von komplexen Anlagen und Prozessen allgemein anerkannt. Die damit zu erzielende verbesserte Planungssicherheit und die schnellere Markteinführung sind entscheidende Wettbewerbsfaktoren [105]. Für die Nutzung der Synergien zwischen unterschiedlichen Simulationsarten sind jedoch noch durchgängige Methoden zu entwickeln, auch die Datenintegration hinsichtlich der Simulation ist nicht ausgereift [41].



Beginnt man mit den Betrachtungen bei den 3D-Basisdaten für Simulationen im Konstruktionsbereich, kann ein Trend zur Umstellung von 2D- auf 3D-Konstruktionssysteme ausgemacht werden. Die systematische Verwendung von 3D-CAD ist im Mittelstand jedoch noch nicht weit verbreitet [87]. Für Simulationen im Bereich der Finite Elemente Methode oder der Kinematik-Simulation werden aber 3D-Modelle benötigt. Für die Verwendung von 3D-CAD würden somit weitere Vorteile sprechen. Die systematische Weiterverwendung der Daten in unterschiedlichen Entwicklungsbereichen muss jedoch methodisch geplant und datentechnisch implementiert sein.

Generell ist zu beobachten, dass eine Vielfalt von Simulationswerkzeugen für unterschiedliche Aufgaben existiert, auch sind Systeme zum Produktdaten-Management (PDM) im Einsatz, mit denen eine Integration der Daten angestrebt wird [15, 21, 104]. Der reibungslose, transparente Datenaustausch zwischen Simulationssystemen und eine ganzheitliche Modellierungsmethodik sind jedoch nur in Ansätzen vorhanden. Bezüglich der Integration sowohl der Eingangs- als auch der Ergebnisdaten von Simulationen in einer Datenumgebung stehen ebenfalls noch keine durchgängigen Lösungen zur Verfügung.

Vordringliches Ziel dieser Arbeit ist es daher, eine weitere Integration der Entwicklungs- und Planungsbereiche auf Maschinen- sowie Anlagenebene zu erreichen, um so die Effizienz der Planung zu steigern und den Zeitaufwand zu reduzieren. Dafür wurde ein umfassendes, durchgängiges Maschinenmodell entwickelt, das die notwendigen Geometrie-, Kinematik-, Steuerungs- und Ablaufinformationen enthält. Die Anwendung des dabei entstandenen Referenzmodells maschinennaher Simulationskomponenten wird über ein Simulationsdaten-Management geregelt (Abb. 2).



**Abb. 2** Zielsetzung der Arbeit

Konkrete Softwaresysteme wurden im Rahmen dieser Arbeit vor allem für den Bereich Systemintegration von maschinennahen Simulationskomponenten und deren Einsatz in der Ablaufsimulation konzipiert und entwickelt. Zusammen mit der Entwicklung des

maschinennahen Referenzmodells erstrecken sich die Ziele dieser Arbeit auf vier Hauptbereiche (vgl. Abb. 2):

### **Ausarbeitung einer integrierten Methode zur maschinennahen Simulation anhand eines Referenzmodells**

Für die notwendige Integration der Entwicklungsbereiche wird zunächst eine Methodik benötigt, die über die gesamte Maschinenentwicklung bis zum Einsatz der Maschine im Fertigungsbetrieb angewandt werden kann. Ansätze dazu lassen sich aus integrierten Produkt- und Prozessmodellen gewinnen. Solche integrierte Modelle sind seit mehreren Jahren Gegenstand internationaler Forschungsprojekte [35]. Dabei steht das genormte Produktmodell ISO 10303 im Vordergrund, bekannt unter der Bezeichnung STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) [36]. Bei der industriellen Anwendung von STEP stand bisher der Austausch von Produktgeometrien im Vordergrund. Die Teile von STEP, die sich mit Kinematik (Part 105: Integrated Application Resource: Kinematics) und mit FEM (Part 104: Integrated Application Resource: Finite Element Analysis) befassen, haben bisher noch keine breite Anwendung gefunden, jedoch bieten sie interessante Perspektiven für die Integration von Simulationsanwendungen.

Im Bereich von partiellen Referenzmodellen für die Simulation laufen verschiedene Forschungsarbeiten [135]. Die dabei erarbeiteten Grundlagen wurden in die Konzeption des Referenzmodells einbezogen. Ebenso konnte auf Ergebnisse im Bereich des Produktdaten-Managements zurückgegriffen werden, die mit den Belangen des Simulationsdaten-Managements in der vorliegenden Arbeit abgestimmt wurden [15, 21, 104]. In diesem Zusammenhang kann auch auf das Produktion 2000 Projekt GiPP (Geschäftsprozessgestaltung mit integrierten Prozess- und Produktmodellen) hingewiesen werden [49]. Daraus wurden ebenfalls Grundlagen abgeleitet, jedoch befasst sich das GiPP-Projekt in der Implementierungsphase hauptsächlich mit der Geschäftsprozessgestaltung.

In dieser Arbeit sollte kein neues *neutrales* Gesamtmodell entworfen werden. Ein solches Modell wäre zu komplex und bei Simulationsanwendern und Softwareanbietern nicht durchsetzbar. Vielmehr wurde ein Metamodell entwickelt, das gesonderte Datenbereiche für die unterschiedliche Simulationsanwendungen enthält. Es kann von effizienten Werkzeugen zum Datenmanagement so verwaltet werden, dass der Anwender Zugriff auf die von ihm benötigten Teile von virtuellen Maschinen erhält.

Auf Seiten der Maschinenhersteller kann die Neukonstruktion einer Maschine zunächst schneller und sicherer erfolgen, da das Zusammenspiel der Entwickler über unterschiedliche Planungsstadien reibungslos funktioniert. Weiterhin wird die Qualität der Planung verbessert, da es nun einfacher wird, verschiedene Simulationsanwendungen zum Einsatz zu bringen, wodurch Entscheidungen in den Bereichen sicherer werden. Der durchgängige Einsatz von Simulation bringt jedoch auch Wettbewerbsvorteile, da Kunden anhand der durchgängigen Planungsergebnisse besser von der

Leistungsfähigkeit und Qualität der Produkte überzeugt werden können. Im Idealfall können die Kunden Teile der Simulationskomponenten auch direkt für ihre eigene Planung einsetzen.

### **Verbindung der Maschinenentwicklung und der Anlagenplanung durch den Einsatz durchgängiger maschinennaher Simulationskomponenten**

Die Bereiche Maschinenentwicklung und Anlagenplanung werden bisher hinsichtlich von Simulationsanwendungen separat betrachtet. Jedoch können virtuelle Maschinen, die bei der Entwicklung Einsatz finden, auch für Planungszwecke im Anlagenbereich eingesetzt werden. Da das angesprochene Simulationsdaten-Management ebenfalls die Systemintegration umfasst, liegt es nahe daraus direkt Simulationskomponenten für die Zwecke der Anlagenplanung abzuleiten. Eine weitere Zielsetzung dieser Arbeit ist somit die Entwicklung von maschinennahen Simulationskomponenten, die eine schnelle Modellierung im Bereich der Ablaufsimulation unterstützen. Mit ihnen sollen Simulationsmodelle unter geringem Aufwand erstellt werden können. Die Entwicklungen erfolgen hier am Beispiel der Elektronikproduktion.

Die Bereitstellung der maschinennahen Simulationskomponenten, welche die Anlagenkomponenten der Elektronikproduktion von der Planung über die Realisierung bis hin zum Betrieb beim Kunden begleiten, hat für den Anlagenhersteller den Vorteil, dass er bereits während der Angebotsphase verlässliche Aussagen über das Anlagenverhalten machen kann. Durch den Einsatz der validierten Referenzmodelle kann dabei von einer hohen Planungssicherheit ausgegangen werden. Für den Kunden und Betreiber der Anlage hat dies den Vorteil, dass er vor dem Kauf überprüfen kann, ob und wieweit seine Anforderungen erfüllt sind, wodurch Fehlinvestitionen vermieden werden können. Es besteht die Möglichkeit die komplette Fertigung in der Planungsphase auszutesten und somit wertvolle Informationen für die Kapazitätsauslegung zu gewinnen. Dadurch wird in dieser frühen Phase auch eine relativ exakte Investitionsabschätzung möglich.

### **Schaffung effizienter Einsatzmöglichkeiten für die Simulationskomponenten in der Ablaufsimulation**

Für den effizienten Einsatz der Simulationskomponenten in der Simulation sind zum einen Speichermöglichkeiten zu schaffen, die sowohl auf Maschinenentwickler- als auch auf Anwenderseite eingesetzt werden können, zum anderen werden Werkzeuge benötigt, die einen flexiblen Einsatz der Komponenten in unterschiedlichen Simulationssystemen ermöglichen. Die Beschreibung der Anlagenkomponenten soll für den Bediener möglichst einfach gehalten werden. So sollen etwa alle relevanten Anlagenkomponenten in geeigneten Eingabemasken initialisiert werden können, wonach sie dem Benutzer als fertige Simulationskomponenten zur Verfügung stehen. Nach dem aktuellen Stand der Rechnertechnik lassen sich diese Randbedingungen am besten mit einer Datenbank realisieren.

Weiterhin sollen Werkzeuge geschaffen werden, mit denen die Modellkomponenten in die Simulation geladen werden können. Dies soll zum einen für einzelne Komponenten möglich sein, zum anderen aber auch für Strukturen mit bereits vordefinierten Materialflussverknüpfungen. So wird der Modellaufbau in einem Simulator deutlich vereinfacht. Weitere Systeme, die einen rationellen Einsatz der Simulationskomponenten ermöglichen, umfassen Parametrierungsmöglichkeiten aus externen Datenquellen und ein Optimierungswerkzeug für die datenbankbasierte Auftragseinlastung in die Simulation.

### **Vereinfachung von Modellaufbau und -initialisierung durch Integration von Arbeitsplanungs- und Simulationswerkzeugen**

Gerade in der Elektronikproduktion lässt sich durch simulationsunterstützte Auftragsreihenfolgeplanung eine Verbesserung der Anlagenproduktivität erzielen [22, 45, 108]. Ein Simulationsmodell muss somit auch die Produkte, Aufträge und Termine einer realen Fertigung abbilden, wenn Optimierungsvorschläge überprüft werden sollen. Mit den angesprochenen maschinennahen Simulationskomponenten sind bereits die Ressourcen im Simulationsmodell abgedeckt. Im nächsten Schritt werden der Arbeitsablauf und die Systemlast betrachtet. Naheliegender ist es für die Initialisierung eines Simulationsmodells mit diesen Informationen dieselbe Datenbank zu verwenden wie für die Simulationskomponenten. Die Informationen über Arbeitspläne und Aufträge können dann auch für notwendige Optimierungsaufgaben herangezogen werden.

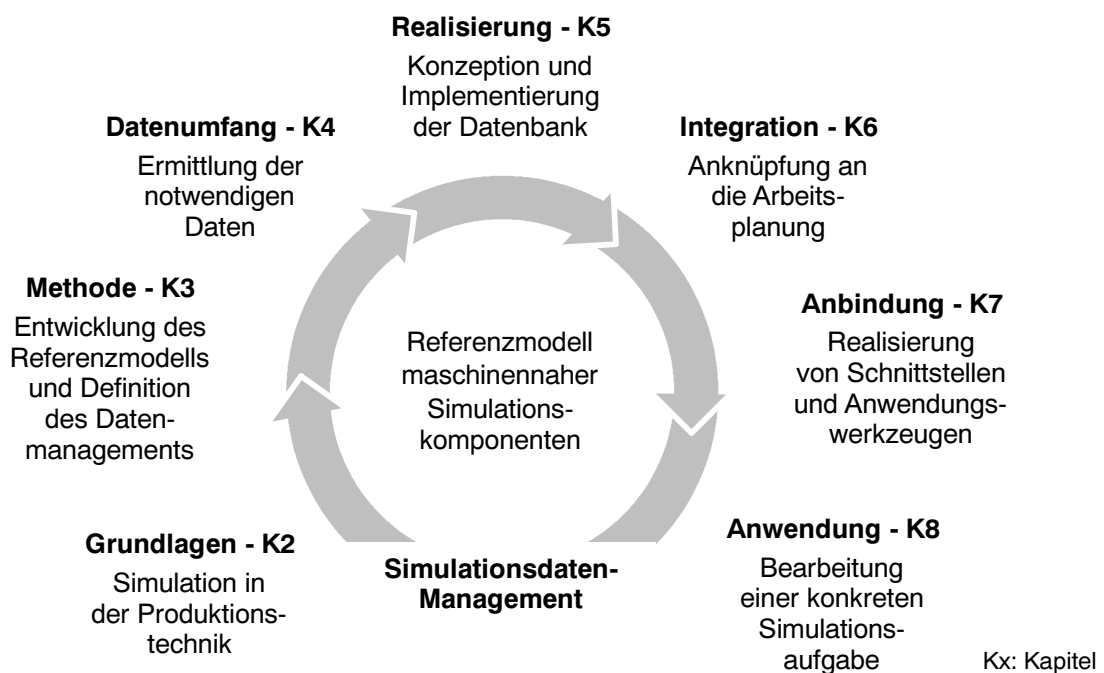
Ein ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entstandenes Arbeitsplanungssystem wird als Datenlieferant für die Arbeitspläne verwendet, um deren Generierung möglichst effizient zu gestalten. Die Arbeitspläne werden in der Datenbank mit den maschinennahen Simulationskomponenten gespeichert. Zu den enthaltenen Maschinenmodellen und den darauf gefertigten Produkten können so auch entsprechend vordefinierte Produktionsabläufe für die Simulation bereitgestellt werden.

## **1.3 Vorgehensweise bei der Ausarbeitung**

In der vorliegenden Arbeit wird aufbauend auf den simulationsbasierten Teilprozessen der Maschinenentwicklung ein Referenzmodell maschinennaher Simulationskomponenten entwickelt. Das Referenzmodell bildet den Kern eines integrierten Simulationsdaten-Managements, das sowohl die Maschinenentwicklung als auch die Anlagenplanung unterstützt. Es werden Methoden zur Integration der unterschiedlichen Simulationsanwendungen und Entwicklungsprozesse aufgezeigt. Für den Einsatz der Simulationskomponenten in der Ablaufsimulation wird ein simulatorunabhängiges System vorgestellt, das auch Aspekte des Systemaufbaus und der Ablaufsteuerung berücksichtigt (Abb. 3).

Grundlage der Arbeit bildet die Analyse der Einsatzfelder und Methoden der Simulation in der Produktionstechnik. Aus dem Einsatz der Simulation in Produktentwicklung, Anlagenplanung und Betrieb sowie den dabei verarbeiteten Daten lässt sich die Notwendigkeit eines integrierten Simulationsdaten-Managements ableiten (Kapitel 2).

Der Kern der Arbeit, das Referenzmodell maschinennaher Simulationskomponenten, wurde konform mit der aktuellen Sichtweise auf Referenzmodelle in der Simulationstechnik entwickelt. Dabei wurde aktiv in einer repräsentativen Arbeitsgruppe zur Begriffsdefinition und Klassifizierung dieser Referenzmodelle mitgearbeitet. Für das Modell sind weiterhin die Anforderungen an den betrieblichen Einsatz ermittelt worden, die als Basis für die Implementierung dienen (Kapitel 3).



**Abb. 3** Vorgehensweise und Entwicklungsschwerpunkte

Ein entscheidendes Defizit bei der Einführung eines integrierten Simulationsdaten-Managements ist die organisatorische und datentechnische Trennung zwischen Maschinenentwicklung und Anlagenplanung. Das Teilmodell Systemintegration behebt dieses Defizit. Ausgangspunkt für die Konzeption und Implementierung des Teilmodells ist die genaue Analyse der Anlagenkomponenten und aller notwendigen Daten, die strukturiert und entsprechend aufbereitet wurden (Kapitel 4).

Anhand der ermittelten Daten wurde eine Datenbasis konzipiert und realisiert, die es ermöglicht, die Simulationskomponenten parallel zur Entwicklung der realen Anlagenkomponenten aufbauen zu können. Die Datenbasis kann von Anlagenherstellern bereitgestellt und von Anlagenbetreibern angewandt werden. Dabei lassen sich die enthaltenen Simulationskomponenten auch aus externen Datenquellen parametrieren (Kapitel 5).

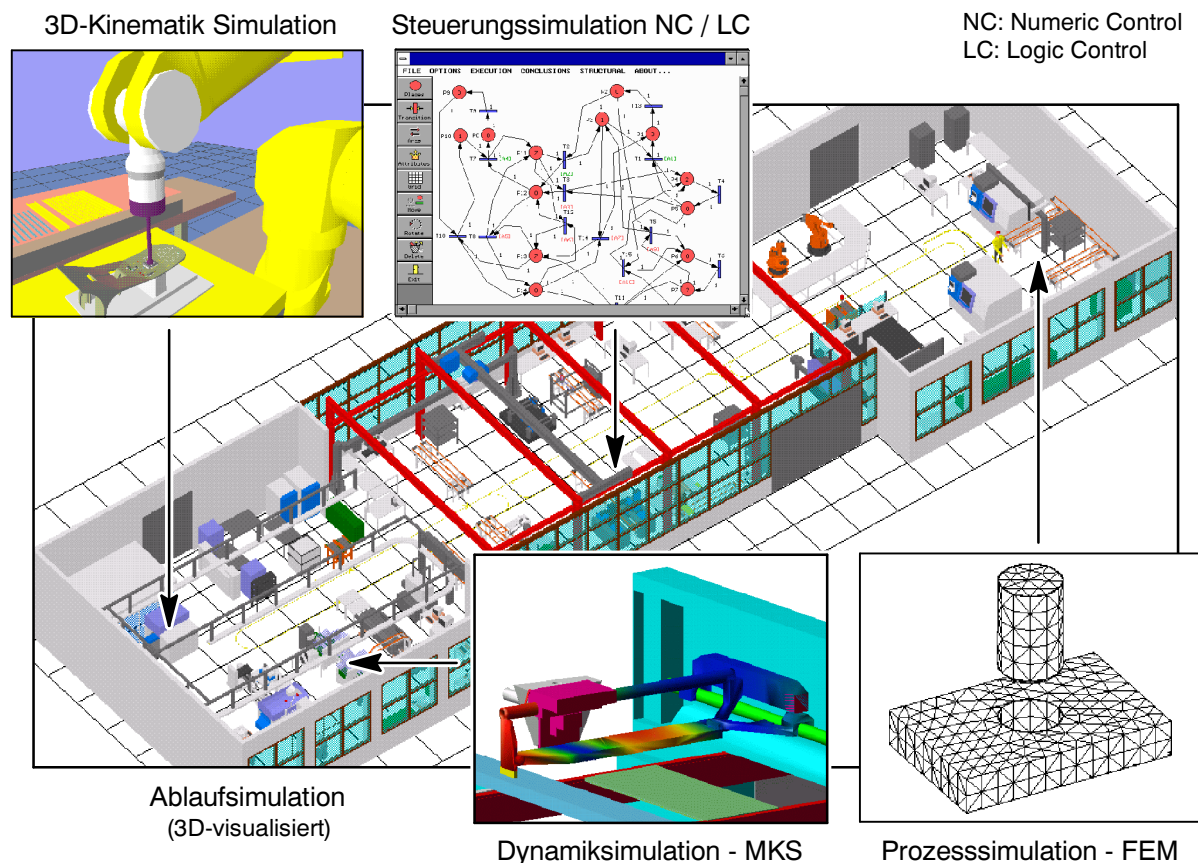
Für den weitergehenden Einsatz der Referenzmodell-Datenbank wurde diese mit einem Arbeitsplanungssystem gekoppelt, um neben den Anlagenkomponenten auch Fertigungsinformationen direkt in die Simulation übernehmen zu können. Dazu wurden im Rahmen der Arbeit relevante Teile des Arbeitsplanungssystems realisiert. Das entstandene System ermöglicht die Erstellung von Arbeitsplänen für unterschiedliche Fertigungstechnologien anhand spezifischer Wissensbasen. Es wird der Aufbau der Wissensbasis für die gewählte Technologie Elektronikproduktion erörtert sowie die Entwicklung des Arbeitsplanungssystems und die Kopplung mit der Referenzmodell-Datenbank (Kapitel 6).

Für die Anwendung der Simulationskomponenten wurden geeignete Schnittstellen definiert und implementiert. Es sind verschiedene Möglichkeiten untersucht worden, wie die Modelle an die Anforderungen der Anwender angepasst und dadurch optimal nutzbar gemacht werden können. Des Weiteren wurden Werkzeuge für die effiziente Parametrisierung und Initialisierung der Simulationsmodelle entwickelt, um den Aufwand für den Anwender möglichst gering zu halten. Dazu ist auch ein Werkzeug zur optimierten Auftragseinlastung für die Simulation realisiert worden (Kapitel 7).

Die vorgestellten Methoden und die entwickelten Systeme zum Teilmodell Systemintegration wurden schließlich anhand einer realen Simulationsaufgabe exemplarisch angewandt und in ihrem Nutzen verdeutlicht (Kapitel 8).

## 2 Einsatzfelder und Methoden der Simulation in der Produktionstechnik

Der hohe Nutzen der Simulationstechnologie hinsichtlich der schnellen Planung innovativer Produkte und der Optimierung von Produktionsanlagen ist bei Anwendern weitgehend anerkannt [105]. Die Einsatzmöglichkeiten von Simulationsverfahren beschränken sich hierbei nicht auf Einzelprobleme, sondern lassen sich auf die gesamten Produkt- bzw. Anlagenlebenszyklen übertragen. Beginnend mit der Planung bis zur Demontage zeigen sich durchgängige Simulationspotentiale [118]. Die verschiedenen Betrachtungsebenen führen zu unterschiedlichen Simulationsmodellen, deren Abstraktionsgrad und Genauigkeit auf die jeweiligen Fragestellungen abgestimmt sind [13, 44]. Die verschiedenen Modelle sind heute zumeist ebenenspezifisch. Ein direkter Austausch zwischen den Simulationsanwendungen und Betrachtungsebenen findet nur in Ausnahmefällen oder Spezialanwendungen statt.



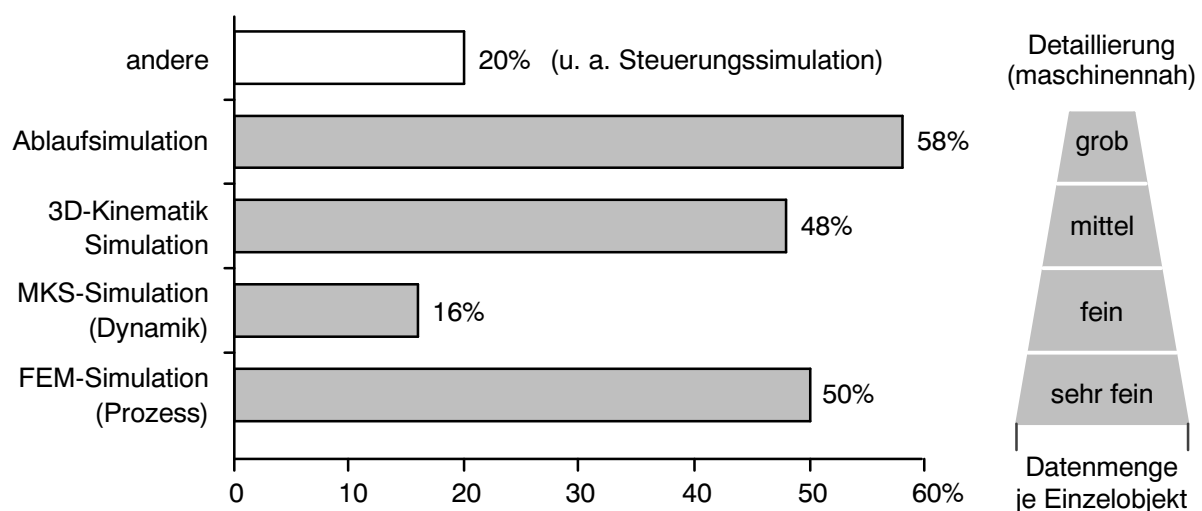
**Abb. 4** *Unterschiedliche Simulationstechniken erleichtern Planungsaufgaben in Maschinenentwicklung und Produktion*

Die wichtigsten Simulationsarten in der Produktionstechnik sind in Abb. 4 dargestellt. Produktionsanlagen werden in der Regel mit der Ablauf- oder Systemsimulation abgebildet. Reine Bewegungsstudien werden mit der 3D-Kinematik-Simulation durchgeführt. Die Steuerungssimulation bildet Maschinen- oder Zellensteuerungen ab. Für die

Simulation der Dynamik von Maschinen wird meist die Mehrkörpersimulation (MKS) eingesetzt, für die Simulation von Bearbeitungsprozessen oder Maschinenbauteilen numerische Simulationsmethoden wie die Finite Elemente Methode (FEM). Die Grundlagen dieser Simulationsverfahren werden in den folgenden Kapiteln mit ihren Anforderungen, Möglichkeiten und ihrem Nutzen näher beschrieben um ein Verständnis für die Integration der Verfahren zu schaffen. Weitere Simulationsarten, die auch in der Produktionstechnik Anwendung finden können, werden nicht näher betrachtet, da sie eigenständige Bereiche darstellen, die nicht direkt mit der Produktentwicklung und dem Aufbau von Produktionssystemen zusammenhängen. Zu diesen Technologien gehören die Simulation in der Materialforschung, die kontinuierliche Simulation chemischer und verfahrenstechnischer Prozesse, die Ergonomiesimulation oder die Simulation elektronischer Schaltungen. Auf mögliche Schnittstellen zu diesen Simulationsarten wird an entsprechender Stelle hingewiesen.

## 2.1 Einsatz von Simulation in Produktentwicklung, Anlagenplanung und -betrieb

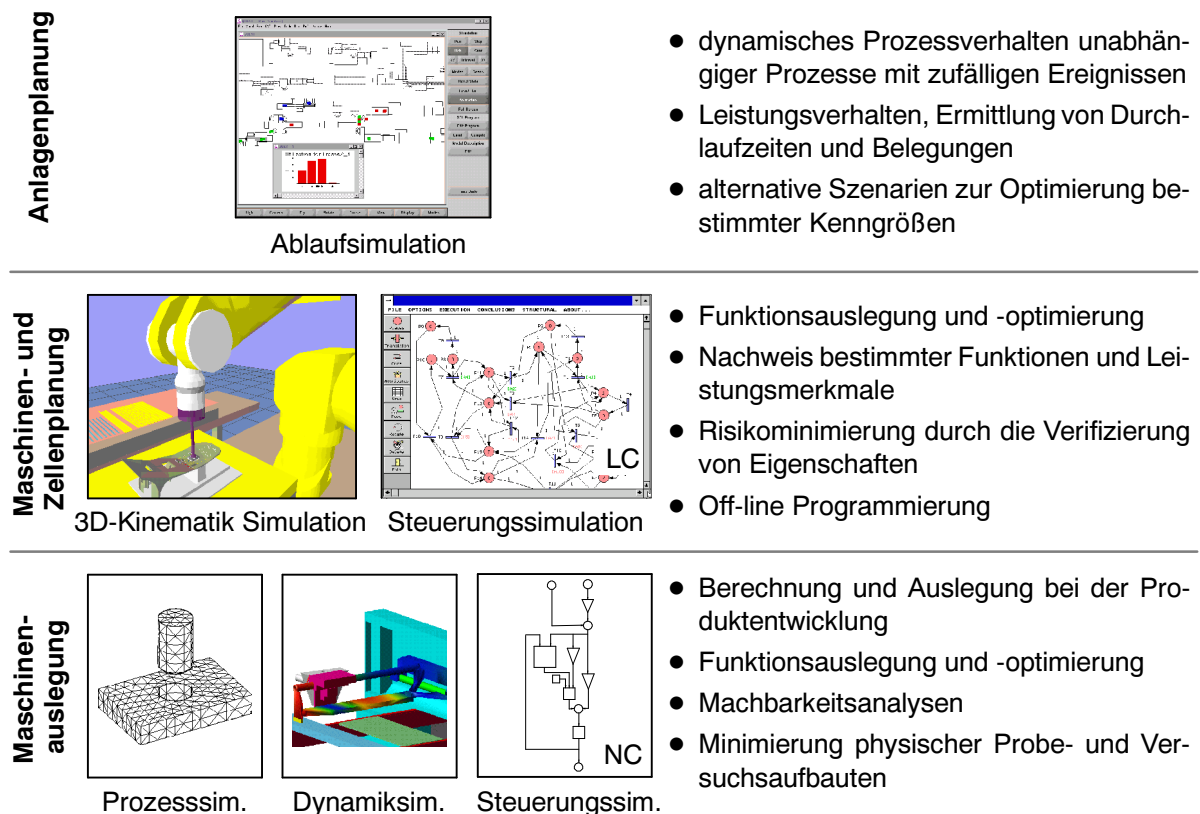
In der Studie "Simulation – Schlüsseltechnologie der Zukunft?" [105] wurde unter anderem die Verwendung unterschiedlicher Simulationstechniken in Unternehmen untersucht (Abb. 5). Dabei stellte sich heraus, dass die Ablaufsimulation die größte Bedeutung besitzt. Relativ häufig werden auch die FEM- und die 3D-Kinematik Simulation eingesetzt, in geringerem Umfang die Mehrkörpersimulation. Daneben existieren verschiedene weitere Simulationstechnologien, die in der Regel auf spezielle Anwendungen zugeschnitten sind [105]. Ein Beispiel dafür ist die Steuerungssimulation, die für die Maschinenentwicklung ebenfalls relevant ist und auf die noch eingegangen wird. Die Dominanz der Ablaufsimulation bei den Industrieanwendungen war mit der Grund für die erste Implementierung des vorgestellten Referenzmodells in diesem Bereich.



**Abb. 5** Anteil der Simulationstechnologien bei Anwendern von Simulation (nach [105])



Im Folgenden werden vor allem Aspekte der Simulation in maschinennahen Bereich betrachtet. So lassen sich die Simulationstechnologien bei ihrer Anwendung nach ihrem Detaillierungsgrad bezüglich der Maschinen- und Prozessdaten klassifizieren. Resultierend aus der Zielsetzung und dem Anwendungszeitpunkt werden für die Simulation Daten in unterschiedlichem Umfang und aus verschiedenen Quellen benötigt. Mit der FEM- und Mehrkörpersimulation wird das Verhalten von Bauteilen im Detail untersucht. Dabei wird direkt auf die 3D-CAD-Daten der Konstruktion aufgesetzt. Diese Daten werden um Materialkennwerten ergänzt und mit Randbedingungen versehen. Die Steuerungssimulation kann in dieser Betrachtungsweise ebenfalls als sehr fein angesehen werden, da sie alle Funktionen der realen Steuerung im Detail abbildet. Dies trifft sowohl für die Simulation numerischer Maschinensteuerungen (Numeric Control, NC) als auch für Ablaufsteuerungen in Fertigungszellen (Logic Control, LC) zu. Die 3D-Kinematik Simulation benötigt auch 3D-Konstruktionsdaten, jedoch werden diese oft vereinfacht wenn sie für die Bewegungsabläufe nicht relevant sind. Schließlich bildet die Ablaufsimulation Maschinen relativ grob ab. Sie stellt in ihrer zeitdiskreten Ausprägung die Dauer von Fertigungsprozessen in der Regel mit Verteilungen dar, um das zeitdynamische Verhalten von Abläufen nachzubilden. Ansätze zur Hierarchisierung in diesem Bereich werden unter dem Begriff *Hierarchische Simulation* zusammengefasst [75]. Ziel ist es jedoch alle unterschiedlichen Detaillierungsstufen nutzbringend ineinander überzuführen. Dazu wird hier über den gesamten Bereich der Produktentwicklung und Anlagenplanung ein Ansatz vorgestellt.



**Abb. 6** Anwendung unterschiedlicher Simulationsarten in Produktentwicklung und Anlagenplanung

Die unterschiedlichen Simulationsarten werden in ganz bestimmten Aufgabenfeldern der Produktionstechnik für spezielle Anwendungen eingesetzt (Abb. 6). Dabei beziehen sich die detaillierten Simulationsmethoden meist auf Bearbeitungsprozesse, Maschinen und Maschinenteile (Tabelle 1). Abstraktere Methoden zielen auf größere Bereiche oder Anlagen. Da jedoch die Maschinen und ihre Prozesse letztendlich die Funktion einer Anlage ausmachen, ist eine Überführung der Ergebnisse in angrenzende Aufgabenfelder naheliegend. Zur Strukturierung und Klassifikation dieser Ergebnisse wird in den folgenden Kapiteln näher auf die einzelnen Simulationsarten eingegangen.

**Tabelle 1** *Entwicklungsbegleitende Simulationsaktivitäten zur Funktionsbewertung von Werkzeugmaschinen bzw. Handhabungsgeräten (nach [76])*

Aufgabe	Parameter	Analyse	Modell	Merkmale
Maschinenkonzept	Topologie der Kinematik	Konzeptentwurf	Konzeptmodell	Aufbaukonzept: - Aufbautyp - Kinematik
Maschinenkonstruktion	Layout, Hauptabmessungen	Analyse des Bewegungsraums	Kinematikmodell	Arbeitsraum: - Beweglichkeit - Bewegungsraum
Leistungsoptimierung	Achsabmessungen, Antriebe, Getriebe, Material	Dynamikanalyse, Parametervariation	Dynamikmodell MKS	Arbeitszyklus: - Antriebsbelastung - Bewegungsdynamik - Taktzeit
Festigkeit und Vibrationen	Detailkonstruktion Achsquerschnitte, Material	Linearisierung, Frequenzantwort, Bauteilvibrationen	FEM-Modell	Eigenfrequenzen: - Eigenformen - Isotropie - kritische Betriebsarten
mechanische Genauigkeit	Detailkonstruktion Getriebe, Lagerkonstruktion	Bahngenauigkeit, Wiederholgenauigkeit, Dämpfung	Kontaktmodell MKS	mechanische Genauigkeit: - Bahnabweichung - Dämpfung
Steuerungsmethodik	Steuerungsaufbau	Linearisierung, Polstabilität, Bahngenauigkeit	Steuerungsmodell	Steuerung: - Stabilität - Lastverteilung - Genauigkeit

### 2.1.1 Simulation des Bauteilverhaltens mit numerischen Berechnungsmethoden

In der Berechnung und Auslegung von Maschinen oder Maschinenteilen werden die virtuellen Maschinenkomponenten am Rechner statischen und dynamischen Belastungen unterzogen. Dadurch lassen sich Informationen über das spätere Verhalten der realen Maschine gewinnen. Somit wird eine Nachrechnung, Dimensionierung und

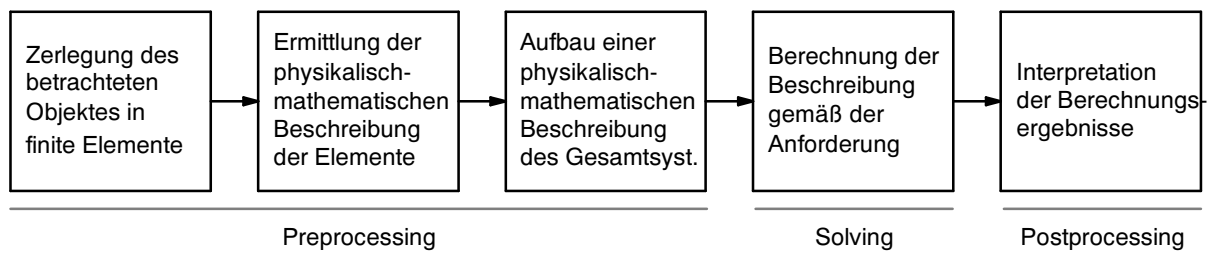
Optimierung der Bauteilgeometrien möglich. Die wichtigsten Verfahren dafür sind die Finite-Elemente-Methode (FEM) und die Mehrkörpersimulation (MKS, siehe 2.1.2).

FEM ist ein Berechnungsverfahren, kann aber auch als ein Simulationsverfahren für das Verhalten von Bauteilen unter Beanspruchung gesehen werden. Andere Verfahren mit ähnlichen Zielsetzungen sind die Randelementmethode (Boundary-Element-Method, BEM) und die Finite-Differenzen-Methode (FDM). Die FEM geht von einer Variationalformulierung aus, die BEM von einer Formulierung mittels Integralgleichungen und die FED von einer Beschreibung mit Differentialgleichungen [118]. Bei all diesen Verfahren wird die zu untersuchende Struktur eines Bauteils in leichter berechenbare Elemente zerlegt. Die Berechnung für die einzelnen Elemente erfolgt häufig durch die Annäherung der mechanischen Grundgleichungen durch Ansatzfunktionen. Diese Einzelfunktionen werden anschließend zu einem linearen Gleichungssystem kombiniert, das numerisch gelöst wird [61].



**Abb. 7** Ziele numerischer Simulationsverfahren bei der Bauteilgestaltung

Die Schritte einer FEM-Berechnung (Abb. 8), die in Softwaresystemen durchgeführt werden, lassen sich in drei wesentliche Phasen einteilen: Preprocessing, Solving, Postprocessing. Das Preprocessing umfasst die vorbereitenden Tätigkeiten, wozu im wesentlichen die geometrische und physikalische Beschreibung der Elemente und die Netzgenerierung gehören. Die Lösungsmethode der elementbeschreibenden Differentialgleichungen ist im FEM-System implementiert, wodurch sich die Aufgabe des Benutzers auf die Auswahl eines geeigneten Elementtyps beschränkt. Im Lösungsprozess (Solving) werden die von der Untersuchungsart abhängigen Gleichungssysteme gelöst. Dazu werden, je nach Problemstellung, angemessene Lösungsalgorithmen bereitgestellt, die eine effiziente Lösung erlauben, wobei hohe Genauigkeit und hohe Geschwindigkeit konkurrierende Ziele darstellen. Im Postprocessing wird die grafische Darstellung der Berechnungsergebnisse ermöglicht. Für die Interpretation der Ergebnisse erfolgt so eine Visualisierung, auch die Plausibilitätskontrolle der Berechnung [118].



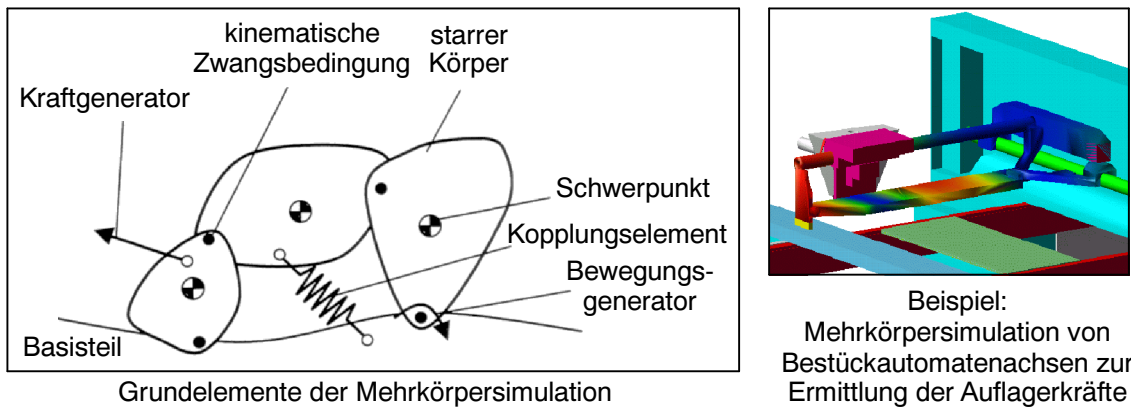
**Abb. 8** Ablauf einer Berechnung mit FEM (nach [118])

Im Maschinenbau wird die FEM vor allem für die konstruktionsbegleitende Auslegung von Maschinenkomponenten und -bauteilen sowie von gesamten Werkzeugmaschinen genutzt [7]. Auf Bauteilseite werden statische Analysen (Spannungen, Verformungen, Reaktionen, etc.), Modalanalysen, thermische Studien und auch Optimierungen durchgeführt. Der Einsatz numerischer Optimierungsverfahren im Konstruktionsprozess steht jedoch noch am Beginn der Entwicklungen [110].

Die Konfiguration einer Maschine lässt sich durch die Analyse des Schwingungsverhaltens und der Kräfteverteilung optimieren. Schwingungen in einer Maschinenstruktur verursachen oftmals Abweichungen an der Werkstückkontur. Die Modalanalyse mit FEM zeigt die Eigenfrequenzen und die Eigenformen einer Maschine, auch bei komplexen Strukturen. Daneben lassen sich die relevanten Dämpfungsfaktoren bestimmen.

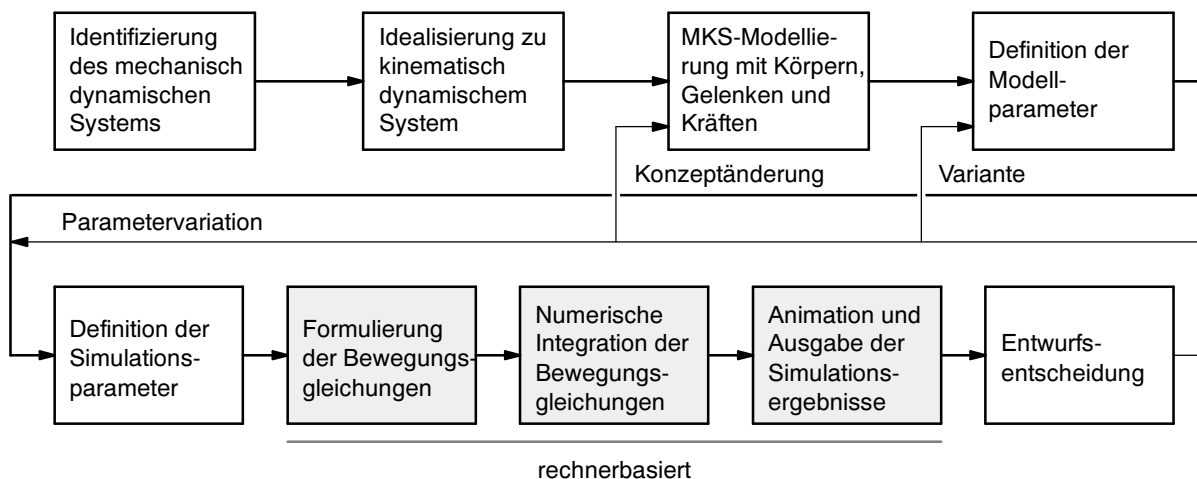
### 2.1.2 Mehrkörpersimulation zur Ermittlung dynamischer Maschineneinflüsse

Mit der Mehrkörpersimulation lassen sich mechanische Systeme realitätsnah analysieren. Dieser Modellierung liegt eine Idealisierung der mechanischen Systeme zugrunde, die mit starren Körpern, kinematischen Zwangsbedingungen und konstruktiven Kopplungselementen beschrieben werden. Jedes Teil des realen Systems wird durch einen starren Körper mit sechs Freiheitsgraden idealisiert, der eine Masse, einen Schwerpunkt und einen Trägheitstensor besitzt [132]. Alle Teile in einem Mehrkörpersystem beziehen sich in ihrer Ausgangslage auf Basiskoordinaten. Eine kinematische Zwangsbedingung ist eine ideal masselose, nichtelastische Bewegungseinschränkung, mit der die kinematische Verknüpfung von Teilen (z. B. ein Gelenk) beschrieben wird. Dafür gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die z. B. freie Rotation, Translation oder eine Schraubbewegung bewirken. Einer solchen Zwangsbedingung kann auch ein Bewegungsgenerator hinterlegt sein, der ein zeitabhängiges Bewegungsverhalten in das System einleitet. Ein konstruktives Kopplungselement ist ein masseloses Element, das eine Kraft zwischen zwei definierten Punkten zweier Körper überträgt. Jede Art von externer physikalischer Kraft auf die Körper kann über Kraftvektoren definiert werden, die über beliebige Funktionen von Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung oder anderer relevanter Modelleigenschaften definiert werden können [76]. Abb. 9 zeigt die Grundelemente der Mehrkörpersimulation.



**Abb. 9** Mehrkörpersimulation zur Untersuchung der Dynamik mechanischer Systeme (nach [76])

Die Analyse eines Mehrkörpersystems erfolgt nach einem systematischen Verfahren, mit dem die Bewegungsgleichungen zur Beschreibung des Systems automatisch rechnerbasiert formuliert werden. Die Methode zur Ableitung der Bewegungsgleichungen ist davon abhängig, wie die Koordinaten des mechanischen Systems dargestellt sind. Bei absoluten Koordinaten erhält man Gleichungen für die Koordinaten und Eulerwinkel aller Körper, bei relativen Koordinaten nur so viele Gleichungen wie freie Gelenkkordinaten existieren. In beiden Ansätzen werden die Bewegungsgleichungen mit numerischer Integration gelöst, nachdem die Ausgangszustände definiert wurden [76]. Der Ablauf, wie eine Mehrkörpermodellierung und -simulation inklusive der rechnerbasierten Aufgaben erfolgen kann, ist in Abb. 10 dargestellt.



**Abb. 10** Ablauf der Mehrkörpermodellierung und -simulation (nach [76])

Ein MKS-System stellt somit ein geeignetes Rechnerwerkzeug für die Beurteilung des dynamischen Bewegungsverhaltens eines Maschinenentwurfs dar. Die Mehrkörpersimulation erfasst neben der Abbildung der kinematischen Strukturen auch die aus Massenwirkungen, physikalischen Effekten und der Antriebscharakteristik resultierenden dynamischen Eigenschaften des Modells. Insbesondere kann sie zur Bestimmung des Zeitverlaufs sämtlicher kinematischer Bewegungsgrößen, wie Lagen, Geschwindig-

keiten und Beschleunigungen, sowie zur Berechnung auftretender Kräfte und Momente [103]. Das Mehrkörpersystem der Maschine muss dazu alle wesentlichen dynamischen Eigenschaften widerspiegeln. Dazu gehören das verzögerte Ansprech- und Überschwingverhalten aufgrund von Trägheiten und Elastizitäten ebenso wie die Eigendynamik der Antriebe und Sensoren [11].

Ein relativ neues Forschungsgebiet in der MKS ist die Modellierung von Lagertoleranzen und Kontaktproblemen. Dadurch lassen sich Voraussagen über das Spiel von Lagern und Getrieben sowie deren Elastizität treffen. Die in realen Lagern zwangsläufig auftretende Nachgiebigkeit und Gelenkreibung führt im Betrieb zu Kontaktverlusten und dadurch zu Geräuschentwicklung und Verschleiß. Zur Modellierung dieser Effekte werden in der MKS die nichtelastischen Bewegungseinschränkungen durch Kraftbeziehungen ersetzt. Details zu dieser Thematik finden sich in [76].

Wie FE-Modelle werden auch die Mehrkörpermodelle aus 3D-CAD Daten aufgebaut. Die beteiligten Maschinenkomponenten werden zunächst als starre Massenkörper aus dem 3D-CAD übernommen. Für weitergehende Untersuchungen kann eine Überlagerung der starren Körper mit flexiblen Körpern (FEM-Netz) vorgenommen werden, um auch die Verformungen der Bauteile selbst zu berücksichtigen (durch modale Synthese). Durch die Verknüpfung der kinematischen und dynamischen Simulation sowie der Berechnung der Verformungen der Maschine ist eine detaillierte Beurteilung der Konstruktion möglich [130].

### **2.1.3 3D-Kinematik Simulation / Digital Mock-up**

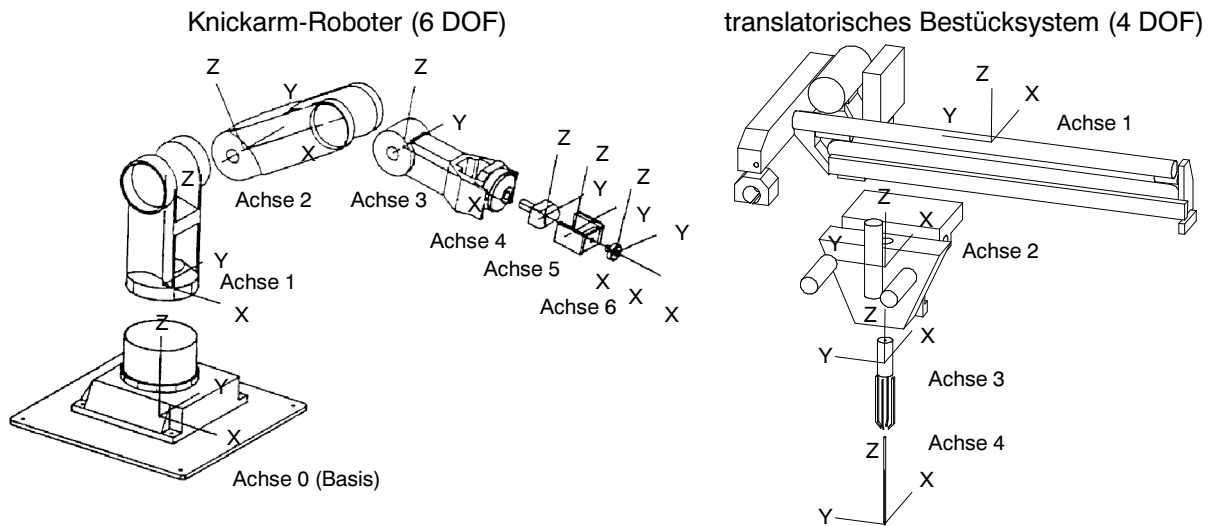
Für die Planung und Überprüfung des Zusammenbaus, der Kinematik und der Installation werden 3D-Kinematik-Simulationssysteme eingesetzt. Wenn Systeme speziell auf den Zusammenbau von virtuellen Produkten ausgelegt sind, spricht man von Digital Mock-up Technologie.

#### **3D-Kinematik Simulation**

Die 3D-Kinematik-Simulation oder auch graphische 3D-Simulation ermöglicht die Simulation komplexer Bewegungen von Körpern und kinematischen Ketten. Im Simulationssystem wird aus den Geometrien der Bauteile und den Informationen über die Baugruppenstruktur ein Modell der Maschine aufgebaut, in dem dann die entsprechenden Kinematiken definiert werden (Abb. 11). Durch die Definition von inversen Kinematiken ist eine Simulation von NC-Achsen oder Industrierobotern über die Bewegung des Werkzeug-Referenzpunktes (Tool-Center-Point, TCP) möglich. Dabei werden über eine Rücktransformation alle Achswinkel und -verschiebungen bei Vorgabe der Raumlage der TCP-Achse berechnet.

Zunächst dient die Simulation der Visualisierung kinematischer Abläufe. Man hat die Möglichkeit alle Bewegungsfunktionen einer Maschine oder eines andere Produkts in ihrem Zusammenspiel zu testen. Daneben sind Kollisionsüberprüfungen und Ab-

standsuntersuchungen möglich, ebenfalls erste Taktzeitberechnungen, da in die Simulation Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte der Teile und Achsen eingegeben werden können. Im Gegensatz zur MKS werden hier jedoch keine dynamischen Faktoren berücksichtigt.



**Abb. 11** Achssysteme zum Aufbau kinematischer Modelle rotatorischer und translatorischer Handhabungsgeräte

## Digital Mock-up

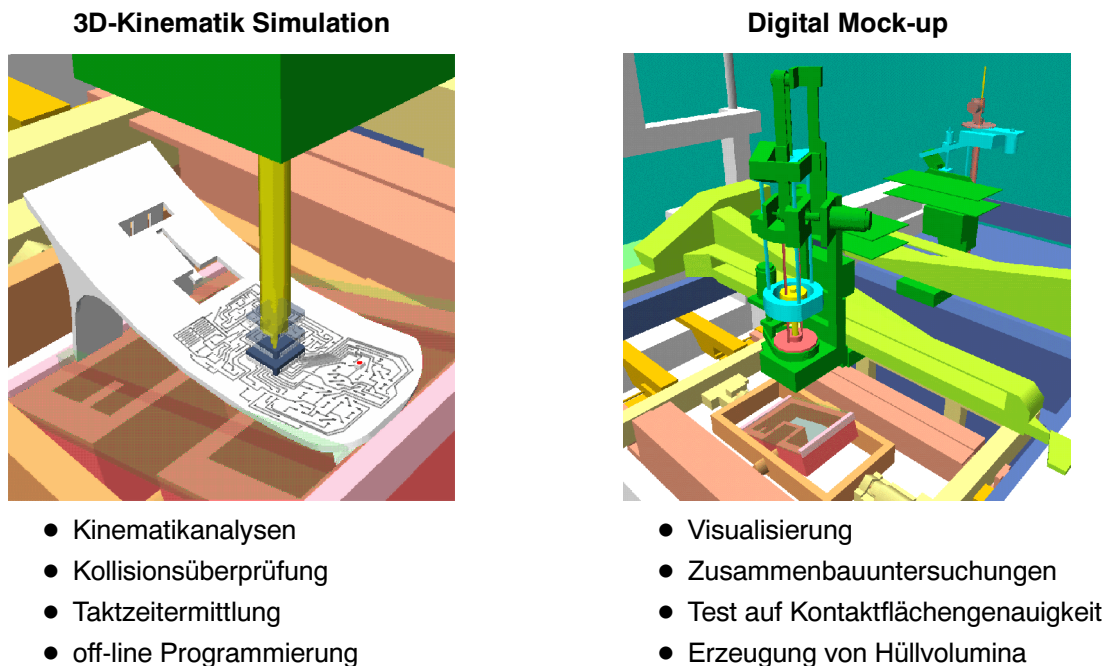
Ein Faktor bei der Reduzierung von Produktentwicklungszeiten und -kosten ist der Einsatz von Produktsimulationen auf der Basis digitaler Produktmodelle. Dadurch lassen sich zeit- und kostenaufwendige physikalische Versuchsmodelle, sogenannte Mock-ups, ersetzen [81]. Ein solches digitales Mock-up wird in [66] definiert:

Ein *Digital Mock-up* (DMU) ist ein rechnerbasiertes Modell für räumliche und funktionale Untersuchungen der Struktur eines Produktmodells, seiner Montage und seiner jeweiligen Teile.

Das primäre Ziel eines DMUs ist es, die Montierbarkeit eines Produktes in jeder seiner Entwicklungsphasen sicherzustellen und dabei gleichzeitig physikalische Prototypen einzusparen [66]. Somit ist ein DMU ein digitales Versuchsmodell. Dieses bildet ein Produkt vollständig dreidimensional im Rechner ab. Es soll die aktuelle, konsistente Verfügbarkeit unterschiedlicher Sichtweisen auf Produktgestalt und -funktion sowie auf Fertigungsprozesse und technologische Zusammenhänge unterstützen [23]. Damit gelingt es, die Prozesssicherheit bereits in frühen Konstruktionsphasen erheblich zu erhöhen. Bei einer Vielzahl von hochkomplexen und oft beweglichen Bauteilen können typische Passformprobleme früh und sicher entdeckt werden. Alle am Entwicklungsprozess Beteiligten können mit Hilfe digitaler Zusammenbau- und Installationsuntersuchungen sicherstellen, dass ihre aktuellen Entwicklungen nicht mit benachbarten Bauteilen und Bauteilgruppen kollidieren, exakte Kontaktflächengenauigkeit aufweisen und definierte Mindestabstände einhalten [64]. DMU beschränkt sich nicht nur

auf die Konstruktion, sondern kann vielmehr auch in den Bereichen Planung, Fertigung sowie Wartung und Service eingesetzt werden [23].

In [66] wird eine Methode beschrieben wie die Ergebnisse aus FEM-Berechnungen in einem DMU System verwendet werden können. Ziel dabei ist es, bei Montage- oder Demontagevorgänge die Verformungen von Teilen mit zu berücksichtigen, die durch äußere Kräfte oder thermische Belastung entstehen und die Kollisions- oder Toleranzprobleme hervorrufen können.



**Abb. 12** 3D-Kinematik Simulation und Digital Mock-up mit dem Basiswerkzeug Graphische 3D-Simulation

### 2.1.4 Steuerungssimulation

In der Steuerungstechnik lassen sich zwei unterschiedliche Steuerungstypen unterscheiden: regelkreisbasierte Antriebssteuerungen (NC/CNC) und Ablaufsteuerungen diskreter Ereignisse (LC). Beispiele für NC-Steuerungen sind Werkzeugmaschinen- oder Robotersteuerungen (RC), typisches Beispiel für Ablaufsteuerungen sind speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). Die Hauptanwendungen der beiden Steuerungsarten teilen sich zwischen der Maschinen- und Zellenebene auf. Auf Maschinenebene findet heute jedoch immer stärker eine Verlagerung von Funktionalitäten aus der CNC-Steuerung in die SPS statt. Beispielsweise werden ursprüngliche Funktionen der CNC-Steuerung einer Werkzeugmaschinen von einer SPS übernommen und damit auch dem Bediener besser zugänglich [54].



## **Antriebssteuerung - Regelungstechnische Systeme**

Überall dort, wo Antriebssysteme betriebsbedingt besonderen Anforderungen unterliegen, setzt sich der Konstrukteur mit der Anwendung erfahrungsgestützter Auslegungsregeln dem Risiko aus, dass eben diese Regeln nicht zu den gewünschten Ergebnissen führen. Solche besonderen Anforderungen liegen z. B. vor, wenn es um präzise Positionierung bei hohen Geschwindigkeiten oder um dynamische Beanspruchungsspitzen bei ungleichförmigen Last- oder Antriebsfunktionen geht und in den Systemen Nichtlinearitäten wirken, gleichgültig, ob regelungstechnischer oder mechanischer, struktureller oder parametrischer Art. Unter diesen Gesichtspunkten erweist sich die Simulation solcher Systeme als effizientes Verfahren zur realitätsnahen Analyse und damit sowohl zur sicheren als auch kostenoptimalen Auslegung von Antriebssystemen [42].

Bei der Simulation von Antriebssystemen werden das Zusammenwirken und die Wechselwirkungen der mechanischen und elektrischen bzw. elektronischen Systemteile untersucht und optimiert. Die dabei verwendeten Modelle basieren auf physikalischen Gesetzen der Mechanik und Elektrotechnik, die allgemein zu Differentialgleichungen führen. Mit Blocksimulatoren können beliebig komplizierte nichtlineare und zeitvariante Differentialgleichungen durch Simulation gelöst werden [50].

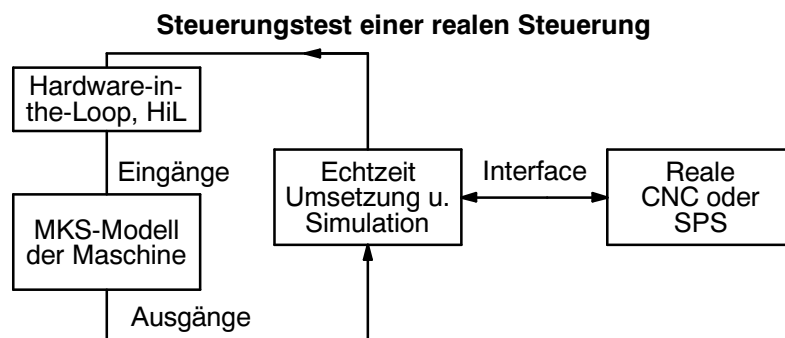
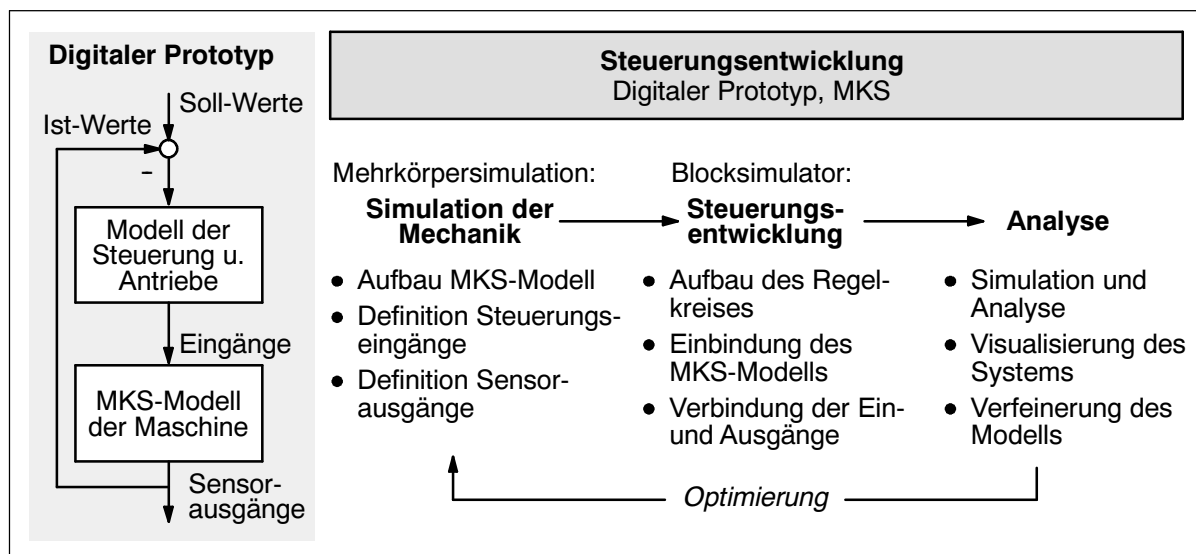
Für den Aufbau eines digitalen Prototyps ist die Integration der Bewegungssimulation und des Steuerungssystems erforderlich, da die Steuerung das Verhalten des mechanischen Systems entscheidend beeinflusst. Somit wird hier für die Simulation ein Ansatz verfolgt, bei dem die Maschinensteuerung in einem Blocksimulator und das Verhalten der Maschinendynamik in einem MKS-System abgebildet wird. So entsteht der digitale Prototyp einer Maschine, der im Gegensatz zum reinen 3D-Kinematik-Modell alle dynamischen Eigenschaften des Systems und seiner Steuerung beinhaltet.

Die Bewegungssimulation ist zunächst geometriebasiert, Steuerungen lassen sich am besten mathematisch mit Regelkreisen beschreiben. Somit gliedert sich die Modellbildung in zwei Abschnitte: die Modellierung der Maschine in einem MKS-System sowie die Erstellung eines Regelkreises zur Abbildung der Steuerung und der Antriebe in einem Blocksimulator (Abb. 13). So wird die Simulation des Verhaltens der Maschine unter Berücksichtigung der Steuerungs- und Antriebsdynamik möglich. Das MKS-System mit allen wesentlichen dynamischen Eigenschaften übernimmt hierbei die Beschreibung des Systems "Maschine" und liefert Ergebnisse (z. B. Ist-Positionen oder Drehzahlen) zurück an den Regelkreis [130].

Oft wird das reale mechanische System einer Maschine für die Entwicklung und den Test der Steuerung benötigt. Dieses liegt jedoch erst sehr spät im Produktentwicklungszyklus vor. Im Sinne des Concurrent Engineering kann die Steuerung für eine Maschine jedoch bereits anhand eines virtuellen Prototyps entwickelt und getestet werden. Damit lassen sich auch Sicherheitsrisiken vermeiden, da man mit der virtuellen Maschine gefahrlos umgehen kann. Zusätzlich können mit der Hardware-in-the-Loop

Technologie (HiL) reale Maschinenkomponenten, die bereits fertiggestellt sind, in die virtuelle Maschine integriert werden, um exaktere Ergebnisse zu erzielen [12]. (siehe Abb. 13)

Beim Einsatz einer virtuellen Maschine in Verbindung mit einer realen Steuerung sind im Modell zusätzlich zu SPS-Funktionen (z. B. Verschalten von Eingängen, Ausgängen, Merkern) CNC-typische Funktionen (z. B. Geschwindigkeitsführung, Interpolation, Transformation, Lageregelung) mit ihren verschiedenen Überwachungs- und Kompensationsmöglichkeiten von Bedeutung. Weiterhin ist eine Echtzeit-Rückkopplung seitens des Simulators zwingend erforderlich, die das reale Maschinenverhalten ausreichend nachbildet und die Sensor-/Aktor Schnittstelle der CNC bedient [11].



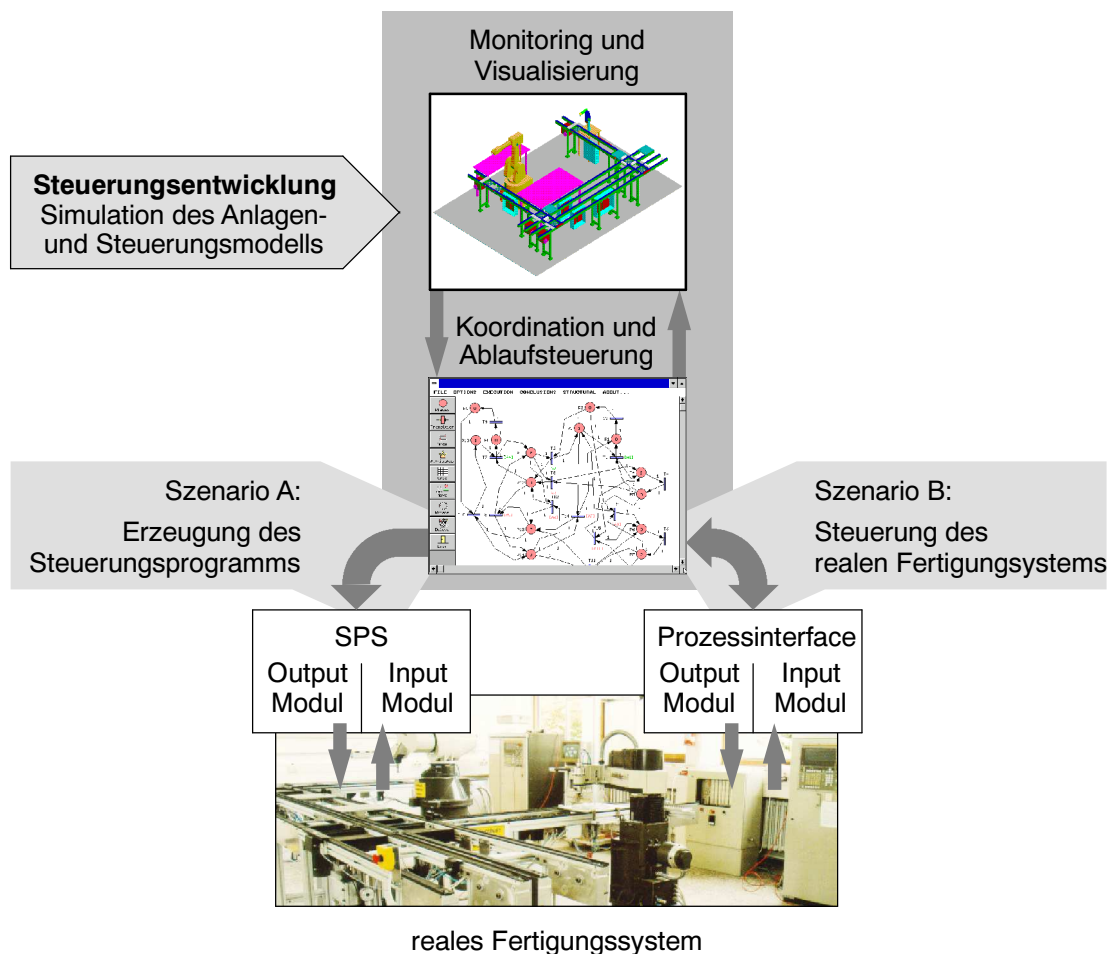
**Abb. 13** Aufbau eines digitalen Prototyps durch Integration von Bewegungssimulation und Steuerungsmodell

### Ablaufsteuerung diskreter Ereignisse

Die komplexen Anforderungen beim Betrieb von Maschinen und Fertigungssystemen bezüglich Automatisierung, Rechnerführung und Flexibilität lassen sich nur durch den Einsatz von programmierbaren Ablaufsteuerungen erfüllen. Solche speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) übernehmen neben ihren Hauptaufgaben aus der Schaltungstechnik auch die Lösung zusätzlicher, erweiterter Aufgaben, wie z. B. Zähl-

len, Rechnen und Vergleichen oder die Verarbeitung analoger Signale, wie dies v. a. in der Verfahrenstechnik benötigt wird. SPS werden in einer Programmiersprache programmiert, die nach DIN 19239 und IEC-Standard 1131, Part 3: Programming Language genormt ist. Die Programmausgabe ist jedoch meist SPS-spezifisch und nicht direkt austauschbar [54]. Die Programmierung erfolgt mit herstellerspezifischer SPS-Programmiersoftware, standardmäßig auf PC-Basis. Die erstellten Programme werden in die SPS eingespielt.

Aufgrund der manuellen Erstellung von Steuerungssoftware, getrennt von Design und Implementierung des zu steuernden Fertigungssystems, nimmt der gesamte Prozess viel Zeit in Anspruch, führt leicht zu Missverständnissen und Fehlern und ist somit kostenintensiv [18]. Die angesprochene Komplexität flexibler Fertigungssysteme legt daher nahe, die System- und die Steuerungsentwicklung im Sinne des Simultaneous Engineering zu überlagern (vgl. [18, 125]). Der entscheidende Vorteil neben der Entwicklungszeitverkürzung ist die Reduzierung von Fehlerkosten, da durch die frühzeitige Einbeziehung der Steuerungsentwicklung in der Entwurfsphase viele Fehler nicht auftreten, die in einer späteren Phase hohe Behebungskosten verursachen würden.



**Abb. 14** Modellierung und Simulation von Anlage und Steuerung für Entwicklung und Test von Steuerungssoftware (nach [18])

Für den Entwurf einer Anlage und der zugehörigen Steuerung wird anhand der Systemspezifikation aus den benötigten Komponenten ein Modell des flexiblen Produktionssystems aufgebaut. Dies dient zur Layoutplanung und in der Simulation für Visualisierung und Monitoring. Die Ablaufsteuerung wird in einem Koordinationsmodell der Komponenten abgebildet, das deren Kooperations- und Konkurrenzverhalten enthält. Das Koordinationsmodell bildet zusammen mit der Visualisierungskomponente das Simulationsmodell des Fertigungssystems (Abb. 14). Für die Abstimmung mit der realen Systemsteuerung wird schließlich die Sensor/Aktor-Schnittstelle definiert.

Zur abschließenden Validierung der modellierten Komponenten und der Steuerungsstruktur anhand der Spezifikation des Systems eignen sich formale Analyse-Methoden wie sie in [18] beschrieben werden. Dabei lassen sich qualitative (z. B. Strukturanalyse) und quantitative Verfahren (z. B. Simulation zur Leistungsbewertung) unterscheiden. Aus dem Modell kann letztendlich durch Ableitung von Steuerungssignalen automatisch die vollständige und fehlerfreie Steuerungslogik generiert werden, die in ein Steuerungsprogramm für eine SPS übersetzt werden kann oder mit der das Fertigungssystem über ein Prozessinterface direkt gesteuert wird.

### **2.1.5 Ablaufsimulation der Fertigung**

Die Ablauf- oder Systemsimulation kann mit einem hohen Grad an Abstraktion betrieben werden, was sich in einer Reduktion von Ereignissen und Zuständen ausdrückt [34]. Somit besitzt diese Art der Simulation ein sehr breites Anwendungsgebiet bei Planung, Realisierung und Betrieb von technischen Systemen [59]. Der Einsatzschwerpunkt lag ursprünglich auf der Planungsabsicherung. Zunehmend wird die Ablaufsimulation durchgängig in allen Phasen des Planungs- und Realisierungsprozesses genutzt und findet ihre Anwendung auch in der Ablaufsteuerung während des Betriebs [93]. Dabei überschneidet sich die Anwendung mit der in 2.1.4 beschriebenen Steuerungssimulation, wobei die Ablaufsimulation vor allem Aufgaben der PPS übernehmen kann, die Steuerungssimulation (NC und LC) mehr Echtzeit-Steuerungsaufgaben.

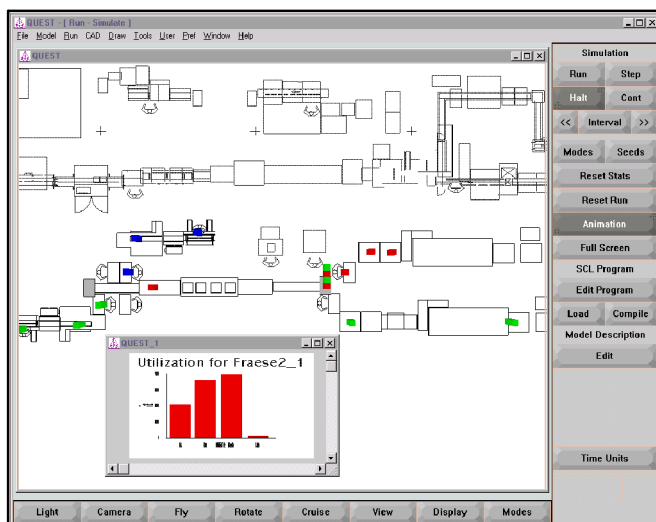
Die Ablaufsimulation ist vor allem für Problemstellungen prädestiniert, die wegen ihrer Komplexität und wegen des Fehlens analytischer mathematischer Modelle nicht mit anderen Mitteln gelöst werden können. Mit der Ablaufsimulation lassen sich eine Vielzahl von Einflüssen, Abhängigkeiten und nebenläufiger Prozesse abbilden, wobei große Datenmengen verarbeitet werden können [93]. Der Ablauf unabhängiger Prozesse unter dem Einfluss zufälliger Ereignisse wird als zeitdynamisches Prozessverhalten bezeichnet. Mit der Ablaufsimulation lassen sich alternative Fertigungsszenarien und das Leistungsverhalten von Produktionssystemen untersuchen, die durch zeitdynamische Prozesse geprägt sind (Abb. 15).

Heute wird für die Durchführung von Ablaufsimulation zumeist spezielle Simulationssoftware eingesetzt, mit der Modelle auf Basis parametrierbarer Modellelemente graphisch-interaktiv erstellt und geändert werden können. Es handelt sich bei den Model-

lementen im Allgemeinen um spezialisierte und komplexe Elemente, die realen Systemelementen entsprechen [93]. Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz zeigt Möglichkeiten auf die Modellelemente schon während der Entwicklung der realen Systemelemente zu erzeugen, um sie dann direkt für die Planung von Anlagen einsetzen zu können.

Der Aufbau eines Simulationsmodells für die Ablaufsimulation beginnt mit der Vorbereitung, bei der nach der Zieldefinition die Datenakquisition folgt. Dabei werden für das System relevante technische Daten, Organisationsdaten und Systemlastdaten gesammelt (siehe Tabelle 2). Der letzte Schritt der Vorbereitung ist die Erstellung des Simulationsmodells. Dabei wird zunächst von einem gedanklichen Modell ausgegangen, das in formale, vordefinierte Strukturen der Modellwelt umgesetzt wird, was je nach Simulator mittels der von der Benutzungsoberfläche vorgegebenen Funktionalität erfolgen kann. Ein Simulationsmodell kann z. B. aufgebaut werden, indem Modellelemente ausgewählt, positioniert, verbunden und parametrisiert werden. Ebenso können Simulationssprachen zur Beschreibung genutzt werden. Sie werden u. a. besonders für solche Modelle oder Modellteile genutzt, die sich graphisch schwer oder nicht eindeutig beschreiben lassen [93].

Mit dem Simulationsmodell werden im Simulator Experimente durchgeführt, um spezielle Systemgrößen zu bestimmen. Ein wichtiger Punkt besteht zunächst darin, das Modell anhand der Simulationsergebnisse zu verifizieren bzw. zu validieren. Durch die systematische Variation von Parametern und/oder der Struktur des korrekten Modells lassen sich unterschiedliche Szenarien hinsichtlich ihres Leistungsverhaltens vergleichen. Wenn die erzielten Ergebnisse die gestellten Ziele erfüllen und keine neuen Fragestellungen auftreten, können sie in der Realität umgesetzt werden.



**Ablaufsimulation**

### Zeitdynamisches Prozessverhalten

- Ablauf unabhängiger Prozesse
- Auswirkungen gemeinsamer Ressourcennutzung
- Auswirkungen zufälliger Ereignisse

### Alternative Szenarien

- Ressourcenzuteilung
- Auslastung
- Prioritäten

### Leistungsverhalten

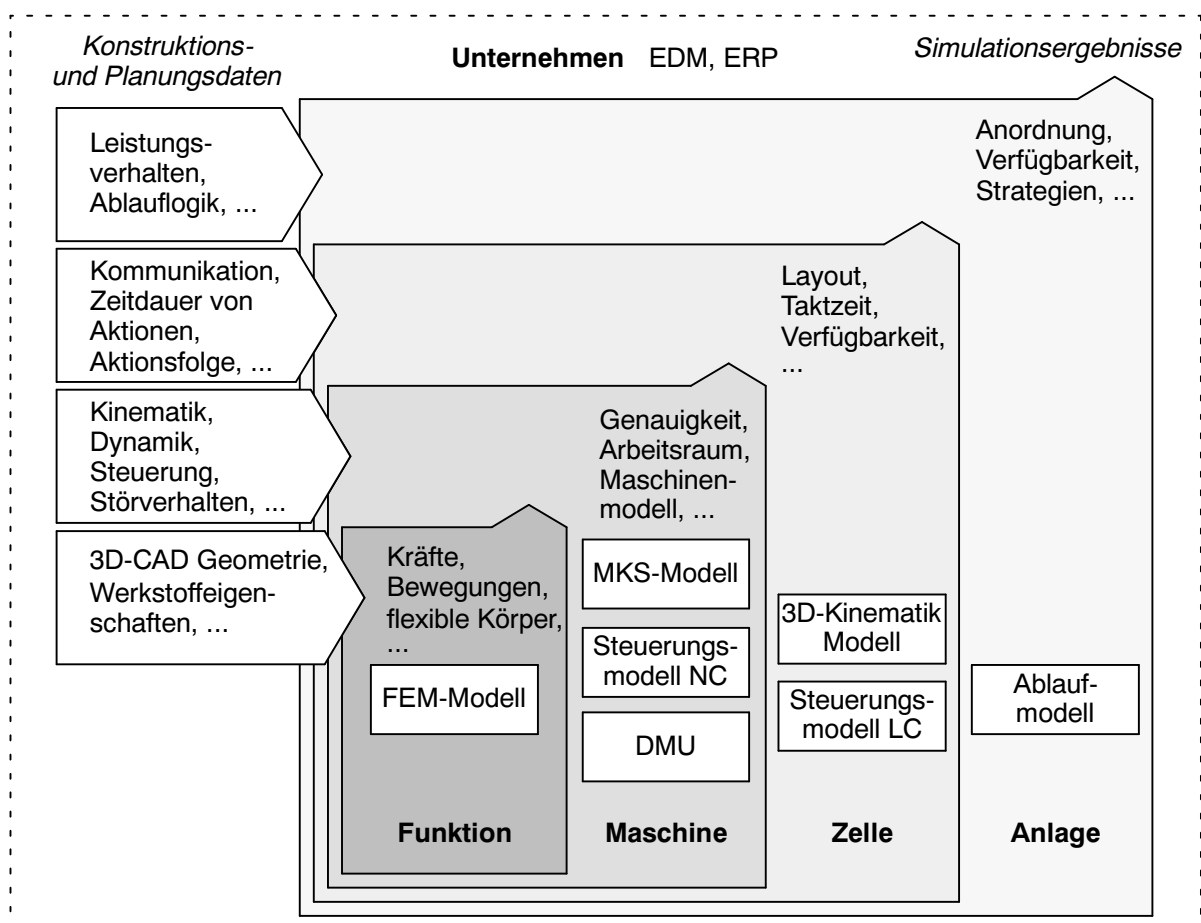
- Ressourcenanforderungen
- Durchlaufzeiten
- Belegung

**Abb. 15** Untersuchungsschwerpunkte der Ablaufsimulation (nach [102])

## 2.2 Simulationsdaten in den Planungsbereichen

In [93] wird die Vorgehensweise bei der Simulation in drei Phasen gegliedert: die Vorbereitung, die Durchführung und die Auswertung. In die Vorbereitung fällt der Aufbau der Datenbasis, was sich an der Zielsetzung – Produktentwicklung oder Anlagenplanung – orientiert.

Die Qualität und die hinreichende Vollständigkeit der zugrundeliegenden Daten sind maßgeblich für den Erfolg von Planungs- und Simulationaufgaben. Auf den unterschiedlichen Planungsebenen werden Daten benötigt, die zum einen für diese Ebene neu generiert werden müssen, was die planerischen Randbedingungen dieser Ebene ausmacht, oder die zum anderen aus einer tieferliegenden Ebene übernommen werden (Abb. 16). Die Planungsergebnisse aus den darunterliegenden Ebenen sind im hier vorgestellten simulationsbasierten Ansatz Simulationsergebnisse. Herkömmliche Planungs- und Berechnungsmethoden behalten auch weiterhin ihre Anwendungsfelder, die dort erzielten Ergebnisse lassen sich jedoch durch Simulation verifizieren und somit in ein simulationsbasiertes Gesamtszenario integrieren.



**Abb. 16** Bottom-up Ansatz einer simulationsbasierten Konstruktion und Planung in der Produktionstechnik (vgl. [76, 123])

### 2.2.1 CAD-basierte Simulationsdaten in der Produktentwicklung

Die Basisdaten für Simulationen während der Produktentwicklung werden in 3D-CAD-Systemen erzeugt. Das 3D-CAD erlaubt die vollständige und eindeutige rechnerinterne Repräsentation der geometrischen Form physikalischer Objekte, so dass diese in ihrer gesamten Komplexität realitätsnah darstellbar sind. Sie bilden somit die Grundlage für den Aufbau virtueller Maschinen und ermöglichen die Unterstützung des gesamten Prozesses der Produktentstehung [23].

Als Format für die Datenspeicherung bietet sich STEP an. Damit ist ein Referenzmodell für Produktdatenmodelle beschrieben, das in seiner ersten veröffentlichten Version ca. 2500 Seiten umfasst. Es dient vor allem der Standardisierung des Datenaustauschs, die globale Zielsetzung liegt jedoch in der möglichst vollständigen Übertragbarkeit der Produktdaten. Neben dem reinen Geometrietransfer sollen auch Topologien, Form-Features, Toleranzen, Materialdaten, Daten über Oberflächenbeschaffenheit und auch Daten aus späteren Lebenszyklen (z. B. Wartung) eines Produktes übertragen werden [118]. Viele Teile von STEP, die nicht alleine Konstruktionsdaten betreffen sind jedoch noch in Entwicklung. Eine breite Nutzung wird erst in den nächsten Jahren möglich werden.

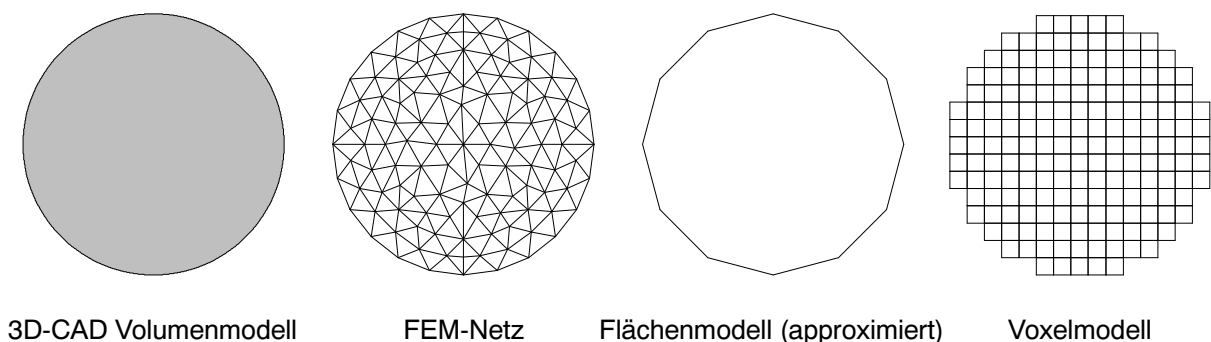
Für die bestmögliche Anwendung von 3D-CAD im Produktentstehungszyklus bieten sich parametrische Modellierer an. Mit dem parametrischen Entwurf kann der Konstrukteur die Flexibilität seiner Entwürfe erheblich steigern. Mit Hilfe der Parametrik lassen sich dynamisch assoziative Verbindungen zwischen produktbeschreibenden Daten (Geometrie, Bemaßung) und fertigungsplanerischen /-technischen Aspekten abbilden [23]. Eine vielversprechende Entwicklung ist die Integration parametrischer Daten in STEP. Damit wird die Übertragung von parametrischen Bezügen zwischen Geometrieinformationen möglich. Mit dieser Spezifizierung wird es zukünftig möglich sein, Änderungen in einem Berechnungsprogramm (z. B. FEM) direkt durch die Änderung der Parametrisierung an das CAD-System zurückzugeben. Weiterhin ist auch eine FEM- und Mechatronik-Schnittstellenspezifikation in der Planung [118].

Elektronik-CAD (E-CAD) wird bei der Entwicklung von elektronischen Schaltungen (Schaltplanentwurf), beim Leiterplattenentwurf und auch bei der Elektrokonstruktion eingesetzt. Für virtuelle Maschinen sind zum einen die Wechselwirkungen zwischen Leiterplatten bzw. elektrischen Baugruppen und dem Gehäuse beim Einbau relevant. Überprüft werden diese durch 3D-Einbauuntersuchungen. [67] beschreibt diesen Themenkomplex genauer. Zum anderen kann eine Simulation der Wärmeausbreitung an elektronischen Schaltungen vorgenommen werden. Ein weiterer Aspekt ist die Installationsplanung, bei der die Verkabelung aus der Elektrokonstruktion in der Maschine verlegt werden muss. Dabei treten Wechselwirkungen zwischen der Geometrie der Maschine und der notwendigen Installation auf. In [103] wird näher auf diese Problematik eingegangen.

Die Geometriedaten werden in den Simulationssystemen in der Regel nicht in den original CAD-Formaten verwendet. Je nach Simulationsart werden die Daten über Schnittstellen in die benötigten Formate übersetzt (Abb. 17). Moderne CAD-Systeme arbeiten auf Basis von Volumenmodellen, wobei B-Rep-Modelle am weitesten verbreitet sind [33]. Bei ihnen wird das zu beschreibende Volumen durch eine Menge von topologisch verbundenen Flächen beschrieben, welche die Oberfläche des technischen Körpers darstellen [67]. Analytische Flächen wie ebene, zylindrische, konische oder sphärische Flächen werden dabei im Modell analytisch exakt wiedergegeben.

Beim Transfer in approximierende Formate werden die Flächen bzw. die Geometrie durch geeignete Repräsentationen ersetzt. Für FEM wird eine Geometrie im Preprocessing automatisch in finite Elemente vernetzt, einzustellen ist dabei lediglich der Netztyp und, über die Feinheit des Netzes, die Genauigkeit. In der 3D-Kinematik Simulation werden meist Flächenmodelle eingesetzt, die einen Spezialfall der B-Rep-Modelle darstellen, sogenannte Polyhedra. Dabei werden als Flächentypen nur Ebenen und als Kantentypen nur gerade Linien unterstützt. Ein typischer Vertreter ist das Stereolithographie Format (STL), bei dem die Außenfläche trianguliert wird. Solche Flächenmodelle zeichnen sich durch einfache interne Algorithmen und damit hohe numerische Stabilität aus [67]. Somit lassen sich Aufgaben wie Kollisionsüberprüfungen leicht lösen. Diese Modelle beinhalten aber in der Regel keine Informationen über Volumen, bei einer Fläche kann lediglich festgestellt werden, ob sich eine Seite außerhalb oder innerhalb des zugehörigen Körpers befindet.

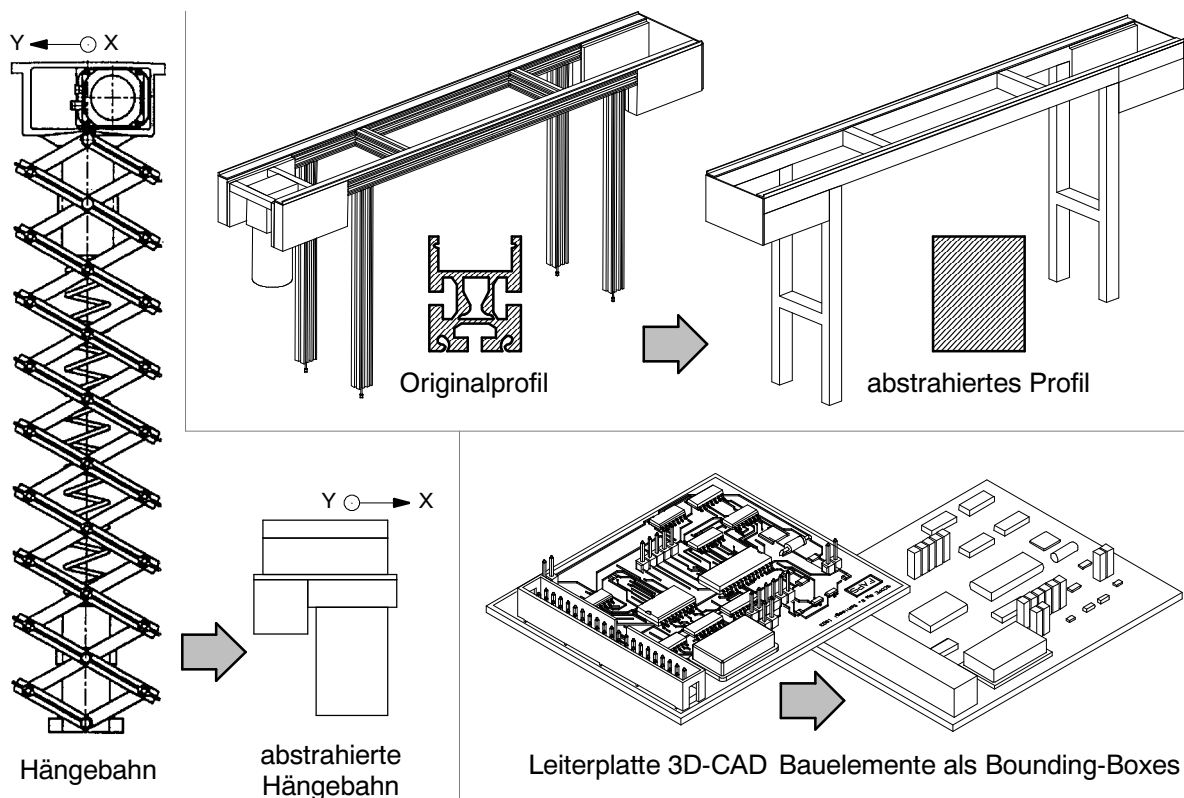
Der Nachteil fehlender Volumeninformation wird in Voxelmodellen beseitigt. Diese Modelle werden dadurch generiert, dass zu beschreibende Körper komplett mit gleichartigen Volumenelementen (Voxel) gefüllt werden [52]. Dabei wird zuerst auch ein Flächenmodell erzeugt, das dann mit Würfeln ausgefüllt wird. Die Genauigkeit des Modells lässt sich zuerst über die Genauigkeit des Flächenmodells, dann über die Kantenlänge der Würfel bestimmen. Voxelmodelle benötigen bis zu 70% weniger Speicherplatz als die ursprünglichen CAD-Modelle, beinhalten aber alle relevanten Informationen für Visualisierung und Volumenrepräsentation. Somit werden sie häufig in DMU-Anwendungen eingesetzt.



**Abb. 17** Geometrierepräsentation für unterschiedliche Simulationsarten am Beispiel einer Kugel (Schnittdarstellung)



Bei der Übernahme von CAD-Daten in Simulationssysteme wird in der Regel zusätzlich zur Datenkonvertierung eine Datenvereinfachung durchgeführt, da unwichtige geometrische Details die Rechnerkapazität unnötig belasten. Die Datenvereinfachung kann entweder manuell oder automatisch geschehen. Bei der manuellen Vorgehensweise wird ein vereinfachtes Ersatzmodell konstruiert, wie es in Abb. 18 am Beispiel der Hängebahn oder der Förderstrecke aus Aluprofil durchgeführt wurde. Diese Ersatzmodelle dienen zur einfachen Visualisierung, z. B. in der Layoutplanung oder für VR-Szenarien. Die automatische Datenreduktion und -vereinfachung kann in Systemen angewandt werden, in die über Datenschnittstellen die komplexen CAD-Originalgeometrien importiert werden, wo aber nicht alle Details für die Aufgabenstellung wichtig sind. Datenreduktion heißt, dass Details bis zu einer bestimmten Größe gelöscht oder unterdrückt werden. Das kann automatisch z. B. mit Unterobjekten, Bohrungen bzw. Löchern oder Fasen geschehen. Unter Datenvereinfachung fällt, dass automatisch kleine Unterobjekte eines bestimmten Größenbereichs und mit mehr als sechs Flächen durch ihre quaderförmigen Ausdehnungsbereiche (Bounding-Boxes) ersetzt werden (Abb. 18). Die Größe eines Unterobjekts kann dabei durch die Länge der Diagonalen seiner Bounding-Box bestimmt werden.



**Abb. 18** Abstrahierung von Modellelementen zur Reduzierung der erforderlichen Rechenleistung für die Visualisierung

## 2.2.2 Datenerhebung für die Ablaufsimulation

Die Ablaufsimulation wird schwerpunktmäßig bei Problemen eingesetzt, die wegen ihrer Komplexität und Vielschichtigkeit nicht mit anderen Methoden lösbar sind. Folglich ist der Aufbau eines Ablaufsimulationsmodells durch einen hohen Informationsbedarf gekennzeichnet. Der Beschaffungsaufwand liegt zunächst in der Menge der notwendigen Daten. Je nach Aufgabenstellung müssen eine Vielzahl von Arbeitsplänen, Aufträgen, Stücklisten, Maschinen- und Ressourceninformationen, Schichtplänen und anderen simulationsrelevanten Informationen übernommen werden [106]. Wenn diese Informationen bereits in EDV-Systemen vorhanden sind, können Sie häufig direkt über die vorhandenen Schnittstellen der Simulationswerkzeuge geladen werden. Die Arbeit mit externen Datenbeständen kann zusätzlichen Aufwand erfordern. Für Simulatoren gibt es aber in der Regel allgemeine (z. B. DXF für Layoutdaten, SQL) oder simulator-spezifische Schnittstellen (z. B. für Tracedaten), die den Datenaustausch unterstützen [93].

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Daten, die für die Ablaufsimulation benötigt werden. Dabei sind die Daten, die für die Systemintegration von Maschinen relevant sind, grau hinterlegt. Eine Strukturierung dieser Daten wird in Kapitel 3 vorgenommen.

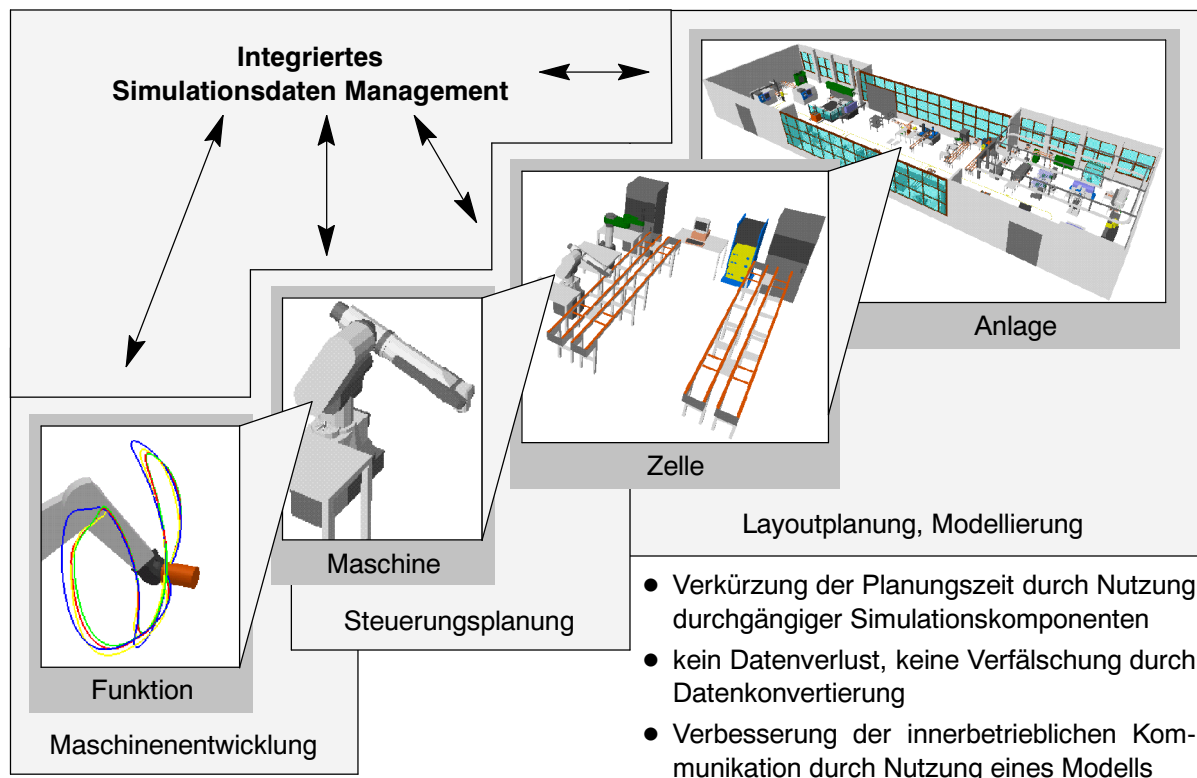
**Tabelle 2** Benötigten Daten für die Ablaufsimulation (nach [93])

● technische Daten	○ Fabrikstrukturdaten	(Anlagentopologie: Layout, Fertigungsmittel, Transportfunktionen, Verkehrswege, Flächen, Restriktionen)
	○ Fertigungsdaten	(Nutzungszeit, Leistungsdaten, Kapazität)
	○ Materialflussdaten	(Topologie des Materialflusssystems, Fördermittel, Nutzungszeit, Leistungsdaten, Kapazität)
	○ Stördaten	(funktionale Störungen, Verfügbarkeiten)
● Systemlastdaten	○ Auftragseinlastung	(Produktionsaufträge, Transportaufträge, Mengen, Termine)
	○ Produktdaten	(Arbeitspläne, Stücklisten)
● Organisationsdaten	○ Arbeitszeitorganisation	(Pausenregelung, Schichtmodelle)
	○ Ressourcenzuordnung	(Werker, Maschinen, Fördermittel)
	○ Ablauforganisation	(Strategien, Restriktionen, Störfallmanagement)

■ relevant im maschinennahen Bereich

## 2.3 Notwendigkeit eines integrierten Simulationsdaten-Managements

Der Trend in der Maschinenherstellung ist heute die komplett durchgängige rechnergestützte Entwicklung. Die Simulation spielt dabei während des gesamten Produktlebenszyklus eine für Entwicklungsdauer, Qualität und Kosten wettbewerbsentscheidende Rolle [118]. Ziel ist es, eine Maschine oder Anlage zuerst vollständig im Rechner aufzubauen und somit den zeit- und kostenaufwendigen Bau von Versuchsmodellen und Prototypen zu reduzieren. Durch das koordinierte Zusammenwirken unterschiedlicher Entwicklungsbereiche wird zudem die Schnittstellenproblematik zwischen den Abteilungen reduziert (Abb. 19). Die Voraussetzungen für ein solches Digital Manufacturing (DMF) sind heute bereits gegeben. Es existieren für jede Phase des Produktentwicklungszyklus geeignete CAx-Werkzeuge, die es dem Entwickler und Konstrukteur ermöglichen, das Design und die Funktionalität einer Maschine am Rechner nachzubilden und zu simulieren. Die Bestrebungen vieler Unternehmen zielen auf die Integration dieser Werkzeuge, auch verschiedene Forschungsprojekte, wie FORSIM<sup>1</sup>, iViP<sup>2</sup> oder MATCAP<sup>3</sup> arbeiten an dieser Aufgabe. Des Weiteren bieten Firmen wie Dassault oder Tecnomatix Simulationswerkzeuge für DMF an.



**Abb. 19** Anwendungsfelder und Nutzen eines integrierten Simulationsdaten Managements in Entwicklung und Planung

<sup>1</sup> Bayerischer Forschungsverbund Simulationstechnik, 07/1996 bis 06/1999 u. 01/2000 bis 12/2002

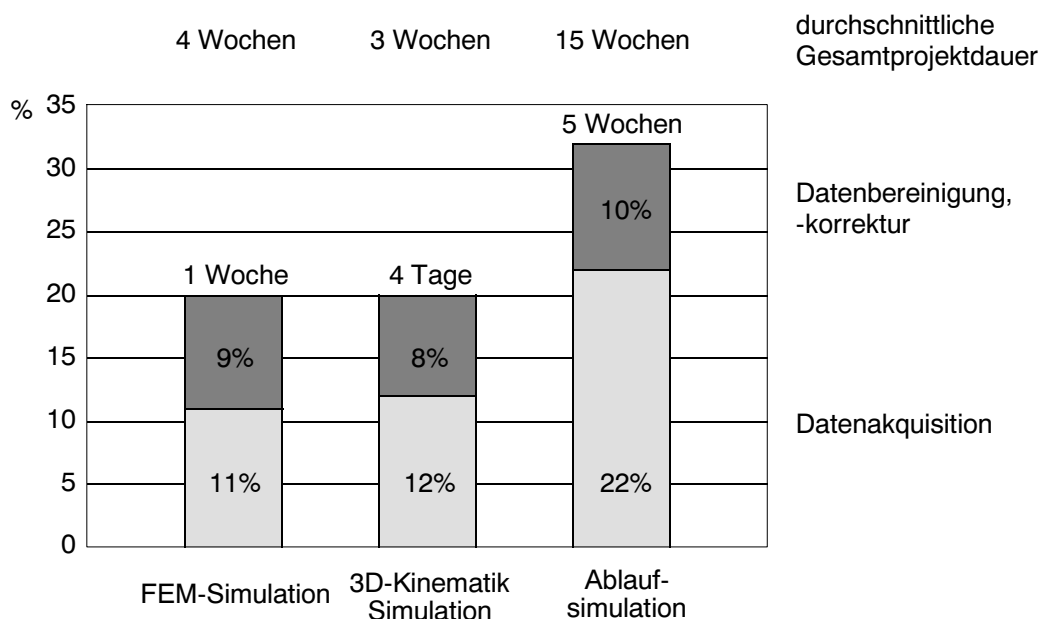
<sup>2</sup> BMBF Leitprojekt iViP – integrierte Virtuelle Produktentstehung, 06/1998 bis 05/2002

<sup>3</sup> Brite Euram III Projekt, 03/1997 bis 02/2000

### 2.3.1 Aufwandsabschätzung für die Datenerhebung

Wie in Kapitel 2.2 dargelegt, ist die Datenmenge, die für Planung und Simulation zunächst in Frage kommt, sehr groß. Einen entscheidenden Aufwand stellt auch die Auswahl der notwendigen Daten dar. Es muss entschieden werden, welche Daten in welchem Detaillierungsgrad benötigt werden, um eine Problemstellung zielführend in einem Simulationsmodell abzubilden. Die Beschaffung dieser Daten gestaltet sich als anspruchsvolle Tätigkeit. Das notwendige Wissen ist meist dezentral bei Mitarbeitern zu finden und eine Dokumentation ist selten vollständig vorhanden [106].

Teile der benötigten Informationen sind in der Regel in EDV-Systemen vorhanden. Beispielsweise sind für die Systemsimulation Arbeitsabläufe in Form von Arbeitsplänen in der Regel durchaus dokumentiert. Allerdings reichen diese bzgl. des Detaillierungsgrades häufig nicht aus oder sie beschreiben nicht die Realität (vgl. Kap. 6). Die mangelnde Qualität der zur Verfügung stehenden Daten führt wiederum zu einem steigenden Aufwand bei der Modellerstellung. Ziel eines jeden Modells ist die Beschreibung der Realität auf einem definierten Abstraktionsniveau. Hingegen stellen explizit dokumentierte Informationen nicht immer den aktuellen Ist-Zustand dar. Viel öfter beschreiben sie den angestrebten Soll-Zustand. Eine unreflektierte Übernahme von Informationen in ein Simulationsmodell kann damit eine spätere Validierung des Modells erheblich erschweren bzw. unmöglich machen. Deshalb ist es heute in der Regel unumgänglich, vor Übernahme der Daten diese auf Plausibilität zu überprüfen. Diese Korrekturschleifen in Kombination mit der Aufnahme nicht dokumentierter Informationen können den Aufwand für die Datenübernahmen im Rahmen eines Simulationsprojektes erheblich vergrößern [106].



**Abb. 20** Aufwand für Datenerhebung und -bereinigung für unterschiedliche Simulationsarten bezogen auf die Gesamtprojektdauer (nach [105])

Die beiden Problemfelder der Datenakquisition und Datenbereinigung bzw. -korrektur wurden in [105] quantifiziert (Abb. 20). Dabei zeigt sich, dass der durchschnittliche prozentuale Aufwand für diese Tätigkeiten bezogen auf die Gesamtprojektdauer bei etwa 20% für die FEM- bzw. 3D-Kinematik Simulation liegt und bei etwa 32% für die Ablaufsimulation. Basierend auf diesen Zahlen wurde die prototypische Realisierung eines Simulationsdaten Managements in dieser Arbeit zunächst für den Bereich Ablaufsimulation durchgeführt.

In [105] wurden Anwender von Simulation in der Produktionstechnik auch nach ihren Wünschen und Anforderungen befragt. Dabei stellte sich heraus, dass der Wunsch nach verbesserten Datenschnittstellen an zweiter Stelle nach der allgemeinen Verbesserung der Bedienbarkeit genannt wurde. Der Datenaustausch soll über genormte Schnittstellen zu CAD-, PPS- und VR-Systemen sowie Datenbanken möglich sein. Weiterhin bestand der Wunsch nach einem besseren Preprocessing der Eingangsdaten mit Kontrollmöglichkeit (Konsistenzprüfung). Ein bidirektionaler Datenaustausch sollte möglich sein. Als Idealfall wurde ein ganzheitliches Modell genannt.

### **2.3.2 Vorteile der entwicklungsbegleitenden Erhebung und Speicherung von Planungsdaten**

Daten, die aus verteilten, heterogenen Datenbeständen erfasst werden, weisen in der Regel nicht die für Simulationsexperimente notwendige Vollständigkeit und Konsistenz auf. Sie waren bisher einer Plausibilitätskontrolle zu unterziehen und ggf. zu ergänzen und zu korrigieren [93]. Um eine Verkürzung der Planungs- und Simulationsdauer zu erreichen, bietet es sich daher an, während der Entwicklung alle Daten so abzulegen, dass andere Entwicklungsbereiche definierten Zugriff auf diese Informationen erhalten können. Dadurch lässt sich die Dauer der Datenakquisition deutlich verkürzen und die Datenbereinigung würde im Idealfall entfallen, da die Übergabe der Informationen bereits im Vorfeld anhand von Transformationsregeln definiert wurde.

Ziel der hier vorgestellten Arbeiten ist es, ein integriertes Simulationsdaten Management (SDM) zu ermöglichen, mit dem die für die unterschiedlichen Entwicklungsbereiche notwendigen Daten gespeichert und den Simulationsanwendern zur Verfügung gestellt werden können. Der dabei erforderliche Austausch konsistenter Daten erfolgt mit den Methoden von Engineering Data Management (EDM)<sup>4</sup>. EDM ermöglicht gegenüber herkömmlicher, heterogener Informationsverwaltung deutliche Einsparungspotentiale (Tabelle 3).

Aus den Daten für die unterschiedlichen Simulationsarten, deren Anwendung und der Verknüpfung der simulationsgestützten Planungsvorgänge wird auf Basis von EDM in Kapitel 3 ein maschinennahes Referenzmodell für die Simulation aufgebaut.

<sup>4</sup> im angelsächsischen Raum auch Product Data Management (PDM)

**Tabelle 3** Mögliche Einsparungen durch EDM-Technologie [117]

Kostenreduzierung durch EDM		Einsparungspotential	Durchlaufzeitverkürzung durch EDM	Einsparungspotential	
Reduzierung direkter Produktentstehungskosten		20-30 TDM/MA/Jahr	schnellere Informationssuche und -archivierung		15-20%
Vermeidung von Folgekosten für neue Sachnummern		DM 1000-DM 2500 pro Teilenummer	verkürzte Kommunikations- und Verteilzeiten		20-30%
Reduzierung festgelegter Produktkosten in den Funktionsbereichen			Schaffung von Voraussetzungen für Simultaneous Engineering		10-20%
Ertragsgewinn durch schnellere Produktanlaufzeiten		15-30% bei Entwicklungszeitverkürzung von 6-12 Mon.	Reduzierung der Iterationsschleifen zwischen Konstruktion, Ablaufplanung und Fertigung		20-30%

K=Konstruktion FP=Fertigungsplanung F=Fertigung ohne EDM mit EDM

## 3 Maschinennahes Referenzmodell für die Simulation

Die virtuelle Produktentstehung hat sich zu einem breit diskutierten Thema entwickelt. Hierdurch erhalten die modernen Simulationstechniken eine neue Bewertung. Die Integration vorhandener Simulations- und Optimierungstechnologien in andere Produktentwicklungswerkzeuge (z.B. CAD, EDM, PDM, VR, RP, ...) steht am Anfang der Entwicklung und bietet ein hohes Potential an Nutzen und Zeitgewinn [110]. Das hier vorgestellte maschinennahe Referenzmodell erleichtert diese Integration und beschreibt eine Systemumgebung für den effizienten Simulationseinsatz.

### 3.1 Referenzmodelle in der Simulationstechnik

Die Modellierung einer Anlage oder eines Systems stellt die entscheidende Vorarbeit zur Simulation dar. Ein Referenzmodell dient dabei als Anleitung und abstraktes Beispiel für eine spezielle Modellierungsaufgabe. Die im folgenden beschriebenen Eigenschaften und die Nutzung von Referenzmodellen sind aus der Mitarbeit in der ASIM<sup>5</sup>-Arbeitsgruppe "Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik" abgeleitet, die es sich zum Ziel gesetzt hat, eine Konkretisierung und abschließende Definition des Begriffes Referenzmodell für die Simulation zu erreichen (siehe [135]).

#### 3.1.1 Begriffsbestimmung und Klassifikation

Der Begriff Referenzmodell wird sowohl in der Technik als auch in anderen Wissenschaftsbereichen verwendet. Die Bandbreite des Begriffsverständnisses reicht von Vergleichsmodell über Referenzprojekt bis zu Musterlösung. In der Informationstechnik ist weiterhin eine Abgrenzung zu Metamodellen und formalen Beschreibungssprachen vorzunehmen. Eine ausführliche Betrachtung zu dieser Thematik findet sich in [135].

Folgende Definition von Hars kann als Ausgangspunkt für das allgemeine Verständnis von Referenzmodellen herangezogen werden [46]:

*Referenzmodelle* sind unter Nutzenaspekten betrachtet eine Vorlage für die Erstellung eines oder mehrerer spezifischer Modelle. Sie müssen einen gewissen Grad an Allgemeingültigkeit besitzen, d. h. ein Referenzmodell muss für die Erstellung mehrerer anwendungsspezifischer Modelle einsetzbar sein. Dem Aspekt der Anpassbarkeit muss ein Referenzmodell dadurch genügen, dass es eine Methode zur Verfügung stellt, die eine Überführung in spezifische Modelle ermöglicht. Die Anwendbarkeit von Referenzmodellen muss dadurch gewährleistet werden, dass es in bestimmten Fällen auch direkt, ohne Anpassung auf

<sup>5</sup> Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM) der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI), Fachgruppe Simulation in Produktion und Logistik

einen Anwendungsfall, angewendet werden kann. Dies impliziert wiederum, dass die Inhalte von Referenzmodellen sowohl einen gewissen Abstraktions- als auch einen gewissen Detaillierungsgrad besitzen müssen.

Im Arbeitskreis "Referenzmodelle" der ASIM-Fachgruppe "Simulation in Produktion und Logistik" wurde der Begriff Referenzmodell untersucht, wobei folgende Eigenschaften von Referenzmodellen aus der Sichtweise der Simulationstechnik hervorgehoben werden:

- Vorlage für die Erstellung eines Modells
- Allgemeingültigkeit des Referenzmodells im Rahmen der Aufgabenstellung
- Übertragbarkeit und Anpassbarkeit an die jeweiligen spezifischen Anforderungen
- modularer Aufbau
- Unabhängigkeit von der Implementierungssoftware
- Erfahrungswissen als Basis
- Verständlichkeit und einheitliche Begriffswelt
- Reduzierung des Aufwands für die Erstellung von spezifischen Modellen

Somit wurde folgende Definition für Referenzmodelle in der Simulationstechnik abgeleitet [58]:

Ein *Referenzmodell* umfasst eine systematische und allgemeingültige Beschreibung eines definierten Bereichs der Realität mit den für eine vorgegebene Aufgabenstellung relevanten charakteristischen Eigenschaften und legt das zugehörige Modellierungskonzept fest.

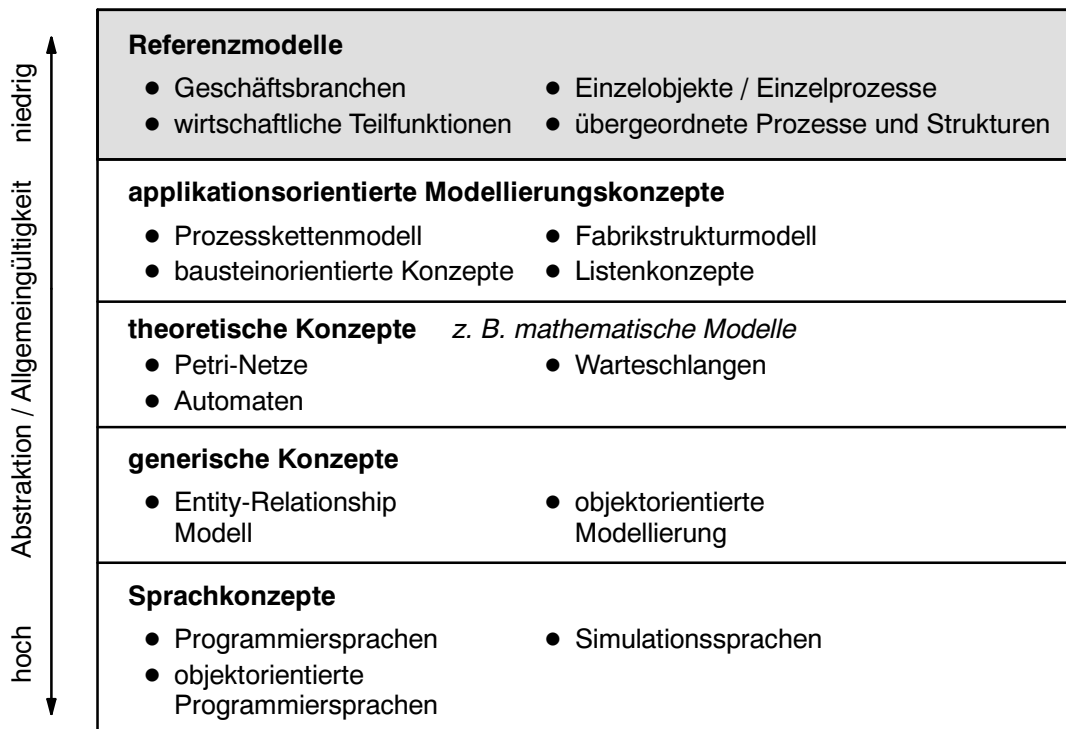
Im Bereich der Simulation dienen Referenzmodelle als Konstruktionsschemata für den Entwurf von aufgabenbezogenen Simulationsmodellen.

Weiterhin wurde im Forschungsprojekt GiPP<sup>6</sup> [49] die zentrale These aufgestellt, dass derartige Modelle ihren Referenzcharakter durch eine breite Basis von Wissen erhalten. In GiPP werden Referenzmodelle rechnergestützt in einer Modellbibliothek mit einem Managementkonzept verwaltet, das Instrumentarien und Verfahren für den Zugang und die Nutzung der Modelle bereitstellt. Das Internet und die darauf basierenden Dienste bieten die Möglichkeit des weltweiten Zugriffs auf die Referenzmodelle.

Referenzmodelle lassen sich in der Klassifizierung der Modellierungs- und Strukturkonzepte für die Simulation als weiteres Konzept oberhalb der applikationsorientierten Modellierungskonzepte einordnen (Abb. 21). Dabei können die jeweils abstrakteren und damit applikationsunabhängigeren Konzepte in den applikationsnäheren Konzepten enthalten sein. Referenzmodelle sind nach dieser Klassifizierung am meisten anwendungsspezifisch, sie sollen die auf den darunterliegenden Stufen angeordneten Modellierungskonzepte nutzen [135].

<sup>6</sup> Geschäftsprozessgestaltung mit integrierten Prozess- und Produktmodellen (GiPP), BMBF-Projekt, 07/1995 bis 06/1998





**Abb. 21** Positionierung der Referenzmodelle innerhalb der Modellierungskonzepte für Simulation [134, 135]

Referenzmodelle für die Simulation können in vier Bereiche aufgeteilt werden: Geschäftsbranchen, wirtschaftliche Teilfunktionen, Einzelobjekte bzw. Einzelprozesse und übergeordnete Prozesse und Strukturen (Tabelle 4). Maschinennahe Referenzmodelle lassen sich dabei in den Bereich der Referenzmodelle für Einzelobjekte und -prozesse einordnen. Sie besitzen im allgemeinen einen hohen Detaillierungsgrad, bezogen auf die Eigenschaften des Einzelobjektes oder -prozesses.

**Tabelle 4** Klassifikation von Referenzmodellen für die Simulation (nach [58])

Referenzmodelle in der Simulationstechnik für:	
<b>Geschäftsbranchen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Automobilindustrie</li> <li>● Elektronikproduktion</li> <li>● Halbleiterindustrie, ...</li> </ul>	<b>Einzelobjekte, Einzelprozesse</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Maschinen</li> <li>● Transportmittel</li> <li>● chemische Prozesse, ...</li> </ul>
<b>Wirtschaftliche Teilfunktionen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Beschaffung</li> <li>● Fertigung</li> <li>● Absatz</li> <li>● Auftragsdurchlauf</li> <li>● Produkt- und Prozessgestaltung</li> <li>● Umschlag und Kommissionierung, ...</li> </ul>	<b>Übergeordnete Prozesse und Strukturen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Strategien</li> <li>● Qualität</li> <li>● allg. Ablaufstrukturen, ...</li> </ul>

### 3.1.2 Beschreibungsmethoden für maschinennahe Referenzmodelle

Die Definition für Referenzmodelle aus Kapitel 3.1.1 besagt, dass in einem Referenzmodell auch das zugehörige Modellierungskonzept, sprich die Anwendung einer Beschreibungsmethode, enthalten ist. Eine adäquate Beschreibungsmethode bildet somit die Grundlage für ein Referenzmodell. Sie umfasst alle zur Modellierung erforderlichen Elemente sowie Regeln und Vorgehensweisen, um die Eigenschaften von Elementen zu bestimmen und die Beziehungen zwischen Elementen angeben zu können. Je nach Anwendungsbereich des Referenzmodells (vgl. Tabelle 4) können sehr unterschiedliche Beschreibungsmethoden zum Einsatz kommen. Aus den Anwendungsbereichen lassen sich eine Reihe von Anforderungen an die Beschreibungsmethoden ableiten, die vor allem folgende Punkte betreffen [8]:

- *Ausdrucksfähigkeit*: Eine Beschreibungsmethode muss die relevanten Eigenschaften eines Anwendungsbereichs präzise darstellen können.
- *Formalisierungsgrad / Analysierbarkeit*: Die präzise, formale Beschreibung ermöglicht den Einsatz von rechnergestützten Analysewerkzeugen, um Fehler und Widersprüche aufzudecken. Der Anwender kann bei der Entwicklung komplexer Modelle durch Modellierungswerkzeuge unterstützt werden.
- *Anwendungsfreundlichkeit*: Eine Beschreibungsmethode sollte über rechnergestützte, graphische Modellierungs- und Visualisierungsmöglichkeiten verfügen. So soll die Erstellung komplexer Modelle zum Teil ohne modelltheoretische Fachkenntnisse möglich sein.

Die in Abb. 21 dargestellten Modellierungskonzepte unterhalb der Referenzmodelle können als Beschreibungsmethoden herangezogen werden. In der Simulationstechnik müssen Modelle unter anderem Objekte, ihre Eigenschaften und ihr Verhalten sowie Abläufe und die dadurch hervorgerufenen Veränderungen der Objekte beschreiben können. In der maschinennahen Simulation werden vor allem Objekte mit ihren Eigenschaften betrachtet. Abläufe sind dann in die Modelle integriert, wenn Systembetrachtungen mit den modellierten Maschinen oder Anlagen durchgeführt werden.

Die Informationen, die im maschinennahen Bereich dargestellt werden, betreffen vor allem Objekte und ihre Eigenschaften. Die Modellierung einer Maschine, also eines Produktes, wird im Forschungsfeld der Produktmodellierung behandelt. DIN definiert [85]:

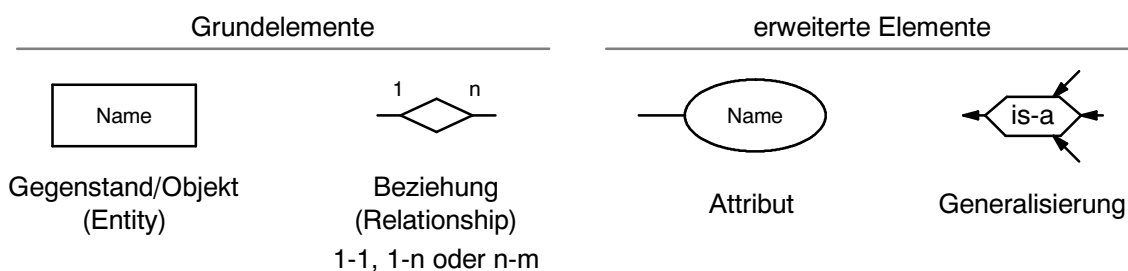
Ein *Produktmodell* ist die Dokumentation aller relevanten internen und externen Daten, Vorgänge, Informationen und Ergebnisse, die für einen Auftrag von der Angebotserstellung über die Fertigung und Auslieferung bis zum Ablauf der Produktverantwortung anfallen.

Für die maschinennahe Simulation sind vor allem die Daten der Entwicklung, Konstruktion, Fertigung und Installation relevant. Die Modellierung dieser Daten erfolgt auf

verschiedenen Ebenen. Die Schemaebene beschreibt die Konstrukte eines generischen Modells, die zur Abbildung der gewünschten Informationsmenge für den entsprechenden Anwendungsfall notwendig sind. Die Instanzebene ist das mit den konkreten Daten eines Produktes bzw. einer Maschine instanziierte (gefüllte) Schema, dazwischen liegt die Applikationsebene [49, 118]:

1. *Schemaebene*: Generisches Modell mit den notwendigen Beschreibungsmethoden. Es ist für alle Anwendungsfälle gleich.
2. *Applikationsebene*: Applikationsspezifische Konfiguration des Modells der Schemaebene.
3. *Instanzebene*: Instanziierung des Modells der Applikationsebene mit realen Attributwerten.

Für die eigentliche Modellierung können die Konzepte aus Abb. 21 herangezogen werden, die auch für Produktmodelle angewendet werden. Applikationsorientierte und theoretische Modellierungskonzepte sind somit im maschinennahen Bereich nur bedingt einsetzbar, da sie für Ablaufbeschreibungen ausgelegt sind. Hingegen sind die generischen Konzepte gut in der maschinennahen Simulation verwendbar. Zunächst ist dabei das Entity-Relationship Modell (ERM) zu nennen, das in den 70er Jahren von Chen [17] entwickelt wurde. Es basiert auf Objekten, sogenannten Entitäten, sowie Relationen, über die Beziehungen zwischen den Entitäten definiert werden (Abb. 22). ERM hat sich zu einem Standard-Modell der semantischen Modellierung entwickelt, was nicht zuletzt auf der einfachen Struktur seiner Konzepte und der Unterstützung durch eine graphische Notation beruht [115]. ERM wird auch als Grundlage des hier vorgestellten Referenzmodells verwendet.



**Abb. 22** Elemente eines Entity-Relationship Modells

Eine andere geeignete Beschreibungsmethode im maschinennahen Bereich ist die im Rahmen von ICAM (Integrated Computer Aided Manufacturing der U. S. Air Force) entwickelte IDEF<sup>7</sup> Methode (ICAM Definition). Der Teil IDEF1 beschreibt ein Informationsmodell zur Repräsentation der Struktur und Semantik von Informationen innerhalb eines Gesamtsystems. Bei der Erweiterung IDEF1X [93] wird kein Datenfluss wie in IDEF, sondern der Aufbau der ausgetauschten Objekte modelliert. In IDEF1X stehen wie in ERM Objekte (Entitäten), Relationen und Attribute aber auch Charakteristika zur Verfügung. IDEF1X erlaubt die Modellierung in einem Top-Down-Ansatz, wobei die

<sup>7</sup> rechnergestützte Umsetzung von SADT (Structured Analysis and Design Technique) [77]

Entitäten zunächst grob modelliert werden und dann schrittweise verfeinert werden können. Im Vergleich zu ERM ist es mit IDEF1X möglich, wesentlich mehr Semantik in die graphische Repräsentation einzubringen. ERM und IDEF1X sind für den statischen Entwurf von Informationskonstrukten entwickelt worden. Somit ist kein dynamischer Zugriff bzw. keine Modifikation des Modells möglich. Auch kann keine automatische Überprüfungen der erstellten Modelle durchgeführt werden [118].

Eine weitere Modellierungsmethode ist Nijssen's Information Analysis Method (NIAM) zur Unterstützung der Informationsanalyse und zum Entwurf von Informationsmodellen [81]. Vor allem die Verwendung natürlichsprachlicher Aussagen über den Problem-bereich als Ausgangspunkt der Informationsanalyse bewirkt dabei die Anwendbarkeit auch ohne große Modellierungserfahrung. Daneben ist auch eine umfangreichen methodischen Unterstützung gegeben (vgl. [101], S. 65 ff.).

Aus IDEF1X und NIAM ging die Sprache EXPRESS bzw. ihre graphische Notation EXPRESS-G hervor [91]. Dies erfolgte im Rahmen der weltweiten Entwicklung und Standardisierung zum Produktdatenaustausch STEP<sup>8</sup>. Dabei umfasst EXPRESS-G eine Untermenge von EXPRESS, durch entsprechende Prozessoren kann eine Umsetzung in EXPRESS erfolgen. In der Simulationstechnik wurde EXPRESS u. a. im Projekt NeutraSIM<sup>9</sup> für die Entwicklung eines Produktdatenmodells zur Beschreibung von Simulationsmodelle herangezogen [60].

Schließlich eignen sich auch die seit Ende der 80er Jahren immer stärker in den Vordergrund rückenden objektorientierten Methoden [122] für die Beschreibung von maschinennahen Modellen. Zu erwähnen ist hier die Unified Modelling Language (UML), die auf mehreren objektorientierten Methoden basiert und 1997 als Standardisierungsvorschlag bei der Object Management Group (OMG) eingereicht wurde [16].

### **3.1.3 Anwendung von maschinennahen Referenzmodellen in Entwicklung, Einsatz und Vertrieb**

Im Bereich der Simulation werden Referenzmodelle entwickelt, um Erfahrungswissen zu dokumentieren und den Aufwand für die Erstellung von Simulationsmodellen zu verringern. Experten leisten durch die Erstellung von Referenzmodellen von Maschinen oder Anlagen eine Vorarbeit, mit der die eigentliche Modellierung bei konkreten Simulationsprojekten erheblich beschleunigt und erleichtert werden kann. Auf der Basis von Referenzmodellen können Modellwelten für unterschiedliche Simulationswerkzeuge realisiert werden. Zudem können Referenzmodelle genutzt werden, um die Kommunikation zwischen Entwicklern und Anwendern von Simulationstechniken zu verbessern. Sie können als Kommunikationsgrundlage zwischen Simulationsdienstleistern und ihren Kunden dienen, sowie der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Implementierungen [58]. Referenzmodelle unterstützen den Anwender zum einen formal

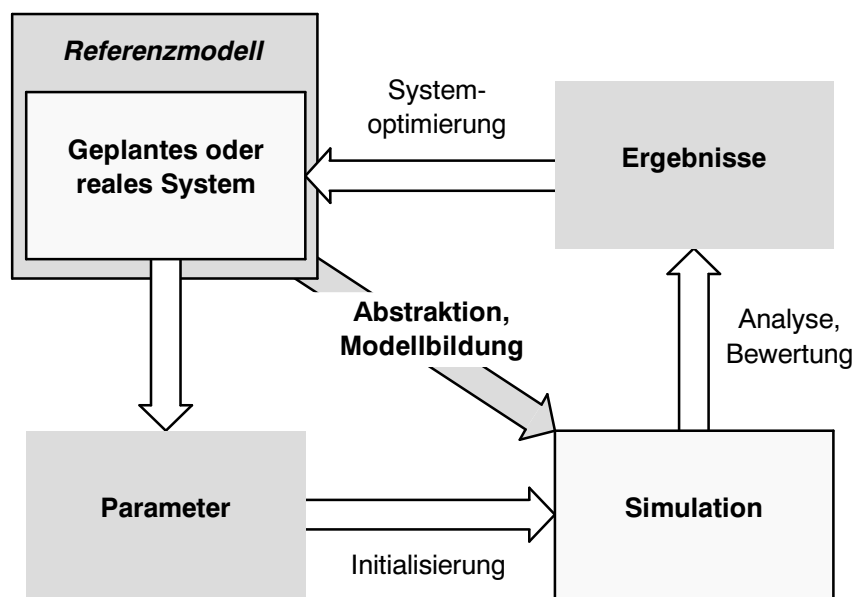
<sup>8</sup> ISO Standard for the Exchange of Product Model Data

<sup>9</sup> Generierung eines neutralen Formats zur Beschreibung von Simulationsmodellen für zu projektierende Fertigungsanlagen (NeutraSIM), DFG Projekt, 01/1994 bis 12/1997

durch vordefinierte Strukturen, zum anderen inhaltlich, da sie vordefinierte Ausprägungen enthalten und somit als Wissensspeicher genutzt werden können.

Abb. 23 zeigt die Vorgehensweise zur Durchführung einer Simulationsstudie. Dabei wird ein geplantes oder reales System zunächst abstrahiert und dann für den Zweck der Simulation modelliert. Der Abstraktion und Modellbildung geht eine Systemanalyse voraus. Dabei entsteht bereits ein gedankliches Modell des Systems. Bei gegebenem System und gegebener Aufgabenstellung basiert das gedankliche Modell auf der Sicht und der Erfahrung der beteiligten Personen (vgl. [93]). Zu diesen Erfahrungen können Modellierungsphilosophien und oder Referenzmodelle gehören.

Strukturähnlichkeiten zwischen dem System und dem Modellierungsansatz sind entscheidend für die Eignung einer Modellierungsmethode. Durch die Vorgabe geeigneter Strukturen kann dem Modellentwickler der Modellaufbau deutlich erleichtert werden. An dieser Stelle greifen Referenzmodelle. Ist ein passendes Referenzmodell für die Aufgabenstellung bekannt, kann das gedankliche Modell nach diesem Konstruktionschema aufgebaut werden. Das Referenzmodell stellt in gewissem Sinne ein Gerüst dar, das bei der Entwicklung des gedanklichen Modells und bei der Umsetzung in ein experimentierbares Modell, entsprechend der Gegebenheiten des betrachteten Systems, inhaltlich gefüllt werden muss [58].



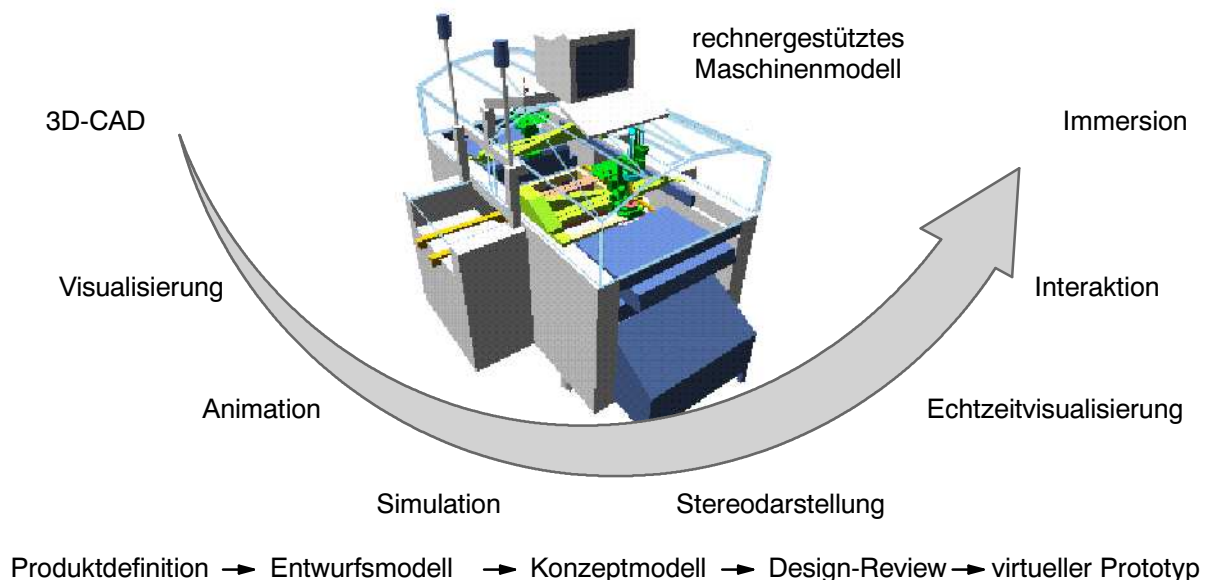
**Abb. 23** Vorgehensweise zur Durchführung einer Simulationsstudie basierend auf einem Referenzmodell (vgl. [82])

In der maschinennahen Simulation dient das hier vorgestellte Referenzmodell zum einen der durchgängigen Nutzung der Simulationstechnik in unterschiedlichen Planungsbereichen, zum anderen, wie oben beschrieben, als Konstruktionschema zum Aufbau maschinennaher Simulationsmodelle. Das Referenzmodell als Produktdatenmodell stellt die Vollständigkeit und Eindeutigkeit der Maschinendaten sicher. In Ver-

bindung mit einem Simulationsdaten Management wird auch die Verwendung der Daten gesteuert.

Auf Seiten der Anlagenhersteller begleitet das Referenzmodell als Teil des Produktmodells die Entstehung einer neuen Maschine von der Planung bis zur Realisierung. Der Nutzen des Modells endet jedoch nicht nach der Maschinenentwicklung. Anhand des Modells lassen sich bereits während der Angebotsphase verlässliche Aussagen über das Anlagenverhalten während des Betriebs bei Kunden machen. Durch den Einsatz des validierten Referenzmodells wird dabei eine hohe Planungssicherheit erzielt. Auch im eigenen Haus kann auf Teile des Referenzmodells bei Variantenkonstruktionen zurückgegriffen werden. Durch die systematische Nutzung gemeinsamer Simulationskomponenten fördert das Referenzmodell außerdem die innerbetriebliche Kommunikation.

Käufer und Betreiber von Anlagen können anhand des Maschinenmodells vor dem Kauf überprüfen, ob und wieweit ihre Anforderungen erfüllt sind um Fehlinvestitionen zu vermeiden. Die komplette Fertigung kann in der Planungsphase ausgetestet werden um wertvolle Informationen für die Kapazitätsauslegung zu gewinnen. Dadurch wird in dieser frühen Phase auch eine relativ exakte Investitionsabschätzung möglich. Die Handhabung der Maschinenmodelle sollte dabei möglichst einfach sein, um einen zeit- und kostengünstigen Einsatz der Simulationstechnik zu erlauben.



**Abb. 24** Anwendung rechnergestützter Maschinenmodelle vom 3D-CAD hin zur virtuellen Realität

Mit dem Einsatz neuer Technologien, wie Virtual oder Augmented Reality, erweitern sich auch die Einsatzmöglichkeiten rechnergestützter Maschinenmodelle. VR findet seine Anwendung von der Produktdefinition über die Produktentwicklung bis hin zum realen Einsatz einer Maschine in einer Fertigung, wo Umrüstungen oder der Service effizienter zu planen sind. Die heutige Anwendung von virtuellen Maschinen umfasst,

wie in Abb. 24 dargestellt, vor allem die Bereiche Visualisierung, Animation, und Simulation. Die Möglichkeiten zur räumlichen Darstellung und zur Echtzeitvisualisierung vermitteln einen sehr realitätsnahen Eindruck einer Maschine und ihrer Komponenten. Mit entsprechenden Eingabehilfsmitteln und Visualisierungsgeräten (z. B. Datenhandschuh, Head Mounted Display) kann die Bedienung der Maschine in ihrer späteren realen Umgebung getestet werden. Referenzmodelle helfen dabei, Maschinenmodelle für diese unterschiedlichen Technologien zu qualifizieren.

## 3.2 Referenzmodell maschinennaher Simulationskomponenten

Die realitätsnahe Nachbildung einer Maschine mit ihren Funktionen wird erst durch die Simulationstechnik möglich. Das im folgenden vorgestellte Referenzmodell maschinennaher Simulationskomponenten beschreibt den Informationsumfang und die Datenverwendung beim Aufbau und Einsatz von virtuellen Maschinen. Die Anwendungsmöglichkeiten der Simulationskomponenten erstrecken sich von der Maschinenentwicklung bis zur Systemplanung. Dazu gibt das Referenzmodell eine systematische und allgemeingültige Beschreibung, welche Daten wann an welcher Stelle des Entwicklungszyklus benötigt werden, um am Ende einen digitalen Prototypen zu erhalten. Der kann wiederum in einer virtuellen Fertigung eingesetzt werden.

Vor der Charakterisierung der Funktionalitäten des Referenzmodells sind einige Begriffsdefinitionen notwendig. Neben den eigentlichen Simulationsaufgaben werden im Referenzmodell auch die Verknüpfungen der verschiedenen Aufgabenbereiche und die Arbeitsabläufe dargestellt. Dies lässt sich mit Funktionalitäten des Workflow Managements realisieren. Die Workflow Management Coalition (WfMC), eine internationale Interessengemeinschaft aus Industrie und Forschung, die zur Definition und Normung des Funktionsumfangs des Workflow Managements gegründet wurde, definiert die Begriffe Workflow und Workflow Management wie folgt:

Unter *Workflow* versteht man die rechnergestützte Formalisierung oder Automatisierung eines Arbeitsprozesses [95].

*Workflow Management* stellt eine prozessorientierte Implementierungstechnik des Workflows dar. Workflow Management kann anhand der Workflow Logik auf einem EDV-System realisiert werden und unterstützt die aufgabenbezogene Koordination und Kommunikation zwischen Aufgabenträgern im Rahmen der organisatorischen Abläufe [49, 95].

Ein *Workflow Management System* ist ein Compiler oder interpreterähnliches System, das den Arbeitsfluss (Workflow) zwischen verschiedenen Teilnehmern an einem Arbeitsprozess leitet. Dabei benutzt es eine vordefinierte Prozedur, die sich aus einer Menge von Teilprozessen bzw. Teilaufgaben zusammensetzt. Zentrale Aspekte vom Workflow Management Systemen sind organisatorisches

Hintergrundwissen, Prozessdefinition, Prozessverwaltung, Informations- und Dokumentenverwaltung und verteilte Systeme. (vgl. [86], S.7)

Für den oben verwendeten Begriff Prozess bzw. Arbeitsprozess soll ebenfalls eine Definition erfolgen. Der Begriff wird im Rahmen des Workflow Managements vor allem für die Abgrenzung organisatorische Abläufe verwendet, er bezeichnet aber auch Bearbeitungsvorgänge auf Maschinen (vgl. Kapitel 2). Die allgemeine Definition aus [49] wird beiden Sichtweisen gerecht:

Ein *Prozess* ist eine Folge von Funktionen bzw. Aktivitäten, wobei eine Funktion bzw. Aktivität durch eine oder mehrere Ereignisse gestartet wird und in einem oder mehreren Ereignissen endet. Die Einzelaktivitäten stehen in einem logischen Zusammenhang zueinander und sind inhaltlich abgeschlossen.

Basierend auf diesen Definitionen wird im folgenden das funktionale und zeitliche Zusammenwirken der in Kapitel 2 beschriebenen Simulationsarten bei der Produktentstehung in einem Referenzmodell spezifiziert.

### **3.2.1 Grundstruktur und Einsatzfelder des Referenzmodells maschinennaher Simulationskomponenten**

Im hier vorgestellten Referenzmodell wird aufgezeigt, welche Aufgaben mit welchen Softwarewerkzeugen durchgeführt werden, um eine Maschine im Rechner aufzubauen, die in Aussehen und Funktion eine reale Maschine nachbildet und welche Daten dabei anfallen. Ein wesentliches Ziel einer solchen virtuellen Maschinen liegt in der Möglichkeit, ihre zukünftigen Eigenschaften durch eine Vielzahl von Simulationen vollständig vorherbestimmen zu können (Abb. 25). Eine virtuelle Maschine kann in der Maschinenentwicklung als Ersatz für reale Versuchsmodelle und Prototypen dienen, sie kann aber auch als Bestandteil einer virtuellen Fertigung eingesetzt werden.

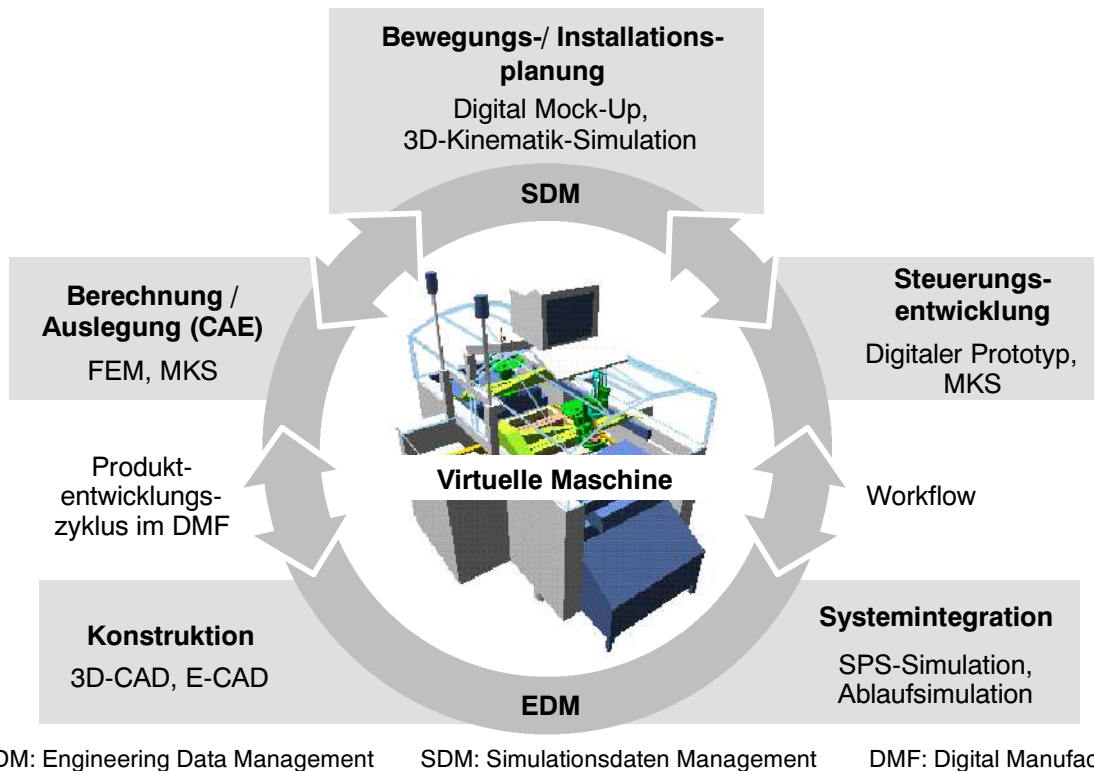
Grundlage für Entwicklungen auf Basis virtueller Maschinen bilden integrierte Maschinenmodelle. Diese sind Informationsgrundlage der Simulationsprozesse und dienen zur Repräsentation der Simulationsergebnisse. Entwicklungsprozessketten mit einer Datenbasis in Form einer gemeinsamen Produktdatenverwaltung und darauf basierendem Entwicklungsablauf werden dem Anspruch an eine solche virtuelle Produktentstehung am heute weitestgehenden gerecht, da ein umfassendes integriertes Produktdatenmodell noch nicht realisiert ist [88, 118].

Die Entwicklungsprozessketten im Referenzmodell maschinennaher Simulationskomponenten besitzen vier grundlegende Charakteristika:

1. Gesamtprozess der Entstehung einer virtuellen Maschine, in Teilprozesse gegliedert (Workflow)
2. rechnerbasiertes System zur ablauforganisatorischen Unterstützung des Gesamtprozesses (Workflow Management)



3. Systeme für die Bearbeitung der maschinenbezogenen Teilprozesse des Gesamtprozesses (u. a. Simulationssysteme)
4. Datenaustauschmechanismen zwischen den Systemen (Kommunikation)



**Abb. 25** Anwendungsbereiche des Referenzmodells maschinennaher Simulationskomponenten

Für die datentechnische Realisierung des Referenzmodells bietet sich Engineering Data Management (EDM) an. Es verbindet die einzelnen Entwicklungsteilprozesse mit ihren Systemen für Konstruktion, Berechnung und Simulation. Dadurch kommt ihm eine entscheidende Bedeutung im Referenzmodell zu. Jede Information, die im Lebenszyklus eines Produktes benötigt wird, kann von einem EDM System verwaltet werden. Dadurch können allen Personen oder Systemen, die zu einem Zeitpunkt spezielle Daten benötigen, genau die passenden, korrekten Daten zugänglich gemacht werden. EDM Systeme steuern Produktinformationen, Zugriffsberechtigungen, Bearbeitungszustände, Freigabevorgänge und andere Abläufe, die sich auf Produktdaten auswirken. Durch Bereitstellung einer Datenverwaltung und -sicherung sorgt das EDM System dafür, dass die Anwender immer die aktuellsten freigegebenen Informationen erhalten. Wird EDM in einer Arbeitsgruppe genutzt, lassen sich damit bereits beachtliche Produktivitätssteigerungen erzielen. Eine wesentlich größere Wirkung wird jedoch erreicht, wenn EDM zu einem unternehmensweiten Vorgehen wird [83].

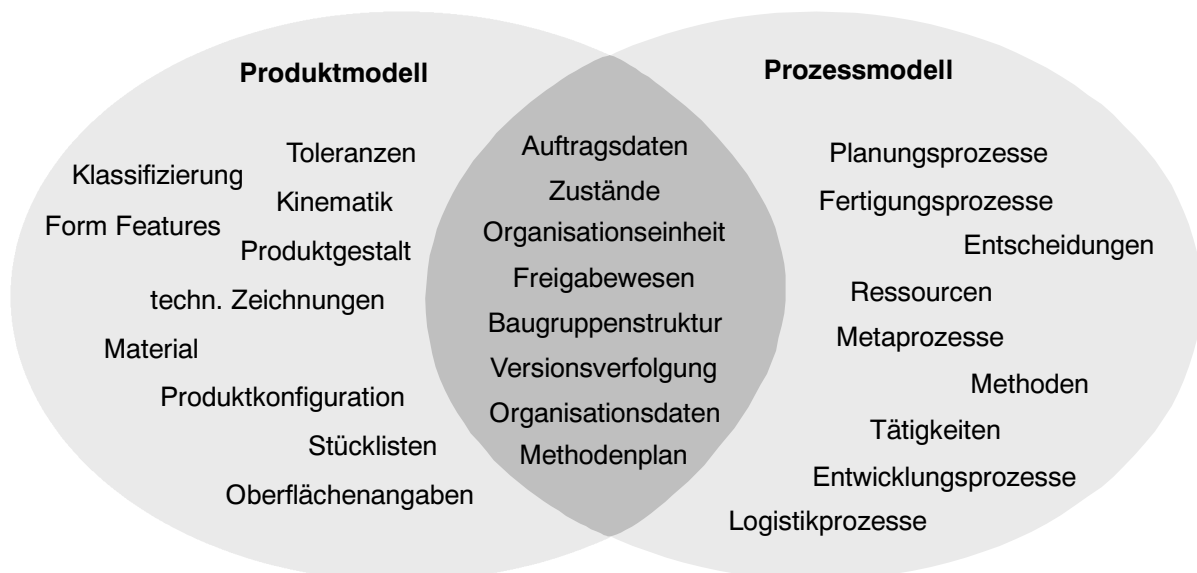
Im Referenzmodell wird hinsichtlich EDM vor allem auf das Management der Simulationsdaten (SDM) eingegangen. Dieses zeigt auf, wann für welche Applikationen im Produktentwicklungszyklus welche Eingangsdaten benötigt werden und welche Re-

sultate und Ergebnisdaten anfallen. Die Hauptaufgaben des SDM sind somit Datenmodellierung und -konvertierung, Workflow Management und Bereitstellung der Kommunikation.

Die Datenverwendung beim Aufbau der Simulationskomponenten, sowohl funktional als auch zeitlich, wird im Workflow festgelegt. Dieser beschreibt die Abläufe im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess. Über die Funktionalität des Datenmanagements wird mit dem Workflow die Datenbereitstellung geregelt. So wird durch koordinierte zeitliche Überlappung von Abläufen eine Verkürzung der Planungszeit erreicht (Concurrent Engineering). Durch die Anwendung dieses koordinierten Vorgehens wird die Planung rationalisiert und abgesichert. Die Funktionen im Datenmanagement zur Datenkonvertierung, -verwaltung und -sicherung stellen die Konsistenz der Daten sicher, vermeiden Redundanz und schützen vor Datenverlust.

### Integrierte Produkt- und Prozessmodelle

Eine Lösungsmöglichkeit für die Integration von Workflow und Maschinenmodell kann im Aufbau eines gemeinsamen Datenmodells bestehen. In [88] wurde jedoch gezeigt, dass dieser Ansatz wegen der hohen Komplexität eines solchen Modells in der unternehmerischen Praxis wenig praktikabel ist und dort nicht weiter verfolgt wurde. Es wurde dagegen ein Informations-Netz mit Hyperlinks im Sinne einer Web-Technologie aufgebaut.



**Abb. 26** Elemente eines integrierten Produkt- und Prozessmodells auf Grundlage von STEP AP 214 [88]

Das hier beschriebene Referenzmodell stellt einen Ausschnitt aus einem umfassenden integrierten Produkt- und Prozessmodell dar. Im Produktion 2000 Projekt GiPP wurde ein solches umfassendes integriertes Modell erarbeitet. Abb. 26 zeigt die dort enthaltenen Elemente zur Modellierung von Produkten und Prozessen und ihre Zuord-

nung auf Grundlage von ISO 10303 / STEP AP 214<sup>10</sup>. Das Modell wurde um Elemente erweitert, die für die integrierte Produkt- und Prozessmodellierung benötigt werden und die durch STEP nicht abgedeckt sind. Elemente, die sich in der Schnittmenge befinden, kommen sowohl im Produkt- als auch im Prozessmodell vor [88].

Für den Aufbau integrierter Produkt- und Prozessmodelle sind drei Datenbereiche relevant, welche die eigentlichen Daten der virtuellen Maschine und das Workflow Management betreffen (vgl. [62]):

1. Die *Produktdaten* sind in Form von Produktmodellen abgelegt, die entweder auf einem Produktdaten-Strukturmodell mit softwarespezifischen Dokumenten (Dateien) oder auf einem integrierten Produktdatenmodell basieren. Wegen der Heterogenität der eingesetzten Simulationswerkzeuge ist die erste Alternative relevant.
2. Die *Prozessdaten* basieren auf dem Ebenenmodell aus Kapitel 3.1.2. Sie bestehen aus generischen Teilprozessen aus der Schemaebene, nicht instanziierten Applikationsmodellen und schließlich aus den instanziierten Prozessen.
3. Die *Wissensbasis* dient zur Interpretation der Abhängigkeiten zwischen Produktstrukturen und Teilprozessen. Die Abhängigkeiten werden durch Regeln beschrieben, die in der Wissensbasis hinterlegt sind.

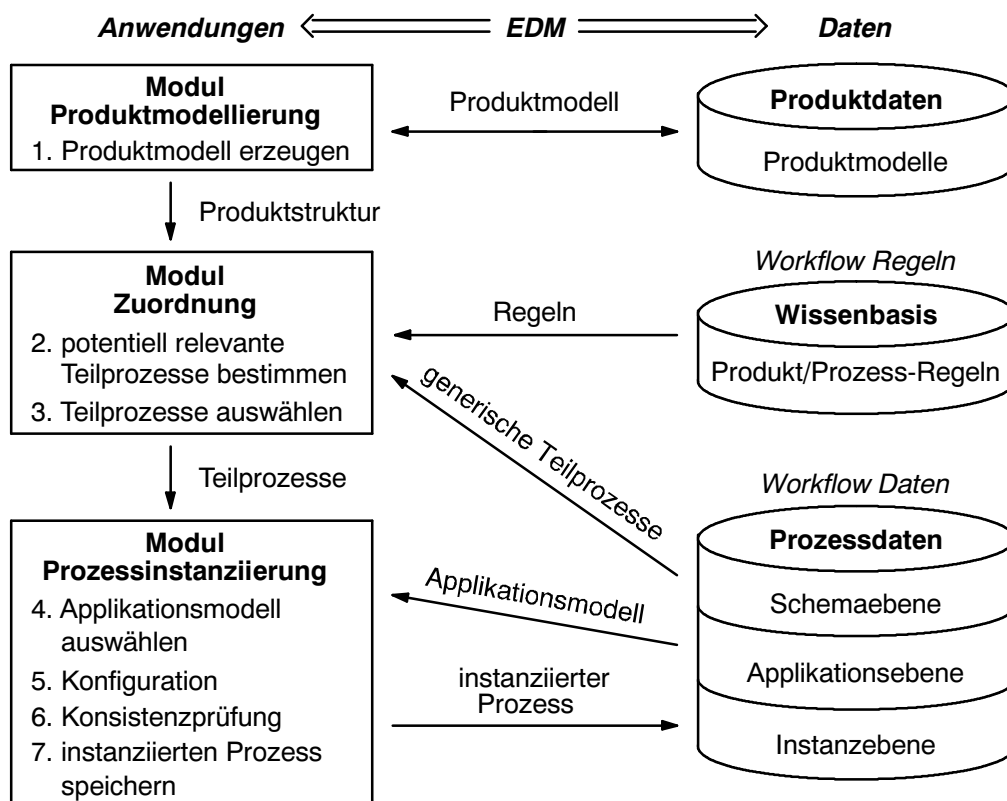
Abb. 27 zeigt, wie diese Daten für die Generierung neuer Produkt/Prozess-Beziehungen genutzt werden. Soll ein neues Produkt entwickelt werden, wird im Modul Produktmodellierung die gewünschte Produktstruktur aufgebaut. Diese kann anhand bereits vorhandener Produktmodelle durch Modifikation erfolgen oder durch Zusammenstellung einer neuen Produktstruktur. Die Wissensbasis enthält über wenn/dann-Beziehungen für das Produktmodell relevante Teilprozesse aus dem generischen Prozessmodell der Entwicklung. Die relevanten Teilprozesse werden aus der Schemaebene in das Zuordnungsmodul geladen und dort je nach spezifischer Produkteigenschaft ausgewählt. Die ausgewählten Teilprozesse werden im Modul Prozessinstanzierung in ein produktspezifisches Applikationsmodell eingefügt. Dabei kommen die Vor- und Nachbedingungen der Teilprozesse und die Reihenfolgeangaben im Applikationsmodell zum Tragen. Anschließend wird die Konsistenz des generierten Gesamtprozesses hinsichtlich der Vor- und Nachbedingungen geprüft. Nach Abschluss der Modellgenerierung wird der instanziierte Prozess gespeichert.

Beispielhaft für das Zusammenspiel der Produkt- und Prozessmodellierung kann der Entwurf einer Maschinenkomponente, z. B. der Entwurf einer Wälzführung für eine Werkzeugmaschine, genannt werden. Die geforderten Leistungsdaten und die Bauweise der Maschine haben Auswirkungen auf die Ausführung der Wälzführung. Ist eine ähnliche Maschine bereits konstruiert worden, kann die Wälzführung ggf. direkt übernommen oder nur leicht angepasst werden. Bei einer Neukonstruktion kann die Wälzführung entweder als Zukaufteil mit entsprechender Spezifikation ausgeführt oder neu konstruiert werden. Dann ist zu entscheiden, ob ein Maschinenelemente-Berechnungsprogramm oder Simulation oder beides für die Auslegung der Führung ein-

<sup>10</sup> STEP Application Protocol Automotive Industry

gesetzt werden soll. Im Falle der Simulation kann weiter nach FEM und MKS differenziert werden. Die gewählten Entwicklungsteilprozesse werden im Zuordnungsmodul mit dem Element Wälzführung aus dem Produktmodell verknüpft und bei der Prozessinstanziierung in das Gesamtmodell der Maschinenentwicklung eingefügt. Dadurch hat der Entwickler bereits in der Planungsphase die Möglichkeit, die Kalkulation der Entwicklungskosten sehr genau an die benötigten Teilentwicklungskosten anzugleichen.

Bei Änderung einer Produktstruktur werden im Zuordnungsmodul entsprechende Änderungslisten generiert. Darin sind die neu hinzugekommenen Teilprozesse aufgeführt, sowie jene, die durch die Änderung überflüssig geworden sind und jene, die durch andere Teilprozesse ersetzt werden.

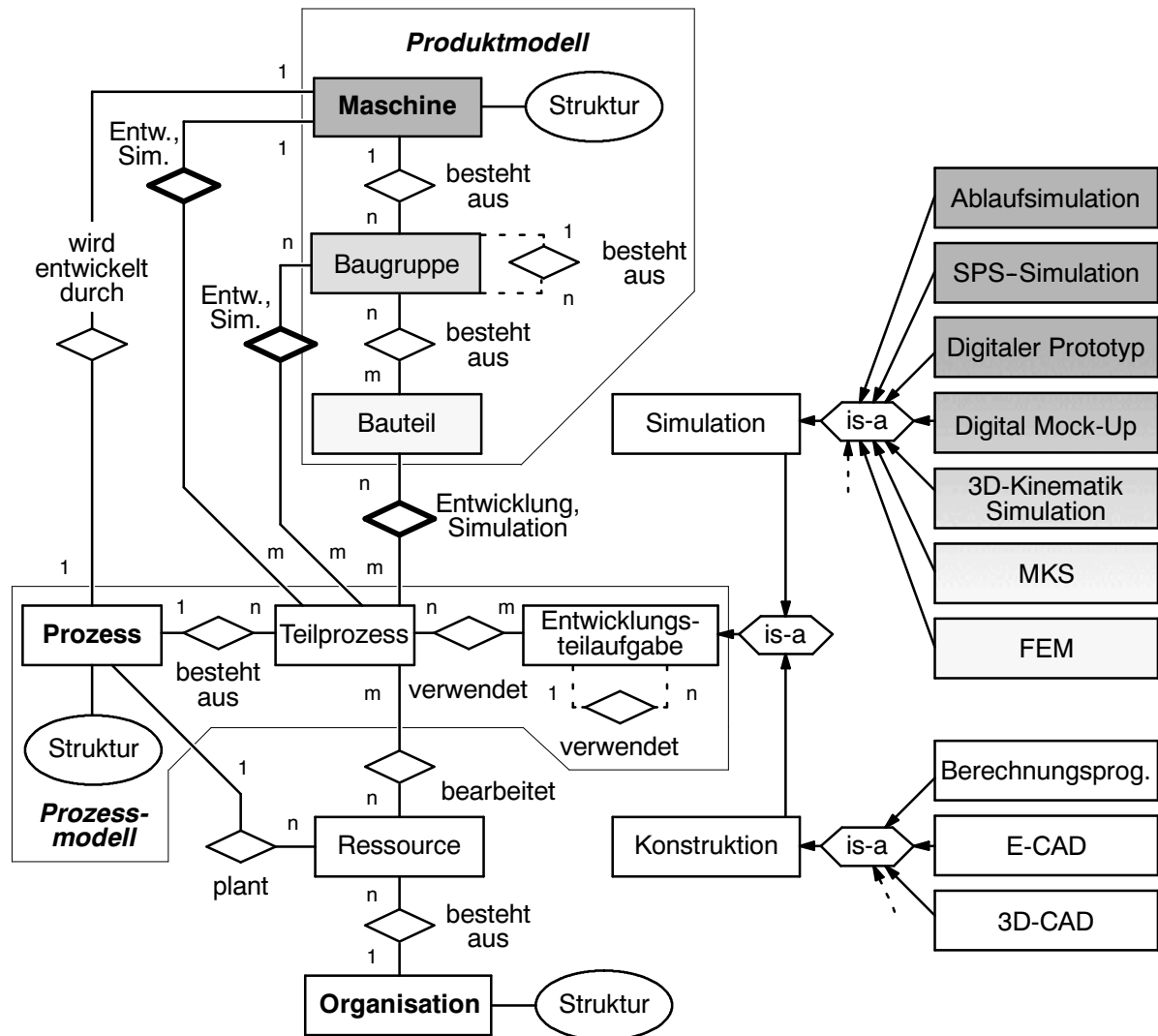


**Abb. 27** Funktionen und Daten zum Aufbau integrierter Produkt- und Prozessmodelle im EDM unter Verwendung einer Wissensbasis (nach [62])

### Referenzmodell maschinennaher Simulationskomponenten

Mit den beschriebenen Bestandteilen lässt sich ein Referenzmodell maschinennaher Simulationskomponenten aufbauen. In Abb. 28 ist das Referenzmodell als Entity-Relationship Modell dargestellt. Es enthält die Integration des Produktmodells der Maschine und des Prozessmodells der Maschinenentwicklung und schließt weiterhin die Ressourcen für die Bearbeitung der Teilprozesse mit ein. Als Ausgangspunkt der Analyse und Modellierung wurden das in [39] vorgestellte Referenzmodell einer parallelen,

integrierten Konstruktion und Arbeitsplanung sowie die Arbeiten in [49] zur Integration von Prozess- und Produktmodellen genutzt.



**Abb. 28** Referenzmodell maschinennaher Simulationskomponenten

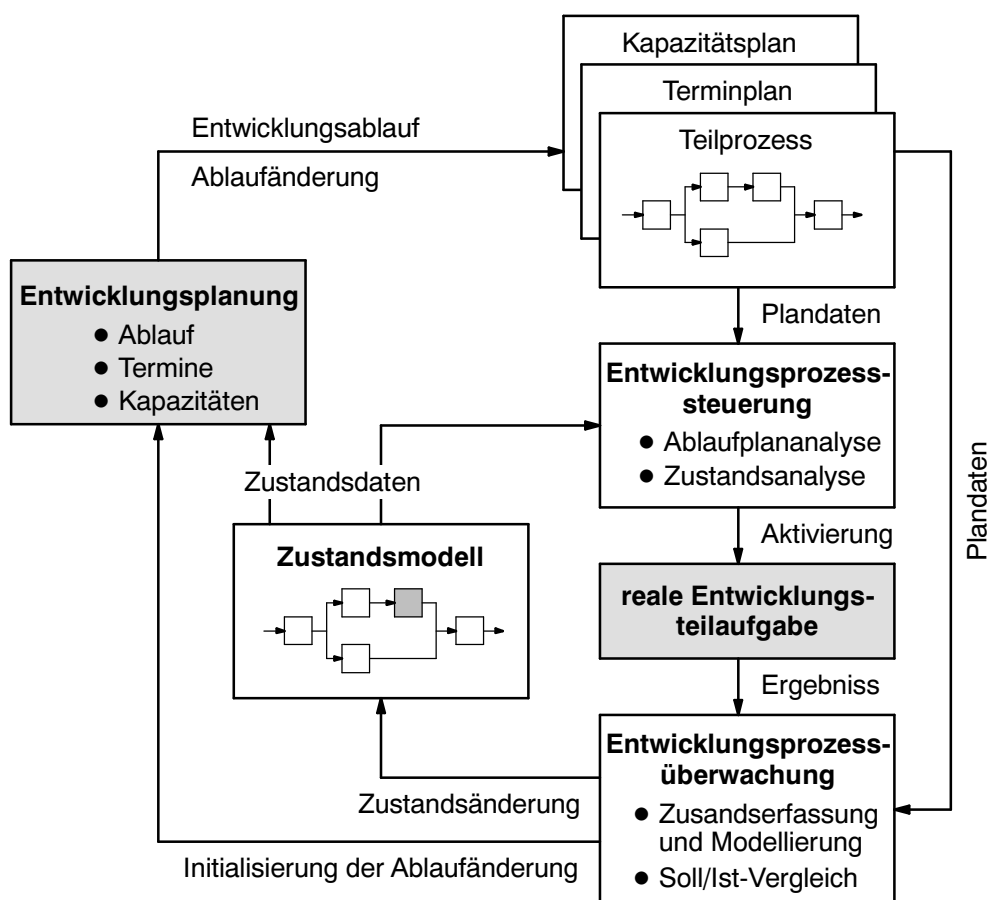
Hinter den Entitäten im Produktmodell liegen die Produktdaten, entweder in einem integrierten Produktdatenmodell oder in einer gemeinsamen Produktdatenverwaltung des EDMS. Die Informationen, die in den Teilprozessen generiert werden, sind nicht explizit modelliert, sie werden im Produktmodell als Daten und Metadaten gespeichert. Das Prozessmodell wird für die Bearbeitung in das Workflow Management überführt, das die Verbindung mit dem Produktmodell herstellt.

Das Referenzmodell unterstützt Simulationskomponenten auf unterschiedlichen Ebenen des Produktmodells. Die Korrelation zwischen den Ebenen des Produktmodells und den darauf angewendeten Simulationsarten ist in Abb. 28 über Graustufen dargestellt. Simulationen können an Bauteilen, Baugruppen oder der gesamten Maschine durchgeführt werden, wobei die Simulation als Entwicklungsteilauflage wieder Eingabedaten aus anderen Simulationen erhalten kann. In Kapitel 3.2.3 wird ein ma-

schinennahes Referenzmodell für die Ablaufsimulation vorgestellt, bei dem für die gesamte Maschine Daten generiert werden, die für die Belange der Ablaufsimulation notwendig sind.

### Steuerung der Teilprozessketten im Workflow

Nach Erzeugung eines geeigneten Gesamtprozesse für die Entwicklung muss vom EDM System der Prozessablauf sichergestellt werden. Dabei sind auch parallel ablaufende Teilprozesse zu berücksichtigen, die vor allem das Concurrent Engineering kennzeichnen. Abb. 29 zeigt eine geeignete Vorgehensweise zur Prozesskettenplanung, -steuerung und -überwachung.



**Abb. 29** Aufgaben im Workflow Management: Planung, Steuerung und Überwachung von Prozessketten in der Entwicklung (nach [118])

Die Entwicklungsplanung orientiert sich am Prozessmodell des Workflow Managements. Die Strukturierung der Teilprozesse lässt sich mit dem Vorgehen der Netzplantechnik [84] vergleichen. Die Teilprozesse im Gesamtentwicklungsablauf werden in der Entwicklungsprozesssteuerung hinsichtlich ihrer Teilaufgaben und ihres Zustandes analysiert, woraufhin die aktuellen Teilaufgaben aktiviert werden. Nach Abschluss der Teilaufgaben werden die Ergebnisse im Produktmodell gespeichert und der neue Bearbeitungszustand im Prozessmodell markiert. Jedoch lassen sich gerade bei Produktentwicklungsprozessen die Ergebnisse nicht vollständig im voraus bestimmen.

Dadurch kommt es zu Abweichungen zwischen dem geplanten Prozess und den realen Ergebnissen. Um solche Abweichungen zu erkennen muss durch die Entwicklungsprozessüberwachung eine wirksame Kontrolle der Abläufe sichergestellt werden. Zum einen werden hier die angeschlossenen Arbeiten erfasst, zum anderen werden Ablaufänderungen an die Entwicklungsplanung zurückgegeben. Beispielsweise kann es sich während einer Entwicklung herausstellen, dass zusätzliche Teilaufgaben für die Erreichung des Entwicklungsziels notwendig sind. Diese Teilaufgaben müssen als Änderung in den ursprünglichen Prozess eingebracht werden, um die Konsistenz des Systems zu wahren.

Weitere Aufgaben im Umfeld der Prozesskettensteuerung sind die Termin- und die Kapazitätsplanung. Mit der Terminplanung wird die Gesamtdauer bzw. der Endtermin und der kritische Pfad bestimmt. Gegenstand der Kapazitätsplanung für Produktentwicklungsprozesse ist die mengen- und zeitgerechte Zuordnung von Mitarbeitern, Anwendungssystemkapazitäten und anderer Ressourcen zu den Teilprozessen [38]. Änderungen und Abweichungen werden wiederum in der Entwicklungsprozessüberwachung registriert und für die Angleichung der Plandaten herangezogen.

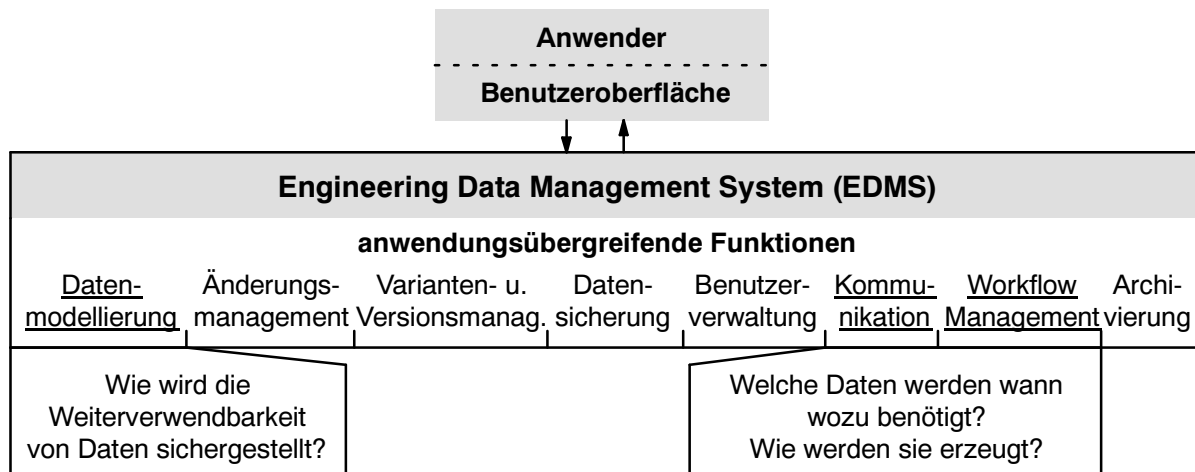
### **Anwendungsmethoden zur Nutzung des Referenzmodells**

Die wichtigsten Funktionen des Simulationsdaten Managements innerhalb eines EDMS wurden bereits aufgeführt. In Abb. 30 sind diese noch einmal zusammengefasst. Für die Anwendung im maschinennahen Referenzmodell sind die Datenmodellierung, das Workflow Management und die Kommunikation von besondere Bedeutung. [88] beschreibt wichtige Methoden und Werkzeuge für die Anwendung integrierter Produkt- und Prozessmodelle. Diese lassen sich auf das SDM übertragen, um so den Zugriff auf die Daten zu koordinieren, mit denen Simulationskomponenten in den unterschiedlichen Teilen des Referenzmodells aufgebaut werden:

- *Standardisierung von Daten*: Durch die Einführung von standardisierten Formaten wird der Austausch von Daten zwischen den unterschiedlichen Modellen deutlich vereinfacht (integriertes Produktdatenmodell). Wünschenswert sind dabei insbesondere Schnittstellen zwischen verschiedenen Anwendungssystemen (CAx, Simulationssysteme).
- *Einsatz von Modell-Bausteinen*: Modell-Bausteine, in denen Workflow- und Simulationsdaten verknüpft abgebildet sind, werden verwendet, um insbesondere Entwicklungsprozesse aufzubauen. Diese Modell-Bausteine haben einen gewissen Standardisierungsgrad und können deshalb situationsabhängig kombiniert werden.
- *Verwendung objektorientierter Ansätze*: Durch Kapselung von detaillierten Workflow- oder Simulationsdaten in Objekten, wird die Verknüpfung in gemeinsamen Modellen vereinfacht. Durch die Objektorientierung ist es auch möglich mit dem

Objekt seine Historie abzuspeichern und so die Teilprozesse, die an dem Objekt durchgeführt wurden, präsent zu halten.

- *Verknüpfung durch Suchmaschinen:* Getrennt vorliegende Workflow- und Simulationsdaten werden durch den Einsatz von Suchmechanismen situativ miteinander verknüpft. Dadurch können beispielsweise alle Geometriedaten ermittelt werden, die für eine bestimmte Simulationsaufgabe benötigt werden.



**Abb. 30** EDM-Systeme und die wichtigsten Funktionen im Simulationsdaten Management (nach [121])

### 3.2.2 Integration von FEM-, 3D-Kinematik, Steuerungs- sowie Ablaufsimulation in das Referenzmodell

In vorherigen Kapitel wurden vor allem Aspekte des EDM im Referenzmodell betrachtet. Ein weiterer entscheidender Punkt beim Einsatz des Referenzmodells maschinennaher Simulationskomponenten ist die wechselseitige Anwendung unterschiedlicher Simulationsarten in einem integrierten Produkt- und Prozessmodell. Die Integration von Anwendungssystemen ist grundsätzlich anzustreben, da durch die Vermeidung wiederholter Eingaben bereits existierender Daten die Abläufe beschleunigt und die Datenübertragungsfehler reduziert werden [43].

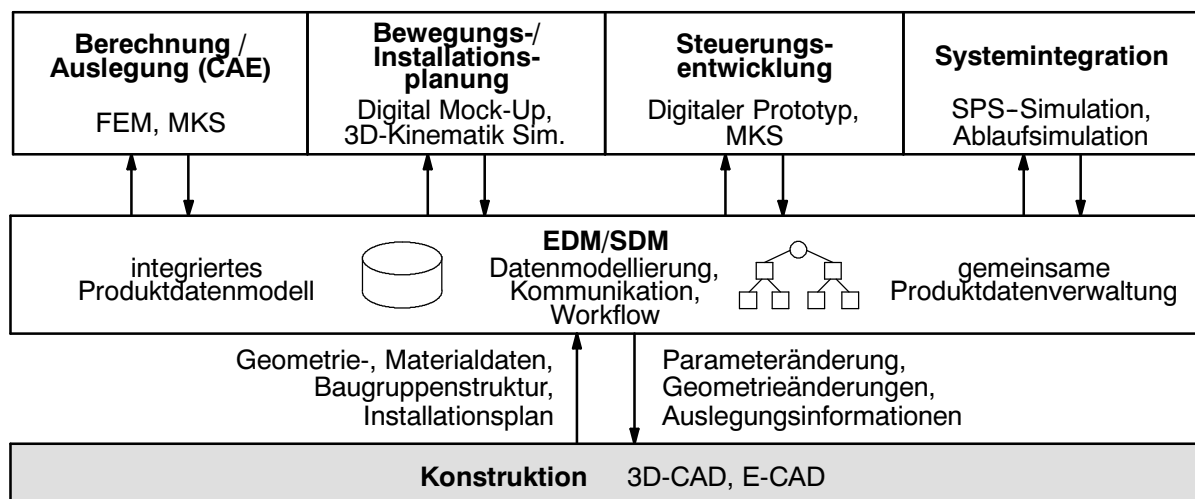
In den unterschiedlichen Entwicklungsteilmodellen treten Überschneidungen der Datenverwendung zwischen den betreffenden Simulationsarten auf. Dabei werden im SDM anhand der gemeinsamen Produktdatenverwaltung global wichtige Daten aus den Bereichen Preprocessing bzw. Modellaufbau und Postprocessing bzw. Auswertung abgelegt, um anderen Ressourcen den Zugriff darauf zu ermöglichen. Dazu ist es notwendig, über geeignete Metadaten eine Verknüpfung von in der Simulation generierten Attributen mit Teilen aus dem Produktmodell herzustellen, wie dies zum Beispiel in [55] mit Hypergraphen oder in [101] mit sogenannten Periphersegmenten gezeigt wird.



Durch die Einführung des hier beschriebenen Vorgehens zur simulationsunterstützten Entwicklung von Maschinen anhand eines Referenzmodells können alle Vorteile virtueller Maschinen auf den unterschiedlichen Planungsebenen genutzt werden. In einem stufenweisen Aufbau können die Teilmodelle unabhängig voneinander implementiert und durch das Simulationsdaten Management verbunden werden. Im folgenden werden die Entwicklungs- und Simulationstätigkeiten für die einzelnen Entwicklungsteilaufgaben im Referenzmodell sowie ihre Integration im SDM beschrieben:

### Teilmodell Konstruktion - Die Basisdaten der virtuellen Maschine

Die Daten aus der Konstruktion werden in allen weiteren Teilmodellen des Referenzmodells benötigt. Neben der reinen Geometrie und den Materialdaten werden auch Information über die Struktur von Baugruppen im CAD generiert, die zum virtuellen Zusammenbau der Maschinen in den Simulatoren verwendet werden (Abb. 31). Die Ergebnisse aus den Simulationen wirken sich im Gegenzug durch Veränderungen der Geometrie aus, wie zum Beispiel Änderung einer Materialstärke, sie geben aber auch grundsätzliche Auslegungsinformationen.



**Abb. 31** Daten der Konstruktion als Basis virtueller Maschinen

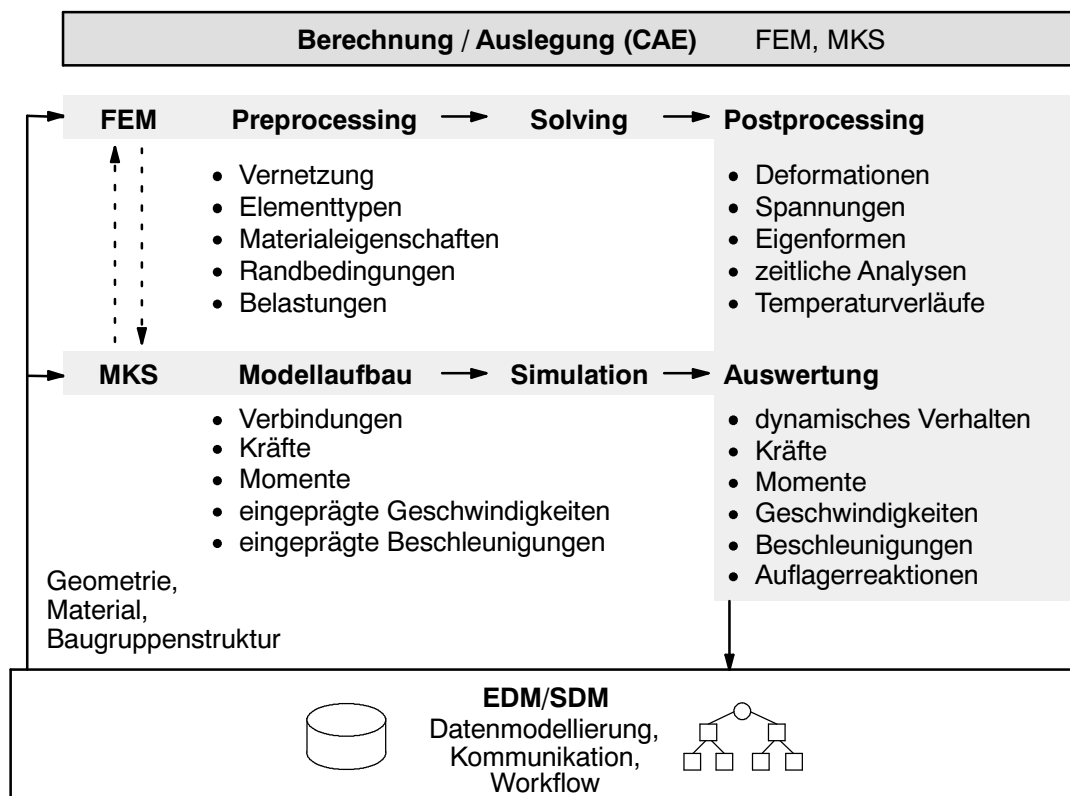
Die Integration von CAD-Systemen in das EDM ist weit fortgeschritten, da das Management von Konstruktionsdaten eine der zentralen Aufgaben von EDM ist. Viele CAD-Hersteller bieten selbst EDM-Systeme an, die auf ihre Produkte abgestimmt sind. Einen weiteren Vorteil für die Integration bringen standardisierte CAD-Datenformate. STEP steht hier für das Ziel eines internationalen Standards. Dieses sehr umfassende integrierte Produktdatenmodell kann bei entsprechendem Entwicklungsstand als Grundlage des gesamten EDM eingesetzt werden. In der Realität muss aber heute noch auf eine gemeinsame Produktdatenverwaltung als Basis des Referenzmodells gesetzt werden, da eine Integration aller Simulationswerkzeuge über STEP noch nicht möglich ist.

Im Konzept der gemeinsamen Produktdatenverwendung erfolgt der Zugriff der Anwendungssysteme auf die Produktdaten ausschließlich über das EDM-System, das diese Daten in einem Produktdaten-Strukturmodell verwaltet. Die Produktdaten bleiben dabei in systemspezifischer Form erhalten [118]. Das Fehlen eines integrierten Datenmodells zwingt zum Datenaustausch über Direkt- oder Standardschnittstellen [65].

### Teilmodell Berechnung / Auslegung (CAE)

Viele Fragestellungen bezüglich der Auslegung und des Betriebsverhaltens von Maschinen lassen sich nur mit speziellen Berechnungsprogrammen oder simulativ lösen. Wesentliche Bereiche betreffen:

- Festigkeit, Stabilität
- Schwingungen
- Wärme, Lüftung
- Aerodynamik, Strömungen, Akustik
- Antrieb, Bremsen, Hilfsantriebe



**Abb. 32** FEM und MKS zur Berechnung und Auslegung von Bauteilen und Maschinen

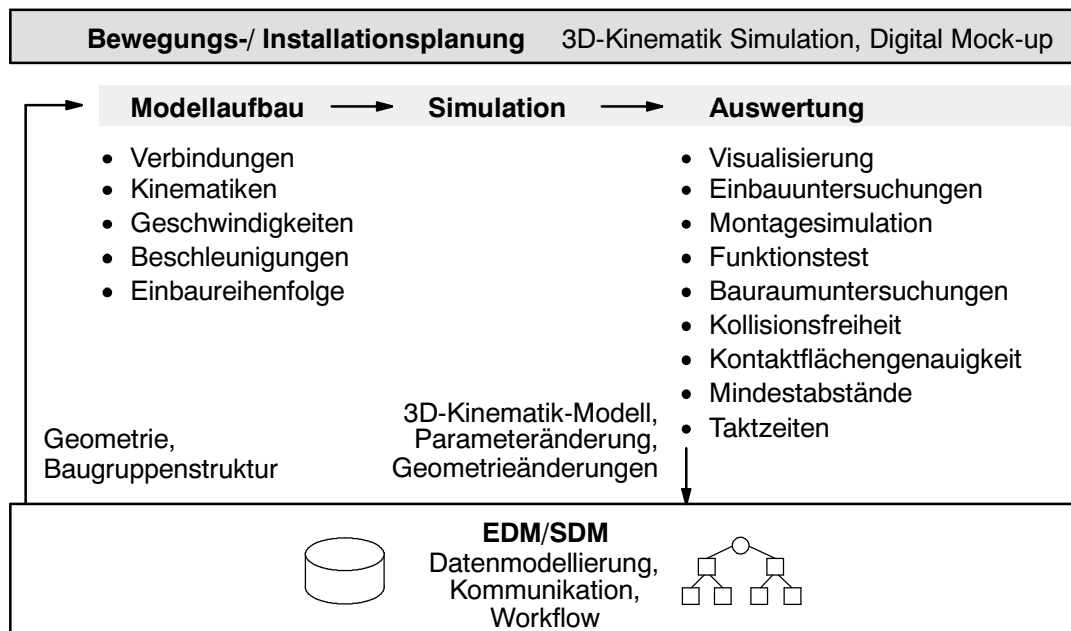
Die Berechnung und Auslegung verläuft zeitgleich oder nach der Konstruktion. Die wichtigsten Simulationsarten im Rahmen der Berechnung und Auslegung, FEM und MKS, sind in Abb. 32 dargestellt. Das SDM hat die Aufgabe, den Programmen die entsprechenden aktuellen Geometrieinformationen zur Verfügung zu stellen und dabei

ggf. eine Datenkonvertierung durchzuführen. Des Weiteren sorgt es im Workflow für die Verzahnung der Konstruktions- und Berechnungsaufgaben.

### Teilmodell Bewegungs-/ Installationsplanung

Mit den Technologien Digital Mock-up und 3D-Kinematik Simulation wird die Konstruktion auf Kollisionen und Beweglichkeit sowie nicht eingehaltene Mindestabstände untersucht. Für die Montage werden die geometrische Passgenauigkeit sichergestellt und notwendige Bewegungsräume ermittelt (Abb. 33). Für den Modellaufbau kann zum Teil auf Daten zurückgegriffen werden, die im Teilmodell Berechnung und Auslegung erzeugt und im SDM abgespeichert wurden, speziell Daten aus dem Modellaufbau der MKS. Es können auch Daten von extern Quellen zum Einsatz kommen, wenn visualisiert werden soll, welches Teil von welchem Zulieferer stammt und wie diese Teile zusammenpassen.

Aus dem Teilmodell Bewegungs- und Installationsplanung geht neben möglichen Konstruktionsänderungen auch ein Modell der Maschine für das Digital Manufacturing hervor. Damit lassen sich Prozessabläufe der Maschine in einer virtuellen Produktion durchführen. Verwirklicht ist dies heute bereits zum großen Teil bei Industrierobotern, bei denen die kinematischen Modelle zur off-line Programmierung in virtuellen Bearbeitungszellen eingesetzt werden.



**Abb. 33** Bewegungs- und Installationsplanung anhand von Versuchsmodellen im Rechner

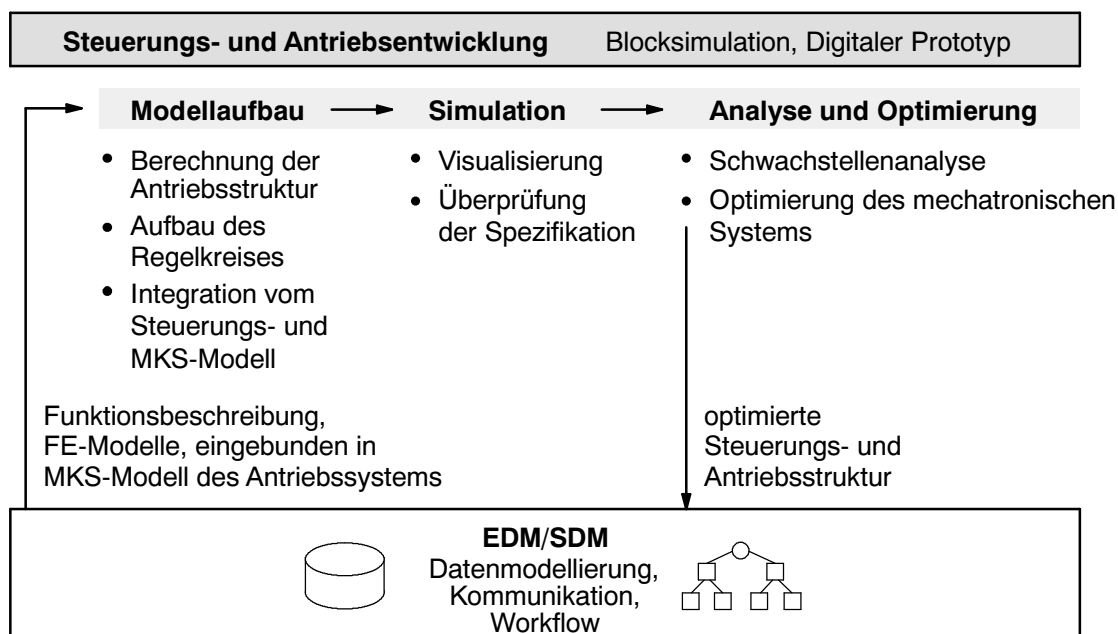
### Teilmodell Steuerungs- und Antriebsentwicklung

Die Entwicklung von Maschinensteuerungen betrifft direkt die Antriebsentwicklung und erfolgt in enger Zusammenarbeit mit der Konstruktion der mechanischen Bau-

gruppen. Die Entwicklung einer Steuerung und die Dimensionierung der Antriebsstruktur stellen komplexe Aufgaben dar, bei denen die Auswahl des Funktionsprinzips und der erforderlichen Komponenten von vielen Einflüssen abhängt. Die dabei festgelegten Parameter definieren die Betriebseigenschaften des gesamten Systems.

Gewöhnlich beginnt die Antriebsentwicklung mit der Analyse der geforderten mechanischen Eigenschaften und mit der Spezifikation der kinematischen Abläufe. Daraus resultiert die Funktionsbeschreibung. In anderen Bereichen der Entwicklung sind bereits FE- und MKS-Modelle von Komponenten des Antriebssystems aufgebaut worden, die nun über das SDM für die Erstellung eines digitalen Prototypen herangezogen werden können.

Beim Modellaufbau für die Steuerungs- und Antriebsentwicklung werden Modellteile und Daten aus den Bereichen Berechnung der Antriebsstruktur, FE-Simulation der mechanischen Übertragungsstruktur, regelungstechnische Blocksimulation und Mehrkörpersimulation zum digitalen Prototypen der Maschine zusammengefasst (Abb. 34). Das setzt die Interoperabilität der verwendeten Systeme voraus. Für den Einsatz flexibler Körper aus der FE-Simulation in einem MKS-System ist heute noch eine modale Ordnungsreduktion notwendig, um das entstehende MKS-Modell handhabbar zu halten. Bei entsprechender Durchführung tritt dabei jedoch kein Verlust relevanter Schwingungseigenschaften auf [103]. Die Integration regelungstechnischer Modelle mit MKS ist heute mit leistungsfähigen Systemen möglich, die Ergebnisse aus Berechnungsprogrammen werden als Parameter im Gesamtmodell verwendet.



**Abb. 34** Steuerungs- und Antriebsentwicklung

Mit der Simulation anhand des virtuellen Prototypen können Schwachstellen der Struktur ermittelt werden, die in einem Optimierungszyklus zu beseitigen sind. Die resultie-

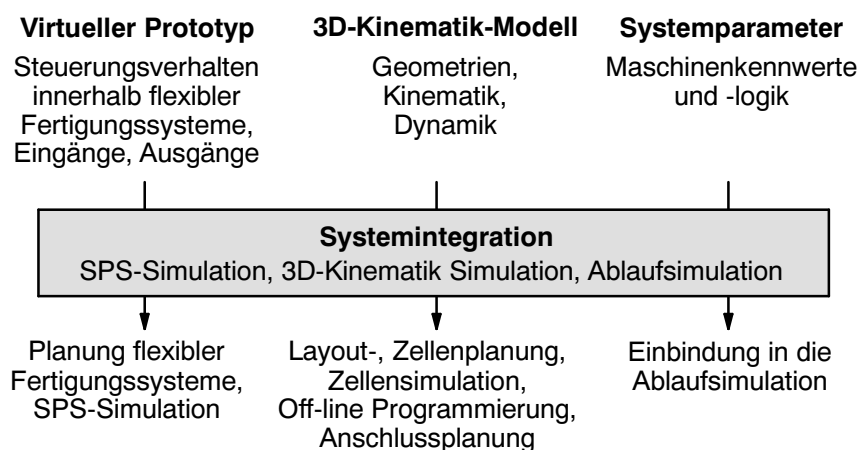
rende Steuerung des Systems und die optimierte Antriebsstruktur werden über das EDM den nachfolgenden Entwicklungsschritten zur Verfügung gestellt.

### Teilmodell Systemintegration

Die in den vorausgegangenen Teilen des Referenzmodells aufgebaute virtuelle Maschine soll nun im Sinne des Digital Manufacturing für die Planung und den virtuellen Betrieb von Produktionssystemen eingesetzt werden. Je nach Anwendungsfall und notwendigem Detaillierungsgrad kann hierzu der digitale Prototyp, das 3D-Kinematik-Modell oder eine Beschreibung des Systemverhaltens herangezogen werden (Abb. 35).

Soll die Maschine in ein flexibles Fertigungssystem integriert werden, wofür die Steuerung zu entwickeln ist, muss der digitale Prototyp mit seinen entsprechenden Ein- und Ausgängen mit der realen Steuerung oder mit einem Modell der Steuerung verbunden werden. Dabei simuliert er sein Systemverhalten, wodurch die Funktion der Steuerung getestet werden kann. Genaue Vorgehensweisen dazu sind in [18] beschrieben.

Für die 3D-Planung von Produktionslayouts oder von Fertigungszellen, für die Zellen-simulation (Kollisionskontrolle, off-line Programmierung) und für die Anschlussplanung kann das 3D-Kinematik-Modell verwendet werden. Dieses bildet die Geometrie und die Bewegungen der Maschine nach. Gegebenenfalls wird für die off-line Programmierung auch ein digitaler Prototyp notwendig, wenn das dynamische Verhalten der Maschine berücksichtigt werden muss. In der Regel reicht aber für die Roboterprogrammierung eine einfache Repräsentation der Kinematik aus.



**Abb. 35** Daten zur Integration virtueller Maschinen in Produktionssysteme

Für die Einbindung der virtuellen Maschine in die Ablaufsimulation von Produktionsanlagen werden Maschinenkennwerte und ggf. die Maschinenlogik benötigt. Damit wird in Verbindung mit den herzustellenden Produkten in der Simulation die Bearbeitungszeit auf der Maschine bestimmt, der Ressourcen- und Personalbedarf ermittelt und die Verknüpfung mit den anderen Komponenten der Fertigung hergestellt. Die notwendigen Parameter können in einer Datenbank gesammelt werden. Über Funktionen des

Simulationsdaten Managements werden dann Simulationskomponenten für die Ablaufsimulation generiert. Auf Details zur Integration virtueller Maschinen in die Ablaufsimulation von Anlagen wird unter 3.2.3 näher eingegangen.

### **Integration von Simulationstechniken**

Neben dem beschriebenen prinzipiellen Zusammenspiel der unterschiedlichen Simulationsarten existieren bereits realisierte Kopplungen zwischen einzelnen Systemen, die meist auf spezielle Anwendungsfälle zugeschnitten sind. Dazu werden hier einige repräsentative Beispiele aufgeführt.

FEM-Berechnungssysteme werden oft abgekoppelt von anderen Simulationswerkzeugen auf Bauteilebene eingesetzt. Es gibt jedoch verschiedene Ansätze, wie die Ergebnisse aus FEM direkt in anderen Anwendungen integriert werden können.

Manche FEM-Programme bieten innerhalb des Postprocessings Optimierungsmodule an, die ein parametrisiertes 3D-Modell optimieren. Dazu wird eine Optimierungsfunktion aufgestellt, die nach jedem FEM-Lauf bewertet wird. Diese Optimierungsmethode kostet bei komplexen Modellen jedoch soviel Rechnerzeit, dass sie für derartige Strukturen noch nicht lohnenswert erscheint [118]. In anderen Ansätzen wird versucht mit wissensbasierten Techniken Strukturoptimierungen voranzutreiben und die optimierten Bauteile an das CAD zurückzugeben [110, 131].

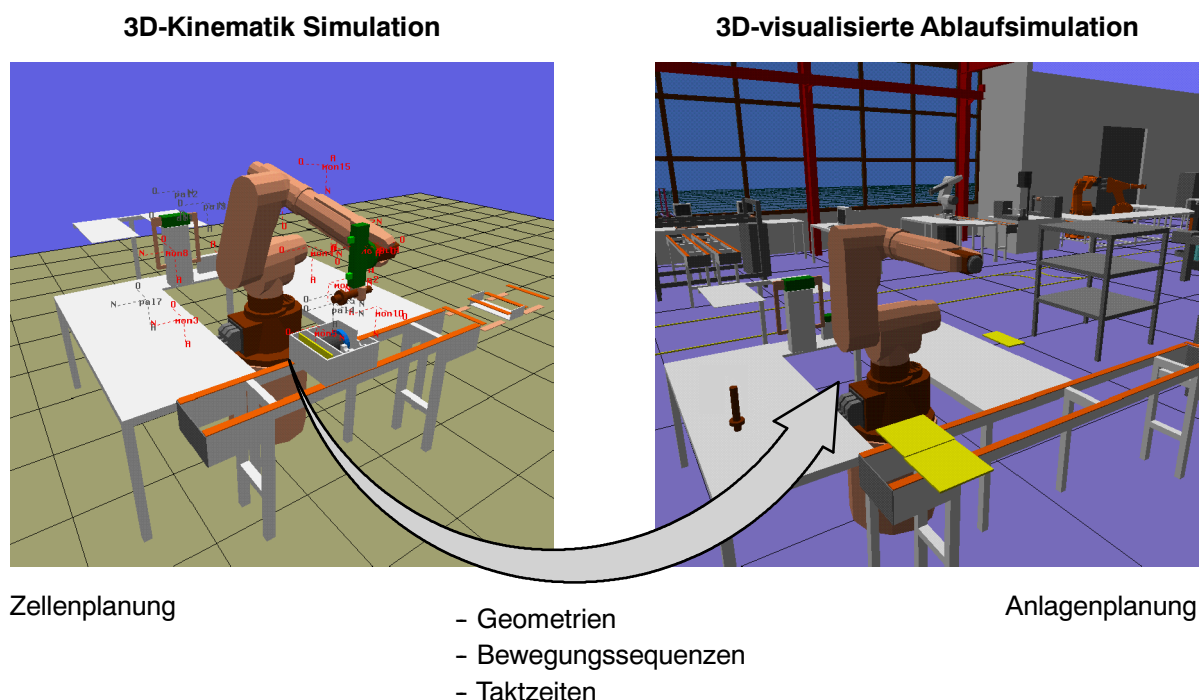
In [66] wird gezeigt, wie FEM mit einem DMU-System (DMU-XPress) gekoppelt werden kann. Dabei werden aus den 3D-Geometriedaten des DMU-Systems Neutralfiles für das FEM-Preprocessing generiert, hier durchgeführt in MSC/PATRAN. Dort werden die gewünschten Belastungsfälle für die Funktionsanalyse oder für die Berechnung von Verformungen definiert. Der Einsatz dieser verformten Modelle im DMU-System erfordert Knotenverschiebungen der Elemente, die das Modell rechnerintern beschreiben. Dazu werden die FEM-Ergebnisse in die Datenstruktur des DMU-Systems zurücktransformiert, mit dem Ziel die verformten Bauteile dort zu visualisieren und mit ihnen Kollisions- und Toleranzuntersuchungen durchzuführen. Die Berechnung des Bewegungsraums elastischer Verformungen ist dabei von besonderem Interesse. Weiterhin dienen Hüllvolumina von sich ausdehnenden Teilen unter Temperaturbelastung als Platzhalter und werden bei der Funktionsanalyse und der Aufteilung des Konstruktionsraums im DMU mit einbezogen.

Ein anderer Ansatz findet im Mehrkörpersimulationssystem ADAMS von Mechanical Dynamics Anwendung. Der Nutzen besteht dabei darin, die FEM-Ergebnisse aus der Bauteilebene und die Mehrkörpersimulation auf Maschinenebene zu integrieren. Dazu werden im MKS-System flexible Körper eingeführt, die auf den in der FEM berechneten Eigenfrequenzdaten basieren. Im dem Verfahren werden die FEM-Daten über ein neutrales Format in das MKS-System importiert. In einem neueren Ansatz lässt sich das MKS-Werkzeug ADAMS auch mit einem DMU-System koppeln (Virtual Workshop von Tecoplan). Dabei werden die Ergebnisse der kinematischen und dynamischen Analysen aus der MKS-Software in das DMU-System überführt und dort zur Kollisions-

untersuchung von bewegten Bauteilen verwendet. In entgegengesetzter Richtung können datenreduzierte Hüllvolumina in das MKS-System zurückgeführt werden.

Im Brite Euram III Projekt MATCAP wird eine durchgehenden Konstruktionsmethodik für Werkzeugmaschinen entwickelt, die ebenfalls auf einem EDM-System basiert. Das EDMS versorgt alle an der Konstruktion beteiligten Abteilungen mit den notwendigen Informationen, die in einer zentralen Datenbank gespeichert sind. Zu Beginn des Entwurfsprozesses werden die Daten, die in aus 3D-CAD-Systemen stammen, in dieser Datenbank gespeichert. FEM und einem Werkzeug zur Kostenvorabschätzung ermöglichen die Analyse dieser Daten. Des weiteren werden die Daten für die Installationsplanung genutzt. Dabei erfolgt die Positionierung und Verkabelung alle elektrischen, hydraulischen und pneumatischen Komponenten anhand eines 3D-Modells.

Die Integration von 3D-Kinematik Simulation und Ablaufsimulation läßt sich am Beispiel der Systeme IGRIP und QUEST der Firma Dassault/Deneb verdeutlichen (Abb. 36). Dabei wird eine flexible Fertigungszelle zunächst in der 3D-Simulation IGRIP modelliert und simuliert, wobei die Bewegungsabläufe und damit die Taktzeiten festgelegt werden. Man kann dann eine so geplante Zelle mit ihrer Geometrie und den Bewegungssequenzen in der Ablaufsimulation QUEST importieren, wo sie für die Layoutplanung und Ablaufuntersuchungen herangezogen werden kann. Die Firma Tecnomatix bietet eine ähnliche Funktionalität für die Systeme ROBCAD und SIMPLE++.



**Abb. 36** Integration von 3D-Kinematik Simulation und Ablaufsimulation

### 3.2.3 Maschinennahe Simulationskomponenten für die Ablaufsimulation

Wie bereits in Kapitel 2 dargestellt, liegt das größte Rationalisierungspotential bezüglich Datenakquisition und Modellerstellung in der Ablaufsimulation (Abb. 20, S. 31). Dies ist der Hauptgrund für die erfolgte detaillierte Ausarbeitung und Realisierung des Teilmodells Systemintegration. Ziel ist es, die Maschinen und Anlagen aus der Entwicklung direkt in der Systemplanung einsetzen zu können. Dazu wird vom Workflow Management entwicklungsbegleitend die Erstellung von Simulationskomponenten für die Ablaufsimulation initiiert. Diese Simulationskomponenten stehen am Ende der Entwicklung als virtuelle Maschinen für weitergehende Planungszwecke zur Verfügung, bzw. dann, wenn die für die Ablaufsimulation notwendigen Parameter bekannt sind. Die Komponenten spiegeln die Geometrie und das Systemverhalten der Maschinen wider, Anwendungsgebiete sind die Layoutplanung und die Systemsimulation bei Planung, Betrieb und Deinstallation von Anlagen. Durch den Einsatz solcher spezialisierter Modellelemente wird die Anwendungsfreundlichkeit der Ablaufsimulation erhöht und gleichzeitig der Aufwand für die Modellerstellung und die Fehleranfälligkeit verringert [93].

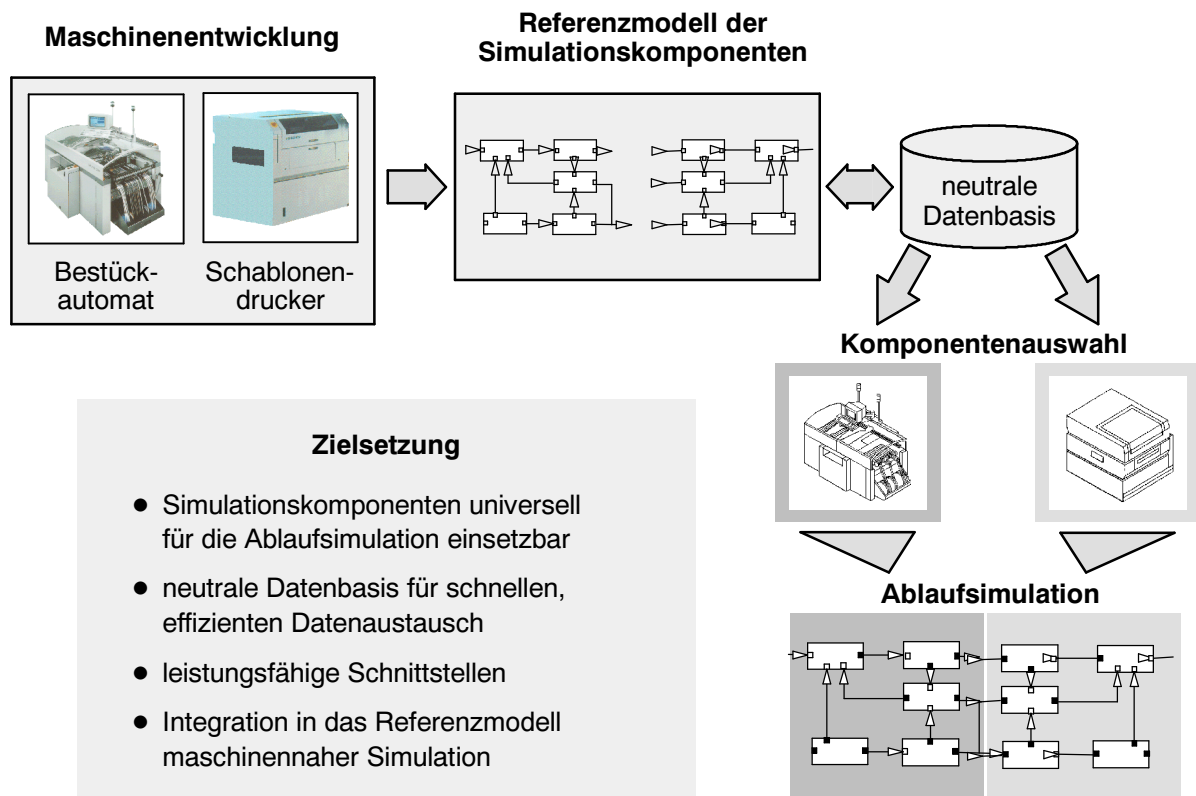
Konkret wurde das Teilmodell maschinennaher Simulationskomponenten in einem Teilprojekt des Bayerischen Forschungsverbundes Simulationstechnik FORSIM zusammen mit den Industriepartnern Siemens und Temic entwickelt<sup>11</sup>. In diesem Teilmodell des beschriebenen Referenzmodells, das auch als Know-how-Speicher aufgefasst werden kann, ist das Fachwissen der Maschinenentwickler hinterlegt und kann anwenderbezogen erweitert werden. Die enthaltenen Modelle von Maschinen dienen in erster Linie der Unterstützung der Systemmodellierung und können beispielsweise von Anlagenherstellern zusammen mit der Komponentenspezifikation angeboten werden. Es besteht so die Möglichkeit, zu den Maschinen Simulationsmodelle anzubieten, die beim Kunden bereits in der Planungsphase als virtuelle Maschinen eingesetzt werden können.

Die maschinennahen Simulationskomponenten im Referenzmodell beschreiben somit konkrete Maschinen hinreichend genau für die Zwecke der Modellbildung zur Ablaufsimulation von Fertigungssystemen. Die enthaltenen Informationen sind, entsprechend dem Einsatzzweck der Komponenten, ausreichend und vollständig. Die Komponenten des Referenzmodells werden in einem von Simulationswerkzeugen unabhängigen Format gespeichert. Sie können über Schnittstellen direkt in ein Simulationsmodell integriert werden (Abb. 37).

Grundlage für die Konzeption und Entwicklung von maschinennahen Simulationskomponenten ist die genaue Analyse der relevanten Maschinen sowie die Definition der daraus resultierenden Anforderungen an die entsprechenden Datenstrukturen. Hier erfolgt die Entwicklung des Modells anhand von Maschinen der Elektronikproduktion, z. B. anhand von Bestückautomaten oder Lötanlagen.

<sup>11</sup> gefördert von der Bayerischen Forschungstiftung





**Abb. 37** Entwicklungsziele für maschinennahe Simulationskomponenten für die Ablaufsimulation

In Tabelle 5 ist eine allgemeine Entwicklungsmethodik für maschinennahe Referenzmodelle dargestellt. Die relevanten Teilaufgaben dieser Methodik wurden auch für den Aufbau des Teilmodells Systemintegration angewandt.

Der erste Schritt war die Modellanalysephase, in der zunächst eine Spezifikation der Repräsentation von Maschinen in der Ablaufsimulation erstellt wurde. Dazu wurden verschiedene Simulationssysteme (u. a. QUEST, SIMPLE++, SIMPLEX) untersucht und Literaturstellen ausgewertet. Nach der Auflösung von vorhandenen Hierarchien in den Beschreibungen und der Vereinheitlichung der Begriffsdefinitionen konnte eine Parameter- und Beziehungsliste aufgestellt werden.

In der Modellstrukturierungsphase wurde vor allem ein Maximal-Parameterbaum mit allen relevanten Parametern für den gewählten Anwendungsbereich Elektronikproduktion aufgestellt, der Grundlage für den Katalog aller Anlagenkomponenten mit ihren jeweiligen Parametern war. In der Modellgenerierungsphase wurde das Teilmodell anhand einer neutralen Datenbasis realisiert. Für die Speicherung der Simulationskomponenten wurde dazu eine relationale Datenbank konzipiert und realisiert, die über schnelle und effiziente Schnittstellen verfügt. Dadurch können die Modelle parallel zur Planung und Realisierung der Anlagenkomponenten entwickelt werden. Die bei den Anlagenherstellern erzeugten Entwicklungsdaten bilden die Grundlage für diese Datenbasis.

**Tabelle 5** Entwicklungsphasen eines maschinennahen Referenzmodells (nach [57, 101])

Modellanalysephase	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Analyse vorliegender Spezifikationen und Modelle</li> <li>● Auflösung von Abkürzungen und unbekanntem Begriffen</li> <li>● Vergleich mit Modellen aus Literatur und Praxis</li> <li>● Auflösung von Hierarchien</li> <li>● Erstellung einer Parameter- und Beziehungsliste der untersuchten Modelle</li> </ul>	<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">maschinenbezogene Informationen</div> <div style="margin: 5px 0 5px auto;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Analyse und Entwurf</div> <div style="margin: 5px 0 5px auto;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Informationsmodell</div> </div>
Modellstrukturierungsphase	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Sicherung der syntaktischen und semantischen Eindeutigkeit</li> <li>● Entwicklung eines Maximal-Parameterbaums (Zusammenfassung aller für den Anwendungsbereich relevanten Parameter)</li> <li>● Anlegen von Parameterkatalogen (Zuordnung der Parameter zu spezifischen Produktmerkmalen)</li> <li>● klare Definition der Input/Output-Beziehungen</li> </ul>	<div style="text-align: center;"> <div style="margin: 5px 0 5px auto;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Spezifikation</div> <div style="margin: 5px 0 5px auto;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Datenmodell</div> </div>
Modellgenerierungsphase	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Erstellung der Teilmodelle für die unterschiedlichen Simulationsarten</li> <li>● Erstellung von Transformationsregeln zwischen den Einsatzbereichen des Referenzmodells</li> </ul>	<div style="text-align: center;"> <div style="margin: 5px 0 5px auto;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Implementierung</div> <div style="margin: 5px 0 5px auto;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Datenstrukturmodell</div> </div>
Modelloptimierungs- und Ausbauphase	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Initialisierung des Modells mit Realdaten</li> <li>● Erweiterung der Parameterkataloge und Ableitung typischer Ausprägungen des Referenzmodells (Integration weiterer Simulationsarten, Branchen Anpassung)</li> <li>● Aufbau des Beziehungsgeflechts zwischen Parameterkatalogen, Transformationsregeln und Workflowinformationen</li> <li>● Anreicherung der Modelle mit Zusatzinformationen</li> <li>● Erweiterung und Optimierung der Modelle durch Vergleich mit branchenspezifischen Spezialmodellen, Validierung</li> <li>● IT-gestütztes Management der Referenzmodelle (Simulationsdaten Management)</li> </ul>	<div style="text-align: center;"> <div style="margin: 5px 0 5px auto;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Optimierung</div> </div>

Die Optimierungs- und Ausbauphase diente schließlich zur Herstellung der Praxistauglichkeit und Erstellung der Werkzeuge zum Modelltransfer. Die Schnittstellen der Datenbasis ermöglichen die Übergabe der Referenzmodelle an die Kunden. Über sie werden die Modelle an die Anforderungen der Kunden und die jeweiligen Simulationssysteme angepasst. Durch die Schnittstellen werden auch Möglichkeiten geschaffen,

bei Änderungen der Anlagenkomponenten seitens der Hersteller die modifizierten Daten direkt für die Anpassung der Simulationsmodelle zu nutzen.

Des Weiteren wurden Werkzeuge für die effiziente Parametrierung und Initialisierung der späteren Simulationsmodelle entwickelt, um den Aufwand für den Anwender möglichst gering zu halten. Dies trägt zur Fehlervermeidung bei der Systemmodellierung bei, nutzbare Ergebnisse liegen schneller vor.

Details zu diesem Vorgehen und die konkrete Umsetzung finden sich in den Kapiteln 4 und 5.

### **3.3 Anforderungen an den betrieblichen Einsatz des maschinennahen Referenzmodells für der Ablaufsimulation**

Nach der Erörterung der Anwendungsmöglichkeiten des Referenzmodells und des informationstechnischen Hintergrundes muss auf die Anforderungen von Seiten der Anwender eingegangen werden, um die Akzeptanz des Systems und die Realisierbarkeit sicherzustellen.

#### **3.3.1 Betriebliche Einflüsse auf den Referenzmodelleinsatz**

In der Elektronikproduktion kommen komplexe, hochautomatisierte Anlagenkomponenten zum Einsatz, deren Modellierung einen enormen Aufwand darstellt. Besonders für mittelständische Unternehmen in dieser Branche ist das Aufwand-Nutzen-Verhältnis einer Simulationsstudie bisher inakzeptabel. Um die Akzeptanz von Simulationswerkzeugen bei Planern zu steigern, müssen die Werkzeuge einfach zu bedienen sein und verwertbare Ergebnisse generieren. Die Referenzmodelle müssen vom Abstrahierungsgrad detailliert genug für realistische Betrachtungen sein, dürfen den Benutzer aber nicht durch unnötig komplexen Aufbau abschrecken.

Gerade in der Elektronikindustrie lässt sich durch simulationsunterstützte Auftragsreihenfolgeplanung eine Verbesserung der Anlagenproduktivität erzielen. Jedoch wird gefordert, dass ein Simulationssystem ergonomisch und offen sein soll, um den Planer in allen Planungsphasen wirksam zu unterstützen. Durch den Einsatz von Referenzmodellen soll dabei eine deutliche Vereinfachung erzielt werden. Dabei ist das zu entwickelnde System aus Referenzmodell, Schnittstellen und angebundene Simulatoren zukunftsicher zu gestalten, um die weitere Verwendung sicherzustellen.

#### **3.3.2 Abstimmung der Zielsetzung auf die Benutzeranforderungen**

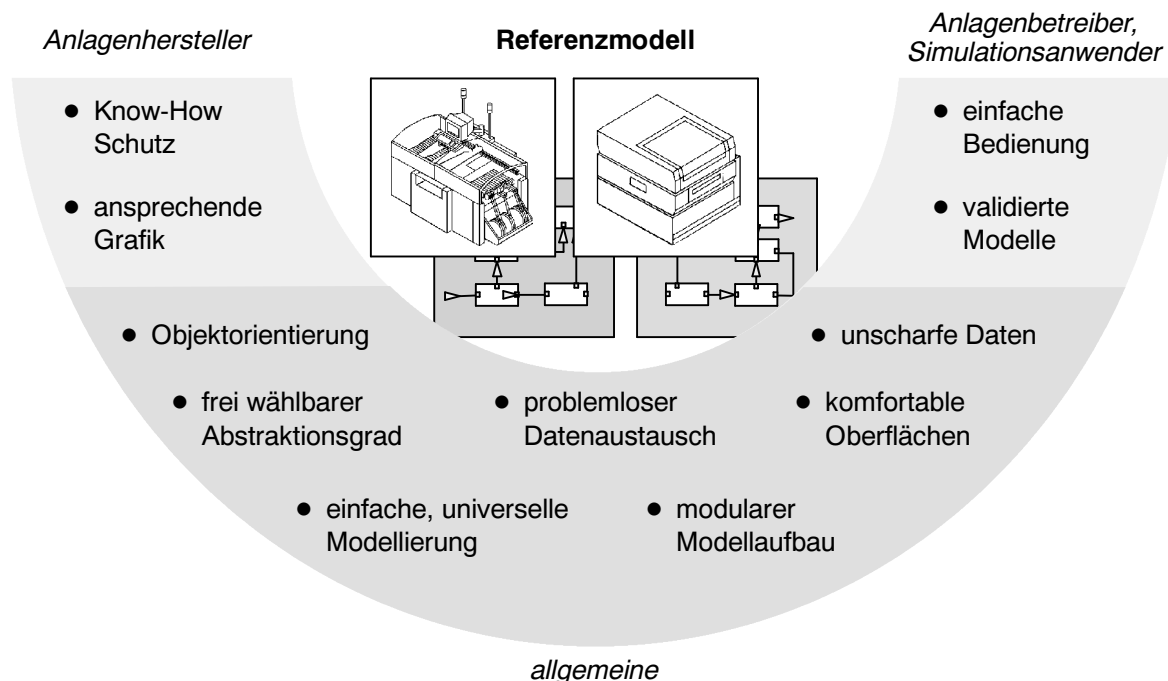
Um die Akzeptanz des entwickelten Referenzmodells zu gewährleisten, wurden auf Grundlage der Studie "Simulation - Schlüsseltechnologie der Zukunft?" [105] mit ver-

schiedenen Industriepartnern Gespräche zu deren Wünschen und Anforderungen geführt. Dabei ergaben sich folgende Defizite beim Einsatz von Simulation:

- zusätzlicher Zeitaufwand
- Mangel an qualifizierten Mitarbeitern
- Simulation zu kompliziert
- Diskrepanz zwischen Simulation und Realität

Weiterhin wurde in der erwähnten Studie nach Wünschen der Simulationsanwender gefragt. Unter anderem wurden dabei Verbesserungen bei der Modellierung und Validierung genannt. Eine einfache und universelle Modellierung für unterschiedliche Anwendungsfälle steht dabei an oberster Stelle. Der Abstraktionsgrad der Modellierung sollte frei wählbar sein. Weiterhin sollte eine konsequente Objektorientierung realisiert sein und ein modularer Modellaufbau mit guten Strukturierungsmöglichkeiten erleichtert werden. Auch wurde der Wunsch geäußert, mit unscharfen Daten simulieren zu können. Diese Anforderungen flossen direkt in das Konzept zur Realisierung des Referenzmodells ein.

Einen hohen Stellenwert nahmen weiterhin die Schnittstellen ein. Es wurde ein problemloser Datenaustausch gefordert. Dies betrifft im Falle des maschinennahen Referenzmodells speziell die reibungslose Integrierbarkeit der Komponenten in die Zielsimulatoren.



**Abb. 38** Benutzeranforderungen an ein maschinennahes Referenzmodell

Die Verbesserung der Bedienbarkeit der Systeme war der wichtigste Wunsch der Anwender. Neben allgemeiner Softwareergonomie wurde der Wunsch nach einer übersichtlichen Gestaltung der grafischen Benutzeroberfläche genannt. Speziell besteht

das Bedürfnis nach einer anwendergerechten Gestaltung der Oberflächen in gewohntem Windows-Stil, mit selbsterklärender, transparenter Menüführung. Dies wurde bei der Entwicklung der Werkzeuge zur Nutzung und Anwendung des Referenzmodells beachtet.

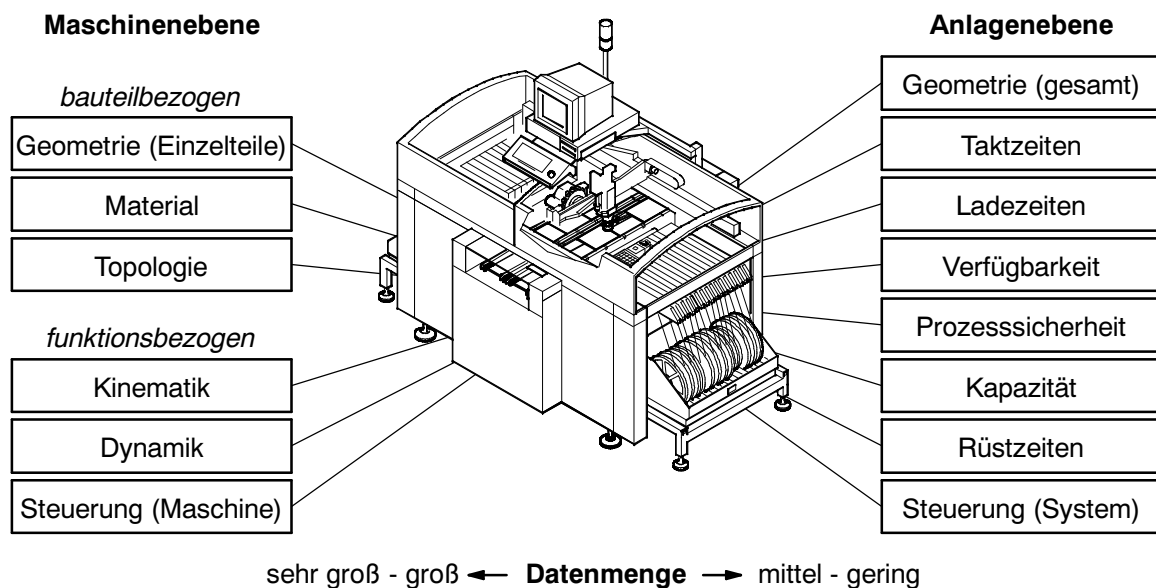
Neben den genannten Anforderungen, welche die Simulationstechnik allgemein betreffen, gibt es für ein maschinennahes Referenzmodell spezielle Anforderungen, da diese sowohl von Anlagenherstellern, als auch von Anlagenbetreibern verwendet werden. Die Anlagenhersteller wollen mit dem Referenzmodell auch vertriebstechnische Aspekte abdecken. Der Vertrieb soll die Modelle beim Kunden bei der Anlagenpräsentation vorstellen, wobei auch grafische Gesichtspunkte zu berücksichtigen sind. Das Referenzmodell soll dabei die Anlagen zwar ausreichend gut beschreiben, der Konkurrenz aber nicht die Möglichkeit geben, die Funktionsweise der Maschinen feststellen zu können. Für Anlagenbetreiber ist es wichtig, die enthaltenen Modelle problemlos und einfach in ihre Simulationsumgebung integrieren zu können. Dort wird auf validierte Bausteine Wert gelegt, die das reale Verhalten der Maschinen widerspiegeln.

## 4 Maschinennahe Simulation am Beispiel der Elektronikproduktion

Die Elektronikproduktion wurde als Beispieltechnologie für eine detaillierte Ausarbeitung des Referenzmodells und die prototypische Implementierung gewählt. Anhand dieser Technologie kann der Einsatz aller beschriebenen Simulationsarten gezeigt werden. In der Elektronikproduktion kommen v. a. in der Bestücktechnik für elektronische Bauelemente hochautomatisierte Maschinen zum Einsatz, bei denen während der Entwicklung FEM-, Mehrkörper-, Kinematik- und Steuerungssimulationen durchgeführt werden. Bei der späteren Systemintegration der Maschinen ist eine genau Bestimmung der Bestückzeiten notwendig, um die Auslastung der Anlagen möglichst optimal planen zu können. Diese muss von Simulationsmodellen der Maschinen gewährleistet werden.

Der Einsatz des maschinennahen Referenzmodells teilt auf zwei prinzipielle Anwendungsfelder: die Maschinenentwicklung und die Systemintegration. Die Daten für die Entwicklung betreffen alle Teile aus denen die Maschine besteht, inkl. der Maschinensteuerung. Auf der Anlagenseite ist das Betriebsverhalten der Maschinen wichtig. Entsprechend dieser Aufteilung sind in Abb. 39 die relevanten Daten in den Anwendungsfeldern dargestellt.

Im folgenden Kapitel wird näher auf die Maschinenebene und die Anwendung des Referenzmodells bei der Maschinenentwicklung eingegangen. Danach wird der Prototyp einer Datenbasis für den systemneutralen Einsatz maschinennaher Simulationskomponenten auf Anlagenebene vorgestellt.

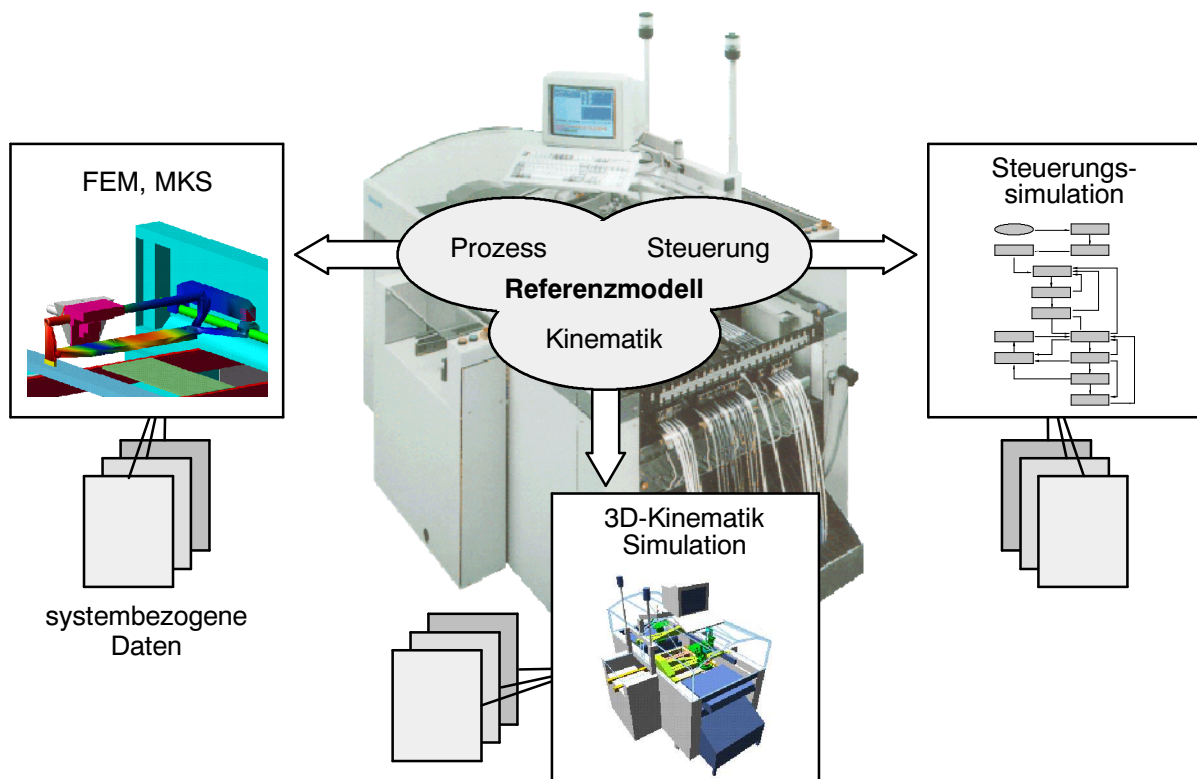


**Abb. 39** Maschinennahe Simulationsdaten in Produktentwicklung und Anlagenplanung

## 4.1 Simulationsdaten der Maschinenentwicklung

Entwicklung und Konstruktion von Maschinen in der Elektronikproduktion stellen komplexe Aufgaben dar. Auch die unterschiedlichen Simulationsaktivitäten in diesem Bereich erfordern umfangreiches Expertenwissen. Um die prinzipielle Integration der Maschinenentwicklung in das Referenzmodell zeigen zu können, beschränken sich die weiteren Ausführungen zunächst auf den Maschinentyp Bestückautomat. Dabei handelt es sich um aufwendige Maschinen im Bereich der Fertigung elektronischer Baugruppen. Des Weiteren werden vor allem Aspekte der Datenintegration bei unterschiedlichen Entwicklungsaufgaben betrachtet, nicht Details der Maschinenentwicklung selbst.

Da die Integration von FEM, MKS, Steuerungs- und 3D-Kinematik Simulation gezeigt werden soll, muss im EDM heute noch auf eine gemeinsame Produktdatenverwaltung zurückgegriffen werden, da, wie bereits erläutert, ein umfassendes integriertes Produktdatenmodell nur für ausgewählte Prozessketten anderer Bereiche zu Verfügung steht [118]. Die Hauptanwendungen der Simulation in der Bestückautomatenentwicklung sind in Abb. 40 dargestellt, wobei das Referenzmodell als Kern des Simulationsdaten Managements die Datenverteilung und Konvertierung hin zu den einzelnen Aufgabenbereichen sicherstellt.



**Abb. 41** Gemeinsame Produktdatenverwaltung für unterschiedliche Simulationsanwendungen bei der Entwicklung von Bestückautomaten

### 4.1.1 Simulation von Bestückvorgängen

Die Forderungen der Elektronikindustrie nach immer feineren Rastermaßen der Bauelemente und dabei immer höheren Bestückleistungen muss durch die Neuentwicklung und Optimierung von Bestücksystemen Rechnung getragen werden. Bestückautomaten sind gekennzeichnet durch schnell bewegte translatorische und rotatorische Achsen, die mit hoher Präzision positioniert werden müssen. Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung ist die Vorherbestimmung des Betriebsverhaltens von Bestückmaschinen und ihrer Komponenten durch Simulation. Der Anwendungsbereich der numerischen Simulation in diesem Bereich ist derzeit vor allem durch den Festigkeitsnachweis und die Bestimmung von Eigenfrequenzen der schnell bewegter Bauteile gekennzeichnet [78, 98]. Ein Beispiel ist die Ermittlung des transienten Verhaltens eines Bestückkopfes an einer bewegten Achse beim Beschleunigen und Abbremsen (Abb. 42). Auch die Ermittlung der Eigenschwingungen des Maschinengestells wird durchgeführt, um Resonanz zu vermeiden. Das Ziel der Simulationsanwendungen besteht in der Gewichts- und Steifigkeitsoptimierung der betrachteten Baugruppen und Bauteile. Aus diesen Ergebnissen werden geeignete Maßnahmen zur Optimierung der Maschine abgeleitet; dies kann eine Optimierung durch konstruktive Änderungen oder die Wahl andere Werkstoffe sein.

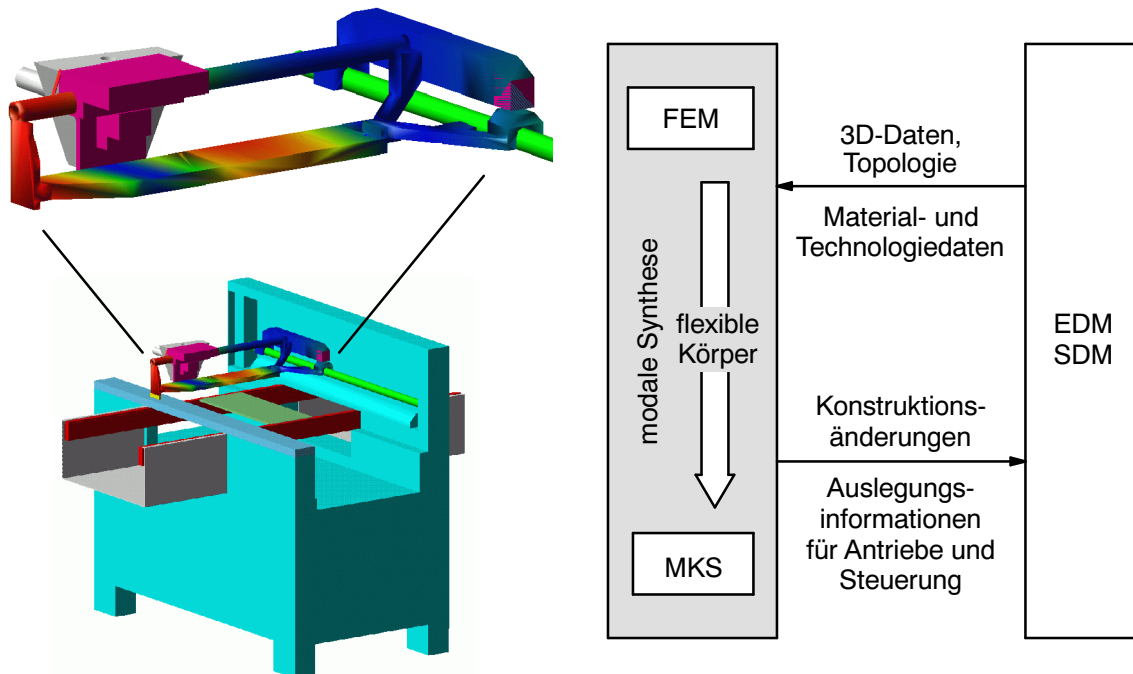
Ein weiteres Anwendungsgebiet der numerischen Simulation an Bestückautomaten ist die Ermittlung von thermischen Einflüssen auf die Maschinenkomponenten während des Betriebs. Dabei werden als Wärmequellen die Antriebe und Reibungserwärmung und die damit verbundene Materialverformung berücksichtigt, die einen Einfluss auf die Genauigkeit der Bestückvorgänge haben.

Bei den genannten Anwendungen ist festzustellen, dass eine integrierte Betrachtung der einzelnen Einflussgrößen im Gesamtsystem Maschine-Technologie nicht stattfindet. Es werden jeweils einzelne Einflussgrößen messtechnisch erfasst und darauf aufbauend Modelle für genau dieses Problem erstellt. Für die umfassende simulative Betrachtung, beispielsweise der Maschinenfähigkeit, ist dieses Vorgehen noch nicht ausreichend.

Die Nachteile bei Einsatz von Simulation in der Maschinenentwicklung lagen in der getrennte Betrachtung von thermischen, dynamischen oder technologischen Einflüsse in unabhängigen Modellen mit unterschiedlichen Simulationswerkzeugen. Dadurch können die Größen, die bei Maschinen- und Prozessfähigkeitsuntersuchungen aus den Teilbereichen Systeme, Prozesse und Materialien einfließen, nicht an einem einheitlichen Simulationsmodell untersucht werden [25]. Außerdem bleiben Wechselwirkungen und Überlagerungen unberücksichtigt, sie zeigen sich erst bei der experimentellen Untersuchung der Maschinenfähigkeit, was zu langen Iterationsschleifen von mehreren Wochen zwischen der Entwicklung mit CAD-Systemen und der Erprobung der Maschinen sowie langen Entwicklungszeiten führt [109]. Diese Nachteile sollen u. a. in einem FORSIM II Projekt "Ermittlung der Maschinenfähigkeit durch integrierte Si-



mulation thermischer und dynamischer Einflüsse” durch den Aufbau eines übergreifenden Modells in einem erweiterten Simulationswerkzeug beseitigt werden.



**Abb. 42** Ermittlung des transienten Verhaltens eines Bestückkopfes an einer bewegten Achse beim Beschleunigen und Abbremsen (vgl. [25])

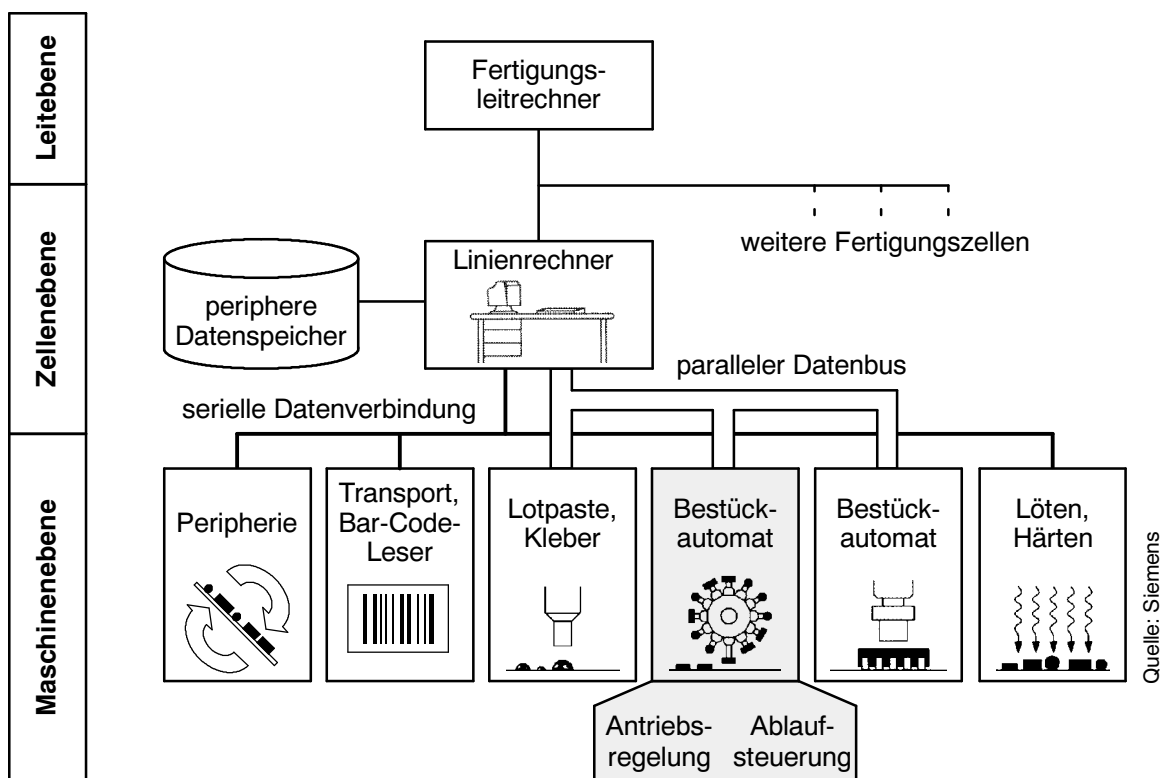
#### 4.1.2 Simulation der Bestückautomatensteuerung

Die Produktivität von Bestückautomaten bzw. Bestücklinien hängt wesentlich von der Leistungsfähigkeit und der Flexibilität der eingesetzten Steuerungs- und Softwaresysteme ab. Zur Steuerung von flexiblen Fertigungssystemen haben sich hierarchische Steuerungslösungen etabliert [85]. Hierbei werden vier Planungsebenen unterschieden (Maschinensteuerungen, Zellenrechner, Leitreechner, PPS), die sich vor allem durch den jeweils betrachteten Planungshorizont unterscheiden. Diese Hierarchie lässt sich, wie in Abb. 43 dargestellt, auch bei der Steuerung von Bestücklinien wiederfinden [40].

Bei der Maschinensteuerung von Bestückautomaten lässt sich ein regelkreisbasierter Teil zur Antriebsregelung und ein ereignisbasierter Teil zur Ablaufsteuerung unterscheiden. Die Achsen moderner Pick-and-Place Bestückautomaten werden nicht mehr mit einfachen Rampenfunktionen beschleunigt und abgebremst, je nach Bestückweg und Orientierung der Bauelemente werden dafür Kurvenfunktionen gefahren, die für die jeweilige Bestückaufgabe optimiert sind. Dadurch werden die kinetischen Einflüsse auf die am Bestückkopf bewegten Bauelemente möglichst gering gehalten, um ein Verrutschen schwererer Bauteile zu vermeiden. Dies wird von der Antriebsregelung gewährleistet. Die Ablaufsteuerung ist vor allem für die Koordination der Ereignisse zuständig. Dadurch werden unterschiedliche Zustände und Aktionen

im Automaten ausgelöst, die für die Bestückaufgabe und periphere Funktionen (Warten auf Daten, Warten auf Leiterplatte, Fehlerzustand, Rüstkontrolle, usw.) notwendig sind.

Bezüglich der Simulation kommen Blocksimulatoren für die Auslegung der Abtriebsregelung zum Einsatz, die Ablaufsteuerung wird mit Programmierwerkzeugen entworfen, die herstellerspezifisch für die ereignisbasierte Maschinensteuerung sind. Die Ergebnisse aus numerischen und experimentellen Untersuchungen der Dynamik von Systemkomponenten dienen bei der Auslegung der steuerung- und regelungstechnischen Konzepte als Eingangsgrößen [111, 120]. Virtuelle Bestückmaschinen, die aus einem MKS-Modell der Maschine und einem Steuerungsmodell bestehen, sind jedoch noch im Entwicklungsstadium.



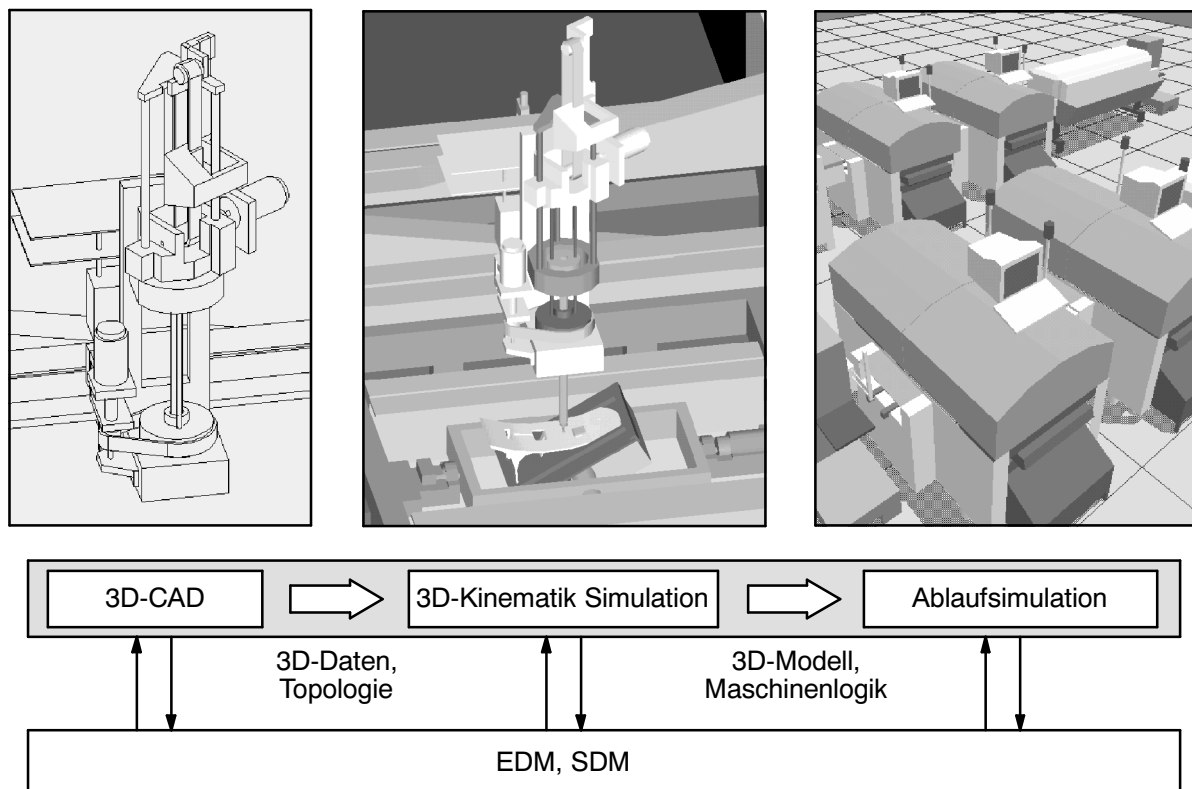
**Abb. 43** Hierarchische Steuerungslösung in der Elektronikproduktion

### 4.1.3 3D-Kinematik Simulation von Bestückautomaten

Speziell durch die Entwicklung neuartiger räumlicher elektronischer Schaltungsträger (3D-MID) kommt der 3D-Kinematik Simulation bei der Konstruktion von Bestücksystemen heute größere Bedeutung zu [14]. Das Zusammenspiel zwischen der Handhabung des 3D-MIDs auf einem Werkstückträger und der Bestückerichtung kann so genau untersucht und überprüft werden (Abb. 44). Durch diese Design-Review lassen sich Konstruktionsmängel des Bestückautomaten erkennen und die Bestückbarkeit unterschiedlicher Schaltungsträger überprüfen.

Das 3D-Kinematik Modell wird aus den 3D-CAD Daten der Maschine aufgebaut. Es dient als Entwurfsmodell für neue Bestückkonzepte, zu Kollisionsuntersuchungen, zur Taktzeitermittlung und kann schließlich auch bei der off-line Programmierung der Maschinen herangezogen werden, um die Bestückprogramme zu verifizieren. Dabei werden aus den 3D-Daten der Schaltungsträger automatisch Bestückprogramme für die Bestückautomaten bzw. Bestückroboter generiert, die, bevor sie auf den realen Maschinen zum Einsatz kommen, zunächst anhand der 3D-Kinematik Simulation auf Korrektheit überprüft werden [28]. Untersucht werden hierbei die Handhabung der Schaltungsträger, die kollisionsfreie Bestückung aller Bauelemente und, wie erwähnt, die zu erwartende Taktzeit.

Die 3D-Modelle, die für die Kinematik-Simulation oder ein Digital Mock-Up erstellt wurden, können des weiteren über das SDM an eine 3D-visualisierte Layoutplanung oder Ablaufsimulation übergeben werden (Abb. 44). In der Ablaufsimulation lassen sich auch die Ergebnisse aus der Steuerungssimulation und den Taktzeitermittlungen nutzen, da mit ihnen Logikbausteine generiert werden können, welche das Systemverhalten der Maschinen repräsentieren.



**Abb. 44** Verwendung von 3D-Konstruktionsdaten für die Kinematik-Simulation und den Aufbau virtueller Maschinen

## 4.2 Analyse und Strukturierung der Anlagenkomponenten für die Systemintegration

Die Systemintegration virtueller Maschinen der Elektronikproduktion ist der Bereich des Referenzmodells, der detailliert ausgearbeitet und prototypisch realisiert wurde. Das prinzipielle Vorgehen wurde bereits in Kapitel 3.2.3 aufgezeigt. Im folgenden werden die Modellanalyse- und Modellstrukturierungsphase zum Aufbau systemneutraler Simulationskomponenten für die Ablaufsimulation erläutert.

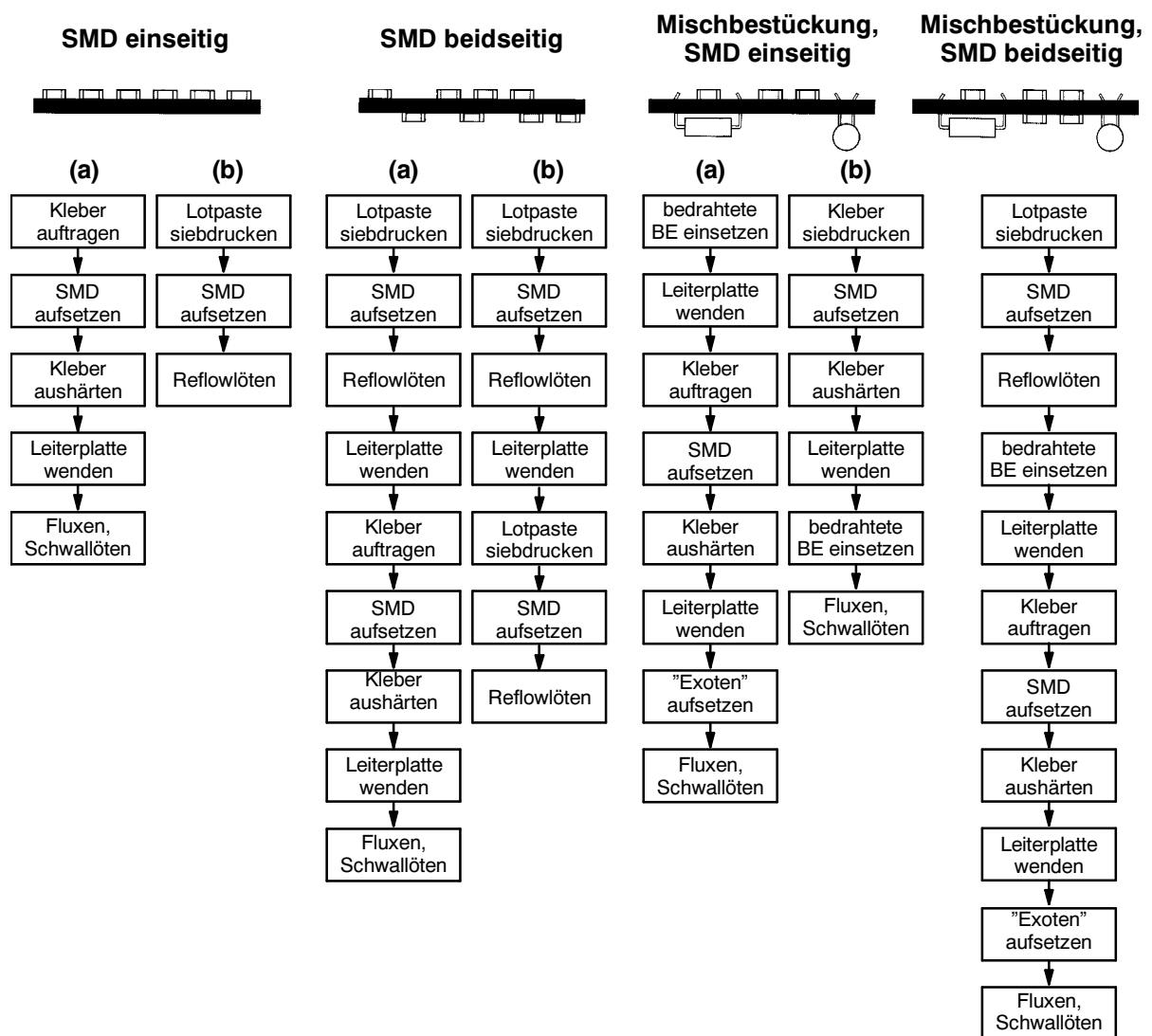
### 4.2.1 Analyse der Abläufe in der Elektronikproduktion

Zu Beginn der Entwicklung eines Referenzmodells steht die Analyse aller relevanten Anlagenkomponenten. Dies sind hier alle Maschinen, die in der Elektronikproduktion Anwendung finden. Dazu wurden Hersteller zu Anlagenkomponenten in der Elektronikproduktion befragt und Marktübersichten sowie wissenschaftliche Veröffentlichungen ausgewertet. Aus den gesammelten Informationen wurde ein Katalog mit einer kompletten Übersicht über die möglichen Fertigungsverfahren und -konzepte in der Elektronikproduktion erstellt [47, 68, 97, 108, 114].

Die Technologie der herzustellenden Leiterplatten bedingt die Fertigungsschritte der Flachbaugruppen und die benötigten Produktionseinrichtungen. Heute wird dabei der Trend zur reinen Oberflächenbestückung (SMT) deutlich. Wie in Abb. 45 mit den Varianten (a) und (b) dargestellt, gibt es jedoch für unterschiedliche Technologien alternative Methoden. Es werden aber weiterhin auch bedrahtete Bauelemente verwendet, wenn etwa Stecker oder große Kondensatoren benötigt werden. Die rein bedrahtete Bestückung ist in Abb. 45 nicht aufgeführt. Es wurden jedoch auch Modelle für die automatische Bestückung von radialen, axialen und DIP-Bauelementen erstellt.

Für die Herstellung unterschiedlicher Leiterplattentypen wird eine der dargestellten Prozesssequenzen ausgeführt. Jeder der Fertigungsschritte erfordert mindestens eine Bearbeitungsstation. Alle verwendeten Stationen sind in den Arbeitsplänen der Flachbaugruppen aufgeführt. Die Arbeitspläne bilden die Grundlage für die Dispositions- und Steuerungsebene des Ablaufsimulationsmodells.

In Abb. 45 sind nur die eigentlichen Fertigungsschritte dargestellt. Test- und Reparaturstationen sind firmen- und produktspezifisch zwischen diesen Schritten angeordnet. Diese Qualitätssicherungsmaßnahmen sind wieder aus den Arbeitsplänen ersichtlich und müssen ebenfalls in ein Simulationsmodell zur Ablaufsimulation integriert werden.



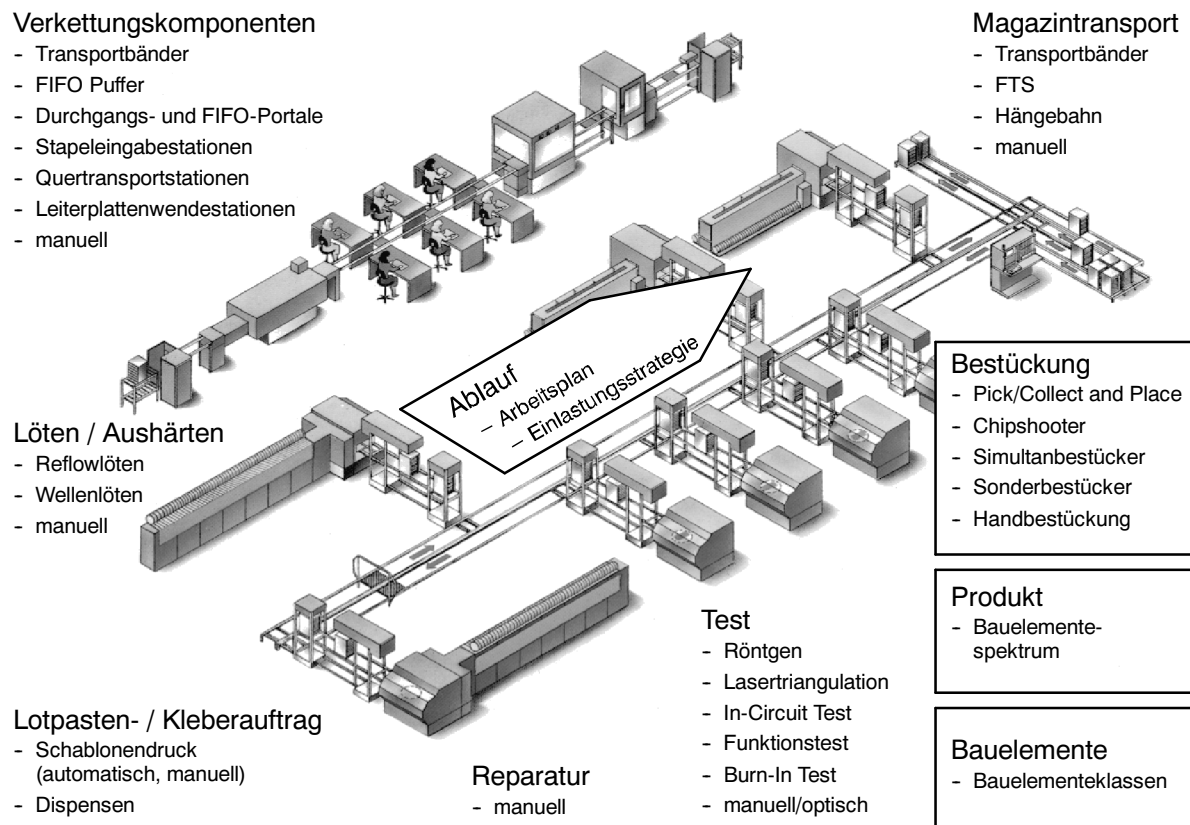
**Abb. 45** Fertigungsschritte für unterschiedliche Leiterplattentypen (nach [47])

## 4.2.2 Bestimmung relevanter Komponenten

Nach der Analyse der Abläufe in der Elektronikproduktion wurden alle verwendeten Anlagenkomponenten bestimmt. Die für Ablaufsimulation relevanten Komponentenklassen mit ihren Ausprägungen sind in Abb. 46 dargestellt. Es wurde eine Kombination aus Objektklassen der Simulationstechnik (vgl. auch [1, 128]) und aus Fertigungsschritten der Elektronikproduktion gewählt, die zum einen die grundsätzlichen Anforderungen an die Simulation und zum anderen das einfache Verständnis der Anwender gewährleisten. Die Klassen der Produktionsmittel sind im einzelnen:

- Lotpasten- / Kleberauftrag
- Bestückung
- Löten / Aushärten
- Test
- Reparatur
- Verkettungskomponenten
- Magazintransport

Der wichtigste Aspekt für die Simulation ist die Bestückung der Bauelemente. Hier liegt oft der Engpass bei der Flachbaugruppenfertigung und hier kommen die komplexesten Maschinen zum Einsatz. Daher wird auf die Modellierung dieser Maschinen besonderes Augenmerk gelegt.



**Abb. 46** Simulationsrelevante Anlagenkomponenten in der Elektronikproduktion

Eine besondere Rolle beim Aufbau der Datenbasis für das Referenzmodell nehmen folgende drei Klassen ein:

- Produkte
- Bauelemente
- Ablauf (Arbeitspläne, Auftragseinlastung)

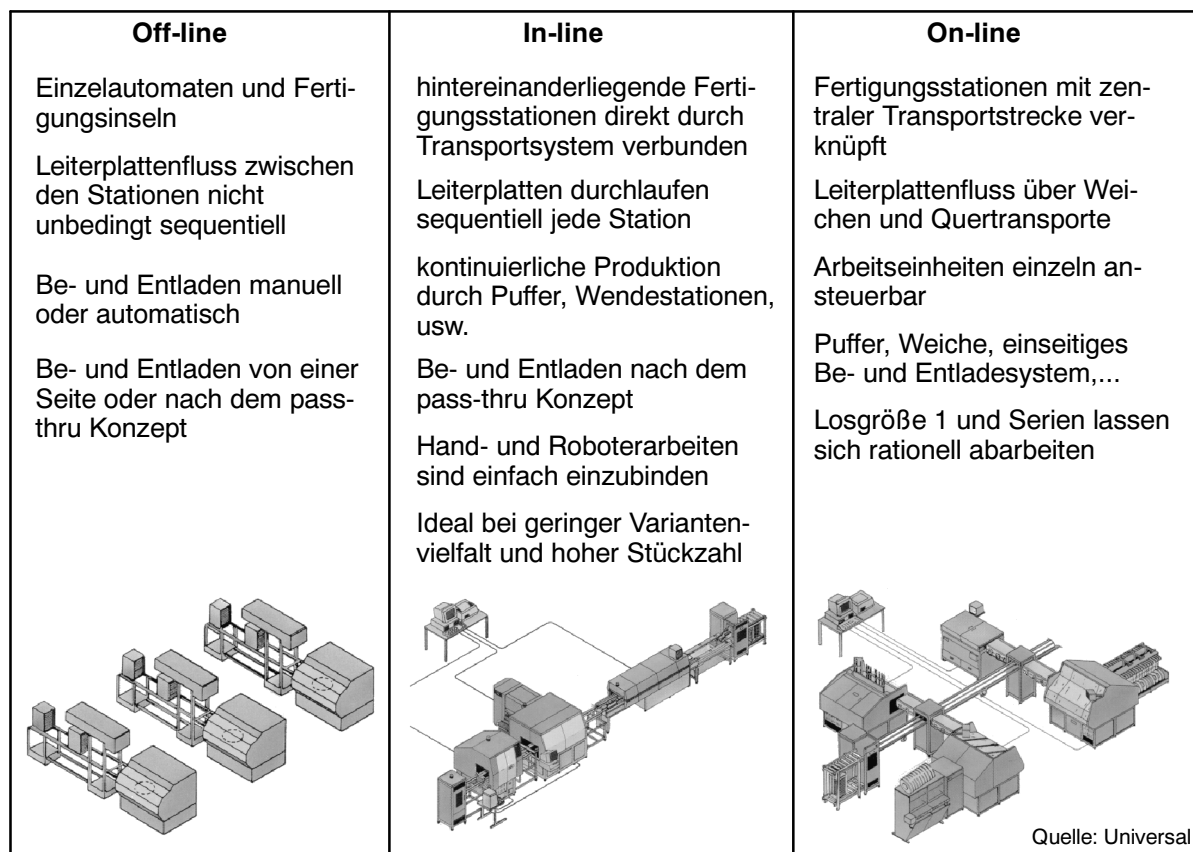
Entscheidend für die Ermittlung der Bearbeitungszeiten auf den Bestückstationen ist das Bauelementespektrum der Produkte bzw. Leiterplatten. Die Bauelemente können zu Klassen zusammengefasst werden. Verschiedene Typen von Bauelementen benötigen unterschiedliche Bestückzeiten. Die Bestückzeiten für die jeweiligen Bauelementeklassen auf einer Station ergeben sich aus dem Produkt der Bauelementanzahl und der Bestückzeit pro Bauelement auf dieser Station. Typische Bestückzeiten sind beispielsweise 0,15 Sek. für kleine Chip-Bauelemente auf einem Chipshooter oder 1 Sek. für einen BGA auf einem Pick-and-Place Automaten. Um die Bearbeitungszeit einer Leiterplatte zu ermitteln, werden die Bestückzeiten für alle im Bauelementespektrum enthaltenen Bauelementeklassen addiert.

Der Fertigungsablauf bestimmt den Weg der Leiterplatten durch die Produktion und ist in den Arbeitsplänen festgelegt. Sie bilden die Grundlage der Simulationsläufe. Weiterhin gibt es für Optimierungszwecke unterschiedliche Einlastungsstrategien. Dabei sollen Rüstzeiten minimiert und die Auslastung der Anlagen gesteigert werden. Auch diese Strategien müssen in einer Simulation berücksichtigt werden, um realistische Ergebnisse zu liefern. Ansätze zur Generierung realistischer Auftragsreihenfolgen für die Simulation werden in Kapitel 6 dargestellt.

### 4.2.3 Definition von Abhängigkeiten

Die Fertigungsschritte bei der Flachbaugruppenfertigung werden in der durch die Arbeitspläne vorgegebenen Abfolge ausgeführt. Dabei kann die Fertigung jedoch, wie in Abb. 47 dargestellt, unterschiedlich organisiert sein. Der Materialfluss erfolgt zwischen den einzelnen Anlagen, die entweder off-line, in-line oder on-line angeordnet sind. Eine Fertigung kann dabei mehrere verschiedene Linienkonzepte beinhalten, die für unterschiedliche Produkte ausgelegt sind.

Bei der Entwicklung der Datenbasis für das Teilmodell Systemintegration werden die Verknüpfungsmöglichkeiten der Anlagen im Rahmen des Materialflusses so gestaltet, dass sich alle auftretenden Linien- und Fertigungskonzepte im späteren Simulationsmodell realisieren lassen (siehe Kapitel 7.2).



**Abb. 47** Linienkonzepte in der Elektronikproduktion

#### 4.2.4 Systematische Katalogisierung der Komponenten

Die Komponentenklassen wurden bereits in Abb. 46 mit ihren Ausprägungen dargestellt. Eine detaillierte herstellereinspezifische Unterteilung wird hier nur für die Bestückautomaten vorgenommen, da sich die Modelle aller anderen Klassen über einfache Parameteranpassungen an jede Ausprägung angleichen lassen (Instanziierung). Bestücksysteme der in Tabelle 6 aufgeführten Hersteller wurden katalogisiert und in die Datenbank mit den Simulationskomponenten aufgenommen.

**Tabelle 6** Berücksichtigte Hersteller von Bestücksystemen

Amistar	harotec	Samsung
Baumann	HEEB-INOTEC	Sanyo
CASIO Yamagata	Intelliplace	SEF Electronic
Contact Systems	Manz	Siemens
Create	MDC	TDK Electronics
Daum	Mimot	Tenryu Technics
DIMA	MPI	Tenryu
ERNI	Multitroniks	Tescon
Essemtec	MYDATA	Tresky
Europlacer Indust.	Nitto Kogyo	TWS
Finetech	OK-International	Universal
FRITSCH	Panasonic	Versatronics
Fuji	Philips	Zevatech
Häcker	Quad	

Die unterschiedlichen Automatenmodelle der Hersteller wurden den Klassen der Bestückautomaten zugeordnet, die in Abb. 48 dargestellt sind. Diese Zuordnung bedingt die notwendigen Parameter für die Berechnung der Fertigungszeiten.

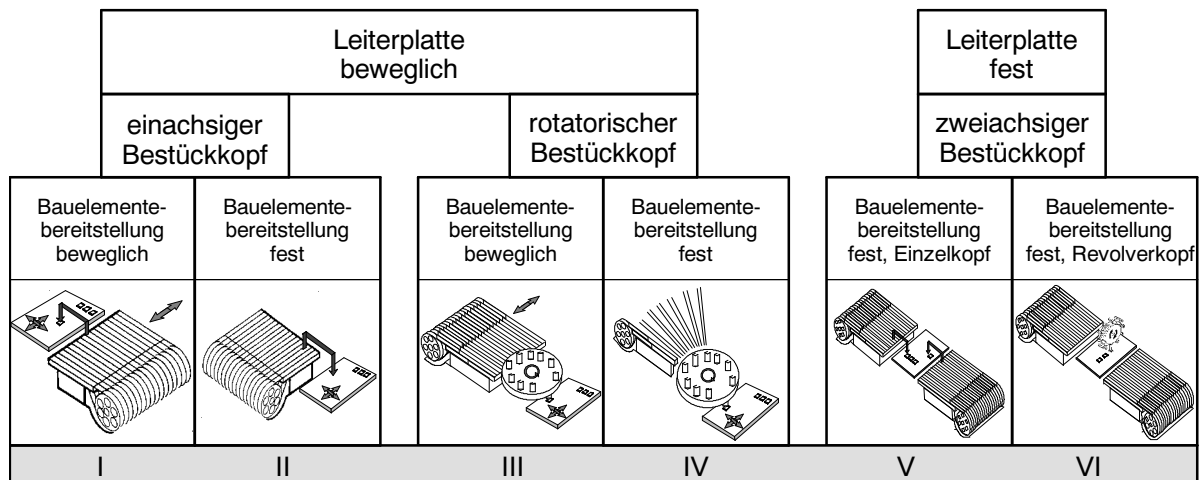
### 4.3 Erforderliche Parameter für die Ablaufsimulation

Nach Erstellung des Katalogs der Anlagenkomponenten wurden die Funktionen der Komponenten detailliert. Dazu wurden von verschiedenen Industriepartnern Parameter und Kenngrößen bereitgestellt. Als Resultat erhält der Katalog alle notwendigen Parameter, die für die Simulationskomponenten im Teilmodell Systemintegration benötigt werden, um eine realistische Simulation durchführen zu können [1, 24, 69, 72, 94, 124].



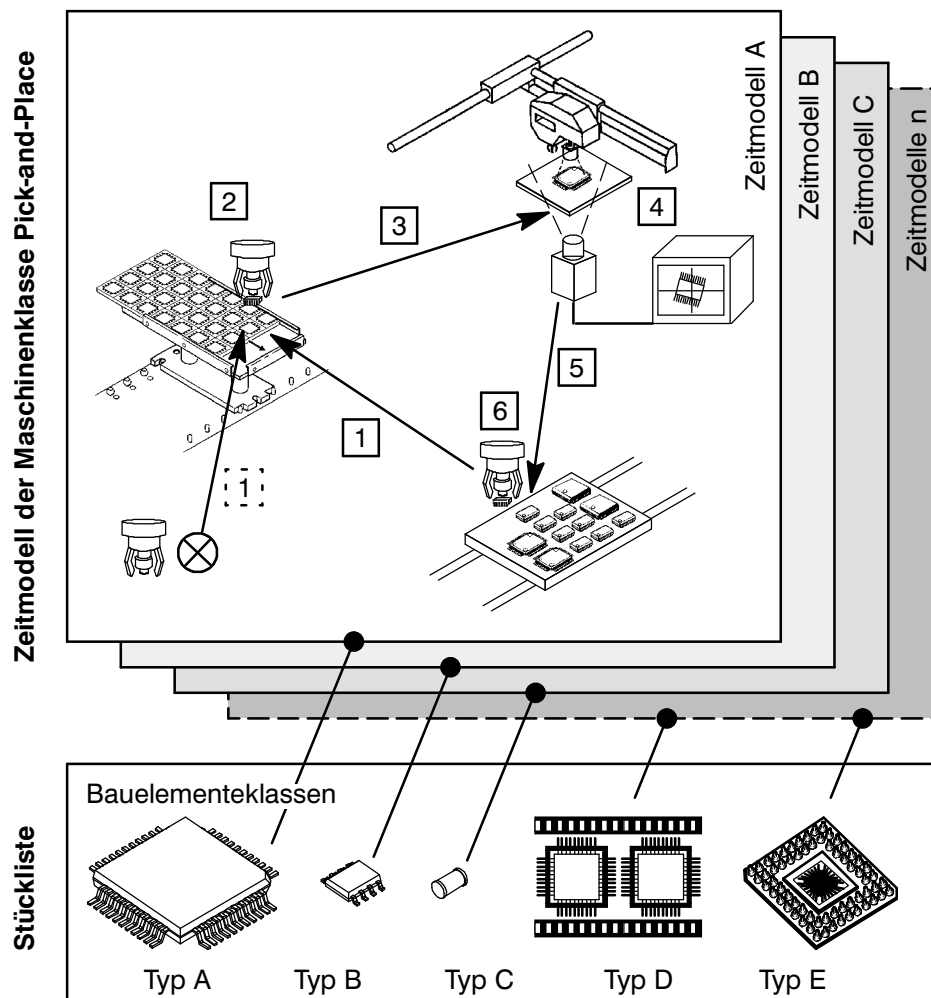
### 4.3.1 Bestimmung relevanter Anlagenparameter für die Ablaufsimulation

Ein Hauptproblem bei der Simulation der Leiterplattenfertigung ist die Modellierung der Bestückautomaten. Es erweist sich als schwierig, realistische Bestückzeiten zu berechnen, da herstellerabhängig verschiedene Bestücktechniken zum Einsatz kommen. Maschinenhersteller geben für ihre Automaten meist nur eine durchschnittliche Bestückleistung an. Für eine realitätsnahe Simulation müssen aber möglichst exakte Bestückzeiten ermittelt werden. Dies kann nur anhand aller auftretenden Zeiten in Verbindung mit den Beschreibungsdaten der eigentlichen Produkte erfolgen.



**Abb. 48** Klassifizierung der Bestückautomaten nach kinematischem und konstruktivem Aufbau [108]

Die unterschiedliche Maschinenmodelle bei Bestückautomaten können nach ihrem kinematischen und konstruktiven Aufbau grundsätzlich in sechs Hauptgruppen unterteilt werden (Abb. 48), wobei aber von verschiedenen Herstellern für spezielle Aufgaben auch andere Techniken eingesetzt werden. Die am häufigsten vorkommenden Klassen sind die Klassen III (Chip-Shooter), V (Pick-and-Place) und VI (Collect-and-Place). Einige elektronische Bauelemente erfordern spezielle Handhabungsoperationen, die aber je nach Automatengruppe unterschiedlich sein können. Es gibt beispielsweise Bauelemente, die vor dem Bestücken optisch zentriert werden. Auf Pick-and-Place Automaten (Klasse V) erfolgt dies meist auf einer separaten optischen Zentrierstation. In Abb. 49 ist dieser Vorgang unter anderem dargestellt. Der Bestückzyklus hat dabei mit optischer Inspektion sechs Schritte (1 bis 6), die sich ohne Inspektion auf drei reduzieren (1, 2, 6). Diese unterschiedlichen Abläufe sind bei einer Simulation zu berücksichtigen, um exakte Prozesszeiten zu erhalten. Das gesamte Zeitmodell eines Bestückautomaten setzt sich somit aus den Zeitmodellen für die unterschiedlichen Bauelementeklassen sowie den Zeitmodellen für Neben-, Sonder- und Fehlerzeiten zusammen.



**Abb. 49** Zeitmodell der Bestückvorgänge auf einem Pick-and-Place Bestückautomaten

In dem Genauigkeitsbereich dieser Zeitmodelle ist es ausreichend, für die einzelnen Bauelementklassen durchschnittliche Bestückzeiten zu hinterlegen, da für eine genauere Bestückzeitberechnung auch die Positionen der Bauelementezuführungen und der Bauelemente auf den Leiterplatten bekannt sein müssen.

In Tabelle 7 sind exemplarisch für Anlagenkomponenten wichtige Parameter von Bestückstationen aufgelistet. Die unterschiedlichen Zeiteinheiten (s, min, h) ergeben sich aus den in der Praxis üblichen Angaben. Bei der Realisierung der Datenbasis wurden die Prüf- und Fehlerbehebungszeiten nicht direkt implementiert, da diese besser durch das Konzept der Logikbausteine einbezogen werden können. So können explizite, maschinenabhängige Sonderzeiten berücksichtigt werden (siehe Kapitel 4.3.2). Es wird jedoch zusätzlich die Zuweisung von gesonderten Fehlerereignissen ermöglicht, womit die Funktionalität der zeitdynamischen Ablaufsimulation ausgeschöpft wird.

**Tabelle 7** Simulationsrelevante Parameter von Bestückstationen

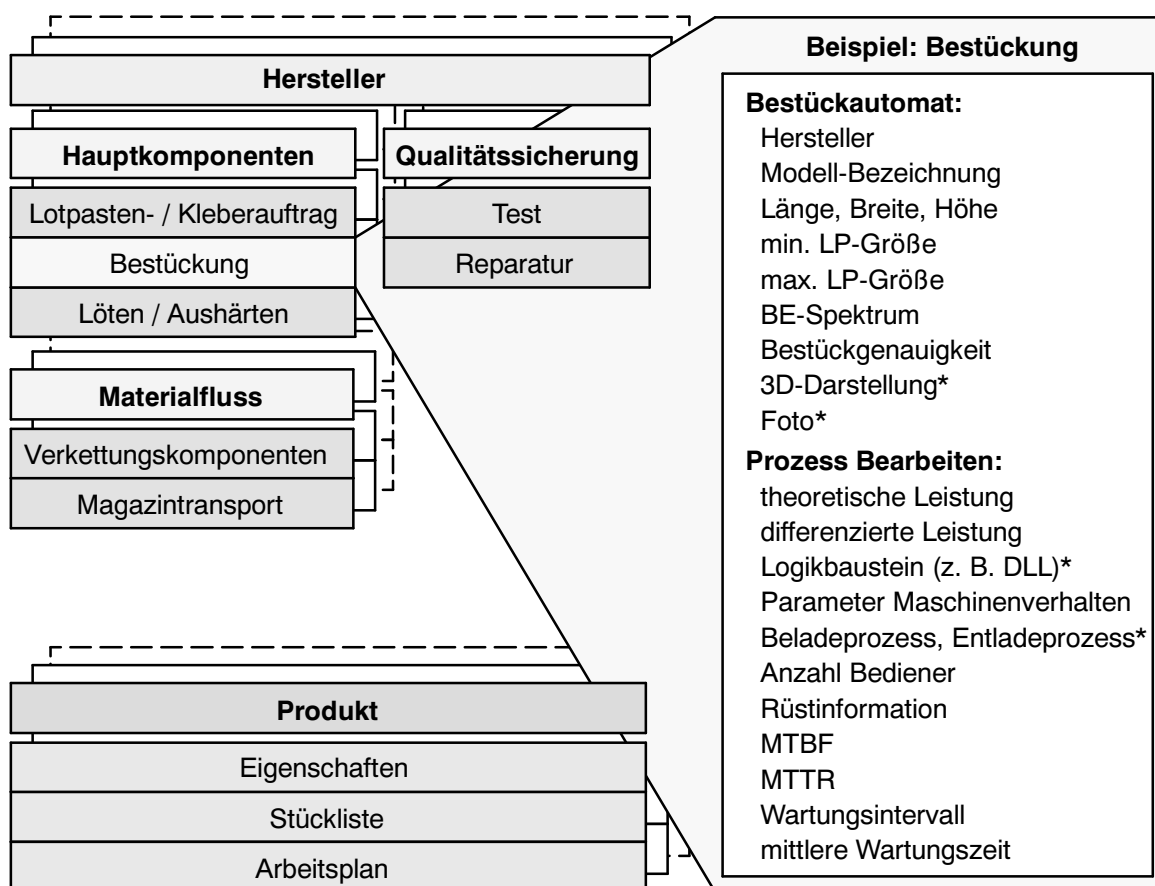
Komponente	Parameter	Einheit
Allgemeine Parameter	Hersteller	Text
	Bezeichnung	Text
	Bestückprogramm	Text
	Rüstzeit	min
	Leiterplattenwechselzeit	s
	Fehlerrate	%
	MTBF (Bedienereingriff)	h
	MTTR (Bedienereingriff)	min
	Wartungsintervalle	h
	Wartungszeiten	min
Pick and Place	Bestückzeiten für BE-Klassen	BE/h
	Prüfzeiten	s
	Fehlerbehebungszeiten	s
	Doppelconveyor	binär
Collect and Place	Bestückzeiten für BE-Klassen	BE/h
	Prüfzeiten	s
	Fehlerbehebungszeiten	s
	Doppelconveyor	binär
Chipshooter	Bestückzeiten für BE-Klassen	BE/h
	Fehlerbehebungszeiten	s
Simultanbestücker	Bestückzeiten	BE/h
Sonderbestücker	Bestückzeiten für BE-Klassen	BE/h
	sonstige Zeiten	s
DIP/RAD/AXIAL Bestücker	Bestückzeiten für BE-Klassen	BE/h
	Prüfzeiten	s
	Fehlerbehebungszeiten	s
Handbestückplatz	Bestückzeiten für BE-Klassen	BE/h
	sonstige Zeiten	s

Die Hersteller von Bestückautomaten geben eine Vielzahl verschiedener Parameter für ihre Maschinen an. Oft sind die Informationen nicht in die unterschiedlichen Bestückzeiten für verschiedene Bauelemente aufgeschlüsselt und aufgrund fehlender verbindlicher Normen nur schwer oder gar nicht mit den Angaben anderer Hersteller zu vergleichen. Es existieren nur wenige normierte Messvorgaben, unter denen einheitliche Prozessvariablen ermittelt werden können (vgl. [94]), und es gibt keine Richtlinien dafür, welche Angaben ein Hersteller seinen Kunden zur Verfügung stellen sollte.

Um ein realistisches Bild der Prozessparameter zu erhalten, wurden die aus Herstellerunterlagen und eigenen Arbeiten gewonnene Werte mit realen Werten der Industriepartner verglichen. Dabei zeigt sich, dass die Angaben der Hersteller oft nur unter idealen Randbedingungen gelten und an die Fertigung realer Produkte angepasst werden müssen. Dies ist abhängig vom Aufbau der Produkte und notwendigen Umrüstungen der Linien.

### 4.3.2 Erweiterung des Komponentenkatalogs um Simulationsparameter und maschinenspezifische Logikbausteine

Nach der Strukturierung der Anlagen der Elektronikproduktion wurde der entstandene Katalog der Komponenten um alle simulationsrelevanten Parametern vervollständigt [1, 69, 72, 124]. Dazu wurden, neben den Parametern für die Simulation wie dem Fehlerverhalten und logistischen Grundgrößen, auch Daten integriert, die speziell für den Einsatz der Modelle im Vertrieb wichtig sind. Dazu gehören die 3D-Darstellung und Grafiken. In Abb. 50 ist die Struktur des Katalogs mit einem Beispiel für die Beschreibung von Bestückautomaten dargestellt. Zur Strukturierung wird eine Aufteilung nach Maschinen- und Prozessdaten vorgenommen. Daraus ergeben sich beim Einsatz der Maschinenmodelle in Simulatoren die Informationen zur Beschreibung von Bausteinen und Objekten (vgl. [93]).



\* Verknüpfung zu Dateien

**Abb. 50** Aufbau des Kataloges der Anlagenkomponenten der Elektronikproduktion

Für die notwendigen Taktzeitberechnungen stehen im vorliegenden Konzept drei unterschiedlich genaue Methoden zur Verfügung. Diese ermöglichen, je nach zur Verfügung stehenden Daten, unterschiedliche Abstraktionsgrade. Die theoretische Leistung gibt einen groben Anhaltswert für die Taktzeit. Die differenzierte Leistung ergibt für ein Produkt, je nach dessen Eigenschaften, eine genauere Abschätzung der Bearbeitungszeit. Ein weiterer entscheidender Punkt im Konzept der Simulationskompo-

nenten ist die Verwendung eines Softwarebausteins, z. B. einer Dynamic Link Library (DLL) für die Beschreibung der internen Abläufe einer Maschine. Wichtig ist die Systemunabhängigkeit dieser Softwarebausteine. Eine DLL kann z. B. mit jeder Windows-basierten Programmiersprache verwendet werden.

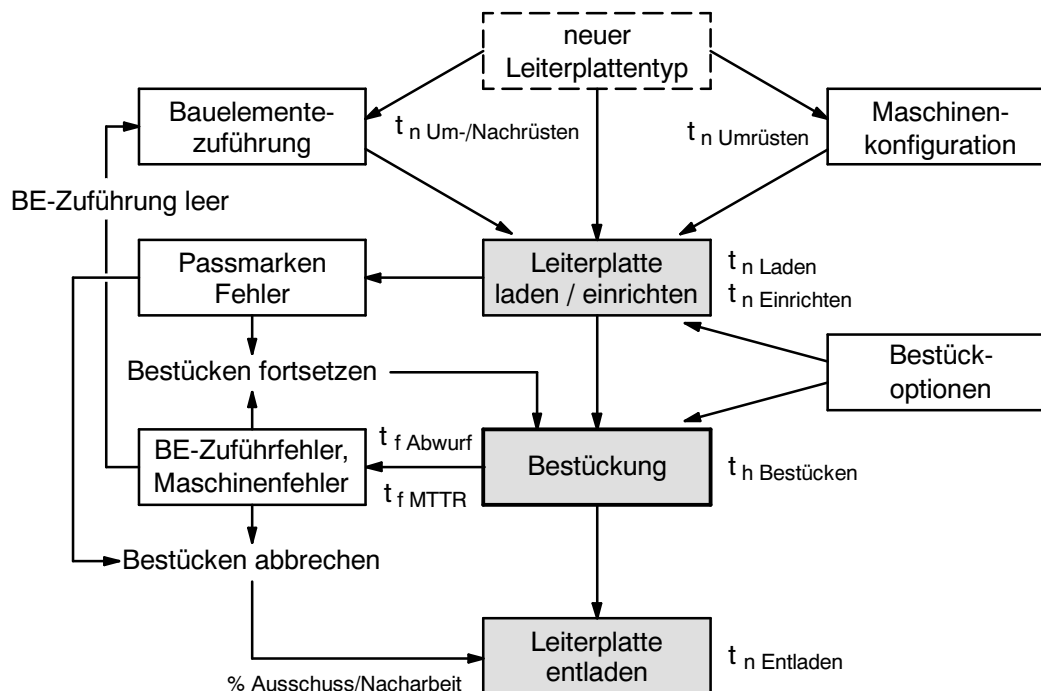
Bei Übergabe der Maschinenmodelle an ein Simulationssystem können einerseits die Logikbausteine mit übertragen werden. Im Simulationssystem wird dann ein solcher Logikbaustein aufgerufen, wenn die Taktzeit für ein spezielles Produkt benötigt wird. Andererseits kann die Taktzeitberechnung für bekannte Produkte bereits während der Übergabe der Maschinenmodelle erfolgen. Die Taktzeiten werden dann in den Arbeitsplänen hinterlegt. So spart man den wiederholten Aufruf der Logikbausteine, z. B. bei Simulation einer Massenfertigung. Außerdem kann man die Maschinenmodelle so auch auf unterschiedlichen Betriebssystemen verwenden, da dort die Logikbausteine selbst nicht mehr ablauffähig sein müssen. Diese Möglichkeit der Vorabberechnung wurde bei der Entwicklung der Werkzeuge für den Einsatz der Maschinenmodelle berücksichtigt (siehe Kapitel 7).

Folgende Gründe sind ausschlaggebend für den Einsatz von Logikbausteinen zur Beschreibung von Maschinen: Die unterschiedlichen Maschinentypen verschiedener Hersteller und Baureihen verwenden sehr viele unterschiedliche Fertigungskonzepte und Handhabungsstrategien. Diese in einer Datenbank zu hinterlegen, ist nicht zweckmäßig. Des weiteren möchten die Hersteller der Anlagen die genauen internen Steuerungskonzepte der Maschinen nicht offen legen. Mit der Verwendung eines Logikbausteins erhält der Maschinenhersteller die Möglichkeit einen Baustein an seine Kunden zu übergeben, der mit der Eingabe von definierten Parametern die resultierende Taktzeit berechnet. Dabei bleibt der genaue Berechnungsvorgang im Verborgenen.

Aufgabe der Automatenhersteller ist es dementsprechend bei der Erstellung von Maschinenmodellen für das Teilmodell Systemintegration neben der Ermittlung der allgemeinen Parameter für die Ablaufsimulation auch einen Logikbaustein zu entwickeln, mit dem die Taktzeiten berechnet werden können. Dabei sind zunächst die internen Abläufe einer Maschine zu analysieren. In Abb. 51 ist dies für Bestückautomaten dargestellt. Dabei müssen wie beschrieben die unterschiedlichen Bauelementeklassen berücksichtigt werden. Um eine realistische Bestückzeit zu berechnen, kann auf unterschiedliche Berechnungsmethoden zurückgegriffen werden. Wichtig ist, dass aus der Beziehung zwischen Leiterplattengröße und Bauelementespektrum ein realistisches Bestückverhalten abgeleitet wird. Dies kann z. B. über statistische Funktionen oder über das Auslesen von Tabellenwerten geschehen. Je nach Automat spielen auch unterschiedliche Sonderzeiten eine wichtige Rolle, wenn z. B. oft Bauelemente-Trays gewechselt werden müssen oder wenn die Bestückgeschwindigkeit an empfindlichere Bauelemente angepasst werden muss.

Die Berücksichtigung von Fehlerzeiten ist ein heikles Thema, aber unerlässlich für ein realistisches Berechnungsergebnis. Fehler können einem Maschinenmodell entweder über Fehlerprozesse zugeordnet werden, die über das Simulationssystem als Feh-

ler behandelt werden, oder das Fehleraufkommen wird in das Modell der Maschinenlogik integriert. Bei Bestückautomaten ist neben allgemeinen Maschinenstörungen (Gurtriss, Vertaktung) vor allem die erneute Bauteilaufnahme nach Bauteilabwürfen zu beachten, die zu Verzögerungen bei der Bestückung führen, wenn die entsprechenden Bauteile erneut aufgenommen werden müssen.



$$t_h \text{ Bestücken} = f(j, n_{BE(j)}, t_{Pick(j)}, t_{Place(j)}, l_{p_{xy}}, t_{Weg}, t_{Sonder})$$

$j$  = Anzahl der Bauelementeklassen

$n_{BE(j)}$  = Anzahl der Bauelemente je Bauelementeklasse

$t_{Pick(j)}$  = Aufnahme- und Messzeit der Bauelemente, abhängig von Bauelementeklasse

$t_{Place(j)}$  = Absetzzeit der Bauelemente, abhängig von Bauelementeklasse

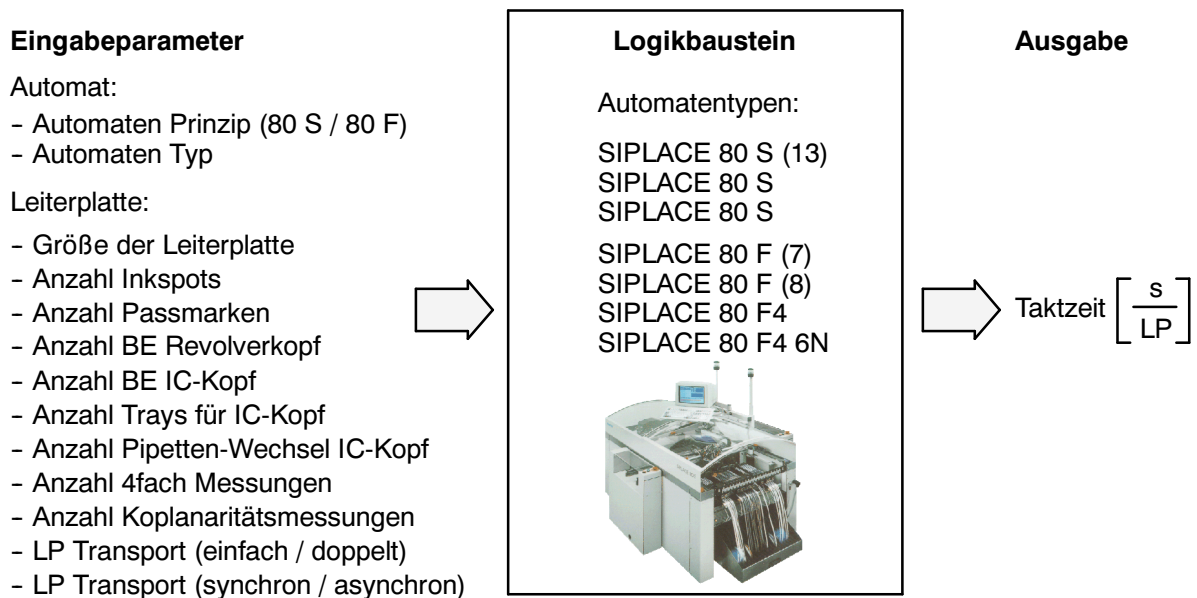
$l_{p_{xy}}$  = Größe der Leiterplatte

$t_{Weg}$  = Fahrweg zu Bestückpositionen (bewegte Portale bzw. bewegte Leiterplatte)

$t_{Sonder}$  = Sonderzeiten, z.B. Pipetten/Trays wechseln, Anpassungen der Bestückgeschw.

**Abb. 51** Analyse der Abläufe während der Bestückung zur Generierung eines Logikbausteins für die Bestückzeitermittlung

In Abb. 52 ist ein Logikbaustein für die SIPLACE-Automatenreihe von Siemens dargestellt, der in Form einer DLL vorliegt. Die SIPLACE-DLL berechnet die Taktzeiten von SIPLACE-Bestückmaschinen über eine statistische Berechnungsmethode. Mit den angegebenen Parametern ist es möglich, die Taktzeiten mit einer Toleranz von 10% zu bestimmen. Ebenfalls sind in der DLL Überprüfungsmechanismen hinterlegt, die eine fehlerhafte Dateneingabe erkennen. Neben Informationen zu den Leiterplatten werden als Eingabeparameter für die DLL auch maschinenspezifische Daten verlangt. So können mit einem Baustein mehrere Maschinentypen und Konfigurationen abgedeckt werden.



**Abb. 52** Darstellung eines SIPLACE-Automaten durch einen Logikbaustein

Neben der Möglichkeit, die Logik eines Automaten in Form eines Softwarebausteins abzulegen, enthält die Datenbasis auch allgemeine Werte für die Leistung einer Maschine. Dies wären z. B. die theoretische Bestückleistung eines Bestückautomaten oder die Leistung je Bauelementklasse (differenzierte Leistung). Durch die Aufnahme dieser Werte in die Datenbank hat der Benutzer, wie gefordert, die Möglichkeit einen Abstraktionsgrad der Maschinenmodelle zu wählen bzw. mit unscharfen Daten zu simulieren, wenn ein Softwarebaustein mit der internen Logik nicht zur Verfügung steht oder wenn dieser aus Gründen der Vereinfachung nicht verwendet werden soll. Der Benutzer kann bei der Übertragung der Maschinenmodelle durch Eingabe von Erfahrungswerten (in Prozent) die theoretische Leistung an die realen Werte angleichen und so auch mit diesen Werten eine Simulation durchführen.

## **5 Realisierung des Teilmodells Systemintegration auf Basis einer relationalen Datenbank**

Mit Datenbanksystemen lassen sich umfangreiche Informationsbestände langfristig speichern und verwalten. Sie umfassen den Datenbestand, auch Datenbasis genannt, und das zugehörige Datenbank-Managementsystem (DBMS), das die Verwaltung und Kontrolle der gespeicherten Daten übernimmt. Datenbanken stellen ein adäquates Mittel zur Speicherung, Verwaltung und Weiterverarbeitung von Daten dar, mit denen sich der Zugriff mehrere Benutzer auf die Daten regeln lässt. Charakteristische Eigenschaften von Datenbanken sind Datenunabhängigkeit, Datenintegrität und Redundanzfreiheit [107].

Die Datenbank für das Teilmodell Systemintegration beschreibt die in der Elektronikproduktion verwendeten Maschinen und Anlagenteile umfassend für die Ablaufsimulation. Die enthaltenen Daten sollen unter geringem Aufwand für den Aufbau von Simulationsmodelle genutzt werden können. Dazu wurden effiziente Werkzeuge geschaffen, mit denen die Simulationskomponenten unterschiedlichen Simulatoren zugänglich gemacht werden können (Kapitel 7). Der Aufbau und die Pflege eines Simulationsmodells ist damit ohne Programmierkenntnisse und ohne aufwendiges Modellieren der Anlagenteile möglich.

### **5.1 Modellierung der Anlagenkomponenten, Produkte und Arbeitspläne**

Bei der Konzeption der Datenbasis wurden zunächst verschiedene Arten der Datenspeicherung bewertet. Dazu wurden die Benutzeranforderungen mit den Vor- und Nachteilen der zwei untersuchten Möglichkeiten, ASCII-Dateisystem oder Datenbank, verglichen. Die relevanten Benutzeranforderungen waren:

- problemloser Datenaustausch
- einfache Bedienung
- PC-Plattform
- kostengünstige Lösung

Zunächst wurde das ASCII-Dateisystem gegenüber der Datenbank-Lösung verworfen. Eine Datenbank bietet für den Benutzer Vorteile, die mit Dateien nicht zu realisieren sind. So sind bei einer Datenbank bereits Werkzeuge zum strukturierten Aufbau einer Datenbasis vorhanden, mit Formularen lassen sich benutzerfreundliche Oberflächen leicht gestalten, die Möglichkeiten zum Datenimport und -export vereinfachen die Entwicklung von Schnittstellen und das DBMS gewährleistet Datensicherheit. Aufgrund der vorliegenden Datenstruktur wurde für die Realisierung das relationale Datenbankkonzept gewählt.



Der nächste Schritt war die Auswahl der Datenbank. Als Plattform wurde aufgrund der Anforderungen aus der Industrie MS-Windows auf PC-Basis eingesetzt, die im Simulationsbereich eine immer breitere Grundlage findet. So ist es ebenfalls für kleine und mittelständische Firmen leichter möglich, Simulation im Betrieb einzusetzen. Anhand dieser Vorgaben und der zu erwartenden Datenmenge bei der Eingabe der Referenzmodelle sowie der benötigten Datenbankoperationen wurde als relationales Datenbank-Managementsystem Microsoft ACCESS ausgewählt. Dort können in bzw. aus einer angelegten Datenbank Daten verschiedener Formate importiert und exportiert werden. Neben Daten aus anderen Windows-Anwendungen wie EXCEL werden Formate verschiedener anderer Datenbanken unterstützt [5].

### **5.1.1 Datenbankentwurf und Datenmodellierung**

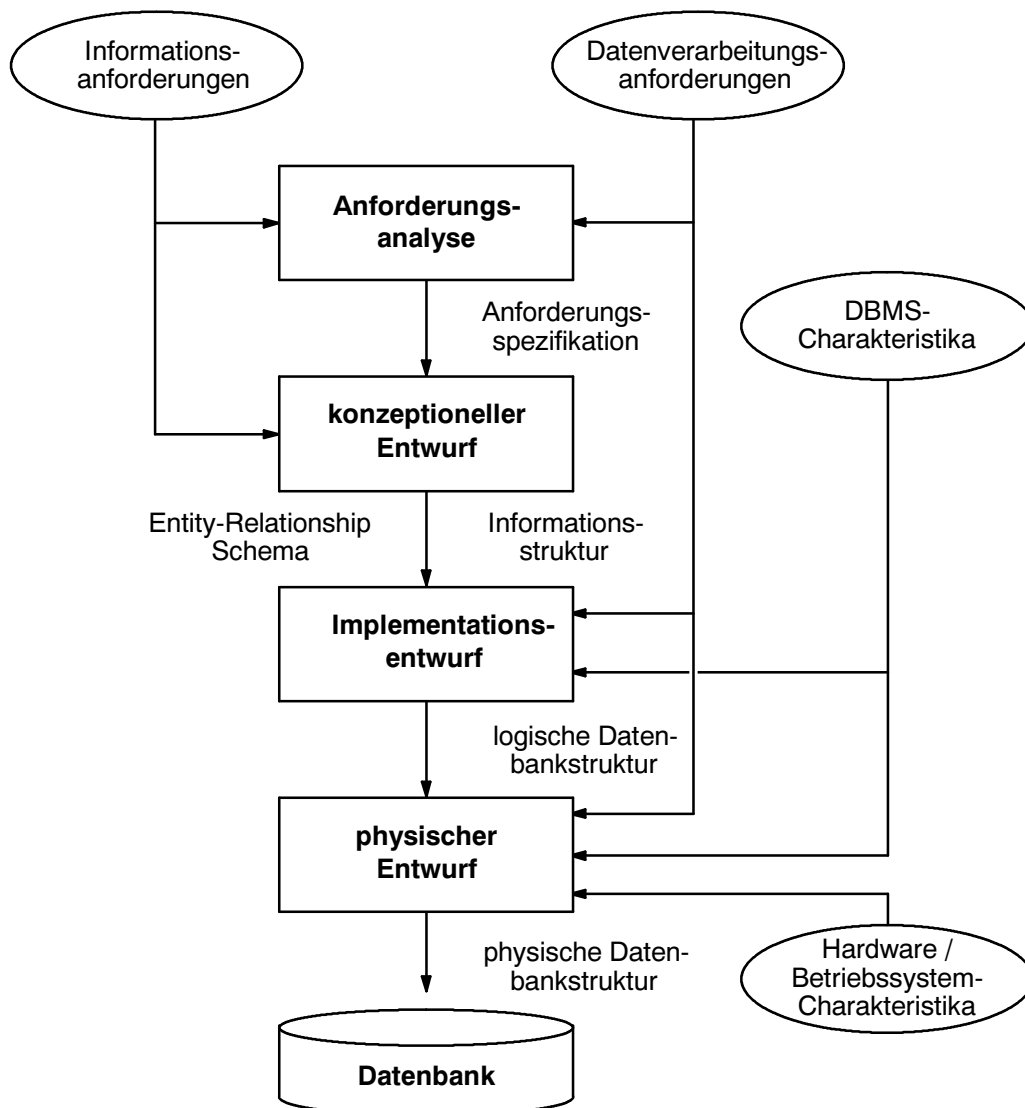
Ziel des Datenbankentwurfes ist die Definition geeigneter Tabellen, in denen die gewünschten Informationen zu den Simulationskomponenten gespeichert werden sollen. Er stellt somit die Voraussetzung für die Datenbankanwendung dar. Der Entwickler bedient sich hierzu eines strukturierten Verfahrens (Abb. 53). Damit wird der Entwurfsprozess transparent und nachvollziehbar gemacht, da er nach jeder Phase klar definierte, reproduzierbare Ergebnisse liefert. Auch die Fehlerwahrscheinlichkeit wird dadurch deutlich verringert.

Beim Entwurf einer Datenbankanwendung kann man vier Entwurfsschritte unterscheiden. Am Anfang steht die Anforderungsanalyse. In diesem Stadium werden alle relevanten Daten der zu modellierenden Welt zusammengetragen.

In der nächsten Phase, dem konzeptionellen Entwurf, wird die Informationsstruktur beschrieben. Dieser Schritt wird noch gänzlich unabhängig vom eingesetzten Datenbanksystem vorgenommen. Das am häufigsten für den konzeptionellen Entwurf verwendete Datenmodell ist das Entity-Relationship Modell (siehe Kapitel 3.1.2).

Erst in der Implementationsphase kommt das Datenmodell des eingesetzten Datenbanksystems zum Tragen. Dabei wird das Entity-Relationship Modell in das Relationenmodell übertragen. Das Datenmodell wird normalisiert und Integritätsbedingungen werden aufgestellt. Schließlich wird das Datenmodell in das verwendete Datenbanksystem implementiert.

In der letzten Phase, dem physischen Entwurf, wird die logische Datenbeschreibung auf die vom Datenbankmanagementsystem angebotenen physischen Datenstrukturen abgebildet. Hier sind vor allem Leistungskriterien maßgebend [53].



**Abb. 53** Phasen des Datenbankentwurfs [53]

### Anforderungsanalyse und Spezifikation

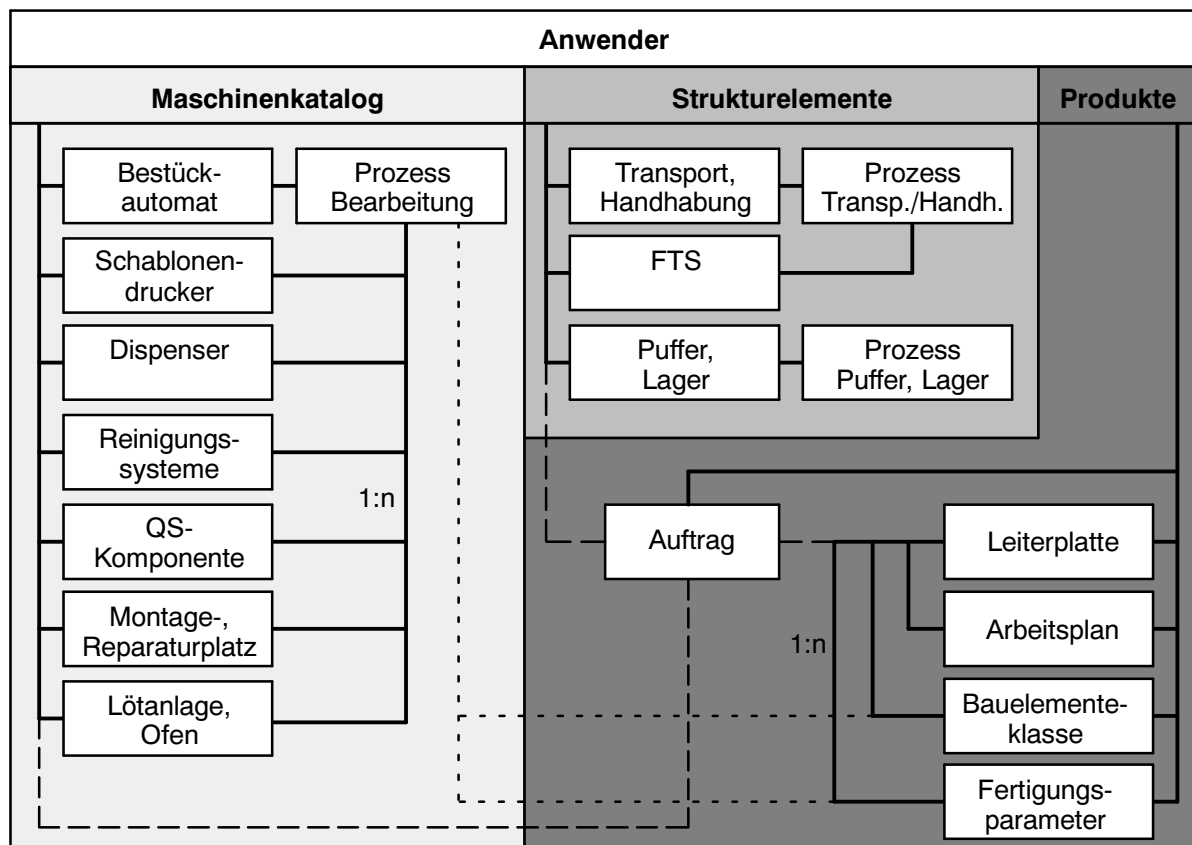
Die Anforderungsanalyse gliedert sich in zwei Teile: die Analyse der Informationsstruktur und die Datenverarbeitungsanforderungen. Für die Informationsstrukturanforderungen wird zunächst der Anwendungsbereich abgegrenzt, d. h. der Zweck der Datenbank und die Anwendergruppe werden genau abgesteckt. Vom Entwickler werden dann systematisch Informationen über das abgegrenzte Anwendungsgebiet gesammelt.

Als Resultat erhält man eine Anforderungsspezifikation, in der die relevanten Objekte aufgelistet werden. Dabei werden diese Objekte bereits zu Objekttypen zusammengefasst. In diese Anforderungsspezifikation werden ebenfalls die Attribute, welche die Objekte beschreiben, sowie die Beziehungen zwischen den Objekten aufgenommen.

Zu den Datenverarbeitungsanforderungen zählen alle dynamischen Prozesse, die später auf der Datenbank ablaufen sollen. Hierunter fallen z.B. alle Datenmanipulationen und die Zugriffsrechte [53, 126]. Diese Anforderungen an die Datenbank lassen sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

- Modularität
- inhaltliche und semantische Nähe der Datentypen zur Realität
- Normierung der Parameter und Messvorschriften für eindeutige Datenhinterlegung
- möglichst natürlichsprachliche Semantik der Parameterbenennung
- eineindeutige Spezifikation und klare Strukturierung (Objektorientierung)
- Kompatibilität der Datenstrukturen zu Anforderungen der Simulationssysteme
- Erweiterbarkeit des Modells zur Anpassung an technische Entwicklungen bzw. zum Einfügen neuer Aspekte, die aus den Anwendungen resultieren
- leistungsfähige, flexible Schnittstellen

Die Spezifikation wurde für die maschinennahe Simulationskomponenten aus dem Bereich Elektronikproduktion in den Kapiteln 4.2 und 4.3 beschrieben. In Abb. 54 ist der daraus abgeleitete, grobe Aufbau der Datenbasis dargestellt.



**Abb. 54** Aufbau der Datenbasis für die Simulationskomponenten

Der Anwender soll aus der Datenbank konkrete Fertigungs- und Materialflusskomponenten auswählen können. Diese enthalten Maschinen- und Prozessdaten. Dabei ist eine 1:n-Verknüpfung von Maschinen und Prozessen möglich, wenn eine Maschine

mehrere Prozesse ausführt. Die Produkte sind durch ihre Eigenschaften, die Stückliste (Bauelementeklassen) und den zugehörigen Arbeitsplan beschrieben.

Die Generierung eines Auftrags für bestimmte Fertigungseinheiten erfolgt durch Aufruf eines Programms, das aus den Leiterplatten- und den Arbeitsplandaten in Verbindung mit den Prozessdaten der Maschinen die resultierenden Taktzeiten der Fertigungsschritte berechnet, u. a. durch Aufruf der Logikbausteine (vgl. Kapitel 4.3.2). Ein solcher getakteter Auftrag kann plattformunabhängig in Simulatoren verwendet werden, da kein weiterer Aufruf der Logikbausteine erfolgen muss.

### **Konzeptioneller Entwurf**

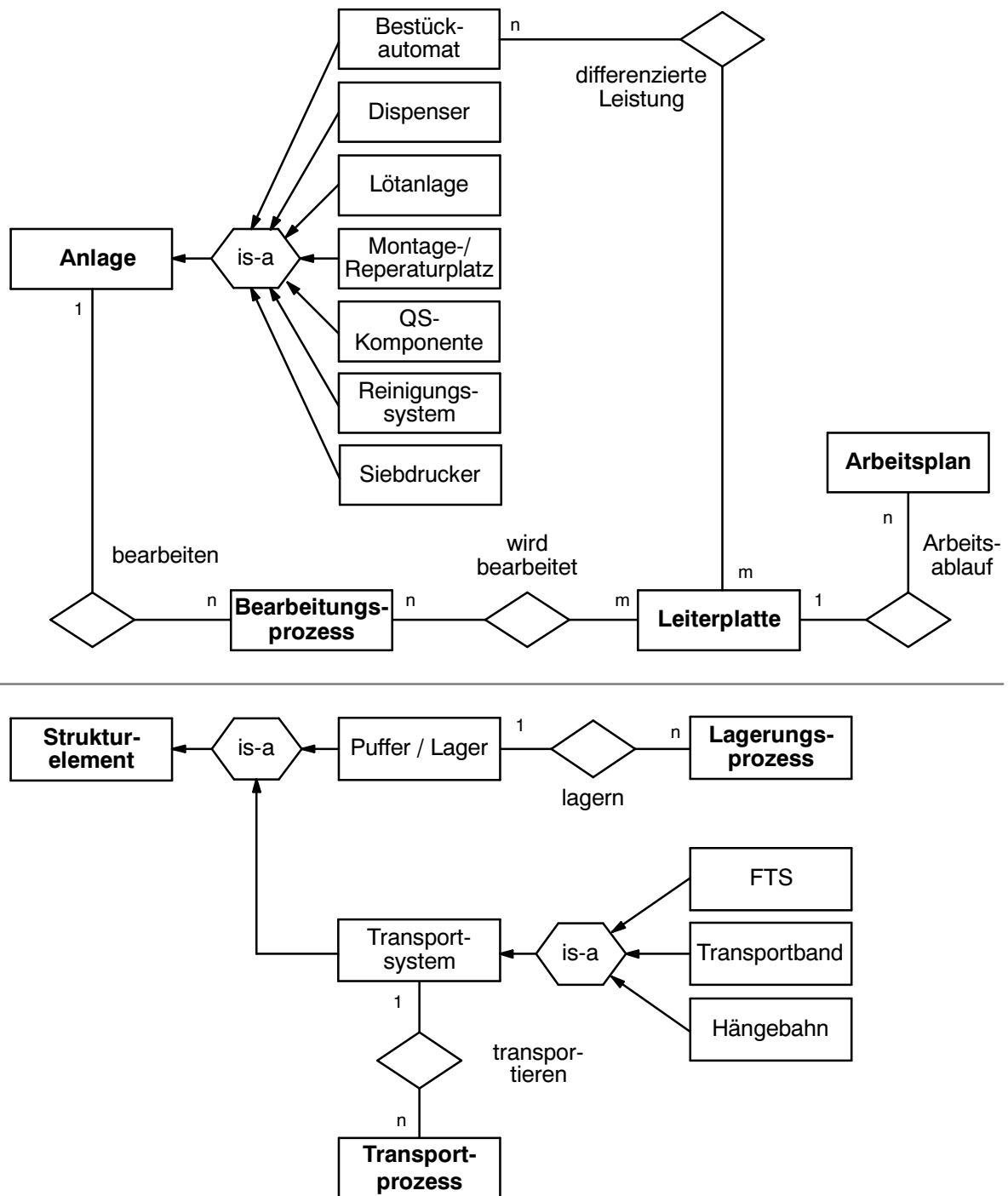
Im konzeptionellen Entwurf wird das implementationsunabhängige Datenschema aufgestellt. Dieses umfasst neben der Strukturbeschreibung auch alle Konsistenzbedingungen und Systemtransaktionen. Für die Darstellung dieses Schemas wird häufig das Entity-Relationship Modell verwendet, da es unabhängig vom Datenmodell des Datenbanksystems ist, das später Verwendung findet (siehe Kapitel 3.1.2).

Bei umfangreichen Anwendungen ist es sinnvoll, in dieser Phase zunächst die externen Sichten zu erstellen. Für jede Benutzergruppe wird dabei ein Datenmodell aufgebaut, das die Informationsstruktur formal so beschreibt, wie sie von der jeweiligen Gruppe benötigt wird. In einem weiteren Schritt werden die erhaltenen Einzelsichten in ein Gesamtmodell überführt, das dann zur Modellierung des datenbankabhängigen Datenmodells verwendet wird [53, 126].

Nach der Spezifikation, welche Beziehungen zwischen den einzelnen Maschinen, den Strukturelementen, den Leiterplatten und dem Arbeitsplan bestehen (Abb. 54), wurde das in Abb. 55 dargestellte Entity-Relationship Modell ausgearbeitet. Der Übersichtlichkeit halber sind die Attribute nicht aufgeführt, sondern nur die Entitäten und ihre Beziehungen. Da in den Anlagen (Bestückautomaten, Dispenser, Siebdrucker etc.) viele gleichartige Informationen enthalten sind, können Redundanzen vermieden werden, indem die entsprechenden Attribute in einen Obertypen eingehen. Das gleiche gilt für die Puffer, Lager und Transportsysteme. Daher wurden in diesen Fällen Generalisierungen durchgeführt.

### **Implementationsentwurf**

Während der Implementierungsphase wird das erarbeitete Entity-Relationship Modell in das Datenmodell des verwendeten Datenbanksystems transformiert. Da in der vorliegenden Arbeit das relationale Datenbanksystem MS ACCESS verwendet wurde, wird in diesem Abschnitt die Überführung des Entity-Relationship Modells in das Relationenmodell erläutert.



**Abb. 55** Entity-Relationship-Modell der realisierten Simulationskomponenten

Das Entity-Relationship Modell ist aus zwei grundlegenden Strukturierungskonzepten aufgebaut, den Entity-Typen sowie den Beziehungen. Im relationalen Schema existieren jedoch nur Relationen, auf die sowohl die Entitytypen als auch die Beziehungen abgebildet werden müssen.

Dabei wird zunächst so vorgegangen, dass für jede Entität eine eigene Tabelle erstellt wird, in der die jeweiligen Attribute die Spaltenüberschriften bilden. Anschließend wird auch für jede Beziehung eine Relation angelegt. Diese Relation enthält die Primär-

schlüssel der zugehörigen Entitäten als Fremdschlüssel sowie eventuelle Attribute der Beziehung.

Während der Transformation des Entity-Relationship Modells in das Relationenschema ist besonders darauf zu achten Redundanzen zu vermeiden. Ein Eintrag in einer Datenbank ist redundant, wenn er in einer Datenbank mehrfach gespeichert ist oder aus bereits vorhandenen Einträgen abgeleitet werden kann. Neben dem Nachteil, dass durch redundante Informationsspeicherung ein erhöhter Bedarf an Speicherplatz besteht, können schlecht entworfene Relationenschemata zu sogenannten Anomalien führen.

Zur Vermeidung von Redundanzen führt man eine sogenannte Normalisierung der Relationen durch. Man versteht darunter die Transformation der Relationen in Normalform. Der Normalisierungsprozess stellt sich als sukzessives Zerlegen der Relationen in neue Tabellen dar. Dadurch werden unnötige Wiederholungen gleichartiger Datenfelder ausgeschlossen und Abhängigkeiten von Attributen von nur einem Teilschlüssel eliminiert.

Bei der Transformation des in Abb. 55 dargestellten Entity-Relationship Modells wurde zunächst für jede Entität und jede Beziehung eine Tabelle erstellt. Da häufig kein eindeutiges Attribut vorhanden war oder da komplexe zusammengesetzte Primärschlüssel vermieden werden sollten, wurden für die Anlagen, Strukturelemente, Prozesse, Leiterplatten und Arbeitspläne künstliche Schlüsselattribute erzeugt, durch die jedes Objekt eindeutig identifiziert werden kann. Ein Beispiel hierfür ist das Schlüsselattribut *ID\_Anlage*, über das man auf eine bestimmte Maschine zugreifen kann. Primärschlüssel sind im folgenden unterstrichen dargestellt.

Die "is-a"-Beziehungen zwischen Entitäten werden im Relationenmodell durch 1:1-Beziehungen zwischen den entsprechenden Relationen wiedergegeben. Beide Relationen besitzen dann den gleichen Primärschlüssel.

Für die Beschreibung der Maschinen wurden die Relationen *Anlage*, *Bestueckautomat*, *Dispenser*, *Loetanlage*, *QS-Komponente*, *Reinigungssystem* und *Siebdrucker* erstellt. In der Relation *Anlage* sind allgemeine Daten enthalten, die auf alle Maschinen zutreffen. Maschinenspezifische Daten finden sich in der jeweils entsprechenden Relation. Eine spezielle Tabelle, welche die Eigenschaften eines Reparatur- oder Montageplatzes näher beschreibt, ist nicht notwendig, da für die Modellierung nur die Daten der Relation *Anlage* erforderlich sind:

**Tabelle 8** Relationsmodell der Anlagen

<i>Anlage</i>	( <u>ID_Anlage</u> , Anlagen_Typ, Hersteller, Mod_Bez, Laenge, Breite, Hoehe, min_LP_B, min_LP_L, max_LP_B, max_LP_L, E_Kapazitaet, A_Kapazitaet, 3D_Darst, Photo)
<i>Bestueckautomat</i>	( <u>ID_Anl</u> , Montage_Art, Arbeitsweise, Bestueckung)

<i>Dispenser</i>	( <u>ID_Anl</u> , Arbeitsweise)
<i>Loetanlage</i>	( <u>ID_Anl</u> , Anlagenart, Arbeitsweise)
<i>QS_Komponente</i>	( <u>ID_Anl</u> , Testart, Arbeitsweise)
<i>Reinigungssystem</i>	( <u>ID_Anl</u> , Arbeitsweise)
<i>Siebdrucker</i>	( <u>ID_Anl</u> , Arbeitsweise)

### 5.1.2 Hierarchische Modellierung der Bearbeitungsprozesse sowie Einbindung von Produkten und Arbeitsplänen

In Kapitel 4.3.2 wurde bereits das Konzept der hierarchischen Modellierung der Bearbeitungsprozesse in drei Ebenen angesprochen:

- theoretische Leistung, übernommen aus Herstellerangaben
- differenzierte Leistung, unterscheidet Leistung je Bauelementklasse
- Logikbaustein, berechnet die Leistung aus Produkteigenschaften

Die theoretische Leistung wird direkt in der Relation *P\_Bearbeitung* jedes Bearbeitungsprozesses gespeichert. Für die differenzierte Leistung und die Speicherung der Eingangsvariablen der Logikbausteine müssen die Relationen zur Beschreibung der Bearbeitungsprozesse und der Produkte verknüpft werden, um eine produktbezogene Zuordnung zu erhalten.

Die Prozessdaten werden in den Relationen *P\_Bearbeitung*, *P\_Bestuecken*, *P\_Loeten*, *P\_QS\_Kontrolle*, *P\_Reinigen* sowie *P\_Siebdrucken* verwaltet. Auch hier stellt die Relation *P\_Bearbeitung* eine übergeordnete Relation dar, in der die gemeinsamen Prozessdaten der Maschinen enthalten sind, während gerätespezifische Daten in den untergeordneten Tabellen enthalten sind.

**Tabelle 9** Relationsmodell der Bearbeitungsprozesse

<i>P_Bearbeitung</i>	( <u>ID_Proz</u> , <u>ID_Anl</u> , <u>P_Bez</u> , <u>P_Beschr</u> , theor_Leistung, Einh_theor_Leistung, abs_Gen, Wiederh_Gen, Zeit_Load, Zeit_Unload, Anz_Bediener, MTBF, MTTR, Int_Wartung, Zeit_Wartung, Ruest_Info, Ruestzeit, Pfad_DLL)
<i>P_Bestuecken</i>	( <u>ID_Proz</u> , Anz_Zufuehrung, Art_Zufuehrung)
<i>P_Loeten</i>	( <u>ID_Proz</u> , Proz_Laenge, Zykluszeit)
<i>P_QS_Kontrolle</i>	( <u>ID_Proz</u> , Zykluszeit)
<i>P_Reinigung</i>	( <u>ID_Proz</u> , Zykluszeit, Kapazitaet)
<i>P_Siebdrucken</i>	( <u>ID_Proz</u> , Zykluszeit, Druckgeschwindigkeit, Druckkraft)

Produktdaten werden in der Relation *Leiterplatte* abgespeichert. Die 1:n Beziehung zur Relation *Arbeitsplan*, die verschiedene Arbeitspläne pro Leiterplatte beinhalten kann, wird durch die Relation *LP\_AP* realisiert.

**Tabelle 10** Relationsmodell der Leiterplatten und Arbeitspläne

<i>Leiterplatte</i>	( <u>ID_LP</u> , Bezeichnung, Beschreibung, Laenge, Breite, Anz_Komp_o, Anz_Komp_u, Anz_Inkspots_o, Anz_Inkspots_u, Anz_Fiducials_o, Anz_Fiducials_u, LP_Trans, Anz_Einzelschaltungen, Anz_Klebepunkte)
<i>Arbeitsplan</i>	( <u>ID_AP</u> , <u>AP_Pos</u> , Prozess_Schritt, LP_Seite, Betriebsmittel)
<i>LP_AP</i>	( <u>ID_LP</u> , <u>ID_AP</u> )

Da bei Bestückautomaten die Bestückleistung von den auf die Leiterplatte aufzubringenden Bauelementen abhängt, wurde die Relation *differenzierte\_Leistung* geschaffen. In ihr werden Bauelementespektren als Klassen definiert und die zugehörigen Bestückleistungen hinterlegt. *BE\_Spektrum* enthält dabei die textuelle Beschreibung der Bauelementetypen. Die Anzahl der Bauelemente, die pro Leiterplattenseite in die jeweilige Bauelementeklasse fallen, wird in der Relation *BE\_Klasse\_LP* gespeichert.

**Tabelle 11** Relationsmodell der differenzierten Leistung

<i>differenzierte_Leistung</i>	( <u>ID_AnI</u> , <u>BE_Klasse</u> , <u>BE_Spektrum</u> , Leistung)
<i>BE_Klasse_LP</i>	( <u>ID_LP</u> , <u>LP_Seite</u> , <u>ID_AnI</u> , <u>BE_Klasse</u> , Anzahl)

Die für den Aufruf eines Logikbausteins benötigten Daten befinden sich in den Relationen *DLL\_Parameter\_Bearbeitung* und *Fertigungsparameter*. Dabei werden der Parametername sowie der im Logikbaustein verwendete Datentyp in der Relation *DLL\_Parameter\_Bearbeitung* abgespeichert und die zugehörigen produkt- und anlagenspezifische Parameterwerte in der Tabelle *Fertigungsparameter*.

**Tabelle 12** Relationsmodell der Eingangsvariablen der Logikbausteine

<i>DLL_Parameter_Bearbeitung</i>	( <u>ID_AnI</u> , <u>Parameter</u> , Typ)
<i>Fertigungsparameter</i>	( <u>ID_LP</u> , <u>ID_AnI</u> , <u>Parameter</u> , Wert)

### 5.1.3 Modellierung der Strukturelemente

Die Strukturelemente sind ähnlich aufgebaut wie die Anlagen mit ihren Prozessen. Daten über Puffer und Lager sind in der Relation *Puffer\_Lager* enthalten. Die allgemeine Relation *Trans\_System*, welche die Transportsysteme beschreibt, wird durch die Relationen *FTS* und *Trans\_Band\_HBahn* näher spezifiziert. Letztere Relation beinhaltet die Attribute der Entitäten Transportband und Hängebahn, da diese einen gleichar-



tigen Aufbau besitzen. Prozessdaten werden in die Relation *P\_Lagerung* bzw. *P\_Transport* eingegeben. Da im Falle der Strukturelemente die Parameterwerte der Logikbausteine nicht vom Produkt, also der Leiterplatte abhängen, die sie lagern oder transportieren, wird den Parametern in den Relationen *DLL\_Parameter\_Lagerung* bzw. *DLL\_Parameter\_Transport* neben dem Datentyp auch der Wert zugeordnet.

**Table 13** Relationsmodell der Strukturelemente

<i>Puffer_Lager</i>	( <u>ID_PL</u> , Hersteller, Mod_Bez, Laenge, Breite, Hoehe, Lagerungsart, Kapazitaet, Mobilitaet, PoL, 3D_Darst, Photo)
<i>P_Lagerung</i>	( <u>ID_Lagerung</u> , ID_PL, P_Bez, P_Beschr, Zeit_Load, Zeit_Unload, MTBF, MTTR, Int_Wartung, Zeit_Wartung, Pfad_DLL)
<i>DLL_Parameter_Lagerung</i>	( <u>ID_PL</u> , <u>Parameter</u> , Typ, Wert)
<i>Trans_System</i>	( <u>ID_Trans_Sys</u> , Hersteller, Mod_Bez, Laenge, Breite, Hoehe, 3D_Darst, Photo)
<i>FTS</i>	( <u>ID_Trans_Sys</u> , Zuladung, Einsatzzeit)
<i>Trans_Band_HBahn</i>	( <u>ID_Trans_Sys</u> , Kapazitaet, Typ)
<i>P_Transport</i>	( <u>ID_Transport</u> , ID_Trans_Sys, P_Bez, P_Beschr, Geschw_leer, Geschw_voll, Geschw_Kurve, Geschw_Anstieg, Trans_Laenge, Zeit_Load, Zeit_Unload, MTBF, MTTR, Int_Wartung, Zeit_Wartung, Pfad_DLL)
<i>DLL_Parameter_Transport</i>	( <u>ID_Trans_Sys</u> , <u>Parameter</u> , Typ, Wert)

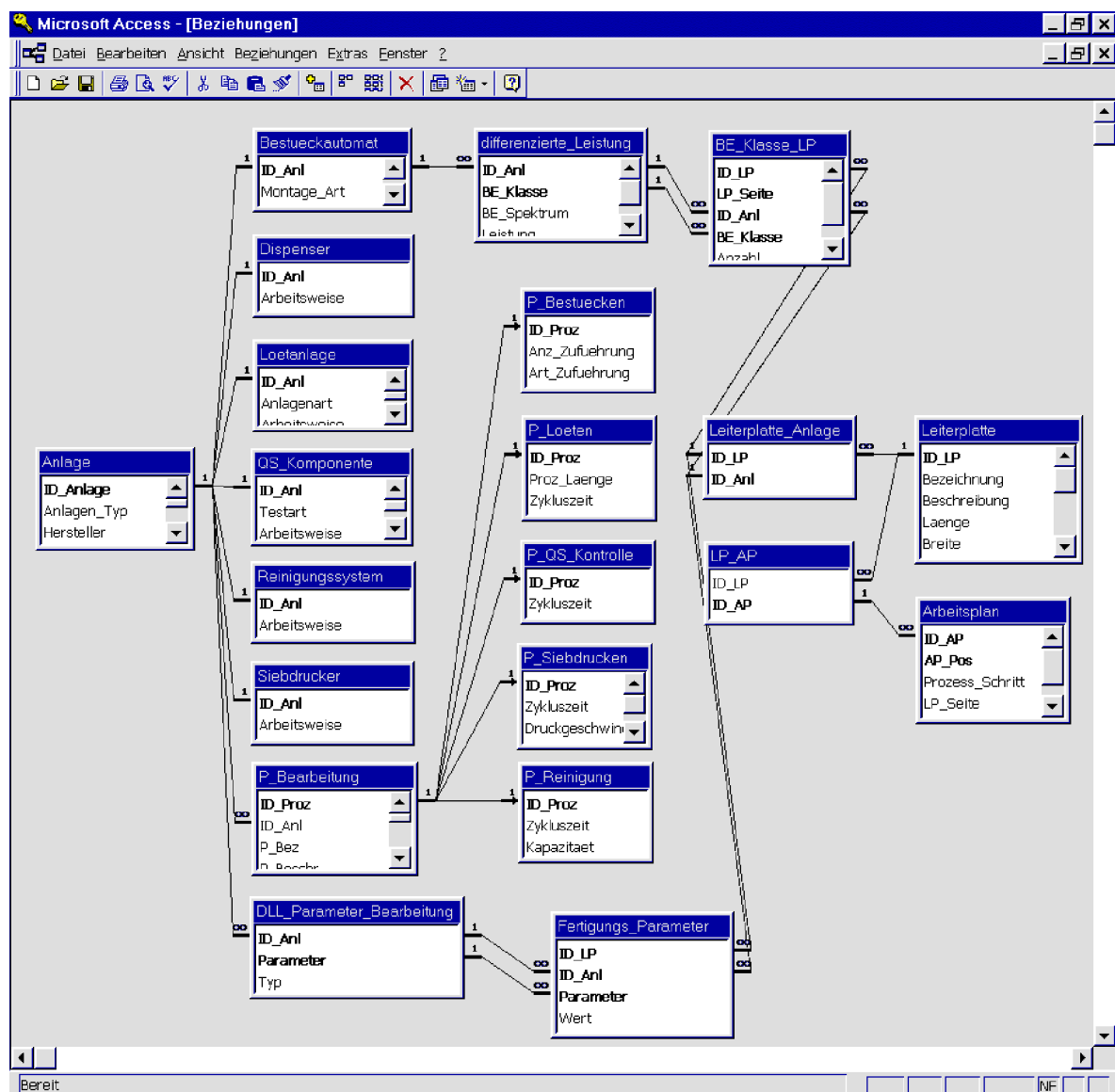
## 5.2 Umsetzung des Implementationsentwurfs der Datenbank

### 5.2.1 Implementierung der Datenbank in Microsoft ACCESS

Bei der Übertragung der im vorherigen Abschnitt definierten Relationen in die ACCESS-Datenbank muss jedem Attribut ein Datentyp zugeordnet werden. Solche Datentypen repräsentieren das Darstellungsformat der in Feldern enthaltenen Informationen. Die Datentypzuweisung wird im Entwurfsfenster durchgeführt. Hier wird auch die jeweilige Feldgröße definiert. Dadurch wird im wesentlichen der Speicherbedarf der Datenbank bestimmt. Wird ein Datensatz angelegt, bekommt jedes Feld entsprechend der im Entwurf vereinbarten Feldgröße Speicherplatz zugewiesen, auch wenn weniger Speicherplatz erforderlich ist. Durch Gültigkeitsregeln lässt sich sicherstellen, dass die eingegebenen Dateninhalte sinnvolle Werte enthalten. Weiterhin wird im Entwurfsmodus festgelegt, ob ein Feld Null-Werte enthalten darf, oder ob ein Index gesetzt wird.

Durch den Einsatz von Indizes erhöht sich in der späteren Anwendung die Abfragegeschwindigkeit. Prinzipiell sollten alle wichtigen Felder indiziert werden, nach denen sortiert oder in denen gesucht wird. Außerdem sollten alle Felder, die in Verknüpfungen verwendet werden, einen Index erhalten.

Nachdem sämtliche Tabellen erstellt sind, müssen die Beziehungen zwischen den einzelnen Tabellen in ACCESS definiert werden. Im Layoutfenster werden dafür zunächst alle Relationen aufgerufen. Die Beziehungen stellt man her, indem man das Feld des Primärschlüssels einer Tabelle zu dem korrespondierenden Fremdschlüssel-Feld einer anderen Tabelle zieht. Abb. 56 zeigt die so definierten Beziehungen.



**Abb. 56** Beziehungen zwischen Anlagenkomponenten und Produkten in ACCESS

Danach werden die Beziehungen näher bestimmt. Dazu werden die Optionen *referentielle Integrität*, *Aktualisierungsweitergabe* und *Löschweitergabe* bedarfsgerecht zugewiesen. ACCESS überprüft bei jeder Eingabe in ein Fremdschlüssel-Feld die refe-

referentielle Integrität und verhindert, dass diese verletzt wird. So kann beispielsweise kein Prozess für eine Anlage, die nicht existiert, erfasst werden. Der Anwender kann also in einer Detailtabelle keinen Datensatz anlegen, zu dem nicht bereits Daten in der Mastertabelle vorhanden sind. Mit der Aktualisierungsweitergabe wird sichergestellt, dass Änderungen am Primärschlüssel in allen betroffenen Fremdschlüsseln ebenfalls vollzogen werden. Bei Aktivierung der Löscherweitergabe werden beim Entfernen eines Datensatzes aus der Mastertabelle auch alle zugehörigen Daten in den Detailtabellen gelöscht.

## 5.2.2 Datenbankerweiterung

Die Datenbank der Simulationskomponenten kann jederzeit um neue Relationen ergänzt werden. Ebenso ist es möglich, Beziehungen neu zu definieren oder bestehende Tabellen durch zusätzliche Spalten zu erweitern. Es muss dabei allerdings die Datenintegrität beachtet werden. Vorgenommenen Änderungen müssen sorgfältig geplant werden, da sie ggf. Anwenderprogramme beeinflussen können, was zu einem hohen Anpassungsaufwand führen kann.

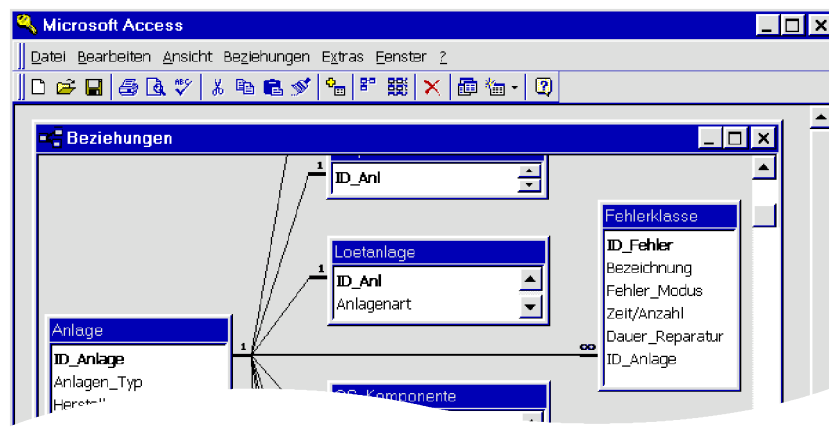
Die Ergänzung der Datenbank um die Möglichkeit, einer Maschine mehrere Fehlerereignisse zuweisen zu können, kann als Beispiel für eine Erweiterung dienen. Fehlerklassen werden dazu verwendet, um unplanmäßige, unregelmäßige Ausfallzeiten oder planmäßige Instandhaltungszeiten zu modellieren. Das Eintreffen dieser Ereignisse basiert entweder auf der abgelaufenen Simulationszeit oder der Anzahl von Teilen, die von einer Maschine bearbeitet wurden.

Bisher konnte in der Datenbank nur je ein Fehler- und Reparaturprozess pro Bearbeitungsprozess definiert werden. Nun sollen einer Maschine mehrere Fehlerprozesse zugeordnet werden können. Dazu wird zunächst die Relation *Fehlerklasse* mit den relevanten Attributen erstellt. Im vorliegenden Fall sind dies:

**Tabelle 14** Relationsmodell der Fehlerklassen

<i>Fehlerklasse</i>	( <u>ID_Fehler</u> , Bezeichnung, Fehler_Modus, Zeit/Anzahl, Dauer_Reparatur, ID_Anlage)
---------------------	--

Im Entwurfsmodus wird diese Relation in ACCESS implementiert und die Datentypen und Feldgrößen der einzelnen Attribute festgelegt. Die Relation *Anlage* steht mit dieser Relation in einer 1:n-Beziehung, was in ACCESS im Layoutfenster durch Verknüpfung der beiden Tabellen definiert wird (Abb. 57). Für die Beziehung wird auch in diesem Fall Einhaltung der referentiellen Integrität gefordert. Außerdem sollen Aktualisierungen oder Löschvorgänge in der Mastertabelle *Anlage* an die Detailtabelle *Fehlerklasse* weitergegeben werden. Diese Vorgaben werden wie bereits erläutert in den Dialogfenstern *Beziehungen* sowie *Verknüpfungseigenschaften* eingegeben.



**Abb. 57** Verknüpfung der Relationen Anlage und Fehlerklasse

### 5.2.3 Erstellung der Benutzeroberfläche

Für die Pflege der Datenbank wurde eine Anwenderoberfläche in Visual Basic erstellt. Der Benutzer erhält mit dieser Oberfläche eine strukturierte Sicht auf die Informationen der Datenbank. So wird es ihm erleichtert, neue Datensätze anzulegen, bereits vorhandene auf einen neueren Stand zu bringen und nicht mehr benötigte Daten zu löschen. Es wird dabei kein Wissen über die Struktur der Datenbank oder über die Abfragesprache SQL benötigt. Durch den Einsatz der Visual Basic Oberfläche muss ACCESS außerdem nicht auf dem verwendeten Rechner installiert sein, um mit der Datenbank arbeiten zu können. Dies wird durch die JET-Engine (Joint Engine Technology) ermöglicht, über die man auf das ACCESS-Format zugreifen kann [20].

Die Anwenderoberfläche gliedert sich in drei Datenbereiche: einen Teil machen die Formulare zur Definition der Anlagen aus, den zweiten bilden die Strukturelemente und im dritten werden die Produkteigenschaften festgelegt. Die zugehörigen Eingabemasken werden über die Menüleiste im oberen Teil der Oberfläche aufgerufen.

Die Maschinenformulare sind als Registerdatenblätter angelegt (Abb. 58 u. Abb. 59). Bei Neueingabe ist zunächst nur das erste Registerblatt, die Informationsseite, aktiv. Erst wenn eine Komponente erstellt ist, d. h. abgespeichert wurde, kann zu den folgenden Menüs gewechselt werden. Dadurch werden Verletzungen von Integritätsregeln vermieden.

Das Visual Basic Programm wurde so konzipiert, dass eine Erweiterung der Benutzeroberfläche möglichst einfach erfolgen kann. Um diese Erweiterbarkeit zu gewährleisten, wurden die Eingabemasken für die Maschinendaten vollkommen unabhängig voneinander gestaltet. Für jede Anlage und für jedes Strukturelement wurde ein eigenes Formular angelegt. Das vereinfacht bei zukünftigen Ergänzungen ein Hinzufügen, Ausbauen oder auch Löschen einzelner Eingabemasken, da keine Verknüpfungen zu den anderen Formularen beachtet werden müssen.

The image shows two overlapping windows from a software application titled 'Bestückautomat'. The top window is the 'Informationen' tab, showing fields for 'Hersteller' (SIEMENS), 'Modell' (SIPLACE 80 F 3), 'Arbeitsweise' (vollautomatisch), 'Montageart' (SMD), and 'Bestückung'. It also includes a 'Stellfläche' section with dimensions (Länge: 1587 mm, Breite: 2425 mm, Höhe: 1836 mm) and a 'Leiterplatten-Grenze' section with dimensions (min Länge: 50, min Breite: 50, max Länge: 508, max Breite: 460). The bottom window is the 'Prozeßdaten' tab, showing 'SIEMENS SIPLACE 80 F' and various process parameters: 'Prozeß-Bezeichnung' (Default), 'Prozeß-Beschreibung' (maximale Leistung), 'theoretische Leistung' (8000 BE/h), 'Dauer des Load-Prozesses' (4 sec), 'Dauer des Unload-Prozesses' (0 sec), 'absolute Genauigkeit' (0,090 mm), 'Wiederholgenauigkeit' (0,025 mm), 'Anzahl Bedienpersonal' (0), 'MTBF' (0,4 h), 'MTTR' (2 min), 'Wartungsintervall' (48 h), 'mittlere Wartungsdauer' (10 min), 'Rüstzeit' (10 min), 'Anzahl der Zuführungen' (80), and 'Dynamik Link Library' (\\cd\siplace.dll).

**Abb. 58** Eingabe von Maschinen in die Datenbank - Allgemeine Informationen und Prozessdaten

## 5.2.4 Initialisierung der Datenbank mit den Anlagenkomponenten

Nach Fertigstellung der Datenbank und der Benutzeroberfläche wurden die Anlagenkomponenten aus dem in Kapitel 4 beschriebenen Katalog übernommen. Da ein Großteil der Informationen aus unterschiedlichen Marktübersichten und Herstellerinformationen zusammengestellt wurde, lag die Hauptaufgabe auf der Ergänzung von fehlenden Werten und auf der Vereinheitlichung der Daten. Speziell die Prozessdaten und die Daten der differenzierten Leistung, deren Eingabemaschinen in Abb. 59 zu sehen sind, mussten abgeglichen werden. Als Basis wurden die Einheiten herangezogen, die in Tabelle 7 (S. 78) aufgeführt sind. Zu bemerken ist, dass meist nur eine Kennzahl für die Leistung einer Maschine angegeben wird, die Differenzierung der Leistung in unterschiedliche Einsatzfälle bleibt die Ausnahme.

The screenshot shows the 'Bestückautomat' application window with four tabs: 'Informationen', 'Prozessdaten', 'differenzierte Leistung', and 'Fertigungsparameter'. The 'Informationen' tab is active, displaying 'SIEMENS SIPLACE 80 F'. Below the tabs are input fields for 'Bauelemente-Spektrum', 'Bauelemente-Klasse', and 'Leistung [BE/h]', along with 'Hinzufügen >>' and '<< Entfernen' buttons.

BE_Spektrum	BE_Klasse	Leistung
0402-1608 SO	1	8000
BGA	2	2000
Super Fine Pitch	3	1800

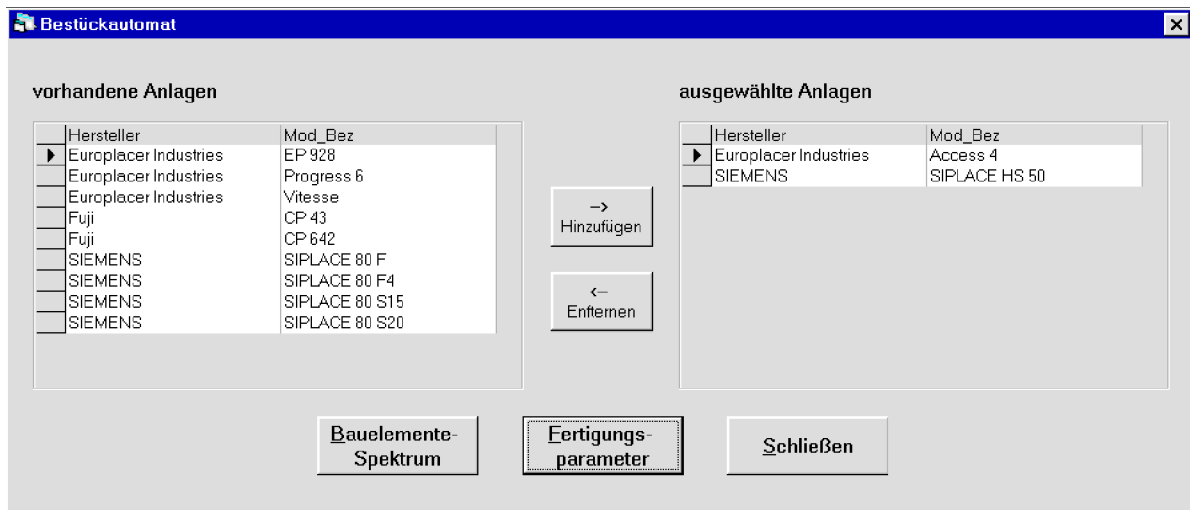
Parameter	Typ
4-times-measurement	Longint
conveyor	Integer
coplanarity measurement	Longint
Fiducials	Integer
IC head components	Longint
Ink spots	Integer
lengt	Real
mm/inch	Integer
mode	Integer
Nozzel changes	Longint
Number	Integer
Number of Trays	Longint
Revolverhead component	Longint
Speed	Integer
TactS20F4	Real
Type	Integer
width	Real

**Abb. 59** Eingabe von differenzierten Leistungs- und Fertigungsparametern

Bei der Eingabe von Maschinen sind die Parameter auf vier Registerdatenblätter verteilt. Das erste Datenblatt enthält neben allgemein Maschineninformationen auch die Möglichkeit ein Bild und eine 3D-Darstellung einzugeben. In der zweiten Maske können Fertigungsprozesse definiert werden (Abb. 58). Die beiden anderen Masken dienen zur Definition von Bauelementklassen und zur Spezifizierung der Parameter für die Maschinenlogiken (Abb. 59). In den Masken sind keine Muss-Felder vorhanden, fehlende Werte werden bei der Übergabe der Komponenten an die Simulation erkannt und gemeldet.

Nachdem der Grunddatensatz für eine Komponente angelegt wurde, sind auch die übrigen Registerblätter aktivierbar. Die Registerseite "differenzierte Leistung" ist nur im Bestückautomaten-Formular enthalten. Die Anzeige der Daten erfolgt hier tabellarisch (Abb. 59). Daten aus den Eingabefeldern können durch Betätigen der entsprechenden Schaltflächen in die Tabelle eingetragen oder gelöscht werden. Analog ist die Funktionsweise des Datenblatts "Fertigungsparameter". Hier werden die Parameter definiert, die von dem zur Anlage gehörenden Logikbaustein verwendet werden. Für den späteren Einsatz des Bausteins in der Simulation müssen die Datentypen der Parameter eingegeben werden. In der Datenbank selbst werden die Parameterwerte als Text hinterlegt, da viele Datentypen, wie beispielsweise *Real*, von ACCESS nicht unterstützt werden. Die Rückkonvertierung erfolgt in den Schnittstellen. Durch dieses Vorgehen bleibt auch die Flexibilität bei der Entwicklung der Logikbausteine gewahrt.

Bei der Aufnahme von Produkten (Leiterplatten) werden nach der Eingabe allgemeiner Daten mögliche Maschinen oder Anlagen in der Betriebsmittelauswahl selektiert (Abb. 60). Für die ausgewählten Betriebsmittel können dann spezifische Daten zum Bauelementespektrum und zu den Fertigungsparametern in separaten Masken eingegeben werden, ähnlich derer bei der Parameterdefinition (Abb. 59), jedoch ergänzt um die Zuweisung konkreter Werte.



**Abb. 60** Betriebsmittelauswahl - Bestückautomaten

Schließlich ist noch ein Formular zur Eingabe von Arbeitsplänen vorhanden. Dieses erreicht man über die Schaltfläche "Arbeitsplan" im Leiterplatten-Formular. Hier besteht die Möglichkeit für eine Leiterplatte mehrere Arbeitspläne anzulegen, falls mehrere Produktionsvarianten möglich sind, die ggf. in der Simulation verglichen werden sollen. In der Auswahlliste "Prozess-Schritt" werden bereits einige Fertigungsschritte, wie Kleberauftrag oder Reflowlöten, angeboten. Nicht aufgeführte Schritte können im Textfeld eingegeben werden. Sie werden automatisch in die Auswahlliste aufgenommen. Wird zu einem Arbeitsschritt kein Betriebsmittel angegeben, kann die Bearbeitung theoretisch auf jeder fähigen Maschine erfolgen, wird dagegen ein Betriebsmittel angegeben ist damit eindeutig festgelegt, auf welcher Maschine im Fertigungssystem der Arbeitsschritt erfolgt. Details zur interaktiven Erstellung und automatisierten Eingabe von Arbeitsplänen finden sich in Kapitel 6.

Speziell bei Bestückautomaten, Schablonendruckern und Lötöfen konnte eine große Zahl der am Markt befindlichen Anlagen in die Datenbank aufgenommen werden. Dadurch wurde für den Praxiseinsatz der Simulationskomponenten eine breite Basis geschaffen. Bei Praxistests der Datenbank zeigte sich, dass neue Maschinen sehr schnell eingegeben werden können. Dabei wurde festgestellt, dass durch die konsequente Verwendung von in der Industrie üblichen Bezeichnungen die Akzeptanz des Systems sehr hoch ist und somit der Einsatz auch durch simulationsunerfahrene Anwender schnell möglich ist.

## 5.3 Parametrierung der Simulationskomponenten aus externen Datenquellen

Die vorgestellte Datenbank mit den maschinennahen Simulationskomponenten ist auf jedem neueren Windows-PC lauffähig. Unter der in Visual Basic erstellten Benutzeroberfläche lassen sich neue Maschinen und Anlagenteile eingeben. Es kann jedoch von Nutzen sein, Daten aus externen Quellen direkt in die Datenbank einzuspielen, um den Eingabeaufwand zu reduzieren oder um Daten abzugleichen. Das Internet bietet dafür heute als standardisierte Netzwerkarchitektur ideale Möglichkeiten. Im Folgenden werden dazu zwei realisierte Systeme beschrieben.

### 5.3.1 Internetbasierte Datenbankeingabe der Simulationskomponenten

Die internetbasierte Dateneingabe (Abb. 61) ermöglicht es, neue Maschinen in die Datenbank einzugeben, ohne dass die Datenbankanwendung selbst beim Benutzer installiert ist. Die Datenbank kann bei einem Dienstleister oder Simulationsanwender hinterlegt sein. Die Eingabe neuer Maschinen kann von extern z. B. durch Maschinenhersteller erfolgen, die ihre Maschinen als Simulationskomponenten zu Verfügung stellen wollen. Durch die Internet-Formulare werden der benötigte Informationsumfang und die geforderten Formate vorgegeben. Die Eingaben werden auf unvollständige oder fehlerhafte Einträge überprüft, bevor sie übertragen werden.

Für die verschiedenen Maschinentypen wurden, wie in der Datenbank-Benutzeroberfläche, eigene Eingabeformulare erstellt. Die in diesen Formularen enthaltenen Eingabefelder besitzen die gleichen internen Bezeichnernamen wie die Spaltenüberschriften der ACCESS-Datenbank. Dadurch lassen sich kompatible Input-Dateien für die Datenbank erzeugen. Diese Spaltenüberschriften als erste Zeile in die Input-Dateien einzutragen ist zwar nicht zwingend notwendig, erleichtert aber die Lesbarkeit der Dateien. Über Datei-Buttons kann der Anwender Zusatzdateien (Photo, 3D-Darstellung, Logikbaustein) spezifizieren und von seinem lokalen Rechner zusammen mit dem Formularinhalt an den Server-Rechner übertragen.

Die übermittelten Informationen werden auf dem Server-Rechner in das ACCESS-kompatible CSV-Format (Comma Separated Values) gebracht. Darin sind die Daten analog zur Datenbank in einem tabellarischen Format angeordnet. Die Datentypen der Felder (Spalten) sind identisch mit denen der Referenzmodell-Datenbank. Die generierten Dateien können in diesem Format in ACCESS importiert werden. Dazu werden die Informationen an die bestehenden Tabellen der Datenbank angefügt. Der Importvorgang wird mit einem kleinen Visual-Basic Tool durchgeführt, das die Aufteilung der Daten auf die relevanten Tabellen übernimmt und dabei die Vergabe der Primär- und Sekundärschlüssel koordiniert.



The screenshot shows a web browser window titled "RMK - Maschineneingabe - Netscape". The main content area is a form titled "Maschineneingabe - Bestückautomat". The form includes the following fields and values:

- Hersteller: SIEMENS
- Modell: SIPLACE 80 F3
- Arbeitsweise: vollautomatisch
- Höhe: 1836 mm
- min Breite: 508 mm
- max Breite: 460 mm
- Ausgang: 1
- theoretische Leistung: 8000 BE/h
- Anzahl Bedienpersonal: 0
- Dauer Load Prozeß: 4 s
- MTBF: 0,4 h
- Dauer Unload Prozeß: 0 s
- MTTR: 2 min
- absolute Genauigkeit: 0,09 mm
- Wartungsintervall: 48 h
- Wiederholgenauigkeit: 0,025 mm
- mittlere Wartungsdauer: 10 min
- Anzahl Zuführungen: 80

Below these fields are three sections for file uploads, each with a "Durchsuchen..." button:

- Photo (JPG, TIF, GIF, BMP): C:\schloegl\siplace80f.jpg
- 3D-Darstellung (DXF, STL, IGES): C:\schloegl\siplace.dxf
- Logikbaustein: C:\schloegl\siplace.dll

A zoomed-in view of the right side of the form shows additional fields for "Pufferkapazität", "Eingang:", "Ausgang:", "Bedienpersonal:", "Wartungsintervall:", and "Wartungsdauer", each with a corresponding input field and a "Durchsuchen..." button.

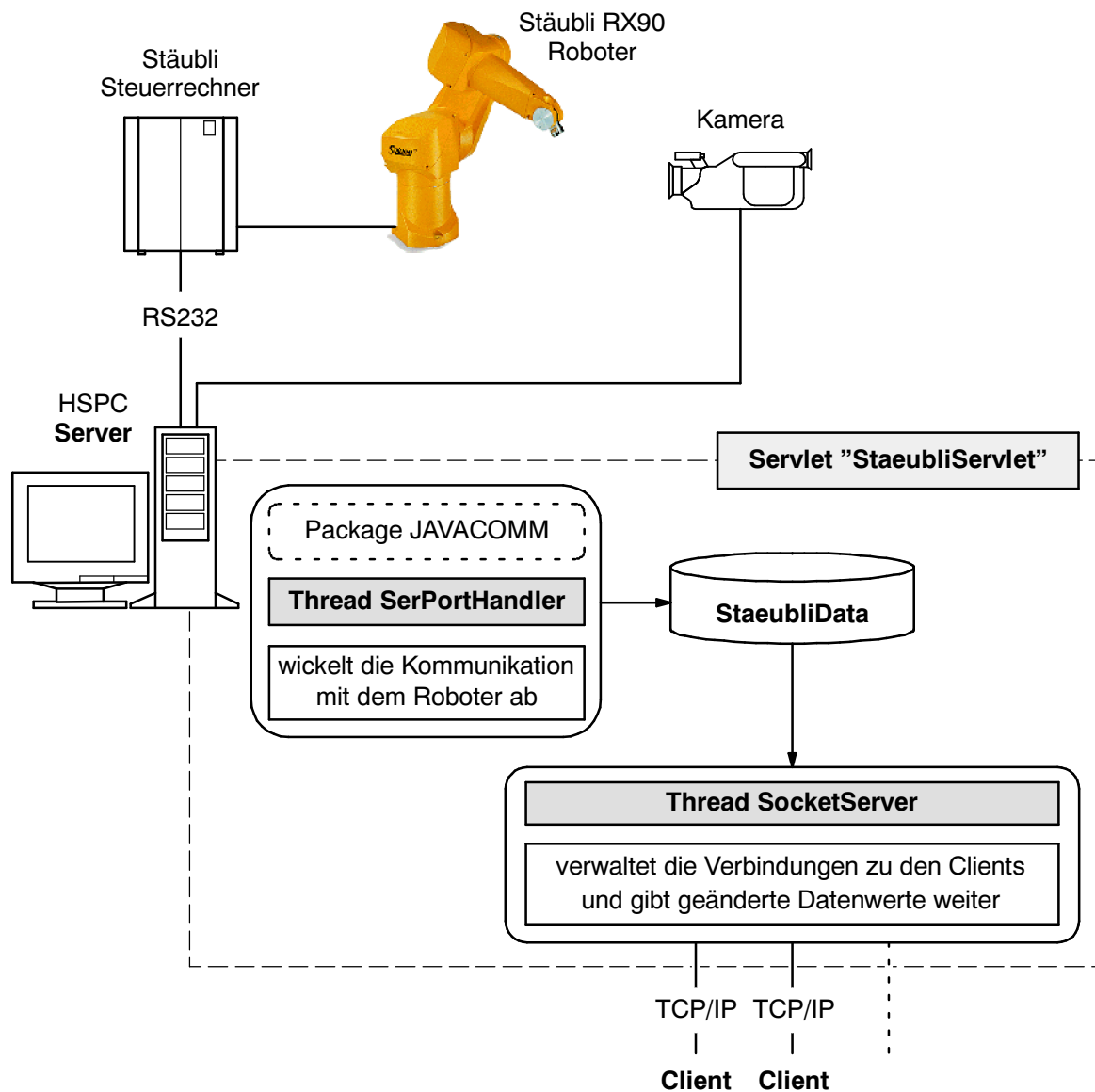
**Abb. 61** Parametrierung von Simulationskomponenten über Internet-basierte Eingabeformulare

### 5.3.2 Parameterbestimmung durch on-line Übertragung von Fertigungsdaten

Die Überwachung von Fertigungsprozessen mit Sensoren und eine weitgehende Vernetzung von Produktionseinheiten bilden die Grundlage für die Kommunikation von Fertigungseinrichtungen mit übergeordneten Beobachtungs- und Leitstellen. Die Internet-Technologie ermöglicht es, die dabei anfallenden Daten über das weltweite Netz entfernten Beobachtern zugänglich zu machen. Wenn für die Simulation einer Maschine spezielle Fertigungsdaten benötigt werden oder die in den Simulationskomponenten hinterlegten Werte validiert werden sollen, können diese Informationen direkt on-line von einer Maschine im Betrieb übernommen werden, wenn geeignete Mechanismen für die Datenübertragung vorhanden sind. Dafür wurde ein System geschaffen, das beliebige Maschinendaten während des Bearbeitungsprozesses im Internet verfügbar macht. Als ein Haupteinsatzgebiet dieses Systems kann die Ferndiagnose gesehen werden [27, 28], es können daraus jedoch auch direkt Prozessparameter für die Simulation abgeleitet werden.

Konkret wurde das System an einem Stäubli Industrieroboter realisiert, der über das Internet beobachtet werden kann. Die internen Parameter der Robotersteuerung und

angeschlossene Sensoren können abgefragt werden, wobei der Produktionsablauf durch eine Videoübertragung kontrolliert werden kann. Auf einem Server-Rechner, der mit dem Roboter verbunden ist, werden die Daten von einem Web-Server bereitgestellt, so dass sie von autorisierten Benutzern in einem Web-Browser betrachtet werden können. Bei der Implementierung wurde darauf geachtet, dass keine spezielle Software auf Client-Seite installiert werden muss.



**Abb. 62** Architektur des realisierten Client-Server-Systems zur Internetübertragung von Fertigungsdaten <sup>12</sup>

Der zu beobachtende Industrieroboter wurde über eine serielle Schnittstelle RS232 an einen Server-PC angeschlossen, auf dem ein HTTP-Web-Server und ein Videoserver laufen. Von diesem Rechner können beliebig viele, über das Internetprotokoll TCP/IP angeschlossene Rechner (Clients) die Fertigungsdaten abfragen und die Abläufe in

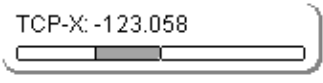
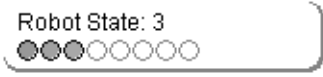

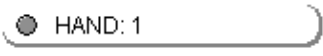
<sup>12</sup> Die Konzeption und Realisierung der Anbindung an den Stäubli Roboter erfolgte in Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Ing. Sami Krimi.

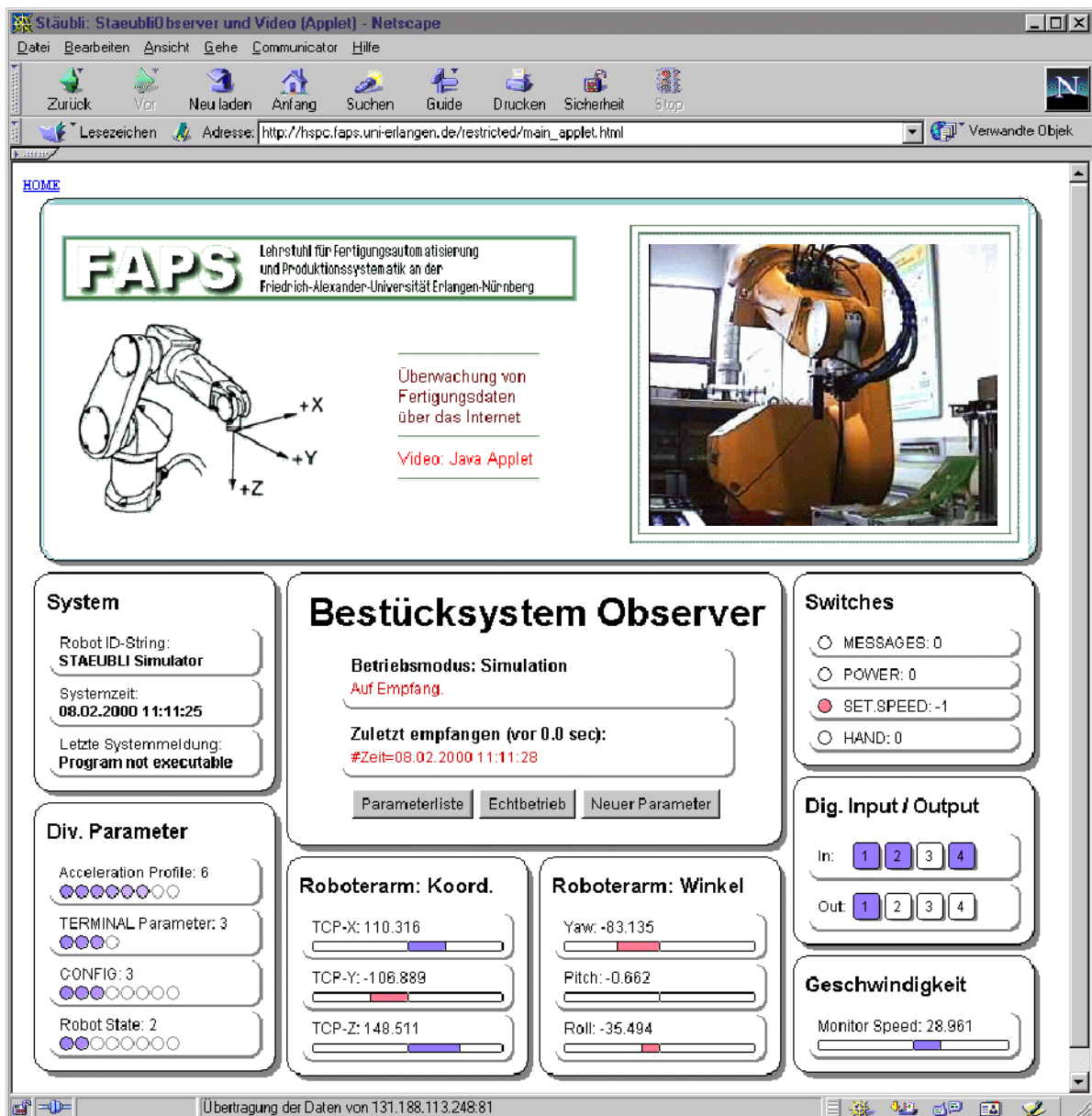
der Roboterzelle per Video beobachten (Abb. 62). Der Steuerrechner des Roboters liefert interne Parameter über die serielle Schnittstelle an den angeschlossenen Server. Zum Ansprechen der seriellen Verbindung zwischen Server-Rechner und der Steuerung wurde das Java Communications API (JAVACOMM) verwendet. Diese Kommunikation mit dem Server läuft in einem Hintergrundtask ab, während der Vordergrundtask den Roboter steuert. Der Hintergrundtask liefert zum einen kontinuierlich die Parameterdaten, die permanent von Interesse sind. Zum anderen sollen auch Client-Anfragen nach speziellen Informationen beantwortet werden können.

Auf dem Serverrechner läuft ständig das Web-Server-Programm, welches über das Java Servlet *StaeubliServlet* in Verbindung mit dem Roboter steht. Dieses Servlet wertet die Daten aus, die in einem Datenstrom von der Robotersteuerung geliefert werden und speichert sie in einer internen Datenstruktur. Sobald ein autorisierter Client Informationen vom Roboter anfordert, leitet der Web-Server die Anfrage an das *StaeubliServlet* weiter. Auf dem Client wird ein Java-Applet gestartet, das über Socketverbindungen ständig mit aktuellen Daten versorgt wird.

Der Client soll Informationen über die Betriebsparameter des Roboters geliefert bekommen, die so aktuell wie möglich sind. Dazu steht im Java-Applet, das die Visualisierung übernimmt, ständig ein *Thread* über *Sockets* in Kommunikation mit einem korrespondierenden Servlet-Thread auf dem Server. Dadurch erhält das Applet laufend die neuesten Daten, die es in einer internen Datenstruktur ablegt (Abb. 62). Ein anderer Thread baut aus dieser Datenstruktur die aktuelle Bildschirmanzeige mit graphischer Visualisierung auf. Für die Art der Visualisierung wurden die vorkommenden Parameter, je nach Wertebereich, in vier Kategorien eingeteilt:

**Tabelle 15** Visualisierung unterschiedlicher Parametertypen

<i>float</i>	Gleitkommazahlen	
<i>integer</i>	Werte im kleinen Ganzzahlbereich, ca. -15 bis +15	
<i>text</i>	Werte, die nur als Textstring dargestellt werden können	
<i>binary</i>	binäre Werte (der Stäubli-Roboter verwendet intern auch -1)	

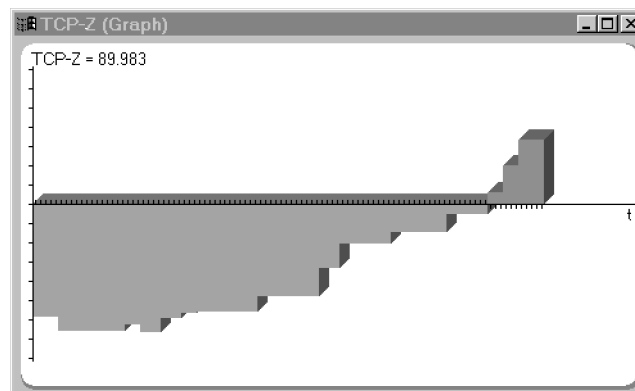


**Abb. 63** Benutzeroberfläche des Systems zur Übertragung von Fertigungsdaten

Die bei der Beobachtung der Fertigungszelle gewonnenen Daten lassen sich über die Zeit darstellen und protokollieren (Abb. 64). Aus diesen Protokollen lassen sich für die Simulation u. a. Taktzeiten, Durchsatz, das Fehlverhalten oder Lade- und Umrüstzeiten ableiten.

Das hier vorgestellte System zum Simulationsdatenabgleich über Internet stellt nur eine Möglichkeit zur Verbindung von realen Anlagen und Planungswerkzeugen dar. Weiterführende Entwicklungen zielen auf die direkte Kopplung von Simulationssystemen und prozessnahen Datenquellen, wodurch eine Instanziierung und Parametrierung eines Simulationsmodells durch korrespondierende Anlagenobjekte erfolgen kann. Als Beispiel sei hier das FORSIM-Projekt "Offene Datenkopplung zwischen An-

lage und Simulation" genannt, in dem für die Realisierung die standardisierte Kommunikations-Architektur CORBA eingesetzt wird.



**Abb. 64** Zeitliche Verlaufsdarstellung und Protokollierung eines Parameters zur Ableitung von Simulationsdaten

## 6 Generierung von Arbeitsplänen für die Ablaufsimulation

Das Nutzungspotential bestehender betrieblicher Informationssysteme für die Generierung von Simulationsmodellen ist allgemein anerkannt. Vor diesem Hintergrund wurden eine Reihe von Lösungsansätzen erarbeitet, welche die Verringerung des Modellierungsaufwandes durch die Nutzung von Schnittstellen zu anderen Informationssystemen erreichen [106, 112, 116, 133].

Wie in Kapitel 4 und 5 erläutert, wurde die Datenbank maschinennaher Simulationskomponenten ebenfalls darauf ausgelegt, den enthaltenen Produkten Arbeitspläne hinterlegen zu können, um zu Maschinenmodellen und darauf gefertigten Produkten auch entsprechend vordefinierte Produktionsabläufe für die Simulation bereitzustellen. Um den Einsatz der Datenbank dafür noch effizienter zu gestalten, wurde sie mit einem System zur automatisierten Arbeitsplanung gekoppelt, von dem Arbeitspläne für die spätere Steuerung eines Simulationslaufs schnell in die Datenbank eingelesen werden können. Dieses Arbeitsplanungssystem, speziell das in Kapitel 6.2 vorgestellte Werkzeug "Interaktives Prozess Flow-Chart", wurde ebenfalls im Rahmen der vorliegenden Arbeit realisiert<sup>13</sup>. Das System ermöglicht die Erstellung von Arbeitsplänen für unterschiedliche Fertigungstechnologien anhand spezifischer Wissensbasen. Im Folgenden wird der Aufbau der Wissensbasis für die gewählte Technologie Elektronikproduktion erörtert sowie die Entwicklung des Arbeitsplanungssystems und die Kopplung mit der Referenzmodell-Datenbank.

### 6.1 Analyse von Fertigungsabläufen und Wissensakquisition

Eine automatisierte Arbeitsplanerstellung setzt die detaillierte Analyse der Produktionsprozesse und der Vorgänge bei der Arbeitsplanung voraus. Aus dieser Analyse kann ein Prozessmodell der Arbeitsplanung abgeleitet werden, das in Form einer Wissensbasis rechnergestützt hinterlegt wird. Anhand dieser Wissensbasis wird der Prozess der Arbeitsplanung automatisiert abgearbeitet, wobei in Teilprozessen Informationen automatisch abgeleitet und generiert werden können. Eine solche Wissensbasis ist technologie- und unternehmensspezifisch. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Wissensbasis für die Arbeitsplanung in der Elektronikproduktion aufgebaut. Nach der Definition für Wissensmanagement fällt dieses Vorgehen unter *Management von Wissen* [49]:

*Wissensmanagement* ist das systematische und gezielte Management von Grundsätzen, Programmen, Praktiken und Aktivitäten im Unternehmen, die beim Teilen, Entwickeln und Anwenden von Wissen eine Rolle spielen. Operativ zielt das *Management von Wissen* auf das vorhandene Wissen und seine Ver-

<sup>13</sup> IAPPS – Integrated Automated Process Planning System, Brite Euram Projekt, 05/96 bis 04/99

netzung und Weiterverwendung. Strategisch zielt das Management *für* Wissen auf neues Wissen und Innovationskraft.

Die Wissensbasis wurde mit dem "Knowledge Acquisition Tool" LOCAM erstellt, das auf Wissensakquisition für die Arbeitsplanung ausgelegt ist. Mit dem Durchlaufen der Wissensbasis können Arbeitspläne für neue Produkte erstellt werden. Dabei werden auf Basis von logischen Regeln aus der Produktionstechnologie und Vorgaben aus den Bereichen Entwicklung und Qualitätssicherung interaktiv mit dem Arbeitsplaner die notwendigen Produktionsschritte festgelegt. Der so entstandene Arbeitsplan dient dann als Eingabe für die nachfolgende Überarbeitung im "Interaktiven Prozess Flow-Chart" (Kapitel 6.2.2).

### 6.1.1 Analyse der Arbeitsplanung zur Fertigung elektronischer Baugruppen

Die Arbeitsplanung zur Herstellung von Flachbaugruppen wurde zunächst auf Basis einer konkreten Fertigung analysiert. Auf Grundlage des Produktspektrums, der Regeln und des Wissens in der Arbeitsplanung sowie von Vorgaben aus dem Fertigungsablauf wurde ein logisches Flussdiagramm aufgebaut, welches das gegenwärtige Produktionsschema elektronischer Baugruppen abbildet. Das Flussdiagramm enthält dabei alle wesentlichen Prozessschritte für die Leiterplattenproduktion mit den jeweiligen Optionen bei den Herstellungsprozessen.

Im konkreten Fall durchläuft jedes neue Produkt einen Produktentstehungsprozess, der sich in fünf Phasen vom Konzept bis zur Serienanlauf erstreckt:

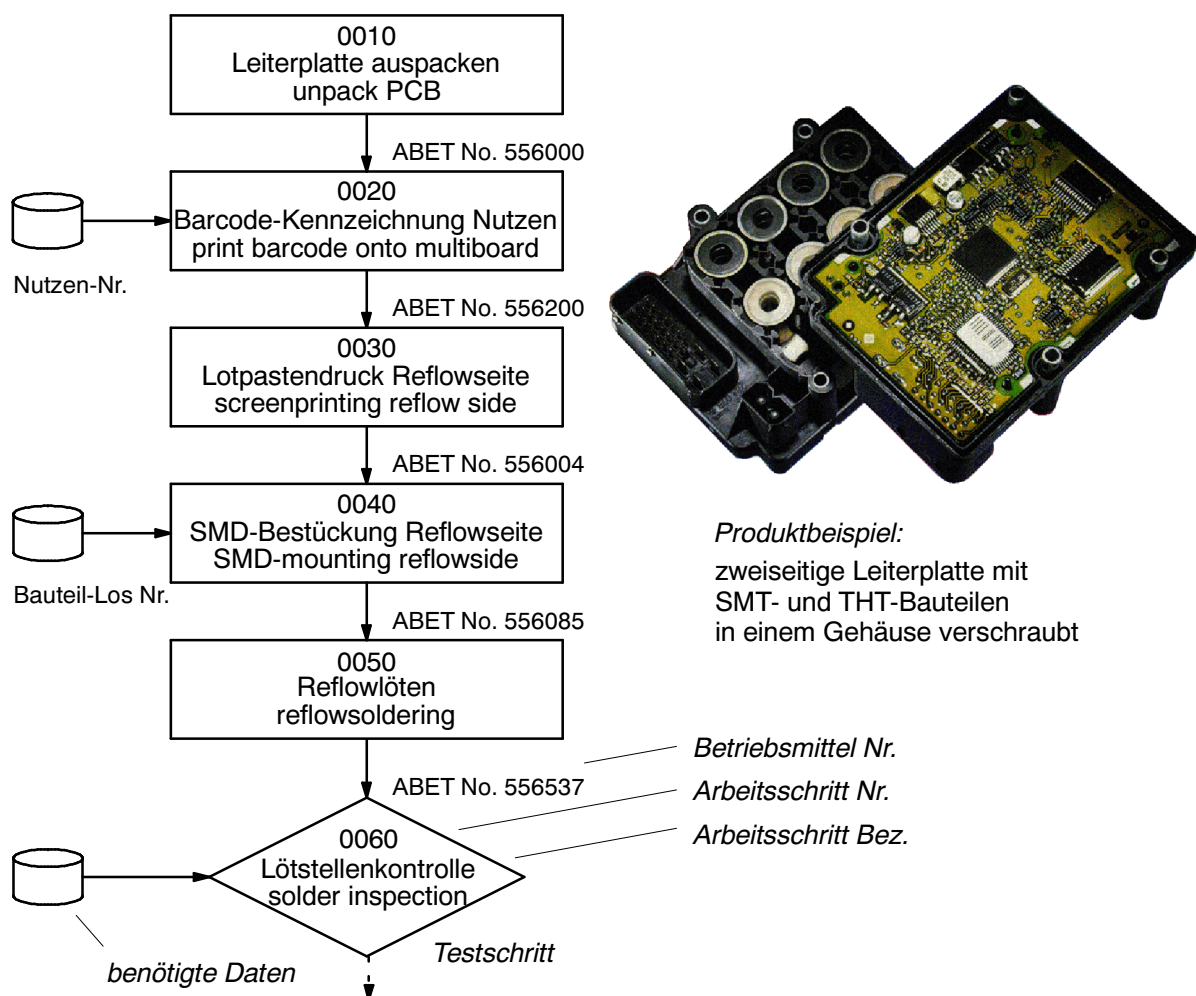
**Tabelle 16** Produktentstehungsprozess für Serienprodukte

Phase 1	Konzept	Analyse und Prüfung der technischen und ökonomischen Machbarkeit basierend auf einer Kundenanfrage
Phase 2	Planung und Spezifikation	Erstellung eines Projektplans, Prüfung der technischen Realisierbarkeit anhand eines funktionsfähigen Prototyps
Phase 3	Entwicklung	Entwicklung des Produkts und des Fertigungsprozesses bis hin zur Serienreife
Phase 4	Qualifikation	Qualifikation des Produkts und des Fertigungsprozesses
Phase 5	Serienanlauf	Serienstart der Produktion

Der Produktentstehungsprozess ist dabei in einer Produktentstehungsrichtlinie detailliert festgehalten. Unter Einbeziehung aller betroffenen Abteilungen und Mitarbeiter dokumentiert diese Richtlinie den Sollprozess der Produktentstehung für eine schnelle und effiziente Entwicklung qualitativ hochwertiger Produkte.

Das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Werkzeug wird in Phase 3, der Entwicklung des Fertigungsprozesses, angewandt und unterstützt dort die Arbeitsplanung. Der Arbeitsplaner entwickelt den Fertigungsprozess für eine neue Baugruppe in erster Linie auf

Grundlage der Entwicklungsdaten des Produkts. Aus der Konstruktionszeichnung und der Stückliste ergeben sich die Herstellungsprozesse für eine Baugruppe. Aus den vorangehenden Produktentstehungsphasen Konzept sowie Planung und Spezifikation müssen die festgelegten Anforderungen, wie zum Beispiel Qualitätsanforderungen und die damit verbundenen Prüfverfahren, in die Festlegung der Arbeitsfolge einbezogen werden. Bei der Arbeitsplanung müssen außerdem die zur Verfügung stehenden bzw. für die Produktion geplanten Fertigungseinrichtungen berücksichtigt werden. Weiterhin fließen das spezielle Wissen des Arbeitsplaners, gesammeltes Firmenwissen sowie Erfahrungen bei der Herstellung ähnlicher Produkte in den Prozess der Arbeitsplanung ein.



**Abb. 65** Auszug aus einem Arbeitsplan Flow-Chart für die Herstellung einer Flachbaugruppe <sup>14</sup>

Die Erstellung von Arbeitsplänen für die Baugruppen erfolgte beim Industriepartner bisher von Hand durch den jeweiligen Arbeitsplaner. Unter Berücksichtigung der beschriebenen Bedingungen und Informationen wurden die nötigen Arbeitsschritte für die Produktherstellung mit Hilfe einer Grafiksoftware in Form von Flow-Charts aufgebaut (Abb. 65). Diese Flow-Charts zeigen die Reihenfolge der einzelnen Fertigungs-

<sup>14</sup> Für die konkrete Anwendung wurde das System zweisprachig realisiert.



schritte für die Produktherstellung und bilden zusammen mit den Arbeitsanweisungen für die einzelnen Arbeitsschritte den Arbeitsplan. Der Arbeitsplaner hatte dabei außer einigen graphischen Elementen keine vorgegebenen Hilfsmittel zum Aufbau des Plans. Standardisierte und immer wiederkehrende Abfolgen von Fertigungsschritten, wie "Lotpastendruck - SMD-Bestückung - Reflowlöten - Röntgenkontrolle", wurden bei jedem Arbeitsplan erneut angelegt. Bestehende Regeln für die Planung der Fertigungsabläufe musste der Arbeitsplaner selbst einbringen. Es bestand auch keine direkte Datenkopplung der Entwicklungsoberfläche für den Arbeitsplan zu den Produkt- und Fertigungsinformationen. Die notwendigen Informationen, wie zum Beispiel die Stückliste, mussten separat eingesehen werden.

Das entstandene Werkzeug unterstützt den Arbeitsplaner bei seinen Aufgaben in diesem Bereich. Er kann nun ohne großen Aufwand Arbeitspläne erzeugen, wobei die zuvor definierten Regeln für die Fertigungsabläufe befolgt werden.

### **6.1.2 Aufbau einer Wissensbasis für die Arbeitsplanung**

Das für die Wissensakquisition eingesetzte Werkzeug LOCAM speichert die Logik der Arbeitsplanung in Form eines Flussdiagramms, das aus Aktions- und Entscheidungsblöcken besteht. In dieser Wissensbasis ist die Logik hinterlegt, die dann zur Planerzeugung verwendet wird. LOCAM stellt Mechanismen zu Verfügung, mit denen die logischen Abläufe der Arbeitsplanung festgehalten werden können, nach denen der Arbeitsplan manuell erstellt wird.

Die Aktionsblöcke enthalten Befehle für das Einlesen und Verarbeiten von Daten einer Datei oder Datenbank, arithmetische und numerische Operationen, das Aufrufen von Unterprozessen oder für das Erzeugen von Arbeitsschritten im Arbeitsplan. Sie bilden die Benutzerschnittstelle zwischen dem Planungswerkzeug und dem Arbeitsplaner. In den Entscheidungsblöcken werden ja/nein-Fragen zur Produktspezifikationen gestellt oder die notwendigen Informationen werden aus vorher spezifizierten Datenquellen ermittelt. Durch die Verzweigung an den Entscheidungsblöcken wird der logische Ablauf entlang der relevanten Äste der Wissensbasis geleitet.

Das Wissensbasis Flow-Chart kann mit einem graphischen Editor oder mit textuellen Formularen erzeugt und verwaltet werden. Im graphischen Editor werden die Aktions- und Entscheidungsblöcke auf der Arbeitsfläche platziert und mit Linien verbunden, die den Ablauf der Logik repräsentieren. Der Inhalt der Blöcke, die Anweisungen in den Aktionsblöcken sowie die Abfragen in den Entscheidungsblöcken, wird über Formulare eingetragen.

Für den Einsatz des Werkzeugs in der Arbeitsplanung für die Elektronikproduktion wurden zunächst die logischen Abläufe für die Fertigung elektronischer Baugruppen sowie die verschiedenen Möglichkeiten und Alternativen für die Produktionsschritte strukturiert, die alle Variationen bei der Herstellung widerspiegeln (vgl. Kapitel 4.2). Basierend auf einem konkreten Produktspektrum wurde so ein Flussdiagramm der mögli-

chen Fertigungsschritte erstellt, das auf den entsprechenden Fertigungsabläufen, den vorgegebenen Regeln und dem Wissen der Arbeitsplaner beruht.

Aus dem Spektrum der Produktvarianten, den verwendeten Bauteilarten und den damit verbundenen Verfahrensvariationen für die Herstellung der Baugruppen wurde eine Anzahl von Arbeitsplänen ausgewählt, die alle wesentlichen Produkt- und Prozessvariationen enthält. Die Arbeitspläne wurden verglichen und die Gemeinsamkeiten sowie die Unterschiede herausgearbeitet.

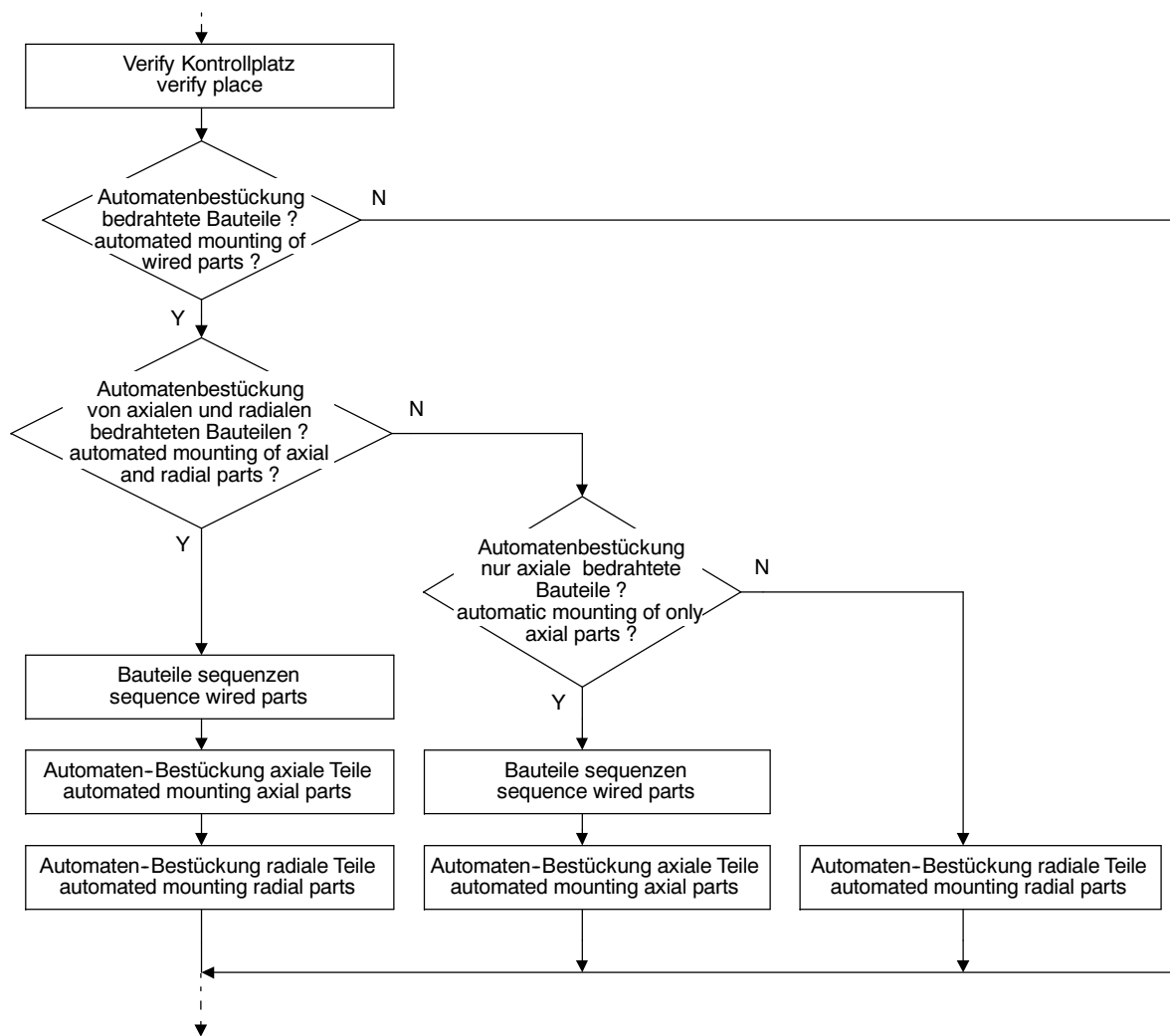
Zur Herstellung des analysierten Produktspektrums kommen etwa 65 unterschiedliche Fertigungsschritte zum Einsatz. Für diese Fertigungsschritte wurde ein vierstelliges Nummerierungssystem entwickelt, um eine eindeutige Zuordnung der Prozesse in einer strukturierten Auflistung zu erreichen. Die Schlüsselnummern sind wie folgt aufgebaut:

**Table 17** *Nummerierungssystem für Fertigungsschritte in der Elektronikproduktion*

- 1... Fertigungsschritte für die Leiterplatte vor der Gehäusemontage
- 2... Fertigungsschritte nach Fertigstellung der Leiterplatte
- 9... Benutzerdefinierte Fertigungsschritte
- .0.. einzelne Fertigungsschritte, die nicht zu einer Gruppe gehören
- .1.. Barcode-Kennzeichnung für die Nachverfolgbarkeit
- .2.. Fertigungsschritte, die SMD-Bauteile betreffen
- .21. Fertigungsschritte, die SMD-Bauteile auf der Oberseite betreffen
- .22. Fertigungsschritte, die SMD-Bauteile auf der Unterseite betreffen
- .3.. Fertigungsschritte für bedrahtete Bauteile
- .31. Montageschritt für Stecker bzw. Stiftleiste
- .4.. Testverfahren und dazugehörige Fertigungsschritte
- .5.. Schutz der Leiterplatte
- .6.. Montageschritte für das Gehäuse
- .61. Typenkennzeichnung der gesamten Baugruppe

Aus den Ergebnissen der Prozess- und Variantenanalyse wurde eine graphische Darstellung erstellt, die alle wesentlichen Prozessschritte, Alternativen und Variationen enthält. In Abb. 66 ist ein Auszug aus dem erstellten Flussdiagramm abgebildet. Auf der Grundlage dieser Darstellung wurden die logischen Regeln für das "Knowledge Acquisition Tool" erarbeitet.

Die einzelnen Arbeitsschritte für die Herstellung der Baugruppen werden als Rechteck dargestellt. Gibt es Alternativen für den Fertigungsablauf, verzweigt sich das Flussdiagramm. Angelehnt an das System LOCAM ist eine solche Verzweigung durch eine ja/nein-Frage gekennzeichnet. Entsprechend der Antwort folgt der nächste Arbeitsschritt. Die gestellten Fragen entsprechen sinngemäß den Fragen, die der Arbeitsplaner beantworten muss, wenn er einen neuen Arbeitsplan für eine Baugruppe erstellt.



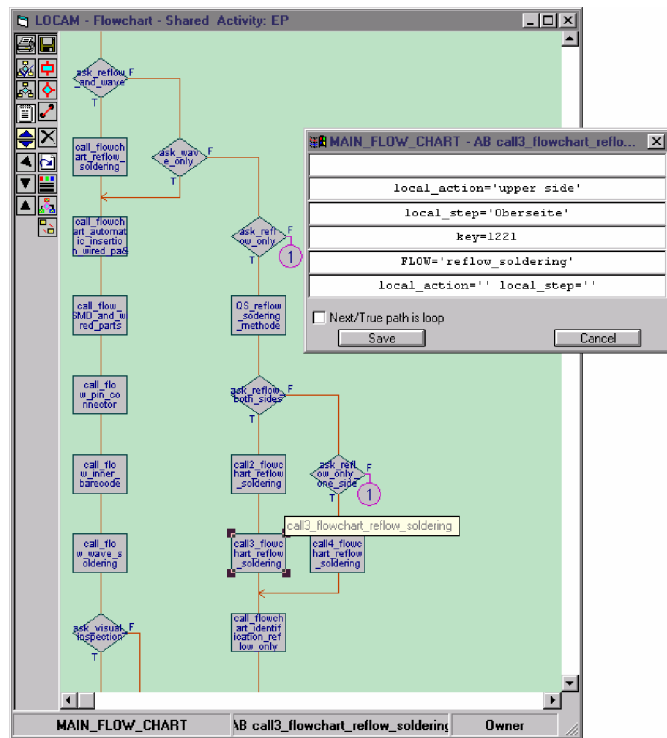
**Abb. 66** Auszug aus dem Flussdiagramm der Fertigungsprozesse in der Elektronikproduktion - Automatische Bestückung bedrahteter Bauteile

In der graphischen Eingabe wird die logische Verknüpfung der einzelnen Blöcke am deutlichsten. Das System LOCAM erlaubt es mehrere Flussdiagramme in beliebiger Tiefe zu verschachteln. Aus einem Flussdiagramm kann so ein untergeordnetes Diagramm als Unterprogramm aufgerufen werden. Beim Aufbau der Wissensbasis werden deshalb Teilprozesse, die eine abgeschlossene Operationsfolge darstellen, als eigenes Diagramm angelegt (Abb. 67). Diese hierarchische Strukturierung verbessert die Übersichtlichkeit, sie erleichtert den Aufbau und spätere Variationen und Anpassungen an Veränderungen im Produktionsprozess.

Um die Übersichtlichkeit und die Pflege der Wissensbasis zu gewährleisten, wurden nicht alle theoretisch möglichen Varianten der Fertigung eingetragen. Sehr seltene Arbeitsschritte, die z. B. nur einmalig für ein bestimmtes Produkt vorkommen, wurden vernachlässigt. Diese können bei Bedarf im "Interaktiven Prozess Flow-Chart" eingefügt werden (siehe Kapitel 6.2.1).

## MAIN\_FLOWCHART

- multiboard\_and\_identification
  - ↳ barcode\_printing
- automatic\_insertion\_wired\_parts
- SMD\_or\_only\_wired\_parts
- pin\_connector
- inner\_barcode
  - ↳ manual\_mounting\_wired\_parts
- identification\_reflow\_only
- wave\_soldering
- reflow\_soldering
- attaching\_typelabel
- testing
  - ↳ funktion\_test
- coating\_of\_PCB
- mounting\_of\_housing
  - ↳ sealing\_of\_housing

Wissensakquisition für die Elektronikproduktion  
im System LOCAM

**Abb. 67** Hierarchie der Wissensbasis und Auszug aus der Repräsentation im System LOCAM

## 6.2 Automatisierte Generierung von Arbeitsplänen

In der Arbeitsplanung werden alle Arbeitsschritte definiert und soweit wie möglich optimiert, die notwendig sind, ein definiertes Produkt in vereinbarter Qualität rationell und kostengünstig herzustellen. Arbeitspläne legen fest, wie Ausgangsmaterialien in ein gewünschtes Produkt transferiert werden, das den funktionalen Anforderungen genügt, wobei es durch die Konstruktion vorgegeben und im Produktmodell erfasst ist.

Mit den Weiterentwicklungen in der Produktionstechnik hat sich die Rolle der Planungsingenieure gewandelt, weg vom traditionellen Fokus der Fertigungsfolgeermittlung und der Vorgabezeiten. Jedoch haben CAPP-Systeme als Basiswerkzeuge der Arbeitsplaner mit diesen Veränderungen nur ungenügend Schritt halten können. Die Kombination von neuen Anforderungen und neu entwickelten Technologien schafft zusätzlich die Notwendigkeit für hochentwickelte, automatisierte Arbeitsplanungssysteme [89].

Die Praxis der Arbeitsplanung in der verarbeitenden Industrie kann bisher im allgemeinen durch folgende Punkte gekennzeichnet werden:

- hoher Anteil an sich wiederholender, manueller Arbeit
- Mangel an direktem oder automatischem Zugriff auf Konstruktions- und Fertigungsinformationen
- ineffektive Verwendung von Unternehmensressourcen, -wissen und -informationen
- Inkonsistenz zwischen Konstruktions- und Fertigungsdaten

Ein Großteil der vorhandenen CAPP-Systeme ist inflexibel, überentwickelt, kompliziert oder aufwendig zu implementieren, begrenzt in der Anwendbarkeit, abgekoppelt von anderen Planungsfunktionen (z. B. Disposition, Werkzeugverwaltung), benutzerunfreundlich [89]. Sie entsprechen also nicht den Anforderungen der Endanwender.

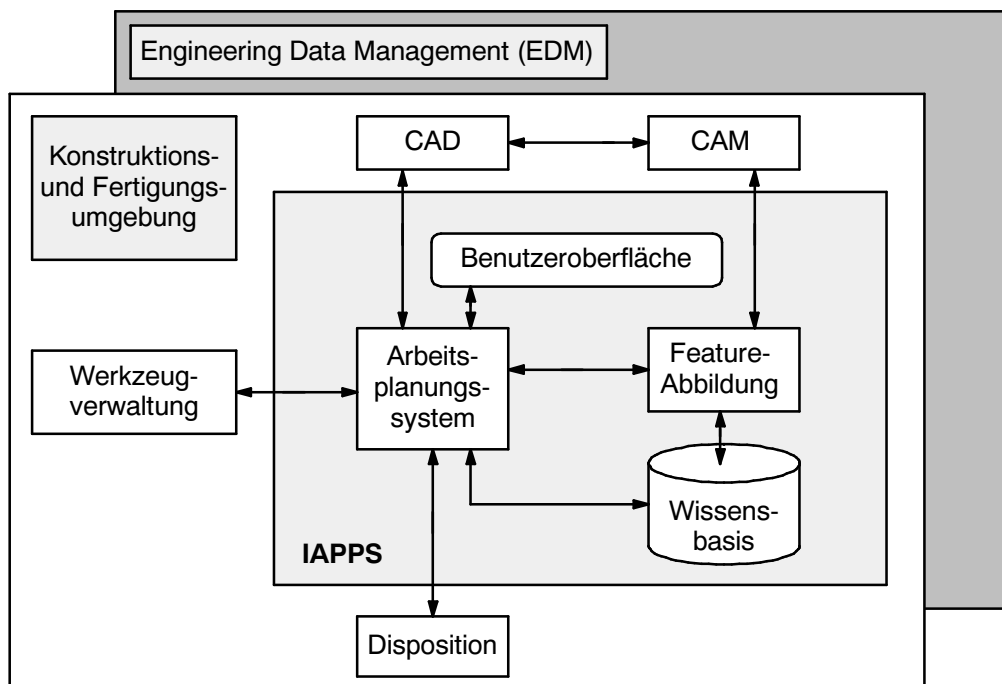
Dies war die Ausgangsposition des BRITE EURAM Projekts IAPPS "Integrated Automated Process Planning System". Das Ziel dieses Projektes war die Verbesserung der beschriebenen Situation für die europäische verarbeitende Industrie, speziell für die Bereiche Automobilbau, Luftfahrtindustrie, Elektronikproduktion und allgemeine Fertigung. Das Ziel wurde durch die Evaluierung, Entwicklung und Validierung eines integrierten, automatisierten Arbeitsplanungssystems erreicht, das auf die Anforderungen der Endanwender zugeschnitten ist. Das Projekt baute dabei auf den Ergebnissen der relevanten Untersuchungen aus der AIT-Pilotphase<sup>15</sup> auf.

Basierend auf den spezifischen Zielen, abgeleitet aus den in der Pilotphase der AIT-Initiative ermittelten Benutzeranforderung (vgl. AIT Deliverable 3.2.2.1), wurden folgende Arbeitspunkte durchgeführt:

- Entwicklung von Werkzeugen zur Arbeitsplanung, die in ein Feature-basiertes Konstruktionssystem integriert sind und die Fertigungs-, Kosten- und Konstruktionsgesichtspunkte gleichermaßen berücksichtigen
- Aufbau von Prototypen, Test und Implementierung dieser Werkzeuge
- Formalisierung von Fertigungswissen in einer Wissensbasis und Integration im CAPP-System
- Einbindung von Fähigkeiten zur Selbstanpassung, die das System selbstlernend machen

In Abb. 68 ist die Architektur des realisierten Systems IAPPS dargestellt. Es ist ein System, das, wie alle Komponenten des hier vorgestellten Gesamtkonzepts, auf einem EDM-System basiert. Das Arbeitsplanungssystem ist direkt mit der Wissensbasis verbunden, welche die Logik des Prozesses Arbeitsplanung enthält. Über Schnittstellen bzw. das EDM greift das System auf die Konstruktionsdaten, die Informationen aus der Disposition und die Werkzeugverwaltung zu. Fertigungsinformationen für verwendete Features werden über das Modul zur Feature-Abbildung ebenfalls in der Wissensbasis hinterlegt. Die Feature-Abbildung arbeitet dabei eng mit den Funktionen des CAM zusammen. Beim Erkennen dieser Features im CAD-Modell werden dann die notwendigen Fertigungsinformationen im Arbeitsplan aufgenommen.

<sup>15</sup> AIT: EU-Initiative "Advanced Information Technology"



**Abb. 68** Architektur des integrierten, automatisierten Arbeitsplanungssystems IAPPS [89]

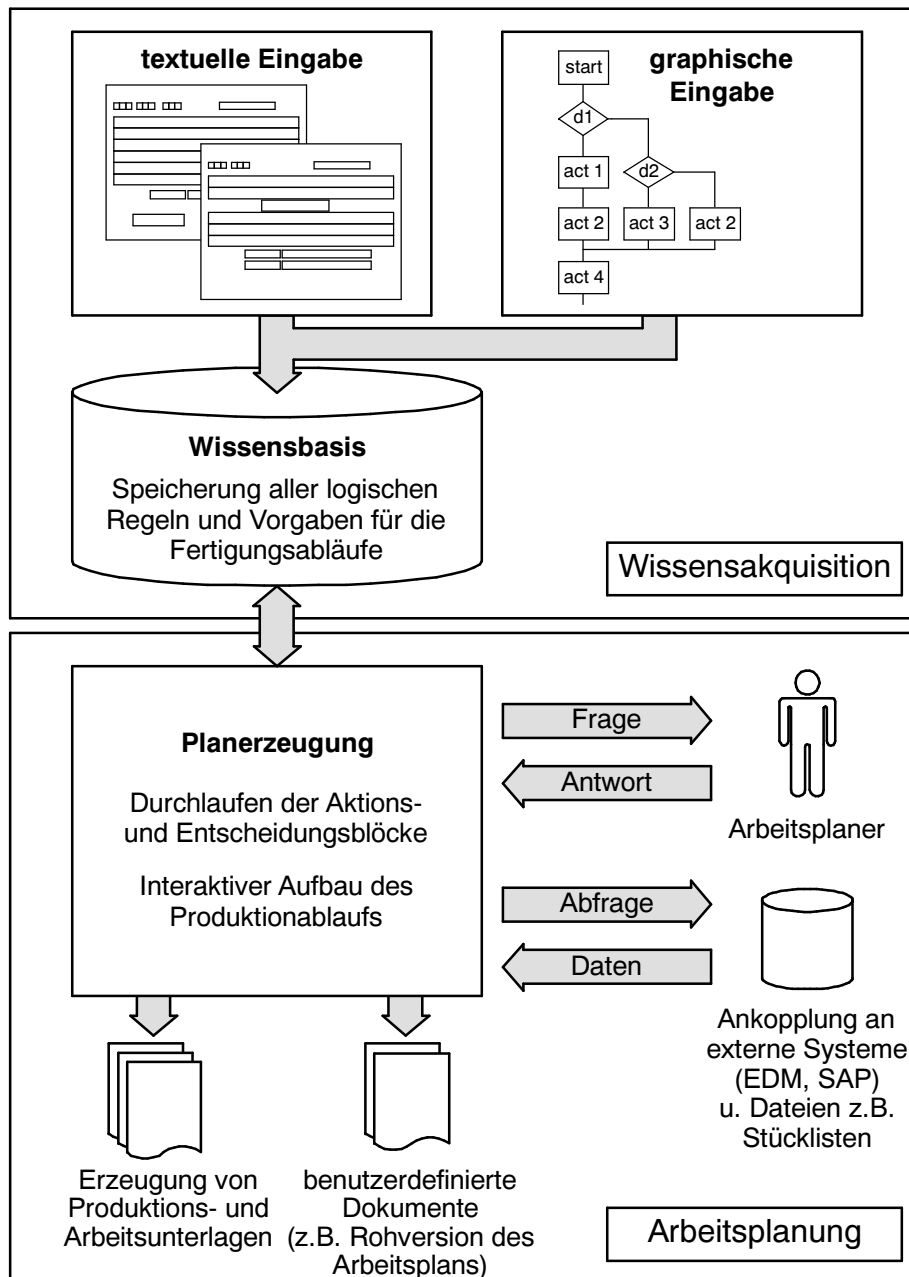
Dieses, entsprechend der obigen Ziele aufgebaute, integrierte, automatisierte Arbeitsplanungssystem kann folglich den zeitaufwändigen, arbeitsintensiven Prozess der Arbeitsplanung entscheidend reduzieren und optimiert die Ressourcennutzung. Als Projektziele wurden festgelegt [89]:

- Reduzierung der Time-to-Market um 25%
- Verringerung der Kosten um 20%
- Fehlervermeidung in Konstruktion und Fertigung
- präzise, korrekte und klare Darstellung von Daten und Informationen ohne zusätzlichen Aufwand und zusätzliche Ressourcen

### 6.2.1 Einsatz der Wissensbasis zur Fertigungsfolgeermittlung

Wie in Kapitel 6.1.2 erläutert, enthält die Wissensbasis für die Elektronikproduktion nicht alle theoretisch möglichen Produktionsvarianten. Sonderfälle können in den Arbeitsplan mit Hilfe des interaktiven Prozess Flow-Charts später eingefügt werden (siehe Kapitel 6.2.2). Prinzipiell ist durch umfangreiche Eingabe von Sonderregeln in das Flussdiagramm eine vollautomatische Generierung des Arbeitsplans möglich. Dieser Aufwand ist jedoch höher als die hier angestrebte Erzeugung einer Rohversion des Plans, die vom Planer an die speziellen Randbedingungen des jeweiligen Produkts angepasst wird. In anderen Fertigungsbereichen, wie der spanenden Fertigung, in denen wesentlich mehr Arbeitspläne benötigt werden als in der Elektronikproduktion, ist es jedoch anzustreben eine möglichst umfassende Wissensbasis aufzubauen.

Ausgehend von den relevanten Eingangsdaten wird vom Arbeitsplaner im System LOCAM zunächst interaktiv eine Rohversion des späteren Arbeitsplans erzeugt. Je nach Vollständigkeit der im System hinterlegten Logik erfolgt dies mehr oder weniger automatisch. Ist das System in das betriebliche Datenverarbeitungssystem integriert, kann während der Erstellung eines Arbeitsplans automatisch auf technische oder betriebliche Daten, zum Beispiel die Stückliste, zugegriffen werden. Dadurch wird die Informationsgewinnung vereinfacht und die Tätigkeit des Arbeitsplaners erleichtert.



**Abb. 69** Zusammenspiel der Wissensakquisition und der Arbeitsplanung

In Abb. 69 sind die wesentlichen Elemente und ihre Funktion im Zusammenwirken der Wissensbasis und der Planerzeugung dargestellt. Bei der Planerzeugung werden die Flussdiagramme der Wissensbasis Block für Block abgearbeitet, wobei die implemen-

tierten Aktionen ausgeführt werden. Die notwendigen Antworten in den Entscheidungsblöcken werden dabei entweder interaktiv vom Arbeitsplaner gegeben, oder automatisch aus einer Datenbank bzw. über das EDM ermittelt, falls diese an das System LOCAM angebunden sind. Fragen zur Prozesstechnologie und zum Prüf- bzw. Qualitätskonzept beantwortet der Planer in Eingabemasken.

Die angesprochene Rohversion des Arbeitsplans wird in LOCAM mit einem Funktionsbaustein generiert (*REPORT LINE*), über den zwei Text-Dateien, sogenannte Report-Files erzeugt werden. Eine Datei dient als Ergebnisdatei und Schnittstelle zum interaktiven Prozess Flow-Chart. Die zweite Datei dient als Kontrolldatei für den Arbeitsplaner, der nach Beendigung oder Unterbrechung der Arbeitsplangenerierung für eine Baugruppe anhand dieser Datei die gesamte Fertigungsfolge überprüfen kann. Das Format der Report-Files wird durch Befehle in den Aktionsblöcken festgelegt.

## 6.2.2 Arbeitsplanung mit dem interaktiven Prozess Flow-Chart

Nachdem die Rohversion eines Arbeitsplans mit LOCAM erstellt wurde, muss diese weiterbearbeitet und komplettiert werden. Dazu wurde das Werkzeug "Interaktives Prozess Flow-Chart" entwickelt, das auch zur Koordinierung des gesamten Prozesses Arbeitsplanung eingesetzt werden kann. Zur Erzeugung von Varianten oder bei geringen Änderungen kann damit auch ein bereits existierender Arbeitsplan weiterbearbeitet werden.

Hauptaufgaben im interaktiven Prozess Flow-Chart sind die Dokumentenerstellung und Dokumentenverwaltung für die Arbeitsplanung in der Elektronikproduktion. Eine der wichtigsten Forderungen bei der Entwicklung war die möglichst enge Integration mit externen Programmen, um die Durchgängigkeit der Arbeitsplanung zu gewährleisten. Im Idealfall soll sich der Arbeitsplaner nicht mehr mit mehreren unterschiedlichen Werkzeugen auseinandersetzen müssen. Die benötigten Werkzeuge sollen automatisch gestartet werden, wenn sie benötigt werden. Die Ausgangsdaten eines Programms sollen als Eingaben des nächsten Programms übernommen werden, ohne dass der Benutzer sich mit solchen temporären Daten auseinandersetzen muss. Die Forderung nach der Integration der Werkzeuge führt dazu, dass auch die Vorgänge von Erstellung, Änderung und Wartung unterschiedlicher Dokumente unter einer einheitlichen Oberfläche vereinigt werden. Wenn alle notwendigen Dokumente unter einer Oberfläche angelegt werden und eine automatische Sicherung der Ergebnisse gewährleistet ist, kann sich der Planer ganz seinen Kernaufgaben widmen.

Unter Einbeziehung der Rahmenbedingungen des IAPPS-Projekts wurden folgende Hauptziele der Softwareentwicklung definiert:

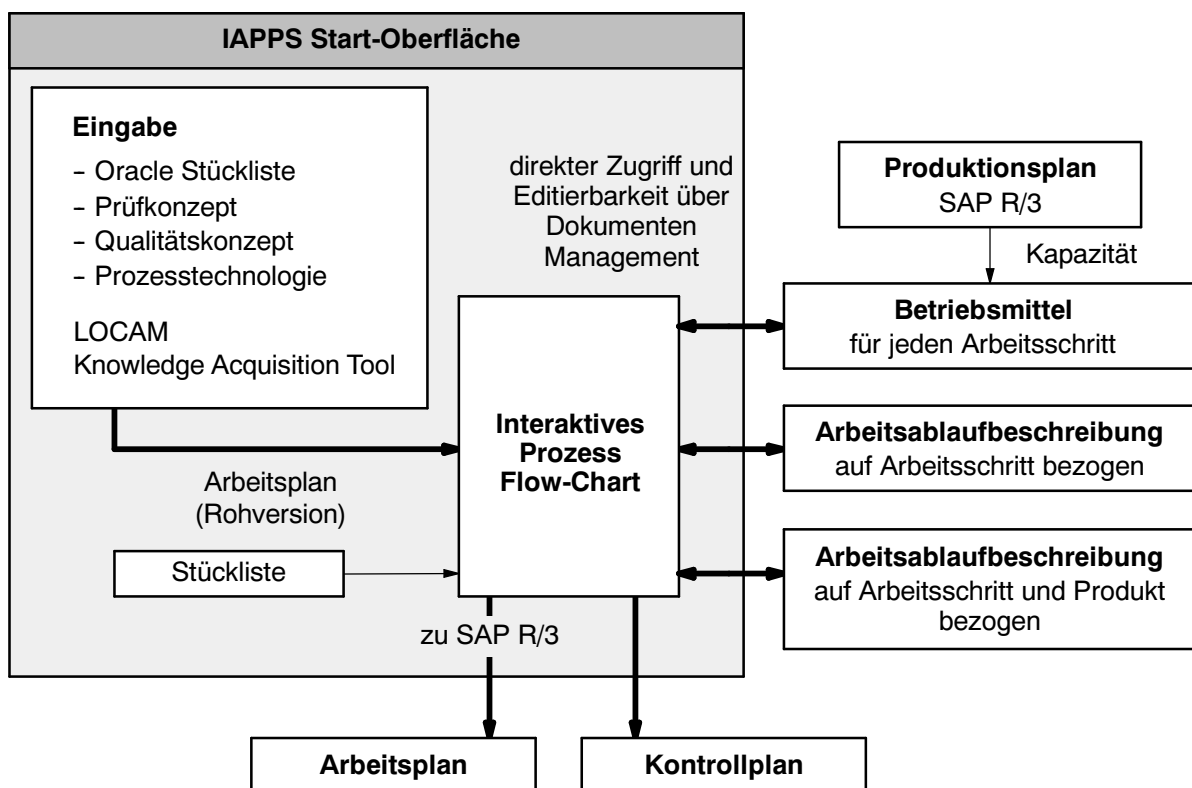
- Durchgängigkeit der Arbeitsplanung
- Vermeidung redundanter Datenhaltung
- Automatisierung wiederholt auftretender Arbeiten



- Unterstützung bei der Erstellung benötigter Dokumente
- Einbeziehung relevanter Softwaresysteme

Das Konzept des interaktiven Prozess Flow-Charts ist in Abb. 70 dargestellt. Der hinterlegte Bereich kennzeichnet die Teilaufgaben, die im Rahmen des IAPPS-Projekts realisiert wurden. Die dicken Pfeile deuten die für das Projekt relevanten Datenflüsse an, die dünnen Pfeile kennzeichnen den Zugriff auf optionale Hilfsdaten. Wichtige Aspekte dabei waren die Schaffung einer geeigneter Schnittstelle für den Export der Arbeitsplandaten in das PPS-System SAP R/3 und die Integration in ein Dokumenten Management System (DMS) zur Verwaltung der Arbeitspläne und Arbeitsablaufbeschreibungen.

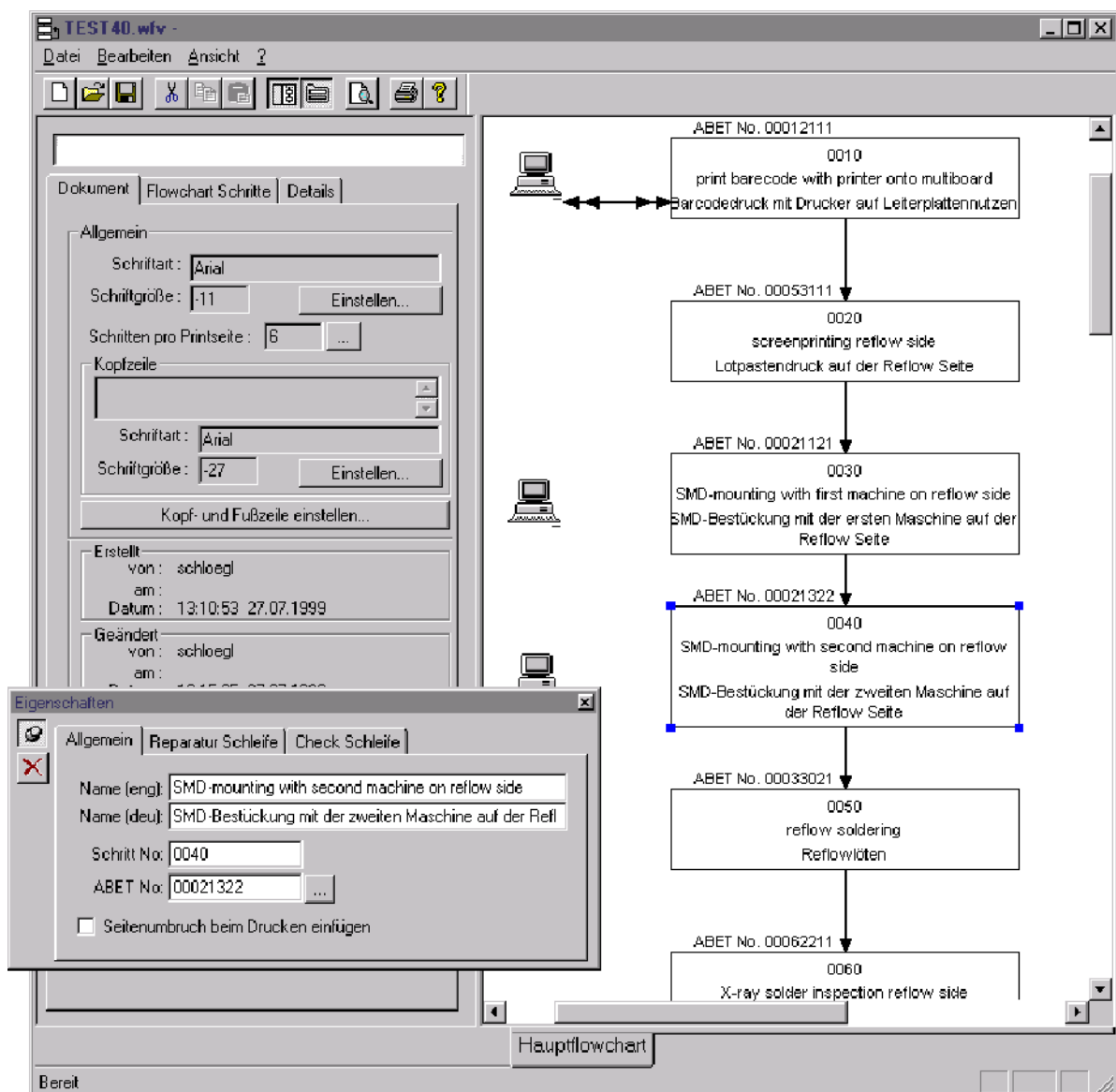
Im Prozess Flow-Chart wird die erforderliche Fertigungsfolge definiert, die Betriebsmittelzuweisung durchgeführt und die Erstellung von Arbeitsablaufbeschreibung ermöglicht. Die fertigen Arbeitspläne werden abschließend entweder direkt in die Formate der Zielsysteme (z. B. SAP R/3, Referenzmodell-Datenbank) umgewandelt oder werden in einem gängigen Datenformat (z. B. Excel) abgespeichert. Das Format für die Speicherung interner Daten wurde so flexibel ausgelegt, dass Erweiterungen jederzeit vorgenommen werden können. Es entspricht dem Format der Rohversion des Arbeitsplans, das von LOCAM erzeugt wird.



**Abb. 70** Konzept eines interaktiven Prozess Flow-Chart Werkzeugs zur Arbeitsplanerstellung

Im interaktiven Prozess Flow-Chart werden die Daten des Arbeitsplans in graphischer Form dargestellt (Abb. 71). Anhand dieser Darstellung kann der Arbeitsplaner folgende Anpassungen und Komplettierungen vornehmen:

- Ausschneiden und Einfügen von Arbeitsschritten
- Aufspalten von Arbeitsschritten
- Hinzufügen neuer Arbeitsschritte
- Betriebsmittelzuweisung
- Arbeitsablaufbeschreibung
- Arbeitsplanerstellung



**Abb. 71** Benutzeroberfläche des interaktiven Prozess Flow-Charts

Ein typisches Flow-Chart für die Beschreibung der Arbeitsabläufe besteht in der Regel aus einer Abfolge von Arbeitsschritten, die nacheinander ausgeführt werden. Idealerweise beschreibt ein solcher Ablauf die Arbeitsfolge vom Start der Produktion bis zum

Endpunkt. Arbeitsschritte in der Praxis können jedoch Bedingungen enthalten, die den Ablauf entweder ganz unterbrechen (z. B. wenn irreparable Fehler festgestellt werden) oder umleiten (z. B. wenn ein Reparatur-Unterablauf eingebettet ist). So können bei der Beschreibung relativ komplizierte Ablaufbäume entstehen, die mehrere bedingte Verzweigungen enthalten und somit jeden denkbaren Fall des Arbeitsablaufs berücksichtigen. Dafür wird eine Darstellungsart gewählt, die den Hauptablauf in Astdarstellung abbildet, zur Übersichtlichkeit jedoch alle verzweigten Nebenabläufe in untergeordnete Darstellungen ausgelagert. Die Flow-Charts erstrecken sich in der Regel über mehrere Druckseiten, was von der Software automatisch unterstützt werden muss.

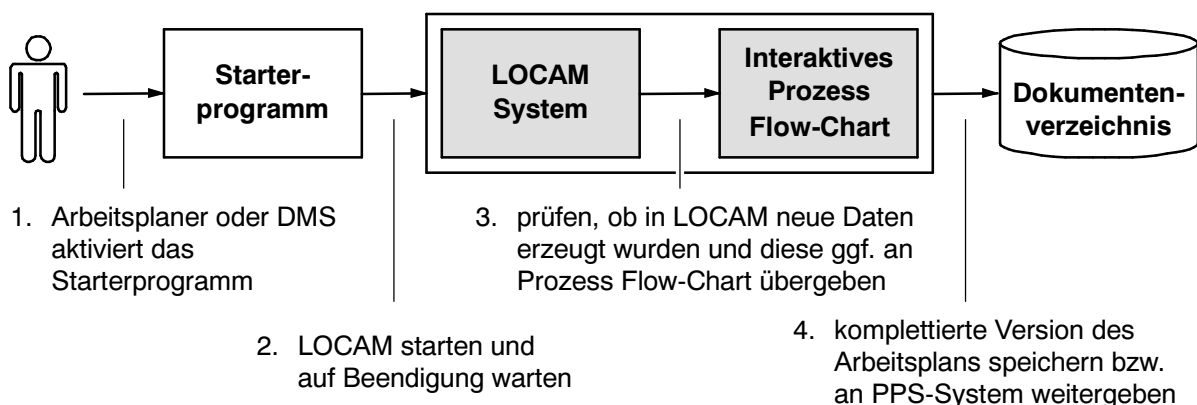
Die Grundfunktionen für die interaktive Erstellung und Änderung der Flow-Charts sind:

- umfangreiche, aber noch überschaubare Anzahl vorgegebener grafischer Elemente, zur Abbildung der realen Fertigungsschritte
- einfaches Einfügen neuer Fertigungsschritte in ein Flow-Chart; alle Operationen zur Verschiebung bestehender grafischer Elemente und eine damit verbundene Umformatierung des Dokuments werden automatisch angestoßen und ausgeführt

Wie bereits dargestellt, verwendet der Arbeitsplaner hier zwei Systeme zur Bearbeitung seiner Hauptaufgaben:

- *System LOCAM*: Verwaltung der Wissensbasis für die Arbeitsplanung und Erzeugung von Arbeitsplan-Rohversion
- *Interaktives Prozess Flow-Chart*: Übernahme der Arbeitsplan-Rohversionen; Editieren, Komplettieren und Exportieren der Arbeitspläne

Zur Koordination der Teilaufgaben wurde eine Softwarekomponente entwickelt, die LOCAM und das interaktive Prozess Flow-Chart nacheinander startet (Abb. 72). Zusätzlich übernimmt dieses Starterprogramm die Aufgabe die LOCAM-Ausgabedaten mit der Rohversion eines Arbeitsplanes automatisch an das Flowcharter-Programm weiterzureichen und danach die endgültige Version im Dokumentenverzeichnis des Bearbeiters abzulegen.



**Abb. 72** Koordination der Teilaufgaben durch das Starterprogramm

Auch für die Integration in das DMS übernimmt das Starterprogramm wichtige Aufgaben, wenn der Vorgang der Arbeitsplanung aus der DMS-Umgebung angestoßen wird. Dabei erhält das Starterprogramm einen Dateinamen als Eingangsparameter. Diese Datei kann entweder eine leere Vorlage oder einen in der DMS-Datenbank abgelegten Arbeitsplan enthalten. Ist die Eingabedatei leer, so wird ein neuer Planungsvorgang gestartet. Handelt es sich dagegen um einen vorher erstellten Arbeitsplan, wird das Prozess Flow-Chart zu Ansicht bzw. Nachbearbeitung gestartet. Das DMS nimmt anschließend neu angelegte oder nachbearbeitete Arbeitspläne automatisch in die Datenbank auf.

Der Arbeitsplaner prüft im interaktiven Prozess Flow-Chart das Vorhandensein aller Arbeitsschritte in der gewünschten Reihenfolge. Bei Bedarf werden Arbeitsschritte eingefügt, gelöscht oder verschoben. Das Einfügen neuer Arbeitsschritte kann entweder frei erfolgen oder über die Auswahl aus einer Liste mit vordefinierten, typischen Arbeitsschritten (Abb. 73). Einem Arbeitsschritt können unterschiedliche Attribute zugeordnet werden (z. B. Name, Aussehen). Für die Darstellung wurde die Bezeichnung zweisprachig realisiert. Die Liste mit den typischen Arbeitsschritten lässt sich über eine Konfigurationsdatei einfach erweitern oder ändern.

Der Planer kann bei Bedarf für die Arbeitsschritte auch Arbeitsablaufbeschreibungen erstellen. Die Verwaltung dieser Dokumente erfolgt über das Dokument Management Systems (DMS). Der Aufruf für die Erstellung dieser Dokumente erfolgt aus dem Flow-Chart heraus, das DMS sucht daraufhin entweder existierende Beschreibungen für einen Arbeitsschritt oder stellt ein leeres Formblatt zur Verfügung. Der Arbeitsplaner kann allgemeine und produktspezifische Arbeitsablaufbeschreibungen erstellen, die Auswahl dafür erfolgt ebenfalls im entsprechenden Menü des Prozess Flow-Charts (vgl. Abb. 70).

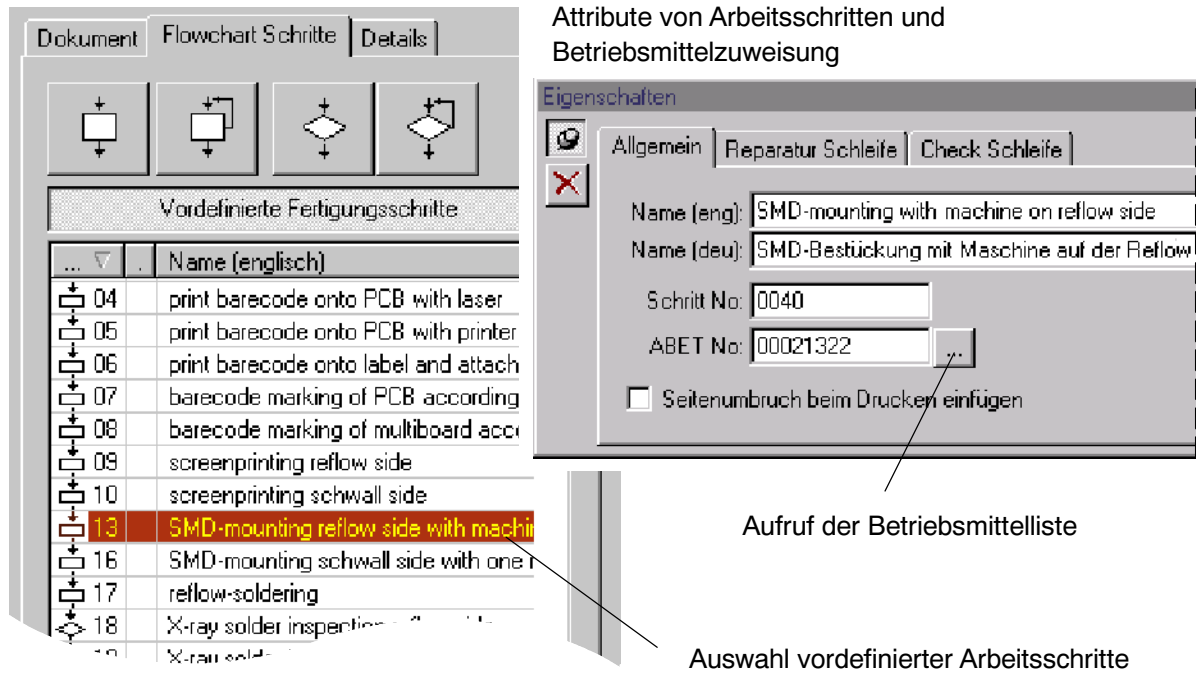
Den Arbeitsschritten im Prozess Flow-Chart sind weiterhin alle notwendigen Informationen für die Erstellung von Kontrollplänen hinterlegt (Prüfmethode, Maschine, Ausführungsart, Merkmale, Anzahl der Prüfungen). Diese Informationen lassen sich editieren. Aus dem Prozess Flow-Chart lässt sich so automatisch eine Kontrollplan in Tabellenform generieren.

Nach Fertigstellung der Arbeitsvorgangsfolge erfolgt die Betriebsmittelzuweisung für die einzelnen Arbeitsschritte. Ein Betriebsmittel wird in diesem Zusammenhang als Attribut eines Arbeitsschritts betrachtet. Im Eigenschaftsblatt eines Arbeitsschritts kann eine Liste mit allen in Frage kommenden Betriebsmitteln aufgerufen werden (Abb. 73). Der Arbeitsplaner wählt daraus ein Betriebsmittel aus. Die Auswahl wird durch eine Dialogmaske unterstützt, in der die Betriebsmittel mit vollständigen Namen hierarchisch angeordnet sind.

Die Liste der Betriebsmittel (Maschinenliste) wird vom Prozess Flow-Chart bei Programmstart ausgelesen. Die Betriebsmittel werden beispielhaft durch eine sechsstellige Nummer und den Betriebsmittelnamen identifiziert. In der Prozess Flow-Chart

Darstellung wird die Maschinenummer neben den dazugehörigen Arbeitsschritten angezeigt.

Auswahl bzw. Definition von Arbeitsschritten



**Abb. 73** Auswahl von Arbeitsschritten und Betriebsmittelzuweisung

### 6.2.3 Zusammenwirken von Arbeitsplanungs- und PPS-System

Für den Erfolg des Projekts war die Anknüpfung des IAPPS-Systems an ein PPS System, hier SAP R/3, von entscheidender Bedeutung. Diese Anknüpfung gewährleistet die Einsetzbarkeit des Systems in der betrieblichen Anwendung, da das PPS-System für die Planzeitberechnungen herangezogen werden soll. Bei der Zuweisung von Betriebsmitteln für die Arbeitsschritte erhält der Planer außerdem Zugriff auf die im SAP R/3 vorhandene Kapazitätsbelegung der Betriebsmittel.

Die Import- und Exportfunktionen von PPS-Systemen ermöglichen den Austausch von Daten mit externen Systemen und erleichtern sowohl das erste Einspielen von Daten als auch die Datenübernahme im laufenden Betrieb. Bei SAP 3/R befinden sich die auszutauschenden Daten in Austauschdateien. Den eigentlichen Datenaustausch beim Import oder Export steuern Übernahmeparameter. Mit Hilfe von Austauschprofilen kann auf Default-Übernahmeparameter zurückgegriffen werden, was häufiger durchzuführende Importe oder Exporte vereinfacht [92]. Für die zu importierenden Arbeitsplandaten werden auch solche Default-Übernahmeparameter definiert. Der Aufbau der Austauschdatei erfolgt nach bestimmten Syntaxregeln, die u. a. festlegen, in welche Tabellenfelder das R/3-System welche externen Daten übernehmen soll. Beim Erstellen der Datei für SAP R/3 hilft eine umfangreiche, applikationsübergreifende Online-Anleitung (Interface Adviser).

Liegen mehrere Austauschdateien vor, wird der Import nacheinander für jede Austauschdatei durchgeführt. Vor dem Import kann eine Dateiprüfung durchgeführt werden. Dabei überprüft das R/3-System z. B. den angegebenen Pfad und den syntaktischen Aufbau der Austauschdatei. Abhängig von der Art der zu importierenden Daten führt das R/3-System weitere Prüfungen durch. Nach Abschluss der Prüfungen erstellt das System ein Prüfprotokoll [92].

Für das Zusammenwirken der Systeme wurde der Informationsfluss in zwei Richtungen geplant:

- Aus der R/3-Datenbank sollen Informationen ausgelesen werden, die im interaktiven Prozess Flow-Chart zur besseren Anbindung an Firmendaten angezeigt und verwendet werden können. Relevant sind Betriebsmitteldaten (Stammdaten) und Kapazitätsinformationen (Bewegungsdaten).
- Die vom IAPPS-System erstellten Arbeitsplanvorlagen (Bewegungsdaten) sollen an SAP R/3 für die Weiterverarbeitung als periodische Datenübernahme übergeben werden. Aus den Daten können dann weitere produktbegleitende Daten wie die Planzeitberechnung generiert werden.

Der Aufruf von Informationen aus SAP R/3 ist über separate SAP-eigene Anwendungen möglich. Für den Export von Daten nach SAP R/3 wurde das Datenformat festgelegt, in welches das Prozess Flow-Chart die Arbeitsplandaten schreibt. Diese Daten können bei einer SAP R/3 - Einführung zunächst dazu verwendet werden, die Arbeitspläne manuell in die Datenbank einzugeben. Das IAPPS-System kann im nächsten Schritt für die direkte Übergabe der Daten an SAP R/3 nachgerüstet werden, die manuelle Konvertierung entfällt.

## **6.3 Arbeitspläne zur Initialisierung von Simulationsmodellen**

### **6.3.1 Einsatz von Arbeitsplänen in der Ablaufsimulation**

Die Nutzung von bereits vorliegenden Daten aus anderen Planungssystemen für den Aufbau und die Initialisierung von Simulationsmodellen ist ein entscheidender Schritt zur besseren Integration von Simulationstechniken in die Planungsprozesse [93, 106]. In diesem Zusammenhang sind Arbeitspläne, die bereits in betrieblichen Informationssystemen gespeichert sind, eine ideale Datenquelle für Aufgabe wie automatisierter Modellaufbau und Initialisierung der Ablaufsteuerung eines Simulationsmodells.

Arbeitspläne stellen innerhalb von Simulationssystemen permanente Informationsobjekte dar. Sie beziehen sich auf die zugehörigen Produkte und geben für diese die Fertigungsfolge an. Wenn für die Simulation einer Produktion für alle herzustellenden Produkte komplette Arbeitspläne vorliegen, kann die Struktur und die Verknüpfung der Be-

arbeitsstationen des erforderliche Simulationsmodells komplett aus den Arbeitsplänen abgeleitet werden. Auch können den einzelnen Fertigungsschritten direkt Rüst- und Bearbeitungszeiten zugeordnet werden. Dies setzt voraus, dass eine Maschinenbelegung erfolgt ist und dass die Planzeitberechnung durchgeführt wurde. Ein derartiges Vorgehen ist aber zumeist ungeeignet für den Aufbau von Simulationsmodellen in frühen Planungsphasen, da hier die einzelnen Maschinen noch nicht feststehen. Ein Ziel der Simulation kann es eben sein, die Anzahl der notwendigen Maschinen zu ermitteln. Dann können Arbeitspläne eingesetzt werden, um die notwendigen Produktionsschritte und deren Ablaufreihenfolge zu definieren. Das Simulationssystem leistet die Zuordnung auf konkrete Maschinen und ermittelt dort die Bearbeitungszeiten.

In kompletten Arbeitsplänen sind für die einzelnen Fertigungsschritte Vorgabezeiten enthalten, die in der Arbeitsvorbereitung bei der Planzeitberechnung ermittelt werden. Diese Vorgabezeiten können direkt für die Simulation herangezogen werden, wenn nicht erst während eines Simulationslaufs die Bearbeitungszeiten berechnet werden sollen. Eine typische Angabe für eine Vorgabezeit in einem Arbeitsplan der Elektronikproduktion ist die Bearbeitungszeit für 100 Produkte.

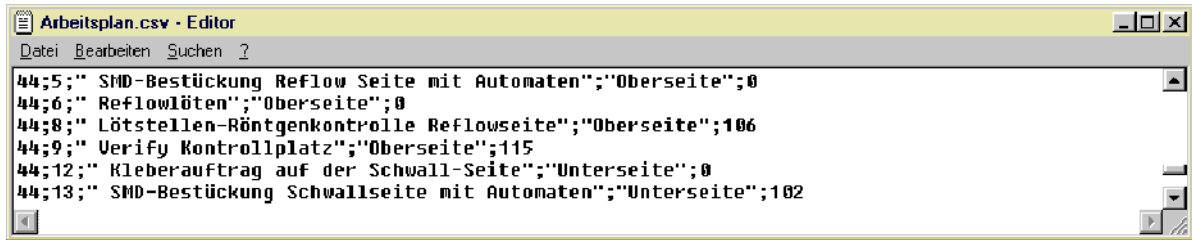
### **6.3.2 Generierung von Arbeitsplänen für die Referenzmodell-Datenbank**

Die zu Beginn des Kapitels beschriebene schnelle Methode Arbeitspläne für spezielle Produkte zu generieren, soll nun dazu verwendet werden, diese Arbeitspläne für die Referenzmodell-Datenbank und somit für die Simulation nutzbar zu machen. Dabei wird die gleiche Vorgehensweise angewandt wie beim Web-basierten Datenimport neuer Maschinen oder wie beim Import der Arbeitspläne in ein PPS-System.

Vom realisierten Arbeitsplanungssystem wird eine CSV-Datei mit der Struktur der Arbeitsplandaten der Referenzmodell-Datenbank erzeugt. Das prinzipielle Vorgehen wurde bereits unter Kapitel 5.3.1 beschrieben. Dabei kommt bei der Vergabe der Primärschlüssel wieder das erwähnte Visual-Basic Tool zum Einsatz. Die erzeugte Datei kann über die Import-Funktion von ACCESS direkt in die Datenbank übernommen werden (Abb. 74). Die Arbeitspläne spielen eine entscheidende Rolle bei der Generierung voroptimierter Auftragsreihenfolgen, da über sie die Berechnung der Bearbeitungszeiten für Produktionsaufträge und die Auftragseinlastung durchgeführt werden (siehe Kapitel 7.3).

Die oben angesprochene Bearbeitungszeiten für 100 Produkte, die in Arbeitsplänen zu den einzelnen Fertigungsschritten hinterlegt sein können, werden in Übereinstimmung mit dem Konzept der maschinennahen Simulationskomponenten ebenfalls in der Datenbank gespeichert. Diese Zeiten stellt eine weitere Methode zur Ermittlung der Bearbeitungszeit während der Simulation dar.

## CSV-Datei aus dem interaktiven Prozess Flow-Chart



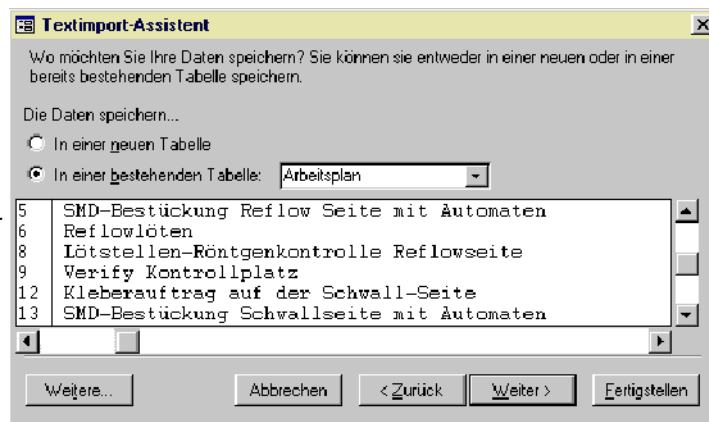
```

44;5;" SMD-Bestückung Reflow Seite mit Automaten";"Oberseite";0
44;6;" Reflowlöten";"Oberseite";0
44;8;" Lötstellen-Röntgenkontrolle Reflowseite";"Oberseite";106
44;9;" Verify Kontrollplatz";"Oberseite";115
44;12;" Kleberauftrag auf der Schwall-Seite";"Unterseite";0
44;13;" SMD-Bestückung Schwallseite mit Automaten";"Unterseite";102

```



Import in die  
Referenzmodell-  
Datenbank



Wo möchten Sie Ihre Daten speichern? Sie können sie entweder in einer neuen oder in einer bereits bestehenden Tabelle speichern.

Die Daten speichern...

In einer neuen Tabelle

In einer bestehenden Tabelle:

5	SMD-Bestückung Reflow Seite mit Automaten
6	Reflowlöten
8	Lötstellen-Röntgenkontrolle Reflowseite
9	Verify Kontrollplatz
12	Kleberauftrag auf der Schwall-Seite
13	SMD-Bestückung Schwallseite mit Automaten

Buttons: Weitere..., Abbrechen, < Zurück, Weiter >, Fertigstellen



Datenbank-Inhalt



ID_AP	AP_Pos	Prozess_Schritt	LP_Seite	Betriebsmittel
44	5	SMD-Bestückung Reflow Seite mit Automaten	Oberseite	0
44	6	Reflowlöten	Oberseite	0
44	8	Lötstellen-Röntgenkontrolle Reflowseite	Oberseite	106
44	9	Verify Kontrollplatz	Oberseite	115
44	12	Kleberauftrag auf der Schwall-Seite	Unterseite	0
44	13	SMD-Bestückung Schwallseite mit Automaten	Unterseite	102

Datensatz: 45 von 125

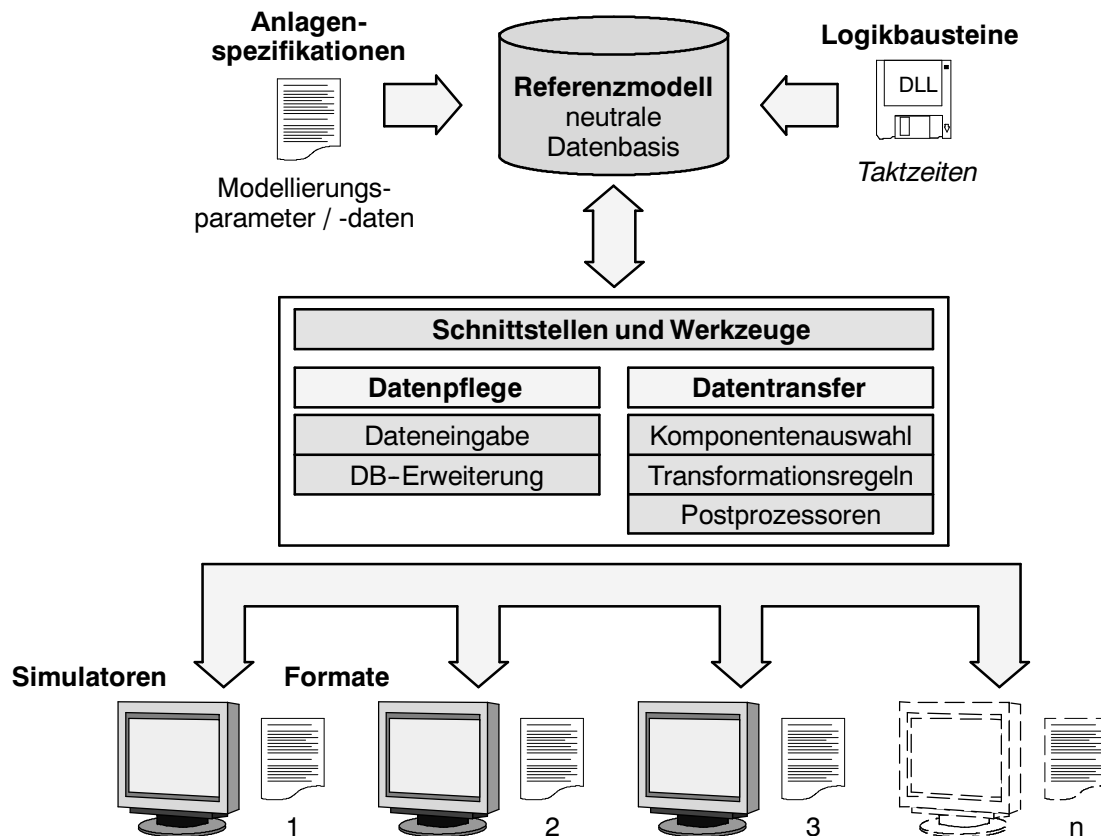
**Abb. 74** Import von Arbeitsplandaten aus dem interaktiven Prozess Flow-Chart in die Referenzmodell-Datenbank



## 7 Schnittstellen zur Simulation und Werkzeuge für die Anwendung

Aus der beschriebenen Datenbank mit Anlagen, Produkten und Arbeitsplänen müssen deren Beschreibungen über Datenschnittstellen zu den gewünschten Simulationssystemen transferiert werden (Abb. 75). Diese Schnittstellen sind das Bindeglied zwischen der Referenzmodell-Datenbank und den Simulatoren und haben die Aufgabe die Datenstruktur des Referenzmodells in das Format des jeweiligen Zielsimulators zu transferieren. Anwendungswerkzeuge erleichtern diesen Datentransfer durch benutzerfreundliche Auswahl- und Strukturierungsmechanismen.

Da es bis heute kein standardisiertes Datenformat für Simulationsmodelle oder für den Austausch von Simulationsbausteinen gibt, muss derzeit noch für jeden Simulator eine eigene Schnittstelle bereitgestellt werden. Falls jedoch aus Bestrebungen wie dem ISO Standard STEP, der Unified Modelling Language (UML) oder der High Level Architecture (HLA) ein standardisiertes Format hervorgeht, kann dieses jederzeit durch eine dafür vorgesehene Schnittstelle generiert werden. Der Inhalt der Datenbank ist daraufhin ausgelegt, dass der notwendige maschinennahe Informationsbedarf für die Ablaufsimulation weitestgehend abgedeckt ist. Es liegt an den Simulatoren, wie und welche Daten übernommen werden können.

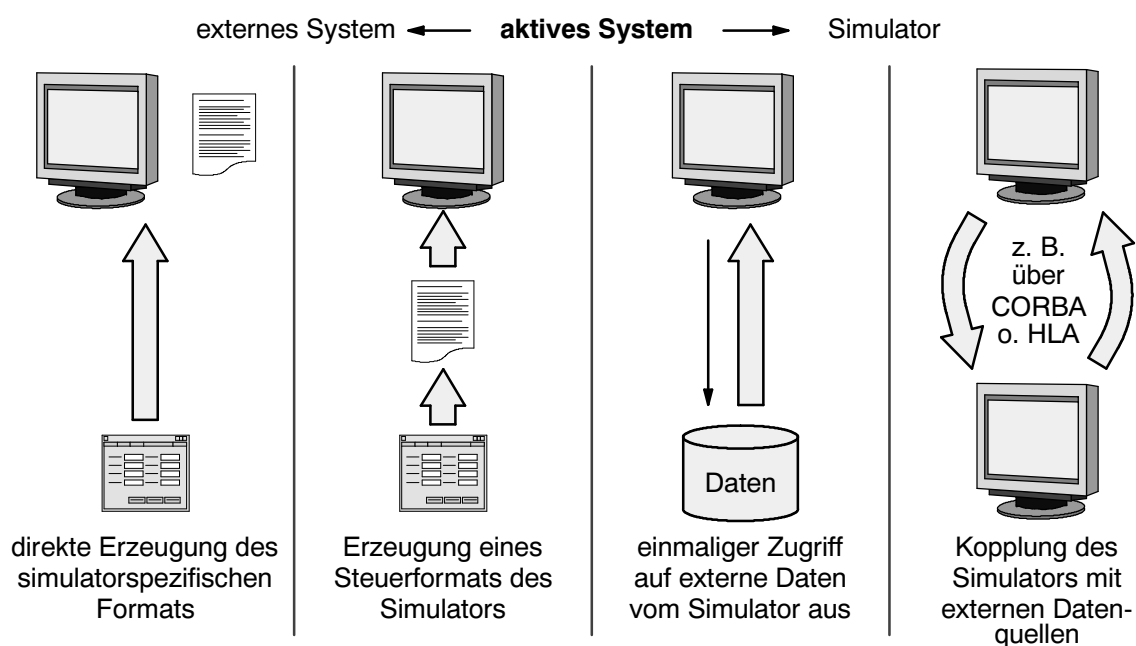


**Abb. 75** Aufgaben der Schnittstellen und Werkzeuge

## 7.1 Art und Funktionalität der Schnittstellen

Für den möglichen Einsatz der hier entwickelten maschinennahen Simulationskomponenten in Simulatoren sind einige Randbedingungen ausschlaggebend. Hauptvoraussetzung ist, dass es der Zielsimulator erlaubt Modellkomponenten von Extern hinzuzuladen. Der Einsatz externer Komponenten wird erschwert oder unmöglich gemacht, wenn die Eingabe oder Programmierung von Simulationsbausteinen nur im geschlossenen System möglich ist und wenn Modelle nur als Ganzes gespeichert werden können. Wünschenswert für den Einsatz der Referenzbausteine ist die Möglichkeit Modellkomponenten und Logiken in gesonderten Dateien zu hinterlegen oder diese über Importfunktionen aus definierten Formaten einzulesen. Die meisten modernen Simulatoren im Bereich der Ablaufsimulation sind für die Verwendung von externen Bausteinen geeignet. Beispiele dafür sind ARENA, AutoMod, QUEST, SIMPLE++, Simplex III oder Witness.

Für das Zusammenwirken von Simulatoren mit externen Systemen gibt es unterschiedliche Stufen der Integration, wobei ein System eher aktives oder eher passiv sein kann (Abb. 76). Auf der einen Seite erzeugt ein externes System Daten für den Simulator, auf der anderen greift der Simulator auf externe Daten zu. Bei der Erzeugung von Daten für einen Simulator kann unterschieden werden, ob direkt dessen internes Format generiert wird – der Simulator liest diese Daten dann wie interne Daten – oder ob Steueranweisungen des Simulators generiert werden. In diesem Fall werden im Simulator anhand der Steueranweisungen vorbereitete Strukturen instanziiert oder neue Strukturen generiert.



**Abb. 76** Schnittstellen zwischen externen Systemen und Simulatoren

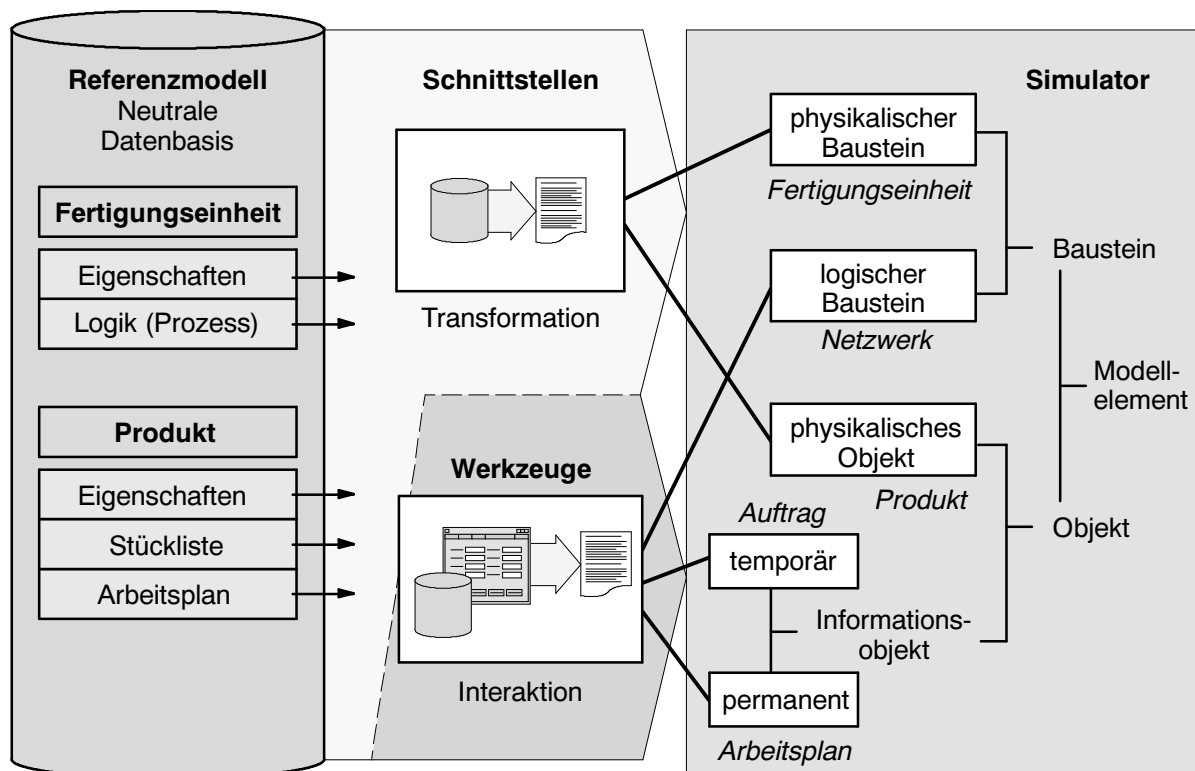
Bei Zugriff auf externe Daten vom Simulator aus gibt es die Möglichkeit, dass Datenbestände einmalig beim Aufbau oder bei der Initialisierung eines Modells gelesen werden

oder dass der Simulator während des Simulationslaufs permanent auf externe, auch dynamische Datenbestände oder andere Simulationsmodelle zugreift. Dadurch können beispielsweise Simulationskomponenten in externen Spezialesimulatoren abgebildet oder reale Anlagenkomponenten an die Simulation angeschlossen werden.

Um einzelne Maschinen aus der Referenzmodell-Datenbank in einen Simulator übernehmen zu können, muss das Datenformat des Simulators bekannt sein oder es muss die Möglichkeit geben Maschinendaten von extern über eine Steuerdatei im Simulator zu definieren. Die benötigten Daten werden aus der Datenbank ausgelesen und in das entsprechende Format gebracht. Im Simulator können diese Maschinen dann wie interne Komponenten verwendet werden. Dieses Vorgehen wurde exemplarisch für den Simulator QUEST der Firma Deneb und SIMPLE++ der Firma Tecnomatix realisiert. Für QUEST wird direkt ein Simulator-internes Format erzeugt, für SIMPLE++ werden Steuerdateien generiert.

### 7.1.1 Strukturierung der Zieldaten für die Simulation

In Abb. 77 ist die Funktionalität der Schnittstellen dargestellt. Sie realisieren in Verbindung mit den Anwendungswerkzeugen den Datentransfer. In den Schnittstellen sind die Transformationsregeln enthalten, die eine Übersetzung der Referenzbausteine aus der Datenbank in das Zielformat erlauben.



**Abb. 77** Schnittstellen zwischen Datenbank und Simulator

Aufgabe der Schnittstellen und Anwendungswerkzeuge ist es durch Transformation und Interaktion mit dem Benutzer die Referenzbausteine aus der Datenbank so aufzubereiten, dass für den Zielsimulator verwertbare Modellelemente entstehen. Der wichtigste Unterschied besteht dabei zwischen physikalischen und logischen Bausteinen und Objekten im Simulator. Physikalische Modellelemente lassen sich durch einfache Transformation aus den gespeicherten Daten der neutralen Datenbasis gewinnen. Nur das Zielformat muss bekannt sein, alle notwendigen Daten sind bereits vorhanden. Logische Modellelemente können nur durch Interaktion mit dem Bediener generiert werden, es sei denn, man stellt spezielle Mechanismen zur Verfügung diese auf anderem Wege zu beschaffen, was jedoch aufwendig ist und in das Gebiet der automatischen Modellgenerierung fällt [72, 106, 116].

Logische Modellelemente sind notwendig, wenn neben einzelnen Maschinen oder Produkten auch Fertigungssysteme anhand des Referenzmodells bereitgestellt werden sollen. Dabei werden Informationen zu Netzwerken, Gruppen sowie zu Aufträgen benötigt. Um diese in Interaktion mit dem Benutzer zu erhalten, sind Werkzeuge notwendig, welche auf die speziellen Anforderungen abgestimmt sind.

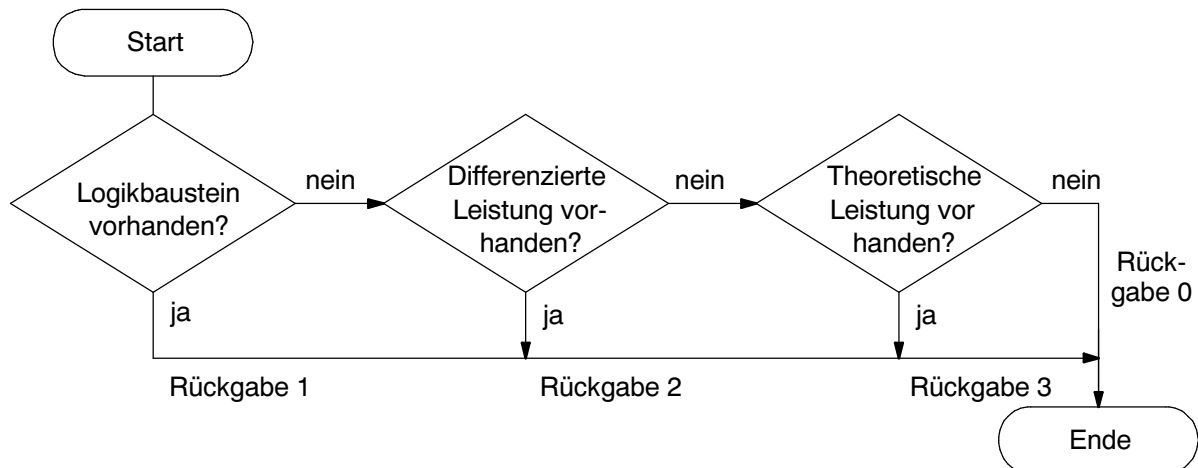
In Abb. 78 ist das Vorgehen bei der Definition von Fertigungssystemen dargestellt. Diese können, wie in Kapitel 4.2.3 (S. 74) dargestellt, aus Bereichen bestehen, die offline, on-line oder in-line aufgebaut sind. Werkzeuge zur Beschreibung von Systemen müssen diese Möglichkeiten bereitstellen. Daher erfolgt nach der Auswahl aller benötigter Komponenten und der Festlegung, für welche Fertigungsprozesse diese einsetzbar sind, die Definition von Abhängigkeiten. Damit lassen sich Fertigungslinien und Fertigungsinseln beschreiben. Danach werden Kapazitätsgruppen markiert, die aus mehreren Maschinen bestehen, die den gleichen Fertigungsschritt eines Arbeitsplans bearbeiten. Kapazitätsgruppen werden benötigt um z. B. die Verteilung des Bestückinhalts auf mehrere Bestückautomaten (Balancing) während eines Simulationslaufs zu berücksichtigen.

Nachdem das Fertigungssystem mit seinen Maschinen und Vernetzungen festgelegt worden ist, werden die zu fertigenden Produkte aus der Datenbank ausgewählt. Diese werden durch ihre allgemeinen Eigenschaften, die Stückliste (Bauelementeklassen) und den Arbeitsplan definiert. Um eine Simulation durchführen zu können, werden die vorhandenen Bauelementeklassen mit den Fertigungseinheiten abgeglichen, damit gewährleistet ist, dass alle Bauelemente bestückt werden können. Bei der Definition von Randbedingungen werden Vorgaben und Restriktionen durch den Anwender festgelegt, damit die Simulation realitätsnah arbeiten kann. So kann beispielsweise von vornherein bekannt sein, dass ein Produkt immer auf einer Linie gefertigt werden soll (Rennerlinie).



## 7.1.2 Ermittlung von Taktzeiten in der Ablaufsimulation

Wie bereits in Kapitel 4.3.1 (S. 76) erörtert ist es möglich in der Referenzmodell-Datenbank unterschiedlich genaue Informationen zur Berechnung von Fertigungszeiten abzulegen. Werden Simulationskomponenten aus der Datenbank an die Simulation übergeben, muss geprüft werden, welche Daten für die Berechnungen herangezogen werden sollen. Das Flussdiagramm dazu ist in Abb. 79 dargestellt.



**Abb. 80** Prüfung verfügbarer Informationen zur Fertigungszeitberechnung

Je nachdem, welche Daten vorhanden sind, müssen entsprechende Berechnungsformeln für die Fertigungszeiten implementiert werden, hier am Beispiel von Bestückautomaten:

### Logikbaustein

Ist ein Logikbaustein vorhanden, übernimmt dieser die Berechnung der Fertigungszeit anhand der vorgegebenen Parameter:

$$t_{\text{logik}} [\text{s}] = f(\text{Maschinen-/ Produktparameter})$$

### Differenzierte Leistung

Die differenzierte Leistung ist in BE/h bezogen auf die jeweilige Bauelementklasse angeben. Die Fertigungszeit errechnet sich aus der Summe der Bestückzeiten je Bauelementklasse:

$$t_{\text{diff}} [\text{s}] = \sum_{i=1}^n \text{Anz}_{\text{BE}i} / \text{Leistung}_i * 3600$$

### Theoretische Leistung

Die theoretische Leistung bezieht sich auf die Gesamtzahl der Bauelemente auf einer Leiterplatte:

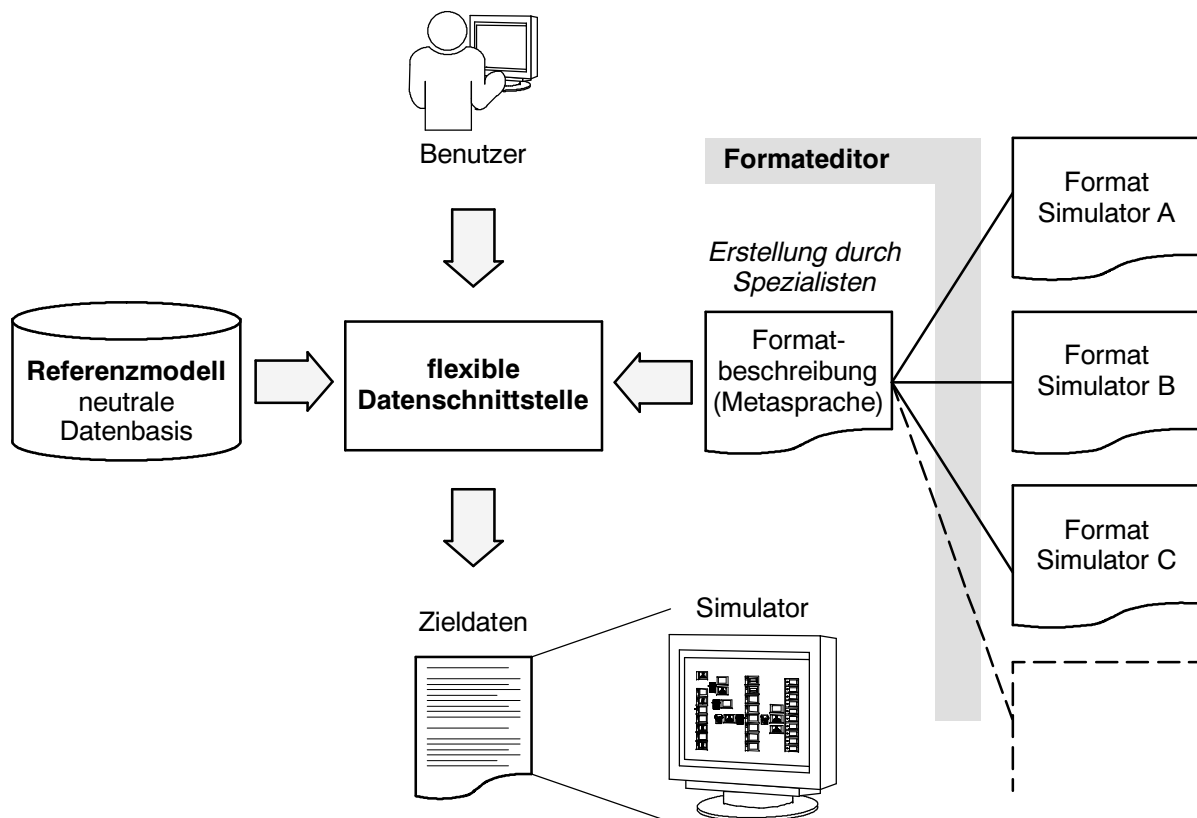
$$t_{\text{theo}} [\text{s}] = \text{Anz}_{\text{BE}} / \text{Leistung}_{\text{theo}} * 3600$$

### 7.1.3 Konzeption einer flexiblen Datenschnittstelle

Für die Realisierung der Datenschnittstellen zu den Simulatoren wurde ein System konzipiert mit dem auf möglichst einfache Weise neue Schnittstellen definiert werden können. Entscheidende Randbedingung dabei ist, dass aus dem vorgegebenen Format der Datenbank quasi beliebige Formate für die Simulatoren erzeugt werden sollen.

Zur Eingrenzung der Aufgabenstellung wurden zwei Bedingungen für die Zielformate definiert: Diese sollen im ASCII-Format vorliegen und in gewisser Weise in Zeilen und Spalten aufgeteilt sein, wobei in einer Zeile z. B. auch Attributbezeichnungen und die zugehörigen Werte stehen können. Es ist zwischen konstanten und variablen Einträgen zu unterscheiden. Die konstanten Einträge sind in der Regel in der Formatbeschreibung enthalten, die Variablen werden entweder direkt oder durch Umformatierung aus der Datenbank übernommen. Weiterhin sollen die Zieldaten bei Bedarf auf mehrere Dateien aufgeteilt werden können.

Zur Lösung der Aufgabe wurde auf eine Konzept aus der Elektronikproduktion zurückgegriffen, wo eine ähnliche Schnittstellenproblematik auftritt. Dort müssen unterschiedliche Maschinen-Steuerformate aus CAD-Daten generiert werden (vgl. [108]). Die Struktur des daraus abgeleiteten Systems ist in Abb. 81 dargestellt.



**Abb. 81** Konzept der flexiblen Datenschnittstelle (vgl. [108])

Die Grundidee der flexiblen Datenschnittstelle besteht darin für die unterschiedlichen Formate der Simulatoren eine einheitliche Formatbeschreibung einzuführen. Diese Beschreibung erfolgt in einer sogenannten Metasprache, mit der unter Zugriff auf die Daten aus der Referenzmodell-Datenbank die Simulatordaten generiert werden können. Die Metasprache besteht aus einer festgelegten Anzahl von Sprachelementen, die nach einfachen Regeln zu einer komplexen Struktur zusammengesetzt werden können. Unter den oben angegebenen Randbedingungen lassen sich die notwendigen Elemente der Metasprache ableiten, damit die Formate der Simulatoren nachgebildet werden können:

- *Struktur*: Das Element Struktur dient zur Aufnahme eines weiteren Elements und damit zum Aufbau einer komplexen Struktur. Es enthält außer seinem symbolischen Namen und ggf. einem Verknüpfungszeichen zum nächsten Element keine weiteren Daten. Die entstehende Datenstruktur entspricht einem binären Baum.
- *Struktur variabler Länge*: Dieses Element verhält sich analog zu *Struktur*, jedoch wird zur Laufzeit der Zieldatengenerierung entschieden, wie oft die Struktur durchlaufen wird.
- *Konstante*: Es werden Zeichenketten abgelegt, die ohne Veränderung in das Zielformat eingetragen werden.
- *Parameter (Datenbank)*: Es wird die Datenbankadresse angegeben, aus der Daten gelesen werden sollen. Es lassen sich auch notwendigen Transformationen spezifizieren.
- *Parameter (Benutzereingabe)*: Es wird der Typ des Parameters angegeben (Integer, Real, Char) sowie sein Wertebereich. Daneben wird ein Text hinterlegt, der bei der Zieldatengenerierung als Frage an den Benutzer eingeblendet wird und zu einer Eingabe auffordert.
- *Referenz*: Über dieses Element ist eine Verknüpfung mit jedem anderen Element der Struktur möglich, wenn Elemente logisch voneinander abhängen. Über eine solche Referenz kann auch ein Zählvariable dargestellt werden, ebenfalls Bezüge zwischen mehreren Dateien.

Für die interaktive Erstellung und zugleich Visualisierung der Formatbeschreibung wird ein grafischer Formateditor eingesetzt. Die effiziente Arbeit mit dem Formateditor setzt die Analyse des Zielformats und dessen sinnvolle Unterteilung in Unterstrukturen voraus. Eine solche Unterteilung erfolgt in der Regel nach einzelnen Dateien und darin enthaltenen Blöcken, Zeilen und Positionen. Bei der Beschreibung eines Formats fügt der Bearbeiter gemäß seiner Analyse Element für Element der Struktur zusammen. Er erstellt dabei die korrekten Verknüpfungen mit den Tabellen der Datenbank, manuelle Eingaben und notwendige Referenzen innerhalb der Struktur. Eine exemplarische Eingabemaske für die Elemente ist in Abb. 82 dargestellt.

Bei Erzeugung der Zieldaten wird die entsprechende Struktur rekursiv durchlaufen, wobei die Elemente nach ihren internen Vorgaben ausgewertet und bearbeitet werden. Konstanten werden als Zeichenfolge unverändert übernommen. Bei einem Da-

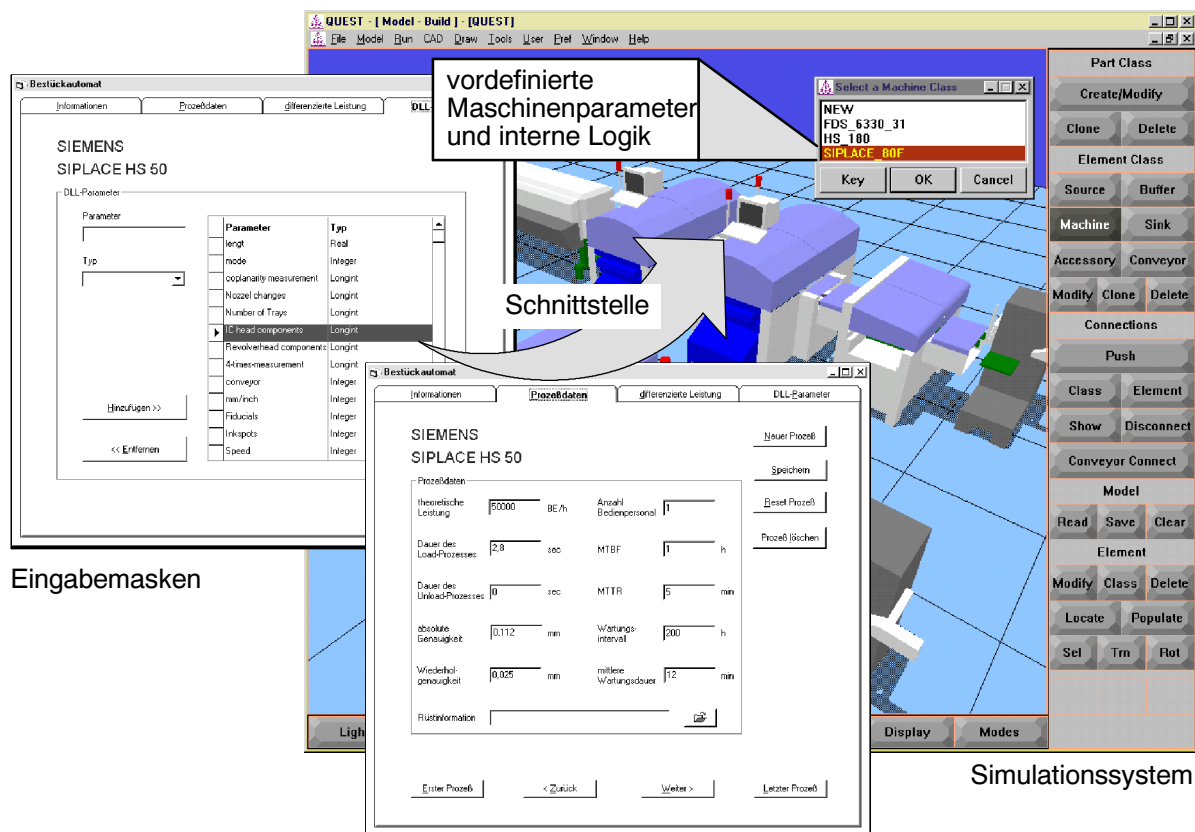


tenbankzugriff wird die Verbindung mit der angegebenen Tabelle in der Datenbank aufgebaut, der enthaltene Wert gelesen, ggf. umformatiert und in die Zielfelddatei geschrieben. Bei Benutzereingaben stoppt die Abarbeitung und die in der Struktur hinterlegte Frage wird angezeigt. Die Eingabe des Benutzers wird überprüft, ggf. auch umgewandelt und in die Zielfelddatei eingetragen. Um Verweise auf Elemente zu ermöglichen, die in der Struktur erst nach einer Referenz erscheinen, sind bei der Zielfeldengenerierung zwei Läufe notwendig. Im ersten Durchlauf wird eine Referenz markiert, die Auflösung erfolgt im zweiten Durchlauf.

**Abb. 82** Eingabemaske für die Elemente der Metasprache

### 7.1.4 Schnittstellen zu den Simulationssystemen QUEST und SIMPLE++

Die Simulationskomponenten aus der Referenzmodell-Datenbank wurden exemplarisch in den Simulationssystemen SIMPLE++ und QUEST eingesetzt. QUEST wurde zunächst für die Realisierung einer Datenschnittstelle gewählt, da es die in Kapitel 7.1 beschriebenen Randbedingungen für den Einsatz voll erfüllt und weil durch seine 3D-Visualisierung der Einsatz der Modelle im Vertrieb optimal gewährleistet wird (Abb. 83).



**Abb. 83** Verwendung der Simulationskomponenten im Simulationssystem QUEST

In QUEST sind Modelle und Modellkomponenten im Dateisystem der Anwenderbibliotheken abgelegt. Alle Bausteine sind als ASCII-Dateien gespeichert, was den Datentransfer deutlich erleichtert. Sechs Verzeichnisse sind entscheidend für die Übertragung der Referenzbausteine in den Simulator:

1. *Eclasses* enthält die Beschreibung einzelner Simulationskomponenten
2. *Logics* enthält die Maschinenlogiken
3. *Failures* enthält Definitionen von Fehlern
4. *Pclasses* enthält die Beschreibung der Produkte
5. *Models* enthält die Simulationsmodelle
6. *Dxf* enthält Dateien im DXF-Format für die Darstellung

Wird nun eine Maschine an QUEST übertragen, werden ihre Daten aus der Datenbank ausgelesen, in das Format von QUEST gebracht und unter *Eclasses* gespeichert. In dieser erzeugten Datei sind Verweise auf die Maschinenlogik und Fehlerbeschreibungen enthalten, die unter *Logics* bzw. *Failures* gespeichert sind, sowie ein Verweis auf die Darstellung. Dasselbe Vorgehen wird bei der Übertragung von Produkten angewendet, die unter *Pclasses* gespeichert werden. Die Generierung vordefinierte Modelle unter *Models* wird im nächsten Kapitel erläutert.

Die Darstellung einer Maschine wird in der Datenbank standardmäßig im DXF-Format gespeichert. In QUEST existiert eine Importfunktion für DXF-Modelle, die Dateien aus *Dxf* liest und die interne Darstellung erzeugt, welche unter *Parts* gespeichert wird.

Kommt bei einem Simulationslauf ein Produkt an eine Bearbeitungsstation, werden die Produktdaten gelesen und anhand der Maschinenlogik je nach Detaillierungsstufe ausgewertet (vgl. Kapitel 4.3.2). Die dabei ermittelte Bearbeitungszeit wird der Maschine beaufschlagt. Die Maschinenlogik beinhaltet ebenfalls die Fehlerbeaufschlagung.

Die Anwendung der Simulationskomponenten in QUEST wird in Kapitel 8 anhand eines Beispiels detailliert aufgezeigt.

Zur Nutzung der Referenzmodell-Datenbank und der Simulationskomponenten mit SIMPLE++ wird ein anderes Vorgehen angewandt. Hier hat der Benutzer keinen Zugriff auf die Simulator-internen Daten, da das Speicherformat nicht dokumentiert ist. Jedoch können SIMPLE++ Steuerbefehle generiert werden, die entsprechende Komponenten im Simulator erzeugen bzw. initialisieren. Dazu werden in SIMPLE++ zunächst die Oberklassen der notwendigen Anlagen (für die Elektronikproduktion u. a. Drucker, Dispenser, Bestücker, Lötöfen, Puffer, Materialflusskomponenten) als *Objekte* modelliert, die alle notwendigen Parameter enthalten. Diese Parameter können über *Methoden* gesetzt werden, um spezielle Maschinentypen zu realisieren. Diese Methoden (Steuerbefehle) können mit der flexiblen Datenschnittstelle aus der Referenzmodell-Datenbank generiert werden. Die Methoden werden zusammen mit den zugehörigen Objekten in SIMPLE++ geladen, wo sie direkt als vorparametrierte Maschinenmodelle zum Aufbau von Fertigungssystemen zur Verfügung stehen.

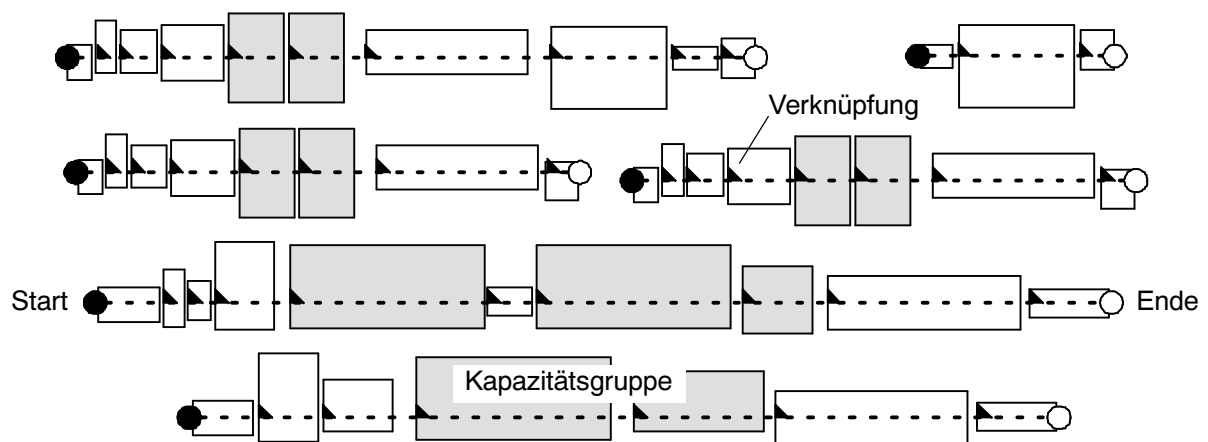
## 7.2 Konzeption eines Strukturierungswerkzeugs zur Definition von Fertigungslinien

Zusätzlich zum Transfer einzelner Maschinen in Simulationssysteme können mit den Referenzbausteinen aus der Datenbank auch Fertigungssysteme vordefiniert werden, um diese dann im Zielsimulator zu detaillieren und zu simulieren. Dazu wird hier ein Strukturierungswerkzeug vorgestellt. Ein Szenario für die Anwendung dieses Werkzeugs wurde bereits in Abb. 78 (S. 128) aufgezeigt. Das dort vorgestellte Vorgehen bringt mehrere Vorteile mit sich. Durch die layoutorientierte Definition von Fertigungssystemen kann der Planer direkt die Layoutinformationen für die Simulation weiterverwenden. Es wird bereits ein Großteil der verwendeten Anlage mit einem Arbeitsgang in die Simulation übertragen und der Simulationsanwender hat dabei die Möglichkeit, einfach Verknüpfungen von Anlagenteilen zu definieren.

In der Datenbank mit den Referenzbausteinen sind die Abmessungen der Fertigungskomponenten hinterlegt. Im Strukturierungswerkzeug werden diese Informationen zur Visualisierung von Anlagen herangezogen. So hat der Planer und Simulationsanwen-

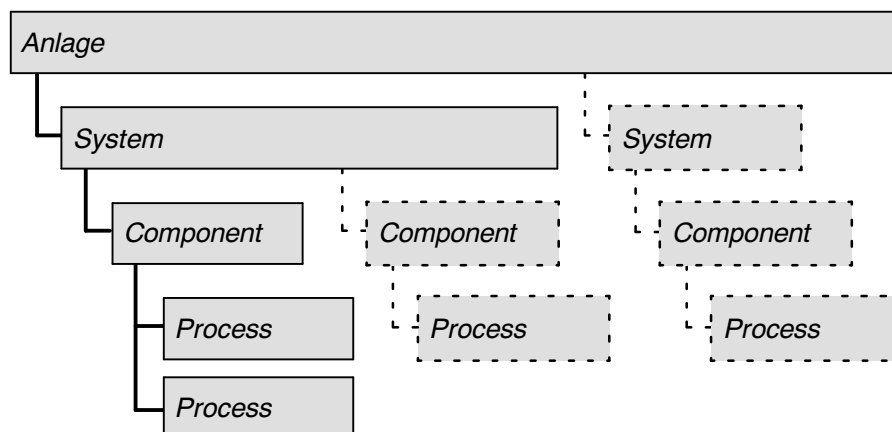
der die Möglichkeit das Layout einer Anlage aufzubauen, wobei den einzelnen Komponenten die Referenzbausteine hinterlegt sind. Im einfachsten Fall können die Maschinen als Modell ohne Verknüpfungen an ein Simulationssystem übergeben werden, dort müssen diese auf Simulator-spezifische Art definiert werden.

Im nächsten Schritt können Verknüpfungen hergestellt werden, was in Abb. 84 dargestellt ist. Dabei werden im Layout die einzelnen Fertigungslinien mit ihren Start- und Endpunkten sowie ihren Maschinen definiert. Als weitere Möglichkeit wird die Definition von Kapazitätsgruppen angeboten, wobei mehrere Maschinen einen Arbeitsschritt ausführen und dabei den Arbeitsinhalt möglichst gleichmäßig verteilen.



**Abb. 84** Layoutorientierte Definition von Fertigungslinien

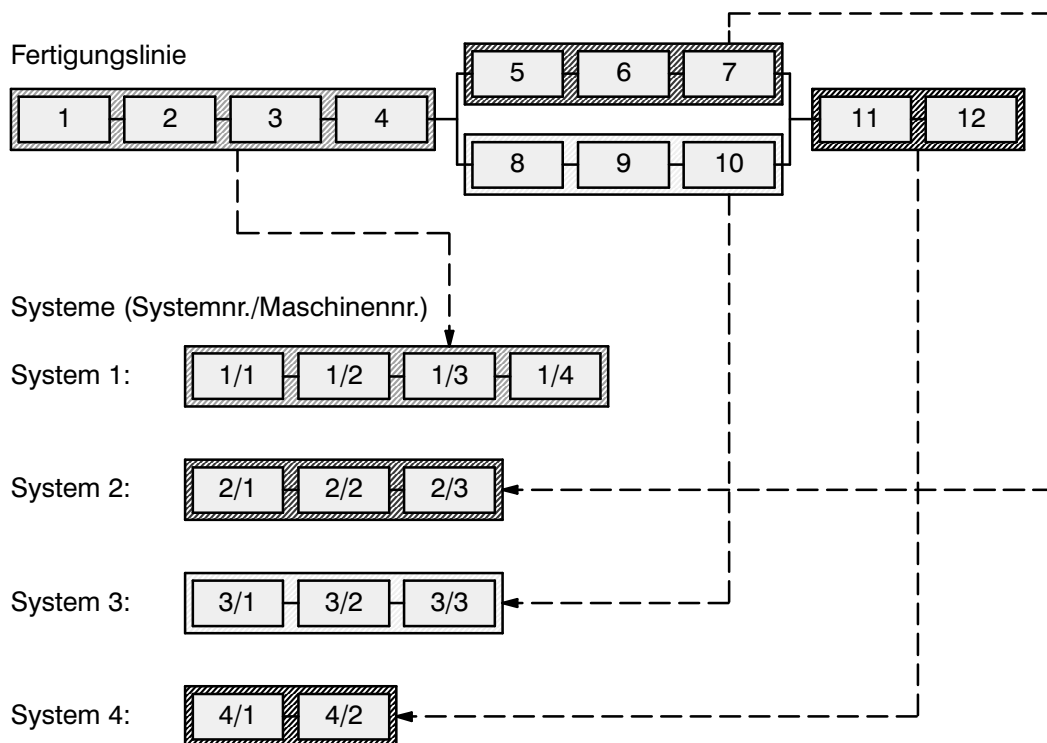
Für die Anlagen wurde ein neutrales Speicherformat entwickelt, das zum Transfer der Informationen dient. Das Format beschreibt die Komponenten, den Aufbau und die Positionen sowie die Verknüpfungen der Anlagen. Dem Format liegt das Schema in Abb. 85 zugrunde. Die Anlagenstruktur wird hierarchisch in drei Ebenen untergliedert. Innerhalb der Anlage befinden sich verschiedene Systeme (*System*) die aus Komponenten bestehen (*Component*) denen wiederum Prozesse (*Process*) zugeordnet sind:



**Abb. 85** Struktureller Aufbau einer Anlage

## System

Die Systemebene entspricht nicht ganz den Linien einer Fertigung, ist aber durchaus damit vergleichbar. Ein System ist eine bestimmte Anzahl linear verketteter Fertigungsmaschinen. Verzweigungen/Zusammenführungen sind nicht möglich. Die reale Linie wird an Verzweigungs-/Zusammenführungspunkten auseinandergeschnitten. Die so entstehenden Linienteile sind die Systeme. Anschließend werden die Maschinen innerhalb des Systems durchnummeriert. Abb. 86 zeigt ein Beispiel für eine solche Aufteilung.



**Abb. 86** Unterteilung einer Fertigungslinie in Systeme

## Component

Die einzelnen Komponenten spiegeln die realen Fertigungsmaschinen wieder. Auf dieser Ebene wird auch die Zugehörigkeit zu einer Kapazitätsgruppe vermerkt. Da auf der Ebene *System* keine Verzweigungen möglich sind, werden Verzweigungen über Aus- und Eingänge unter *Component* realisiert. Eine Komponente kann mehrere Ein- und Ausgänge besitzen, die durch Nummern eindeutig identifiziert werden.

## Process

Jeder Komponente können ein oder mehrere Prozesse zugeordnet werden. Damit wird angegeben, welche Bearbeitungsschritte diese Komponente ausführen kann. Die Prozesse werden innerhalb der Komponente fortlaufend nummeriert.

Das beschriebene Speicherformat dient als Ausgangspunkt für die Übertragung der Systeme an Simulatoren aber auch als Übergabedatei für die Anlagendefinition an das Werkzeug zur Voroptimierung der Auftragsreihenfolge für die Simulation, das in Kapitel 7.3 vorgestellt wird.

Tabelle 18 zeigt, wie die Verknüpfungen in einem Simulator realisiert werden. Für die Implementierung wurde wieder QUEST gewählt. Dort sind in der Modellbeschreibung unter *Models* die Stationen über die Verbindung von Ein- und Ausgängen hergestellt. Dies ist aus dem oben beschriebenen Format leicht zu erzeugen.

**Tabelle 18** *Format in QUEST zur Definition von Verknüpfungen von Simulationskomponenten*

```
CONNECT OUTPUT[1] OF 'Manuell2' 1 TO INPUT[2] OF 'Puffer1' 9
CONNECT OUTPUT[1] OF 'Fraese2' 1 TO INPUT[1] OF 'Manuell2' 1
CONNECT OUTPUT[1] OF 'Run_In' 1 TO INPUT[1] OF 'Puffer1' 4
CONNECT OUTPUT[2] OF 'Run_In' 1 TO INPUT[2] OF 'Puffer1' 5
```

### 7.3 Optimierte Auftragseinlastung für die Simulation

Eine wichtige Grundvoraussetzung bei der Simulation von Fertigungssystemen ist die realitätsnahe Einlastung von Produktionsaufträgen in die simulierte Fertigung. In [56] werden drei grundsätzliche Typen der Auftragseinlastung in eine Werkstattfertigung unterschieden:

- sofortige Einlastung eines Auftrags nach seiner Generierung im Simulationslauf
- periodische Einlastung eines angesammelten Auftragspools
- periodische Einlastung einer Teilauftragsmenge eines angesammelten Auftragspools basierend auf der Auslastung oder anderer Kriterien

Diese Einlastungstypen werden unter der Annahme verwendet, dass die Bearbeitungszeit der Aufträge durch Zufallsverteilungen bestimmt wird. Dies geschieht entweder für den gesamten Auftrag oder durch Aufaddieren von Einzelbearbeitungszeiten, die wieder über Verteilungen ermittelt werden.

Für definierte Produkte bietet die Referenzmodell-Datenbank die Möglichkeit über die enthaltenen Simulationskomponenten die Bearbeitungszeiten relativ genau bestimmen zu können. Die Datenbank erlaubt es ebenfalls konkrete Aufträge einzugeben. Da in der Beispieltechnologie Elektronikproduktion die Effizienz einer Anlage stark von der Einlastungsstrategie mitbestimmt wird, ist im Folgenden eine Möglichkeit beschrieben eine realistische Einlastung vor der Simulation zu ermitteln, die dort als eine Art Plantafel eingesetzt werden kann.

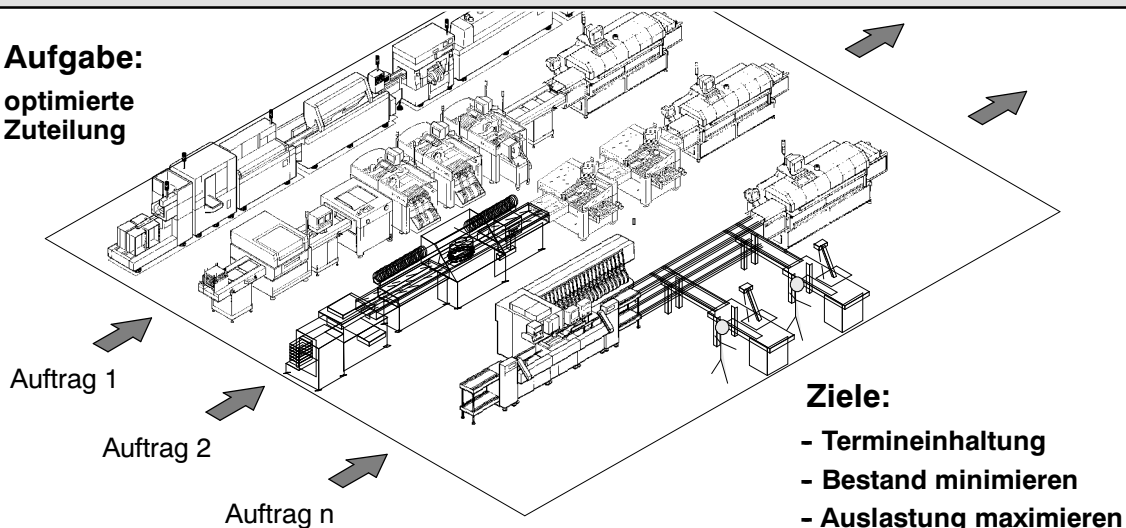
### 7.3.1 Optimierung der Auftragseinlastung am Beispiel der Elektronikproduktion

Wenn ein Produktspektrum von Flachbaugruppen durch hohe Variantenvielfalt und geringe Stückzahlen gekennzeichnet ist, kommt der umrüstoptimalen Auftragseinlastung eine hohe Bedeutung für die Produktivität zu (Abb. 87). Fertigungssysteme in der Elektronikproduktion bestehen oft aus mehreren Fertigungslinien, die unterschiedlich geeignet für die Herstellung der Flachbaugruppen sind (technische Restriktionen). Aufgrund der großen Zahl unterschiedlicher Bauelemente können auch nicht immer alle für die Bestückung notwendigen Bauelemente auf den Bestückautomaten gerüstet sein, Umrüstungen werden erforderlich. Somit besteht das Ziel der optimierten Auftragszuteilung darin, unter Berücksichtigung der Termineinhaltung die Aufträge auf geeignete Produktionslinien zuzuweisen und dort Auftragsreihenfolgen zu bilden, bei denen möglichst wenig umgerüstet werden muss.

#### Eingabedaten:



#### Aufgabe: optimierte Zuteilung



**Abb. 87** Optimierte Auftragseinlastung am Beispiel der Elektronikproduktion [56, 108]

Für diese Aufgaben der kostenoptimalen Zuteilung der eingeplanten Aufträge auf die vorhandenen Bestücklinien gibt es spezielle Optimierungssysteme, welche die aktuelle Konfiguration und Auslastung aller Maschinen sehr genau abbilden und so detaillierte Optimierungen vornehmen können [32, 108]. In einer Ablaufsimulation zur Planung einer neuen Fertigung ist eine so tiefgehende Betrachtung in der Regel nicht möglich. Die technologischen Randbedingungen, die Benutzerausschlüsse und die

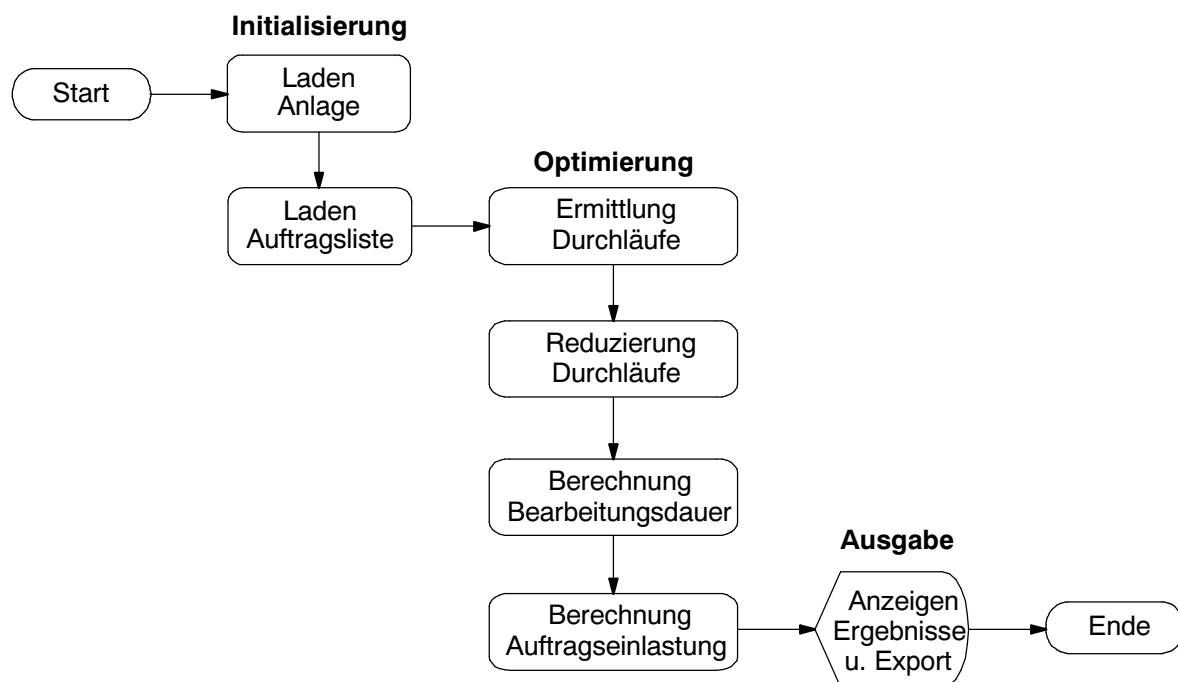
grobe Steuerstrategie müssen jedoch auch in der Simulation berücksichtigt werden um sinnvolle Simulationsläufe zu erhalten. Der Inhalt der Referenzmodell-Datenbank bietet die notwendigen Informationen um die Berechnung einer realistischen Auftragsreihenfolge (Systemlast) durchführen zu können.

### 7.3.2 Auftragseinlastung für die Simulation auf Basis der Referenzmodell-Datenbank

In der Referenzmodell-Datenbank sind Produkt- und Auftragsdaten (Stückzahl, Termin) sowie Anlagendaten hinterlegt. Um für unterschiedliche Produkte und Aufträge eine voroptimierte Auftragsreihenfolge für ein spezielles Fertigungssystem zu erzeugen wurde ein System entwickelt, das eine solche Reihenfolge aus den in der Datenbank enthaltenen Informationen berechnet. Das Planungssystem hat die Aufgabe für die Simulation auf Basis von Auftragslisten konkrete Informationen über eine sinnvolle Auftragseinlastung zur Verfügung zu stellen:

- Zuordnung der Aufträge zu den Quellen des Simulationsmodells unter Beachtung der ermittelten Reihenfolge
- Festlegung des zu verwendenden Arbeitsplans je Auftrag
- Festlegung des Durchlaufs durch das Fertigungssystem je Auftrag
- Austaktung der Maschinen innerhalb einer Kapazitätsgruppe

Die dazu realisierte Vorgehensweise ist in Abb. 88 dargestellt.



**Abb. 88** Vorgehen zur Erzeugung einer voroptimierten Auftragseinlastung für die Simulation



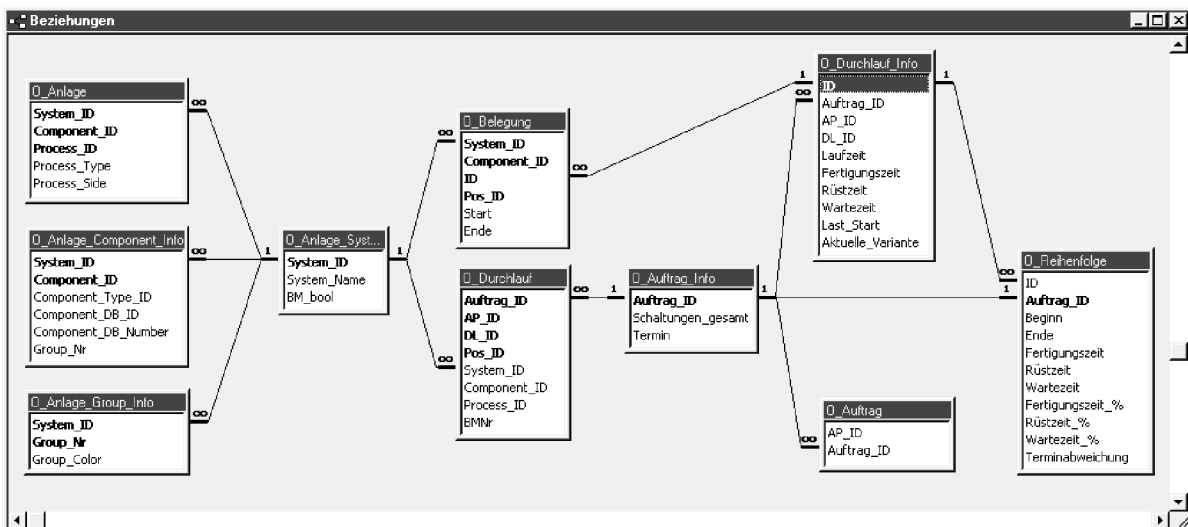
## Daten für die Ermittlung einer voroptimierten Auftragsreihenfolge

Das entwickelte Berechnungswerkzeug stellt eine Erweiterung zur Referenzmodell-Datenbank dar. Seine Datenstruktur wurde auf das bestehende Konzept abgestimmt, wobei mehrere Benutzer gleichzeitig und unabhängig voneinander mit dem Werkzeug arbeiten können.

Für die Generierung einer voroptimierten Auftragsreihenfolge werden folgende Daten benötigt, die aus der Referenzmodell-Datenbank bzw. zunächst aus Dateien gelesen werden:

- Anlagendaten
- Auftragsdaten
- Maschinendaten
- Produktdaten
- Arbeitsplandaten

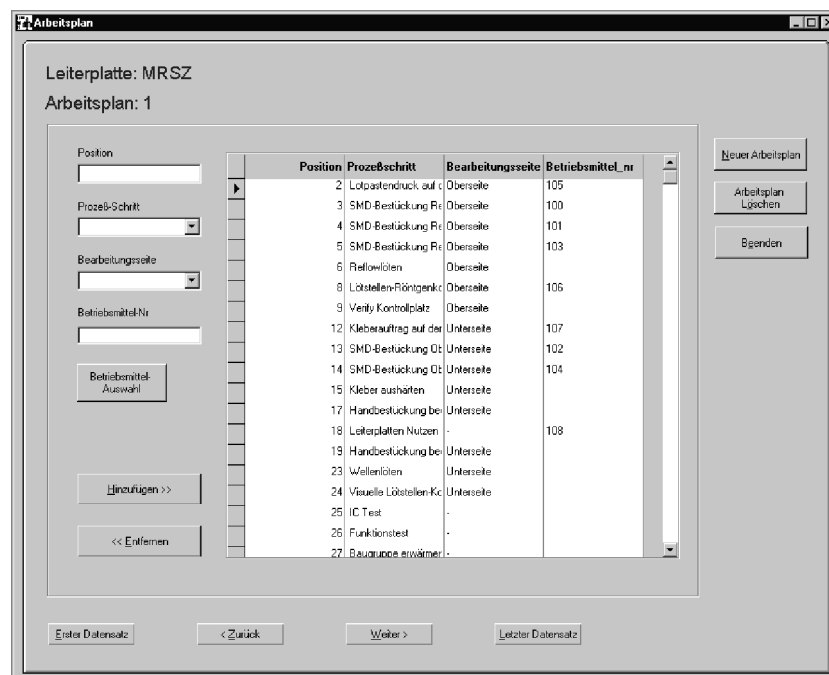
Die für die Initialisierung verwendeten Anlagendaten werden mit dem unter Kapitel 7.2 beschriebenen Werkzeug erstellt und im dort beschriebenen Format eingelesen. Die enthaltenen Informationen werden für die Weiterbearbeitung in die Datenbank geschrieben. Dazu wurde die Datenbank um die in Abb. 89 dargestellten Tabellen erweitert. Die Auftragsdaten werden auch aus einer Datei in definiertem Format gelesen und in die Datenbank eingetragen. Die Verknüpfungen von Anlagen- und Auftragsdaten sind ebenfalls in Abb. 89 zu sehen.



**Abb. 89** Tabellen und Beziehungen für das Berechnungswerkzeug

In den Maschinendaten sind die technischen Restriktionen enthalten, die in Verbindung mit den Produktdaten Maschinenausschlüsse bedingen. In den Produktdaten finden sich alle notwendigen allgemeinen und Stücklisten-bezogenen Informationen zu den Produkten.

Zu einem Produkt können in der Datenbank mehrere Arbeitspläne definiert werden um verschiedene Bestückreihenfolgen oder Bearbeitungsvarianten abbilden zu können. Ist zu einem Arbeitsschritt kein Betriebsmittel angegeben, kann der Prozess theoretisch auf jeder fähigen Maschine durchgeführt werden, wird dagegen ein Betriebsmittel angegeben, ist damit eindeutig festgelegt, auf welcher Maschine im Fertigungssystem der Prozess durchzuführen ist. Abb. 90 zeigt ein typisches Beispiel für einen solchen Arbeitsplan in der Datenbank. Zusätzlich besteht die Möglichkeit den einzelnen Betriebsmitteln arbeitsplanspezifische Informationen zuzuweisen. So können maschinenabhängige Produkteigenschaften wie Bauelementklassen definiert werden.



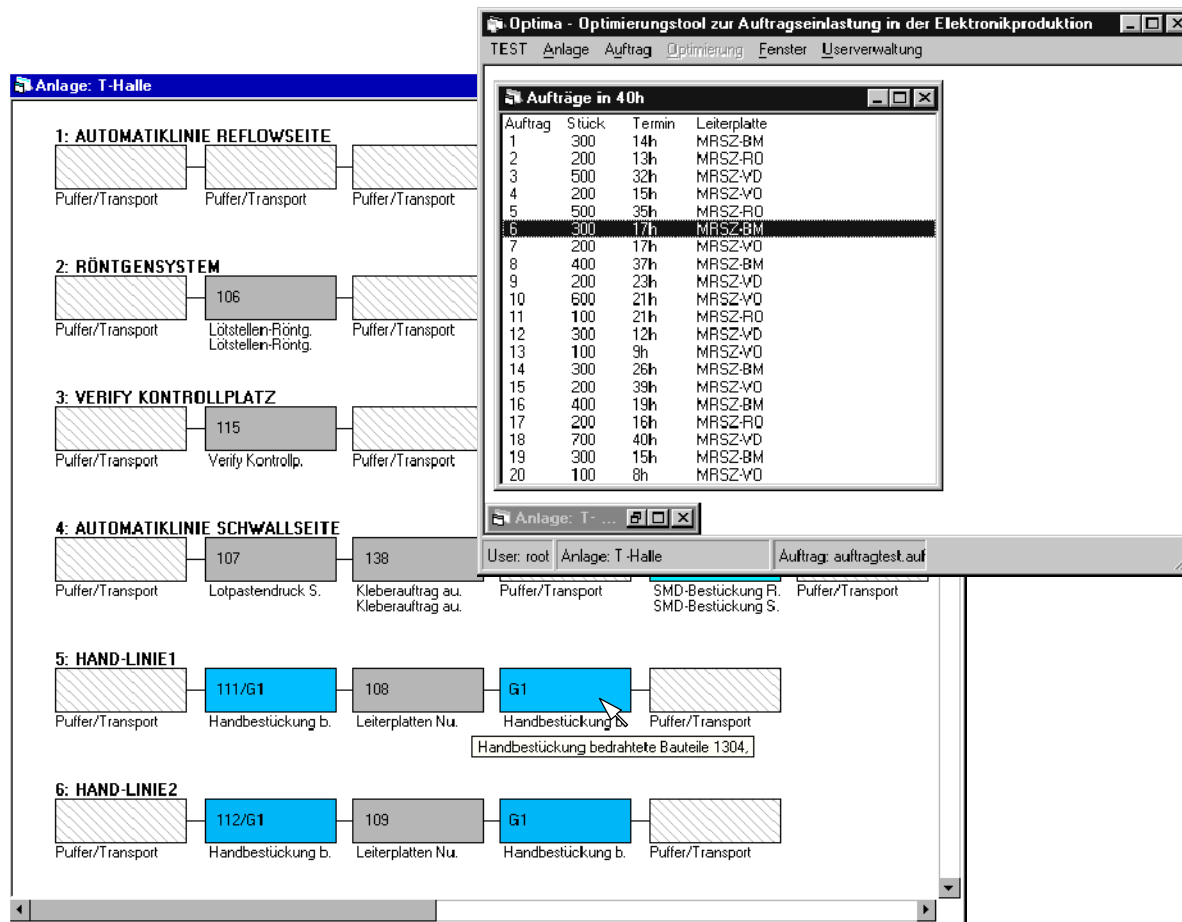
**Abb. 90** Eingabefenster Arbeitsplan

## Generierung der Auftragsreihenfolge

Vor der Generierung einer Auftragsreihenfolge müssen eine Anlagen- und eine Auftragsdatei geladen werden. Diese werden wie in Abb. 91 dargestellt visualisiert. Eine Anlage wird aufgeteilt in ihre Untersysteme abgebildet (vgl. Kapitel 7.2), zu den Auftragsdaten werden Auftrags-ID, Stückzahl, Termin und Produktinformationen angezeigt. Nach dem Einlesen der Dateien kann mit der Berechnung der Auftragsreihenfolge begonnen werden. Dabei fallen folgende Teilschritte an:

- Analyse der Arbeitspläne der herzustellenden Produkte und Zuweisung entsprechender Maschinen je Bearbeitungsschritt.
- Reduzierung der Durchlaufvarianten durch Auswertung der technischen Restriktionen
- Abschätzung der Fertigungszeit je Variante und Auftrag

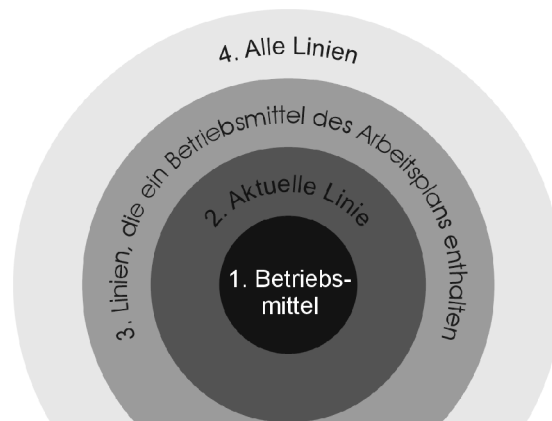
- Berechnung einer Einlastungsreihenfolge unter Berücksichtigung der Randbedingungen (Termin, Prioritätenbehandlung)
- Visualisierung der berechneten Fertigungszeiten, Auslastungen, etc.



**Abb. 91** Visualisierung von Anlagenstruktur und Aufträgen

Der erste Schritt der Einlastung ist die Ermittlung der Wege, die ein Auftrag durch die Fertigung nehmen kann. Dabei werden zunächst alle möglichen Durchlaufvarianten berücksichtigt. Es werden rekursiv alle Auftrags-/Arbeitsplan-Kombinationen abgearbeitet. Jedem Arbeitsschritt wird eine Maschine zugewiesen und in der Datenbank hinterlegt. Bei der Zuordnung der Arbeitsschritte zu den Maschinen müssen folgende Randbedingungen beachtet werden:

- Mehrere Arbeitspläne je Leiterplatte:  
Zu jeder Leiterplatte können mehrere gleichberechtigte Arbeitspläne in der Datenbank hinterlegt sein. Das Berechnungswerkzeug erstellt Durchläufe für alle gefundenen Arbeitspläne.
- Kein Betriebsmittel zugeordnet:  
Nicht jedem Arbeitsschritt ist auch ein konkretes Betriebsmittel zugeordnet. Das Berechnungswerkzeug sucht selbständig in verschiedene Stufen (Abb. 92) nach Maschinen, die diesen Fertigungsschritt ausführen können. Dabei werden Bearbeitungsprozess und Prozessseite berücksichtigt.

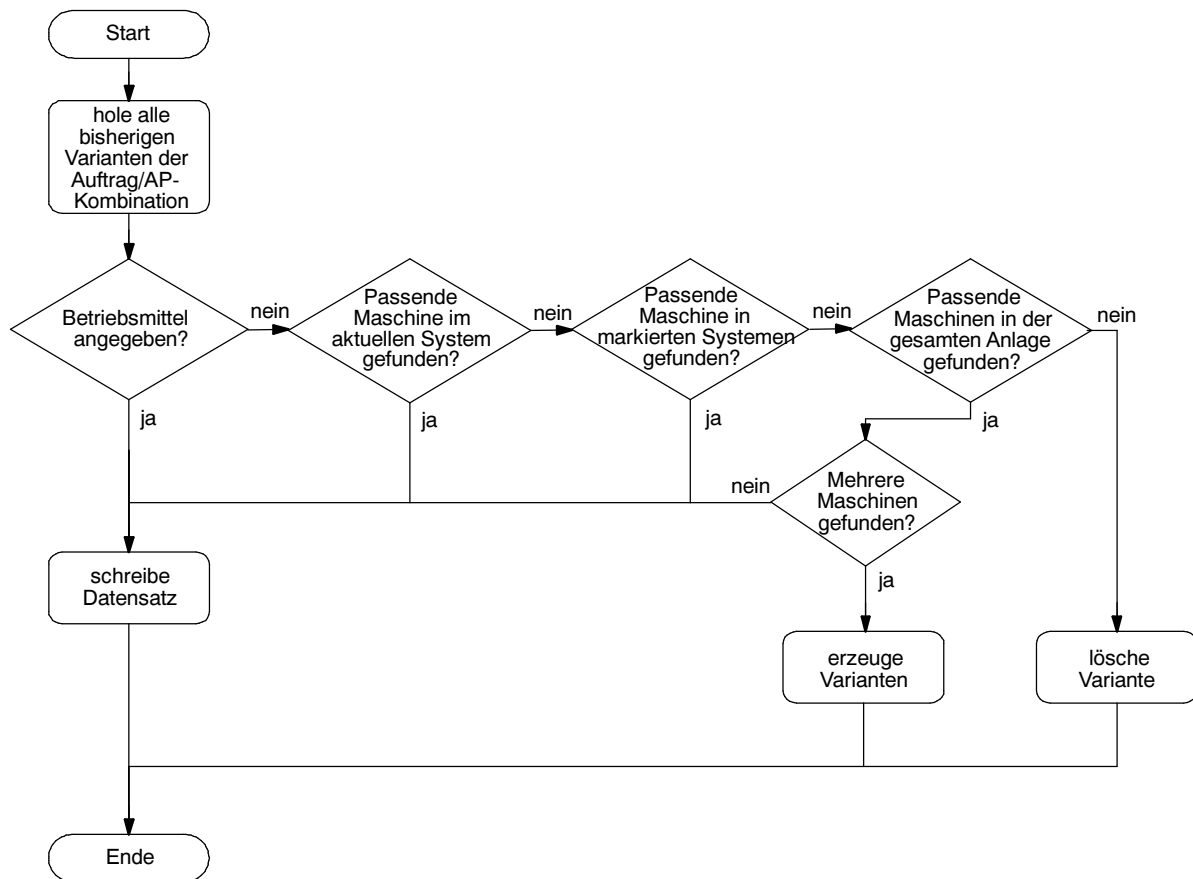


**Abb. 92** Suchradien für geeignete Betriebsmittel

1. Bei der Suche nach geeigneten Maschinen definiert ein konkret zugeordnetes Betriebsmittel genau diese Möglichkeit.
2. Ist kein Betriebsmittel angegeben, wird zuerst im aktuellen System (= System des Vorgängerprozesses) nach einer passenden Maschine gesucht. Damit ist gewährleistet, dass ein Auftrag so lange wie möglich in einer Linie bleibt und nicht ständig zwischen Systemen wechselt.
3. Bleibt diese Suche erfolglos, wird der Suchradius auf die Linien erweitert, die ein Betriebsmittel des zugrundeliegenden Arbeitsplans enthalten. Diese Suche wurde implementiert, da der Fall eintreten kann, dass für die aktuelle Komponente zwar kein konkretes Betriebsmittel angegeben ist, aber einer der nächsten Fertigungsschritte nur auf einer ganz bestimmten Maschine gefertigt werden kann bzw. ein Betriebsmittel dafür festgelegt ist. So ist eine vorausschauende Sicht möglich um einen Auftrag einer Linie zuzuordnen, die laut Arbeitsplan durchlaufen werden muss. Für diese Suche werden alle Systeme markiert, die ein Betriebsmittel enthalten, das im Arbeitsplan angegeben ist.
4. Wenn bis hier kein Betriebsmittel festgelegt wurde, wird zuletzt innerhalb der gesamten Fertigung gesucht. Werden mehrere passende Maschinen gefunden, so wird die entsprechende Anzahl Durchlaufvarianten erzeugt. Sollte die Suche jedoch ohne Ergebnis verlaufen, handelt es sich bei der Variante um eine Sackgasse, sie wird gelöscht. Wenn der Fall eintritt, dass für ein Produkt kein Durchlauf möglich ist, wird eine entsprechende Meldung ausgegeben.

Die so gefundenen Durchlaufvarianten werden in die Datenbank geschrieben. Abb. 93 zeigt den genauen Ablauf dieses Vorgehens als Flussdiagramm.

Im nächsten Schritt werden die gefundenen Durchlaufvarianten hinsichtlich technischer Restriktionen geprüft. Dazu werden die Produkteigenschaften mit den Maschineneigenschaften verglichen. Eine Inkompatibilität stellt ein Ausschlusskriterium dar, die zugehörige Durchlaufvariante wird gelöscht.



**Abb. 93** Ablauf bei der Suche nach einem geeigneten Betriebsmittel

Für die nun folgende Terminierung der Aufträge wird als Planungsgrundlage für jede Durchlaufvariante die Fertigungszeit berechnet. Zu jedem Arbeitsplanschritt einer Variante werden die vorhandenen Daten ermittelt und analysiert. Je nachdem welche Informationen zu den Maschinen in der Datenbank hinterlegt sind, wird das zugehörige Zeitmodell für die Berechnung der Fertigungszeiten ausgewählt und angewandt (vgl. Kapitel 7.1.2, S. 129).

Um für die Simulation eine Aussage über eine Einlastungsreihenfolge treffen zu können, wird nach der Fertigungszeitermittlung die Berechnung der Auftragseinlastung anhand einer Rückwärtsterminierung durchgeführt. Dazu wird für jeden Auftrag zunächst die Variante mit der kürzesten Laufzeit ausgewählt. Diese wird zum spätest möglichen Zeitpunkt eingelastet. Aus den Einlastungszeitpunkten aller Aufträge kann die Einlastungsreihenfolge ermittelt werden.

### Ausgabe der Ergebnisse

Neben der Weitergabe der Ergebnisse an die Simulation können diese auch im Berechnungswerkzeug anhand einer Plantafel visualisiert werden. Dazu berechnet das System die Durchlaufzeiten anhand der festgelegten Einlastungsreihenfolge der Aufträge. Zunächst wird für einen Auftrag geprüft, ob die festgelegte Startlinie frei ist. Ist dies der Fall wird der Auftrag eingelastet. Nach der Einlastung (= Belegung der ersten

Komponente) wird die Berechnung abgebrochen und die zuvor errechnete Planungszeit übernommen. Ist die Startlinie belegt, versucht das Werkzeug zuerst eine Variante des Auftrags zu finden, die eine unbelegte Startlinie hat. Wird eine solche gefunden, wird diese Variante ausgewählt und eingelastet. Kann keine andere Startlinie ermittelt werden, wird die Variante mit der geringsten Wartezeit gewählt.

Nachdem die Berechnungen abgeschlossen sind, wird ein Fenster geöffnet, das die Ergebnisse visualisiert und veranschaulicht (Abb. 94). Dabei werden die Aufträge nach dem Einlastungszeitpunkt sortiert. Das Ergebnisfenster ist in zwei Bereiche geteilt: im oberen Teil die Auftrags-, Varianten- und Durchlaufzeiten und im unteren das Gantt-Diagramm der Auftragseinlastung.

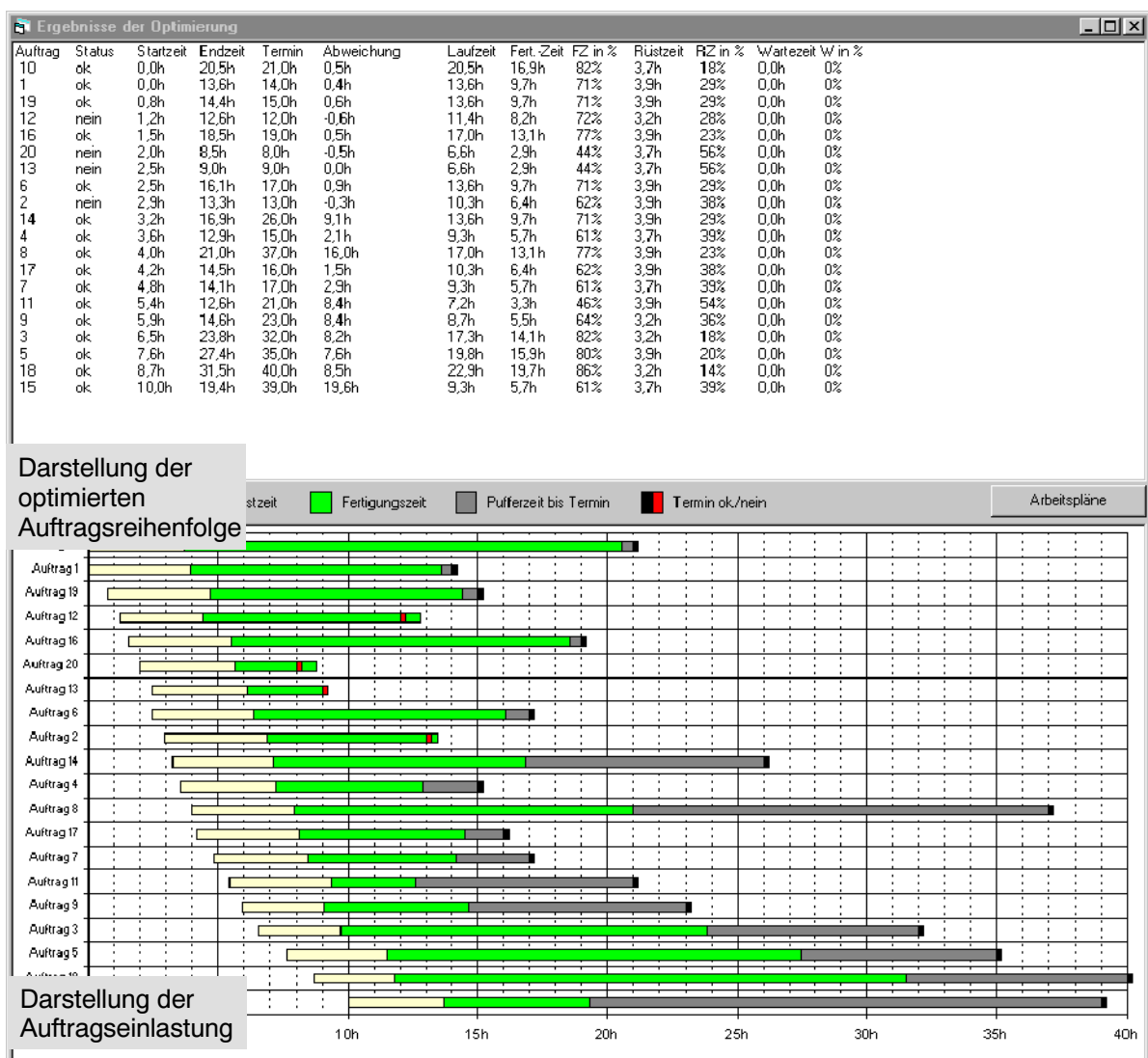


Abb. 94 Ergebnisdarstellung der Auftragseinlastung

In der Auftragsliste werden die Aufträge in der Reihenfolge ihrer Einlastung angezeigt sowie eine Reihe weitere Informationen zu den Terminen und Zeiten. Zu einem Auftrag können auch die zugehörigen Varianten- und Durchlaufzeiten abgerufen werden, aus

denen der Benutzer detaillierte Informationen über einen Auftrag ablesen kann. Das Diagramm der Auftragseinlastung zeigt die Verteilung der Einlastung und der Fertigungszeiten der Aufträge.

Abschließend werden die Ergebnisse aus dieser Voroptimierung als Einlastungsinformation an die Simulation übergeben. Dazu wird aus den Ergebnistabellen der Datenbank eine Datei im gewünschten Format erzeugt. Im Beispiel QUEST wird eine Steuerdatei unter *Schedules* erstellt. Diese kann mit fünf Aufträgen beispielsweise wie folgt aussehen, wobei die erste Zahl den Einlastungszeitpunkt in Sekunden und die zweite Zahl die Stückzahl darstellt:

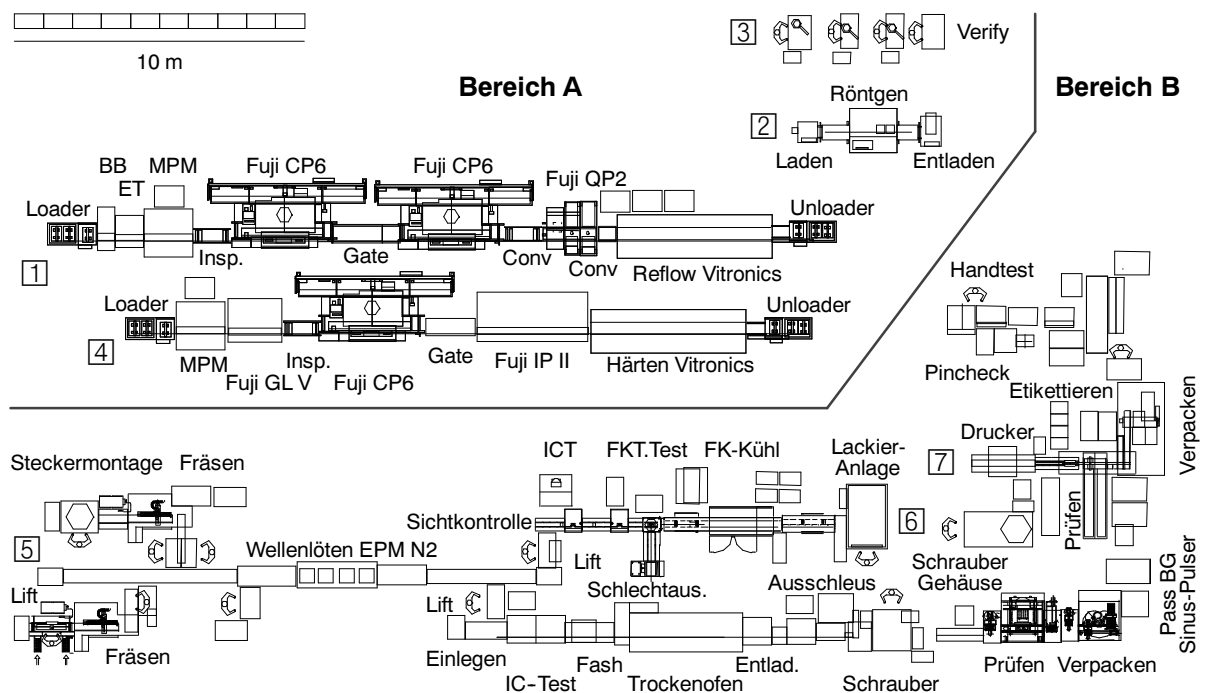
```
# Auftragseinlastung
ABSOLUTE
Produkt3 0 600
Produkt4 0 300
Produkt1 2880 300
Produkt2 4320 400
Produkt5 5400 700
```

# 8 Exemplarische Anwendung des Teilmodells Systemintegration

Nach der Beschreibung der Konzeption und Realisierung der einzelnen Module des Teilmodells Systemintegration ist im Folgenden ihre Anwendung anhand eines konkreten Beispiels dargestellt. Für die Ablaufsimulation wurde das System QUEST verwendet.

## 8.1 Beschreibung der Simulationaufgabe

Für die exemplarische Systemmodellierung unter Verwendung der Simulationskomponenten aus der Referenzmodell-Datenbank wurde eine Fertigung elektronischer Baugruppen für die Automobilindustrie gewählt. Bei den hergestellten Produkten handelt es sich um komplexe Baugruppen mit Mischbestückung in SMT und THT, wobei die bedrahteten Bauteile wie Stecker oder Sensoren manuell bestückt werden. Es kommen einseitig und zweiseitig bestückte Leiterplatten vor. Zum Schutz vor Umwelteinflüssen werden die Flachbaugruppen zum Teil mit Schutzlack überzogen und schließlich in ein Gehäuse montiert. Die Baugruppen haben sicherheitsrelevante Funktionen und werden daher während der Fertigung mehreren Tests unterzogen, die über die herkömmlichen Tests bei der Flachbaugruppenfertigung hinausgehen. Das Layout der relevanten Fertigungsbereiche ist in Abb. 95 dargestellt. Im Bereich A befindet sich die automatische SMD-Bestückung, im Bereich B die manuelle Bestückung und die Gehäusemontage.



**Abb. 95** Produktionssystem zur Herstellung von elektronischen Baugruppen für die Automobilindustrie



Alle Produkte durchlaufen die Systeme ① bis ④ im Bereich A. System ⑤ hat zwei produktabhängige Startpunkte, die an der Wellenlötanlage zusammengeführt und danach wieder aufgeteilt werden. Im Bereich ⑥ befinden sich Einzelstationen, im Bereich ⑦ drei unabhängige Linien für Test- und Verpackungsaufgaben. Die einzelnen Systeme haben folgende Funktionen:

System ①: Automatische SMD-Bestückung Leiterplattenoberseite

System ②: Röntgeninspektion zum Auffinden von Bestück- und Lötfehlern

System ③: Manuelle Prüfplätze zur Fehlerkontrolle und -beseitigung

System ④: Automatische SMD-Bestückung Leiterplattenunterseite

System ⑤: Manuelle Bestückung, Nutzen trennen, Wellenlöten, Test

System ⑥: Tauchlackieren der Leiterplatten, Gehäusemontage

System ⑦: Etikettieren, Endtest, Verpacken

Das zu fertigende Produktmix von ca. 35 Varianten lässt sich in einem ersten Schritt auf vier Hauptprodukte reduzieren. Die zu fertigenden Stückzahlen und die Produktdaten sind in Tabelle 19 angegeben. Die Losgrößen der Fertigung liegen im Bereich A zwischen 5.000 bis 10.000 Leiterplatten, im Bereich B bei 1.000 bis 2.000. Die Fertigung läuft im 3-Schicht-Betrieb an sechs Tagen der Woche. Abzüglich der Pausen hat ein Tag 1.350 Arbeitsminuten.

**Tabelle 19** Produktdaten der herzustellenden Flachbaugruppen (4er-Nutzen)

	LP 1	LP 2	LP 3	LP 4
geforderte Tagesproduktion (Einzelschaltung)	2.300 - 2.500	1.200 - 1.500	1.500 - 2.000	1.000 - 2.000
Anzahl BE OS 1. Automat	216	228	136	180
Anzahl BE OS 2. Automat	244	144	88	200
Anzahl BE OS 3. Automat	40	24	16	32
Anzahl BE US 1. Automat	548	72	0	444
Anzahl BE US 2. Automat	20	0	0	12
Anzahl BE Manuell 1	16	16	24	16
Anzahl BE Manuell 2	16	36	20	16
LP: Leiterplatte, BE: Bauelemente, OS: Oberseite, US: Unterseite				

Die Aufgabe besteht darin das System und die Auftragseinlastung zu modellieren und mit Hilfe der Simulation zunächst drei Fragen zu klären:

1. Was ist die optimale Losgröße der Produkte? Diese Frage ist unter den Gesichtspunkten Termineinhaltung, Flexibilität und Minimierung des Umrüstaufwands zu betrachten.
2. Wie wirken sich Variationen beim Produktmix auf den Puffer zwischen Bereich A und Bereich B aus?

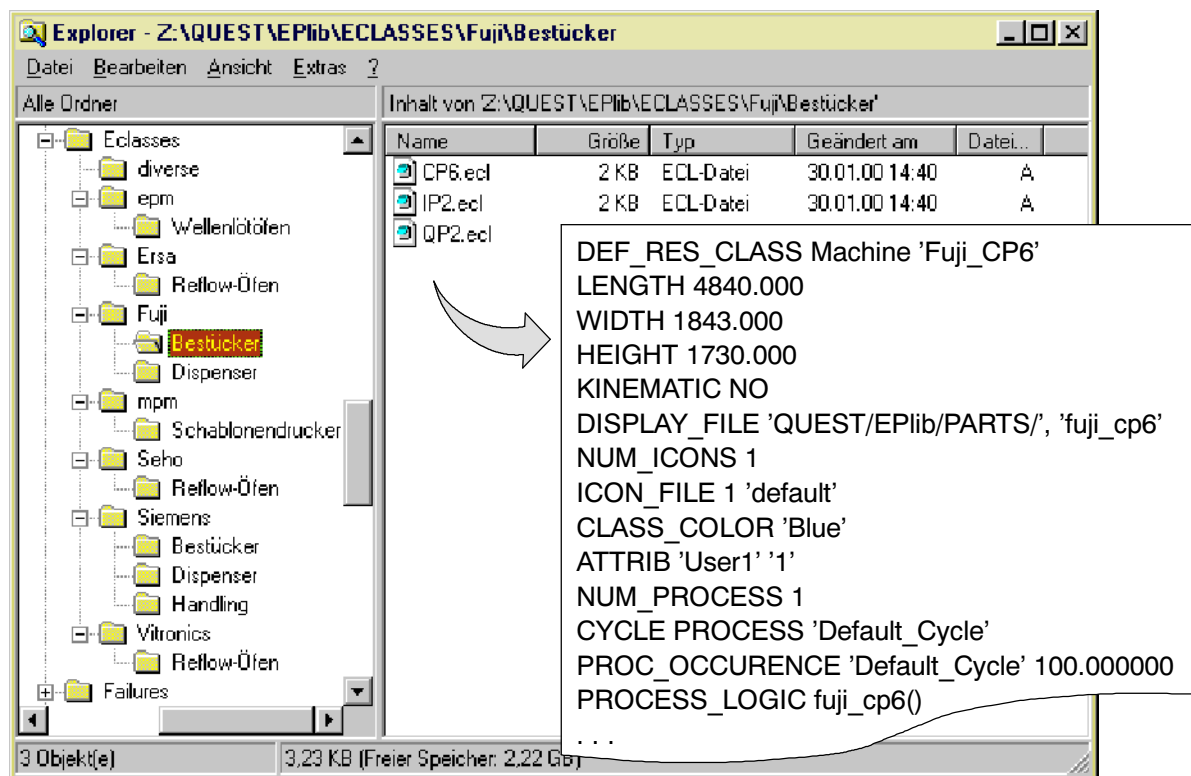
3. Wie lange benötigt Bereich B um beim Ausfall der Wellenlötanlage von zwei Tagen die angestauten Aufträge abzuarbeiten?

## 8.2 Aufbau des Simulationsmodells mit Hilfe der Referenzmodell-Datenbank

Für den Aufbau des Simulationsmodells wurde das beschriebene Fertigungssystem analysiert. Dabei wurden etwa 50 unterschiedliche Maschinen, Materialflusskomponenten und Puffer ermittelt. Die Unterstützung bei der Modellierung durch die Simulationskomponenten wird anhand von zwei Beispielen dargestellt: dem Hinzuladen einzelner Maschinen und dem interaktiven Aufbau einer Fertigungsstruktur.

### 8.2.1 Hinzuladen einzelner Komponenten aus der Datenbank

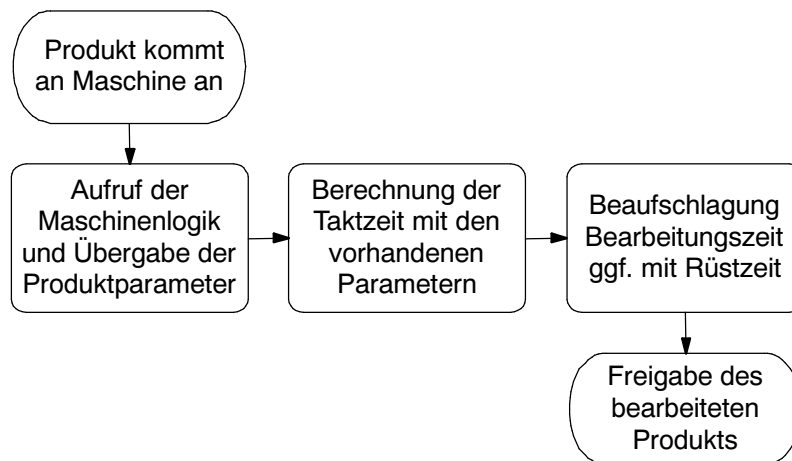
Um aus der Referenzmodell-Datenbank eine oder mehrere spezielle Maschinen in ein QUEST-Simulationsmodell hinzuzuladen, werden diese Maschinen mit dem unter Kapitel 7.1.4 beschriebenen Werkzeug ausgewählt und in einer Benutzerbibliothek (Library) abgespeichert. In Abb. 96 sind eine beispielhafte Bibliotheksstruktur und ein Auszug aus der Beschreibungsdatei für einen Fuji CP6 Bestückautomaten dargestellt.



**Abb. 96** Windows-Dateisystem mit Simulationskomponenten für das Simulationssystem QUEST

Um eine Maschine aus der Benutzerbibliothek in QUEST einzubinden, wird sie zunächst mit den Befehlen *File - Read Entity - Element Class* ausgewählt. Danach steht die Maschine direkt im Auswahlménü für Maschinen zur Verfügung und kann inklusive ihrer Maschinenlogik in ein Simulationsmodell eingebunden werden. Für die Beschreibung der Maschinenlogik wird die QUEST-spezifische Simulation Control Language (SCL) verwendet, mit der definiert in Simulationsläufe eingegriffen werden kann.

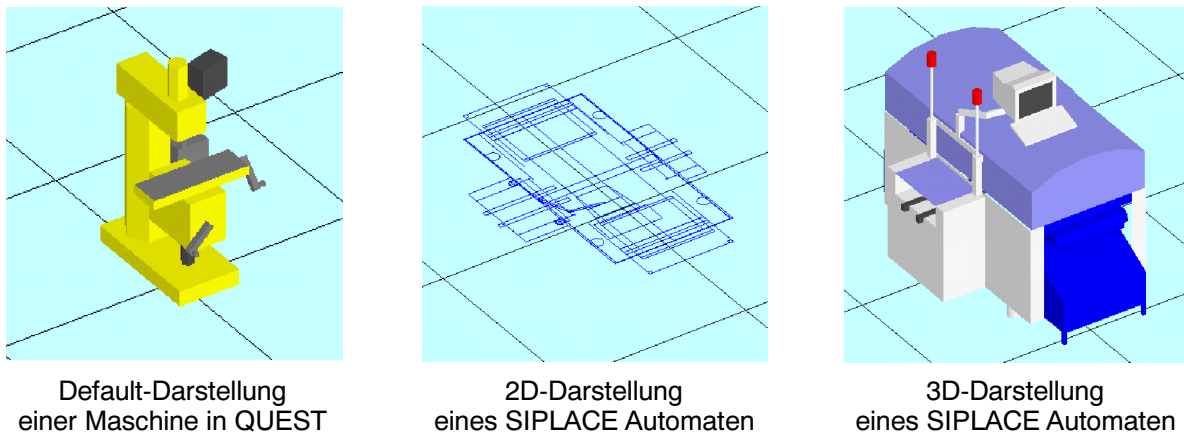
Die Maschinenlogik, die als separate SCL-Datei gespeichert ist, wird in QUEST durch die MaschinenvARIABLE *PROCESS\_LOGIC* mit der zugehörigen Maschine verknüpft. Alle relevanten Produktdaten sind als *User Attributes* der Produkte hinterlegt. Kommt während eines Simulationslaufs ein Produkt an einer Maschine an, wird die entsprechende Maschinenlogik aufgerufen und die Produktdaten werden übergeben. Die Maschinenlogik wertet die Produktdaten aus und berechnet je nach vorhandene Daten die aktuelle Taktzeit. Dabei wird das dreistufige Vorgehen aus Kapitel 7.1.2 (S. 129) angewandt. Einfache Berechnungen wie theoretische und differenzierte Taktzeit werden direkt von der SCL-Datei durchgeführt. Ist eine Logikkomponente für die Maschine vorhanden, wird diese mit den entsprechenden Variablen über einen *Pipe Stream* aufgerufen, der die Taktzeit zurückliefert. Dieses Vorgehen ist in Abb. 97 dargestellt. In der Maschinenlogik lassen sich noch weitere Funktionalitäten integrieren, wie die Berücksichtigung einer Umrüstzeit bei Produktwechsel oder die Anwendung unterschiedlicher Verteilungen auf die berechnete Taktzeit.



**Abb. 97** Ablauf der Simulation mit den maschinennahen Simulationskomponenten

Die direkte Übernahme einer Maschinengeometrie für die Darstellung in QUEST ist derzeit nicht möglich, da QUEST ein eigenes, internes Grafikformat verwendet. In der Referenzmodell-Datenbank sind Geometriedaten jedoch in einem standardisierten Grafikformat hinterlegt (z. B. DXF, IGES, STL). Wird für eine Maschine in QUEST die Default-Darstellung gewählt, wird eine Fräse angezeigt (Abb. 98). Je nachdem welche Darstellung für eine Maschine gewünscht ist, müssen im CAD-Modul von QUEST die Geometriedaten zunächst geladen und dann im Format von QUEST gespeichert werden. Dies können wie in Abb. 98 dargestellt 2D- oder 3D-Daten sein. Die Geometriein-

formation wird bei der Maschinendefinition zugewiesen, worauf die neue Darstellung direkt angezeigt wird.



**Abb. 98** *Unterschiedliche grafische Repräsentationen einer Maschine im Simulationssystem QUEST*

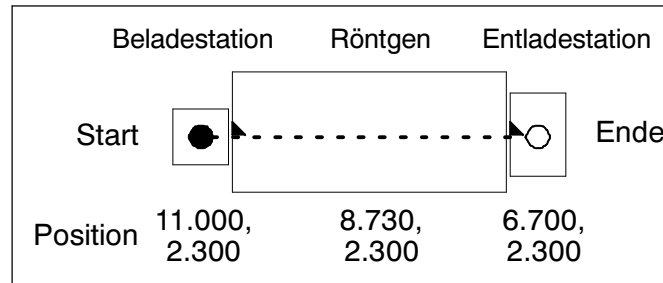
## 8.2.2 Interaktiver Aufbau einer Fertigungsstruktur

Mit dem in Kapitel 7.2 beschriebenen Werkzeug zum interaktiven Aufbau von Fertigungsstrukturen kann mit den in der Referenzmodell-Datenbank gespeicherten Simulationskomponenten das Layout einer Fertigung aufgebaut werden, wobei auch die Verknüpfung der Komponenten bezüglich des Materialflusses möglich ist. Das Einlesen einer solchen Struktur in QUEST erfolgt mit der QUEST-spezifischen Batch Control Language (BCL), mit der alle Funktionen von QUEST gesteuert werden können.

Als Beispiel einer derartigen Fertigungsstruktur ist in Abb. 99 ein Röntgensystem dargestellt, das aus einer Einlegestation bedient wird und das die geprüften Produkte in eine Entladestation übergibt. Bei der Positionierung im Layout wird der Umriss der Komponenten dargestellt, ihre Verknüpfung erfolgt grafisch. Bei der Übertragung der fertiggestellten Struktur an QUEST werden zum einen die enthaltenen Komponenten in die QUEST-Anwenderbibliothek geschrieben (vgl. Kapitel 8.2.1) und zum anderen wird die BCL-Datei erstellt, welche die Komponenten lädt, positioniert und verknüpft. Die drei Abschnitte – Laden, Positionieren, Verknüpfen – sind ebenfalls im Beispiel in Abb. 99 zu erkennen. Die betreffende BCL-Datei wird in QUEST über einen *BCL User Button* aufgerufen.

Dieses Vorgehen der Vorabdefinition von Fertigungssystemen kann angewandt werden, wenn alle benötigten Komponenten in der Referenzmodell-Datenbank vorliegen. Für die Praxis ist dies zunächst schwer zu realisieren. Speziell Puffer, Materialflusskomponenten oder Montagestationen sind oft Sonderlösungen, die nicht in ihrer gesamten Vielfalt vorrätig gehalten werden können. Eine Möglichkeit die Referenzmodell-Datenbank dennoch für die Systemdefinition zu verwenden besteht darin, fehlende Komponenten bei der Systemanalyse zu lokalisieren und diese daraufhin in die

Datenbank einzugeben. Eine zweite Möglichkeit ist die Verwendung von Standardkomponenten der entsprechenden Klassen als Platzhalter, die im Simulationssystem an die eigentlichen Systemkomponenten angepasst werden.



```
-- Laden
READ ECLASS FROM 'Loader_Xray.ecl'
READ ECLASS FROM 'Xray.ecl'
READ ECLASS FROM 'Unloader_Xray.ecl'
-- Positionieren
CREATE ELEMENT 'Loader_Xray_1' OF BUFFER CLASS 'Loader_Xray' AT 11000.0, 2300.0, 0
CREATE ELEMENT 'Xray_1' OF MACHINE CLASS 'Xray' AT 8730.0, 2300.0, 0
CREATE ELEMENT 'Unloader_Xray_1' OF BUFFER CLASS 'Unloader_Xray' AT 6700.0, 2300.0, 0
-- Verknüpfen
CONNECT ELEMENT 'Loader_Xray_1' OUTPUT 1 TO ELEMENT 'Xray_1' INPUT 1
CONNECT ELEMENT 'Xray_1' OUTPUT 1 TO ELEMENT 'Unloader_Xray_1' INPUT 1
```

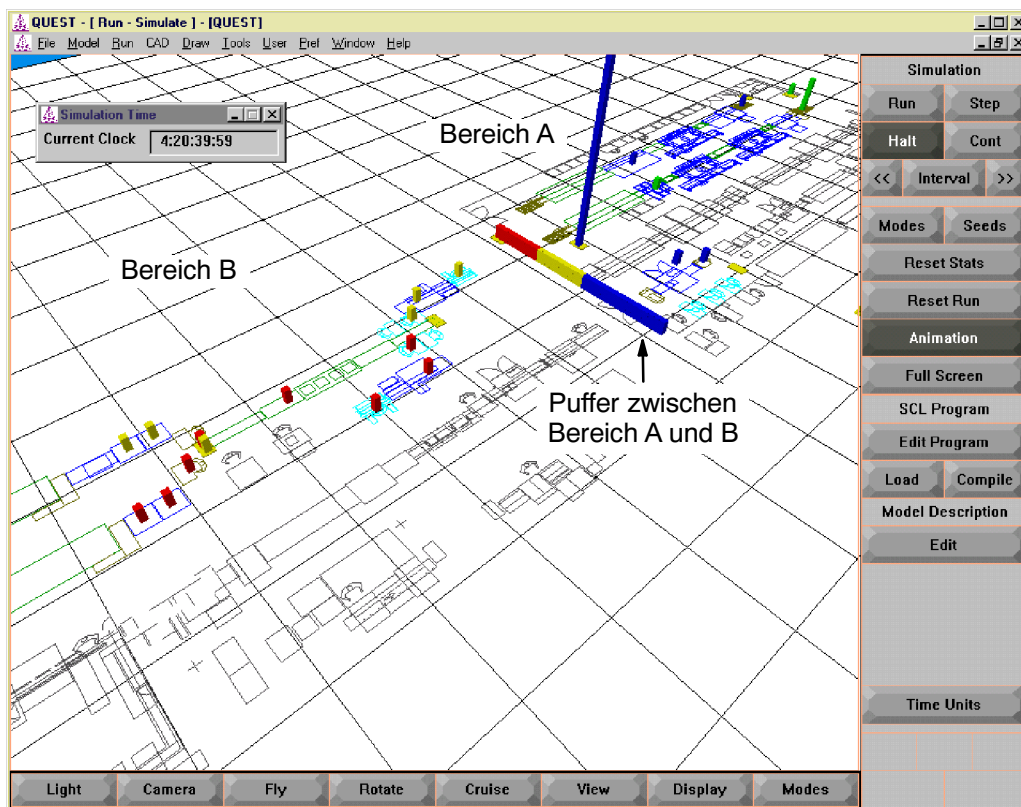
**Abb. 99** BCL-Befehlssatz zur Erzeugung einer Fertigungsstruktur in QUEST

Eine derartige Fertigungsstruktur kann in QUEST in ein bestehendes Simulationsmodell geladen werden oder in ein neues Modell. Die Modelle in QUEST orientieren sich an der realen Größe der Fertigungseinrichtungen. Beim Laden der Struktur in ein neues Modell wird lediglich ein BCL-Befehl zur Festlegung der benötigten Grundfläche vorgeschaltet:

```
-- Festlegung der Grundflaeche
SET GRID TO 10, 1000.0
```

Die Grundfläche eines Simulationsmodells in QUEST ist quadratisch, hier im Beispiel ein 10er-Raster mit einem Meter Kantenlänge. Der Nullpunkt der Grundfläche liegt in ihrem Mittelpunkt.

Das gesamte Simulationsmodell des beschriebenen Beispiels ist in Abb. 100 dargestellt. Bei Modellaufbau zeigt sich, dass der Bereich A mit der automatischen Bestückung und dem Test sehr gut anhand der Referenzmodell-Datenbank modelliert werden kann. Dabei können sowohl die Maschinen als auch die Peripherieeinrichtungen der Systemanbieter direkt übernommen werden. Dies war zu erwarten, da die Datenbank primär für diese Simulationskomponenten ausgelegt ist. Im Bereich B treten einige spezielle Montage- und Bearbeitungsstationen auf, die so nicht in der Datenbank vorhanden sind. Es ist jedoch möglich diese unter der Kategorie Montage-/Reparaturplätze einzugeben, die speziell für solche Fälle vorgesehen ist.



**Abb. 100** Simulationsmodell der Fertigung in QUEST

### 8.2.3 Generierung einer voroptimierten Auftragseinlastung

Um die Erzeugung einer voroptimierten Auftragseinlastung zu demonstrieren, wurde für die vier Produkte aus Tabelle 19 ein Auftragspool mit unterschiedlichen Fertigungstückzahlen erstellt, der einen Zeitraum von 40 Stunden umfasst (Tabelle 20). Des Weiteren wurden die Arbeitspläne für die vier Produkte mit dem in Kapitel 6 beschriebene Werkzeug erstellt und in die Datenbank übernommen.

**Tabelle 20** Auftragspool

Auftrag	Produkt	Anzahl	Termin	Auftrag	Produkt	Anzahl	Termin
1	LP1	300	14h	11	LP4	100	21h
2	LP4	200	13h	12	LP3	300	12h
3	LP3	500	32h	13	LP2	100	9h
4	LP2	200	15h	14	LP1	300	26h
5	LP4	500	35h	15	LP2	200	29h
6	LP1	300	17h	16	LP1	400	19h
7	LP2	200	17h	17	LP4	200	16h
8	LP1	400	37h	18	LP3	700	40h
9	LP3	200	23h	19	LP1	300	15h
10	LP2	600	21h	20	LP2	100	8h

Die Anlage, die nach der oben beschriebenen Modellierung bereits im benötigten Format vorliegt, wurde in das Werkzeug zur Ermittlung einer voroptimierten Auftragsreihenfolge geladen, ebenso die Auftragsliste. Nach Durchführung der Optimierung zeigt sich die in Abb. 101 dargestellte Situation. Die Aufträge sind in ihrer neuen Reihenfolge dargestellt, das Ergebnisfenster bietet noch eine Reihe weiterer Informationen. So wird mitgeteilt, ob der Termin eines Auftrags voraussichtlich eingehalten werden kann oder ob damit gerechnet werden muss, dass sich der Auftrag verspätet. Weitere Angaben sind Start- und Endzeitpunkt, der ursprüngliche Termin, Terminabweichungen, die berechnete Lauf-, Fertigungs- und Rüstzeit, wobei die letzten beiden Werte absolut und prozentual angegeben werden. Die in Kapitel 7.3.2 bereit vorgestellte Laufzeitanzeige dient zur Visualisierung dieser Werte.

### Auftragsansicht

Ergebnisse der Optimierung												
Auftrag	Status	Startzeit	Endzeit	Termin	Abweichung	Laufzeit	Fert.-Zeit	FZ in %	Rüstzeit	RZ in %	Wartezeit	W in %
10	ok	0,0h	20,5h	21,0h	0,5h	20,5h	16,9h	82%	3,7h	18%	0,0h	0%
1	ok	0,0h	13,6h	14,0h	0,4h	13,6h	9,7h	71%	3,9h	29%	0,0h	0%
19	ok	0,8h	14,4h	15,0h	0,6h	13,6h	9,7h	71%	3,9h	29%	0,0h	0%
12	nein	1,2h	12,6h	12,0h	-0,6h	11,4h	8,2h	72%	3,2h	28%	0,0h	0%
16	ok	1,5h	18,5h	19,0h	0,5h	17,0h	13,1h	77%	3,9h	23%	0,0h	0%
20	nein	2,0h	8,5h	8,0h	-0,5h	6,6h	2,9h	44%	3,7h	56%	0,0h	0%
13	nein	2,5h	9,0h	9,0h	0,0h	6,6h	2,9h	44%	3,7h	56%	0,0h	0%
6	ok	2,5h	16,1h	17,0h	0,9h	13,6h	9,7h	71%	3,9h	29%	0,0h	0%
2	nein	2,9h	13,3h	13,0h	-0,3h	10,3h	6,4h	62%	3,9h	38%	0,0h	0%
14	ok	3,2h	16,9h	25,0h	9,1h	13,6h	9,7h	71%	3,9h	29%	0,0h	0%
4	ok	3,6h	12,9h	15,0h	2,1h	9,3h	5,7h	61%	3,7h	39%	0,0h	0%
8	ok	4,0h	21,0h	37,0h	16,0h	17,0h	13,1h	77%	3,9h	23%	0,0h	0%
17	ok	4,2h	14,5h	16,0h	1,5h	10,3h	6,4h	62%	3,9h	38%	0,0h	0%
7	ok	4,8h	14,1h	17,0h	2,9h	9,3h	5,7h	61%	3,7h	39%	0,0h	0%
11	ok	5,4h	12,6h	21,0h	8,4h	7,2h	3,3h	46%	3,9h	54%	0,0h	0%
9	ok	5,9h	14,6h	23,0h	8,4h	8,7h	5,5h	64%	3,2h	36%	0,0h	0%
3	ok	6,5h	23,8h	32,0h	8,2h	17,3h	14,1h	82%	3,2h	18%	0,0h	0%
5	ok	7,6h	27,4h	35,0h	7,6h	19,8h	15,9h	80%	3,9h	20%	0,0h	0%
18	ok	8,7h	31,5h	40,0h	8,5h	22,9h	19,7h	86%	3,2h	14%	0,0h	0%
15	ok	10,0h	19,4h	39,0h	19,6h	9,3h	5,7h	61%	3,7h	39%	0,0h	0%

### Varianten- und Durchlaufansicht

Varianten zu Auftrag 14			Pos.	System	Komp.	BM-Nr.	Bezeichnung
Arbeitspl.	DL-Nr.	Laufzeit	2	17	4	0	MPM, Ultraprint 2000 Hie (automatiklinie reflowseite_2)
40	1	14,1h	3	17	6	0	Fuji, CP-642 (automatiklinie reflowseite_2)
40	2	14,1h	4	17	8	0	Fuji, CP-642 (automatiklinie reflowseite_2)
40	3	14,1h	5	17	10	0	Fuji, QP-242E (automatiklinie reflowseite_2)
40	4	14,1h	6	17	12	0	Vitronics, Magnatherm 820N (automatiklinie reflowseite_2)
40	5	14,1h	8	2	2	106	default, Röntgen (röntgensystem)
40	6	14,1h	9	3	2	115	default, Verity-Kontrollplatz (verity kontrollplatz)
40	7	14,1h	12	4	3	138	Fuji, FGL V-5000 (automatiklinie schwallsseite)
44	1	14,1h	13	4	5	102	Fuji, CP-642 (automatiklinie schwallsseite)
44	2	13,6h	14	4	7	104	Fuji, FIP II (automatiklinie schwallsseite)
44	4	14,1h	15	4	8	113	Vitronics, Magnatherm 820N (automatiklinie schwallsseite)
44	5	13,6h	17	5	2	111	default, Handbestückplatz (hand-linie1)
44	6	13,6h	18	5	3	108	default, Fräse (hand-linie1)
44	7	13,6h	19	5	4	0	default, Handbestückplatz (hand-linie1)
44	8	13,6h	23	7	2	114	SEHO, 1235 (löten schwallsseite)
44	9	13,6h	24	7	3	116	default, Visuelle Lötstellenkontrolle (löten schwallsseite)
44	10	14,1h	25	8	2	117	default, IC-Tester (test-linie 1)
44	11	14,1h	26	8	3	118	default, Funktionstester (test-linie 1)
44	12	14,1h	27	8	4	119	default, Klimaschrank (test-linie 1)
44	13	14,1h	28	8	5	120	default, Burn-In (test-linie 1)
			33	10	2	125	default, Tauchlackierer (tauchlackieren)
			34	11	2	137	default, Run-In-Tester (run-in-tester (5%))
			35	12	2	126	default, Schrauberstation (schrauber-station 1)
			36	14	2	128	default, Etikettieren (montage und verpacken 1)
			37	14	3	129	default, Endtester (montage und verpacken 1)

Abb. 101 Ergebnisfenster (Auftragsansicht)

Mit der Maus kann eine Auftragszeile ausgewählt werden. Nach Anklicken der Schaltfläche *Arbeitspläne* am rechten Fensterrand werden für den gewählten Auftrag die zu-

gehörigen Varianten- und Durchlauf Listen angezeigt. Diese Listen geben detaillierte Informationen über die gefundene Fertigungsvarianten und die zugehörigen Fertigungsabläufe. Zu den Varianten werden die verwendeten Arbeitspläne und die berechneten Laufzeiten angezeigt. Die Durchlauf Listen geben zu den Fertigungsschritten im Arbeitsplan das zugeordnete Fertigungssystem, die Fertigungskomponente, die Betriebsmittelnummer sowie die Maschinenbezeichnung an.

Die Ergebnisse der Optimierung werden der Simulation in Form einer Einlastungsliste zu Verfügung gestellt. Für QUEST wurde das entsprechende Format in Kapitel 7.3.2 aufgezeigt. Das Simulationssystem übernimmt die vorgeschlagene Einlastungsreihenfolge. Simulationsintern erfolgt die Abarbeitung der Aufträge jedoch nach den dort eingestellten Strategien und Verknüpfungen.



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Simulationstechnik stellt heute leistungsfähige Werkzeuge zur Verfügung, die in vielen Bereichen der Produktionstechnik eingesetzt werden können. In der Maschinenentwicklung reicht die Simulationsunterstützung von der Untersuchung des mechanischen und thermischen Verhaltens einzelner Bauteile über die Auslegung von Kinematik und Dynamik bis zum Zusammenbau ganzer Maschinen. Simulierte Maschinen spiegeln das Steuerungsverhalten von realen Maschinen wider und können in Systemsimulationen eingesetzt werden. In der Anlagenplanung werden dann ganze Produktionssysteme hinsichtlich ihrer Effizienz und Leistungsfähigkeit untersucht. Ziel der Simulation ist es, den Bau von aufwendigen realen Prototypen durch Rechnermodelle zu ersetzen oder zu Ergebnissen zu kommen, die nicht auf andere Weise erlangt werden können. Simulation ermöglicht auch den schnellen Betrachtungswechsel zwischen unterschiedlichen Entwicklungsvarianten.

Voraussetzung für den Simulationseinsatz sind digitale Daten. In der Maschinenentwicklung werden zunächst 3D-Daten der Bauteile benötigt. Für die Simulation sind dann Randbedingungen und Eingangsdaten zu setzen, die entweder aus der Entwicklungsaufgabe vorgegeben sind oder aus vorgelagerten Simulationen oder Berechnungen stammen. Je weiter der Entwicklungsprozess fortschreitet, desto umfangreicher werden die Daten, die aus angrenzenden betrieblichen Bereichen benötigt werden. Für den Einsatz einer virtuellen Maschine in einem simulierten Produktionssystem sind dann etwa auch Daten über die zu fertigenden Produkte und die Produktionsabläufe erforderlich.

Alle Daten, die im Laufe einer Maschinenentwicklung entstehen, müssen von einem Informationssystem verwaltet werden, das die Durchgängigkeit der Daten und den Zugriff darauf sicherstellt. Ein umfassendes Datenmanagement und die abgestimmte Steuerung der Entwicklungsprozesse sind die wichtigsten Grundlagen für die effiziente Nutzung integrierter Simulationsanwendungen.

Im Rahmen dieser Dissertation wurde als Kern des Datenmanagements für die maschinennahe Simulation ein Referenzmodell entwickelt, das eine Daten-, eine Prozess- und eine Ressourcensicht enthält. Dieses Referenzmodell stellt somit ein integriertes Produkt- und Prozessmodell dar, in dem alle Entwicklungsteilaufgaben abgebildet werden können. Der benötigte Datenumfang für die Simulationen und die Anwendungsmethoden sind in Teilmodellen enthalten. Die Simulationskomponenten unterschiedlicher Entwicklungsebenen werden anhand der Teilmodelle zusammengefügt und in einer übergreifenden Sicht dargestellt.

Der Teil des Referenzmodells, der das Systemverhalten von Maschinen betrifft, wurde in einer Datenbank realisiert, die alle relevanten Maschineninformationen für die Ablaufsimulation enthält. Teile des Informationsinhalts werden über das Datenmanagement direkt aus Entwicklungsdaten übernommen. Andere Informationen zur Beschreibung der virtuellen Maschinen müssen speziell für die Zwecke der Systemsimulation

bereitgestellt werden. Dies sind beispielsweise Bausteine zur Beschreibung der Maschinenlogik mit definierte Ein- und Ausgabeparametern.

Das realisierte System bildet die Schnittstelle zwischen Maschinenherstellern und Anlagenbetreibern beim Einsatz von maschinennahen Simulationskomponenten für die Ablaufsimulation. Die Bereitstellung dieser Komponenten hat für Anlagenhersteller den Vorteil, dass bereits während der Angebotsphase verlässliche Aussagen über das Maschinenverhalten im System gemacht werden können. Dabei kann von einer hohen Planungssicherheit ausgegangen werden, da direkt auf die Entwicklungsdaten der Maschinen zurückgegriffen wird. Für Kunden und Betreiber der Maschinen besteht der Vorteil darin, dass vor dem Kauf überprüft werden kann, ob und wieweit Anforderungen erfüllt sind, wodurch Fehlinvestitionen vermieden werden. Weiterhin wird durch die simulationsbasierte Planung ein schneller Produktionsanlauf sichergestellt.

Für die Praxisanwendung der Simulationskomponenten wurde neben den Maschinendaten auch die Modellierung von Produktionssystemen und -abläufen betrachtet. Dabei wurden für den effizienten Einsatz Werkzeuge und Schnittstellen geschaffen, mit denen Fertigungsstrukturen sowie realistische Ablaufinformationen anhand von Arbeitsplänen generiert werden können und die eine Übertragung der Informationen an die Systemsimulation ermöglichen. Der Anwendernutzen der entwickelten Softwarebausteine wurde anhand einer konkreten Aufgabenstellung nachgewiesen.

Technische Informationssysteme wie das hier vorgestellte integrierte Simulationsdaten-Management bestimmen zukünftig ganz wesentlich den Erfolg von Unternehmen. Ohne derartige Informationssysteme sind die gestellten organisatorischen und technischen Aufgaben bei der Entwicklung komplexer Maschinen oder Produktionsanlagen nicht mehr effizient zu bewältigen. Die Einführung eines solchen Systems ist zunächst mit großem Aufwand verbunden. Die Investitionen zahlen sich jedoch sehr bald durch verkürzte Entwicklungszeiten und qualitativ höherwertigere Produkte aus.

Die heutigen Simulationssysteme werden in ihrer Funktionalität weiter zunehmen, wodurch mehrere unterschiedliche Simulations- und Planungsaufgaben mit einem Werkzeug durchgeführt werden können. Die Fortführung des Digital Manufacturing Gedankens führt zu integrierten Arbeitsumgebungen, die eine durchgängige Archivierung aller anfallenden Daten für die Weiterverwendung in hierarchischen Planungssystemen zum Ziel haben. Virtuelle Maschinen und ganz allgemein virtuelle Produkte werden mit dem Einsatz von standardisierten Bibliotheken und Schnittstellen zu den Simulationssystemen immer rationeller aufgebaut werden können. Letztendlich wird die Bereitstellung virtueller Anlagen für Planungszwecke durch die Maschinenhersteller nicht nur aus den integrierten, simulationsbasierten Entwicklungsprozessen resultieren, sondern auch eine obligatorische Anforderung der Anwender werden. Die vorliegende Arbeit stellt dazu die grundlegenden Methoden und Vorgehensweisen bereit.

# Abkürzungen

3D-CAD	räumliches CAD	HiL	Hardware-in-the-Loop
API	Application Program(ming) Interface	IAPPS	Integrated Automated Process Planning System
ASIM	Arbeitsgemeinschaft Simulation der Gesellschaft für Informatik e.V.	ICAM	Integrated Computer Aided Manufacturing (der U. S. Air Force)
BEM	Boundary-Element-Method	IDEF	ICAM Definition
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	IEC	International Electrotechnical Commission
CAD	Computer Aided Design	ISO	International Standards Organisation
CAE	Computer Aided Engineering	LC	Logic Control
CAM	Computer Aided Manufacturing	M-CAD	Mechanik-CAD
CAP	Computer Aided Planning	MKS	Mehrkörpersimulation
CAPE	Computer Aided Production Engineering	MTBF	Mean Time Between Failure
CAX	Computer Aided Activities	MTTR	Mean Time To Repair
CNC	Computer Numeric Control	NC	Numeric Control
CSV	Comma Separated Values	NIAM	Nijssen's Information Analysis Methodology
DB	Datenbank	QFD	Quality Function Deployment
DBMS	Datenbank Management System	OMG	Object Management Group
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft	PC	Personal Computer
DIN	Deutsches Institut für Normung	PPS	Produktionsplanung und -steuerung
DMF	Digital Manufacturing	RC	Robot Control
DMS	Dokumenten Management System	RP	Rapid Prototyping
DMU	Digital Mock-up	SADT	Structured Analysis and Design Technique
DOF	Degree of Freedom	SDM	Simulationsdaten Managent
E-CAD	Elektronik-CAD	SMD	Surface Mount Device
EDM	Engineerig Data Management	SMT	Surface Mount Technology
EDMS	Engineerig Data Management System	SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
ERM	Entity-Relationship Model	SQL	Structured Query Language
ERP	Enterprise Resource Planning	STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
FDM	Finite-Differenzen-Methode	THD	Through Hole Device
HLA	High Level Architecture	THT	Through Hole Technology
FEM	Finite-Elemente-Methode	UML	Unified Modelling Language
FORSIM	Bayerischer Forschungsverbund Simulationstechnik	VR	Virtual Reality

# Literatur

1. Abels, S.:  
Modellierung und Optimierung von Montageanlagen. Dissertation, Universität Erlangen. München: Carl-Hanser 1993
2. Albert, J.; Tomaszunas, J.:  
Rapid Prototyping von speicherprogrammierbaren Steuerungen an virtuellen Maschinen. In: Industrie Management, 14 (1998) 5, S. 34 ff.
3. Amann, W.:  
Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen. Dissertation, TU München 1993
4. Angele, S.; Rabe, M.; Scholz, I.; Schulze, Th.; Straßburger, S.:  
Austauschbarkeit und Kopplung von Modellen. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik, S. 233-255. Delft [u.a.]: SCS 2000
5. Baloui, S.:  
Microsoft ACCESS. Haar bei München: Markt und Technik Buch und Software 1993
6. Banks, J.:  
Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Application, and Practice. New York [u. a.]: Wiley-Interscience 1998
7. Bauernfeind, H.:  
Einsatz von FEM-Simulation im Werkzeugmaschinenbau. In: iwv Seminarberichte 47: Virtuelle Produktion – Prozeß- und Produktsimulation. München: Herbert Uzt 1999
8. Becker, M.; Brenner, C.; Erkollar, A.; Jochem, R.; Klußmann, J.:  
Beschreibungsmethoden für Referenzmodelle. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik, S. 31-54. Delft [u.a.]: SCS 2000
9. Bender, K.; Schaich, C.:  
Simultaneous Engineering bei der Projektierung von Maschinensteuerungen. In: ZWF, 91 (1996) 10
10. Bestle, D.:  
Analyse und Optimierung von Mehrkörpersystemen. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer 1994
11. Bestle, D.; Meier, H.; Glora, M.; Kreuzsch, K.:  
Vorabinbetriebnahme numerischer Steuerungen mit simulierten Werkzeugmaschinen. In: Industrie Management, 14 (1998) 5, S. 49 ff.
12. Boot, R.:  
Automatisierter Test von Steuergeräten in einer Hardware-in-the-Loop-Simula-

- tionsumgebung. In: Engeli, M.; Hrdliczka, V. (Hrsg.): Simulationstechnik, S. 45-55, Zürich: vdf Hochschulverlag 1998, Zürich 15.-18.09.1998
13. Bracht, U.; Hagmann, M.  
Die ganze Fabrik im Simulationsmodell. In: ZWF (1998) 7/8, S. 345-348
  14. Brand, A.:  
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID). Dissertation, Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 1997
  15. Bullinger, H.-J.; Warschat, J. (Hrsg.):  
Concurrent Simultaneous Engineering Systems. The Way to Successful Product Development. Berlin u.a.: Springer 1996
  16. Burkhardt, R.:  
UML - Unified Modeling Language. Bonn [u.a.]: Addison-Wesley 1997
  17. Chen, P.:  
The Entity-Relationship Model: Towards a Unified View of Data. ACM Transactions on Database Systems, Vol. 1, No. 1, Jan. 1976
  18. Colombo, W.:  
Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High-Level Petri Nets. Dissertation, Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 1998
  19. Dittrich, J.; Mertens, P.:  
A Framework für MRP-Simulation. In: Dalcin, M.; Herzog, U.; Bloch, G.; Kaylan, A. Riza (Hrsg.): Proceedings of the ESS 1995, Erlangen-Nürnberg, The Society of Computer Simulation, Istanbul 1995
  20. Doberenz, W.; Kowalski, Th.:  
Visual Basic 5: Programmierpraxis. München: Hanser 1997
  21. Eversheim, W.; Bochtler, W.; Laufenberg, L.:  
Methods and Models for Integrated Modelling of Products and Processes. Production Engineering - Annals of the German Academic Society for Production Engineering, Vol I/2 (1994), pp. 173-176
  22. Eversheim, W.; Fuhlbrügge, M.; Dobberstein, M.:  
Produktivitätssteigerung durch simulationsgestützte Auftragsreihenfolgeoptimierung. VDI-Z 136 (1994) 9, S. 30-32
  23. Eversheim, W.; Schenke, F.-B.:  
Das virtuelle Produkt - Hilfsmittel zur effizienten Produktgestaltung. In: wt Werkstattstechnik, 89 (1999) H. 3, S. 73 ff.
  24. Eversheim, W.; Thome, H. G.:  
Einsatzgebiete der Simulation im Rahmen des Computer Integrated Manufacturing, Simulation in der Fertigungstechnik, Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer 1988

25. Feldmann, K.; Christoph, F.:  
Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Optimierung des thermischen und dynamischen Verhaltens von Bestückautomaten. In: ZWF (2000) 6
26. Feldmann, K.; Geiger M. (Hrsg.):  
Produktionssysteme in der Elektronik – Bericht des Forschungsverbundes 1995–1998. Bamberg: Meisenbach 1999
27. Feldmann, K.; Göhringer, J.:  
Multimedia System for Remote Diagnosis of Complex Placement Machines. The International Journal of Advanced Manufacturing Technologies (1999), Vol. 6, pp. 722-728
28. Feldmann, K.; Krimi, S.; Colombo, A.W.:  
A Hybrid Simulation-Based Approach for Design and Implementation of Flexible Production Systems. IASTED International Conference: Modelling and Simulation 1999, Philadelphia, PA USA, May 5-8, 1999
29. Feldmann, K.; Schlögl, W.:  
Referenzmodelle für maschinennahe Simulationskomponenten. In: Engeli, M.; Hrdliczka, V. (Hrsg.): Simulationstechnik, S. 307–313, Zürich: vdf Hochschulverlag 1998, Zürich 15.-18.09.1998
30. Feldmann, K.; Schlögl, W.:  
Integrated Modelling and Simulation of Manufacturing Systems – Exemplary in Electronics Production. In Tagungsband: 32nd CIRP International Seminar on Manufacturing Systems 1999, S. 369-378, Leuven/Belgien 24.-26.05.1999
31. Feldmann, K.; Schlögl, W.:  
Aufbau und Anwendung maschinennaher Referenzmodelle für die Ablaufsimulation. In: Feldmann, K.; Reinhart, G. (Hrsg.): Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion, S. 223-251. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer 1999
32. Föhrenbach, A.; Grunow, M.; Günther, H.-O.:  
Simulation von Bestückungsautomaten in der Elektronikindustrie. ZWF 93 (1998) 6, S. 255-258
33. Foley, J. D.; van Dam, A.; Feiner, S. K.; Hughes, J. F.; Phillips, R. L.:  
Grundlagen der Computergaphik – Einführung, Konzepte, Methoden. Bonn [u.a.]: Addison-Wesley 1994
34. Fishwick, P. A.:  
Simulation Model Design and Execution – Building Digital Worlds. Engelwood Cliffs: Prentice Hall 1995
35. Grabowski, H.; Anderl, R.; Schilli, B.; Schmidt, M.:  
Produktmodellkonzept von STEP. VDI-Z 131 (1989) 9, S. 68-76
36. Grabowski, H.; Anderl, R.; Polly, A.:  
Integriertes Produktmodell. In: Warneke, H.-J.; Schuster, R. (Hrsg.): Entwicklungen zur Normung von CIM. Berlin, Wien, Zürich: Beuth 1993

37. García de Jalón, J.; Bayo, E.:  
Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems - The Real Time Challenge. New York: Springer 1994
38. Golm, F.:  
Gestaltung von Entscheidungsstrukturen zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen. Dissertation, TU Berlin. Potsdam: UNZE 1996
39. Gräßler, R.:  
Planungs- und Workflow-Methodik für eine integrierte Konstruktion und Arbeitsplanung. Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Shaker 1999
40. Grampp, K.:  
Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestückautomaten. Dissertation, Universität Erlangen. München: Carl-Hanser 1994
41. Greiner-Dürr, E.; Murr, O.:  
Austausch und Integration von Modelldaten im Umfeld von Modellierungswerkzeugen. GiPP Arbeitsbericht 1997, [http://w2.siemens.de/zt\\_pp/ergebnis/b\\_s5\\_1b.html](http://w2.siemens.de/zt_pp/ergebnis/b_s5_1b.html)
42. Großmann, K.:  
Antriebstechnik beherrschen durch Simulation. In: Antriebstechnik 33 (1994) Nr. 4, S. 56-65
43. Haasis, S.:  
Integrierte CAD-Anwendungen, Rationalisierungspotentiale und zukünftige Einsatzgebiete. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer 1995
44. Hagmann, M.; Schäfer, G.; Bracht, U.:  
Das integrierte Ebenenkonzept als neuer Ansatz in der Fabrik- und Anlagenplanung. In: Simulationstechnik, S. 267-274, Zürich: vdf Hochschulverlag 1998
45. Hansen, O.:  
Synchronisierte Simulation. Ein Beitrag zur optimalen Ablaufsteuerung von Fertigungsprozessen, dargestellt anhand der Elektronikfertigung. Dissertation. TU Dresden 1995
46. Hars, A.:  
Referenzmodelle - Grundlagen effizienter Datenmodellierung. Wiesbaden 1994
47. Herrmann, G.; Egerer K.:  
Handbuch der Leiterplattentechnik, Band 2: Neue Verfahren, Neue Technologien. Saulgau: Eugen G. Leuze 1991
48. Heuer, A.; Saake, G.:  
Datenbanken. Bonn [u.a.]: Internat. Thomson Publ. 1995
49. Hofer-Alfeis, J. (Hrsg.):  
Geschäftsprozeßmanagement - Innovative Ansätze für das wandlungsfähige Unternehmen. Marburg: Tectum 1999

50. Hoffmann, J.:  
MATLAB und SIMULINK. Bonn [u.a.]: Addison-Wesley 1998
51. Hubka, V.; Eder, W. E.:  
Einführung in die Konstruktionswissenschaft. Berlin, Heidelberg [u. a.]: Springer 1992
52. Kaufman, A.; Cohen, D.; Yagel, R.:  
Volume Graphics. IEEE Computer, Vol. 26, No. 7 July 1993 S. 51-64
53. Kemper, A.; Eickler, A.:  
Datenbanksysteme: Eine Einführung. Wien: Oldenbourg 1996
54. Kief, H. B.:  
NC/CNC Handbuch. München, Wien: Carl Hanser 1999
55. Kiese Wetter, Th.:  
Integrativer Produktentwicklungsarbeitsplatz mit Multimedia- und Breitbandkommunikation. Dissertation, TU Berlin 1997
56. Kiran, A. S.  
Simulation and Scheduling. In: Banks, J. (Hrsg.): Handbook of Simulation. New York [u. a.]: Wiley-Interscience 1998
57. Klabunde, S.:  
Referenzmodelle und flexibles Geschäftsprozeßmanagement. In: Hofer-Alfeis, J. (Hrsg.): Geschäftsprozeßmanagement – Innovative Ansätze für das wandlungsfähige Unternehmen, S. 37-41. Marburg: Tectum 1999
58. Klinger, A.; Wenzel, S.:  
Referenzmodelle – Begriffsbestimmung und Klassifikation. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik, S. 13-29. Delft [u.a.]: SCS 2000
59. Klußmann, J.; Krauth, J.; Splanemann, R.:  
Simulation – Spielerei oder zukunftsweisende Technik? In: wt – Produktion und Management 86 (1996), S. 361-366
60. Klußmann, J.; Waenke P.; Weber, F.:  
Production Simulation as Decision Support System for Small and Medium Enterprises. In: Modelling and Simulation: A Tool for the Next Millenium, 13th European Simulation Multiconference (ESM '99), S. 300-304. Warschau: SCS 1999
61. Knothe, K; Wessels, H.:  
Finite Elemente. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer 1992
62. Kodweiß, A.; Wittmann, M.; Rupprecht, Ch.; Boley, H.:  
Modellgenerierung mit Referenzbausteinen. In: Hofer-Alfeis, J. (Hrsg.): Geschäftsprozeßmanagement – Innovative Ansätze für das wandlungsfähige Unternehmen, S. 215-222. Marburg: Tectum 1999
63. Kosturiak, J.; Gregor, M.:  
Simulation von Produktionssystemen. Wien, New York: Springer 1995



64. Koytek, T.:  
Virtuelles Prototyping mit Digital Mockup. In: Engineering Management, 1997/98, S. E23 ff.
65. Krause, F.-L.; Jansen, H.; Vollbach, A.:  
EDM-Integration heterogener CAD-Systeme für die verteilte Produktentwicklung. Industrie Management 5/96, S. E16-E20, Okt. 1996
66. Krause, F.-L.; Bock, Y.; Rothenburg U.  
Application of Finite Element Methods for Digital Mock-Up Tasks. In Tagungsband: 32nd CIRP International Seminar on Manufacturing Systems 1999, Leuven/Belgien 24.-26.05.1999
67. Krebs, T.:  
Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell. Dissertation, Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 1997
68. Krups, R.:  
SMT-Handbuch -Vom CAD-System zur Platinenfertigung, Vogel Buchverlag 1991
69. Kuhn, A.; Reinhardt, A.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.):  
Handbuch Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik. Wiesbaden; Braunschweig: Vieweg 1993
70. Laschet, A.:  
Simulation von Antriebssystemen. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer 1988
71. Law, A. M.; Kelton, W. D.:  
Simulation Modelling & Analysis. New York [u. a.]: McGraw-Hill 1991
72. Lehmann, H.:  
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystemen. Dissertation, TU München. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer 1997
73. Levine, J. R.; Mason, T.; Brown, D.:  
lex & yacc, 2nd Edition. USA: O'Reilly & Associates 1992
74. Löffel, Ch.  
Integration von Berechnungswerkzeugen in den rechnergestützten Konstruktionsprozeß. Dissertation, Universität Erlangen 1997
75. Lulay, W.; Reinhart, G.  
Hierarchical Simulation Models Improve Production-Accompanying-Simulation. In EuroSIM 98 - 3rd International Congress of the Federation of EUROpean SIMulation Societies, Helsinki 1998
76. Makkonen, P.  
On Multi Body Systems Simulation in Product Design. Dissertation, Stockholm: KTH 1999

77. Marca, D. A.:  
SADT – Structured Analysis and Design Technique. New York [u. a.]: McGraw-Hill 1993
78. Meitinger, Th.; Pfeiffer, F.:  
Dynamic Simulation of Assembly Processes. In: Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Pittsburgh, Aug. 5-9, 1995, Vol. II, S. 298-304
79. Milberg, J.; Amann, W.; Schuster, G.:  
Simulation in der Produktionstechnik – Entwicklungen und Möglichkeiten. pa Produktionsautomatisierung 3/92
80. Nijssen, G. M.; Halpin, T. A.:  
Conceptual Schema and Relation Database Design (A Fact Oriented Approach). New York, London [u. a.]: Prentice Hall 1989
81. N.N.  
AIT DMU-MM: Digital Mock-up Modelling Methodologies for Product Conception and Downstream Processes. Brite-Euram Project BRPR-CT95-0005, Deliverable D1 Harmonised User Needs Document, 1997
82. N.N.  
ASIM-Mitteilungen aus den Fachgruppen: Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik. Heft Nr. 58, November 1997
83. N.N.  
CIMdata: Product Data Management – The Definition. Firmenpublikation, 4. Aufl., 1997
84. N.N.  
DIN 69900 Teil 1 u. 2: Netzplantechnik Begriffe und Darstellungstechnik. Berlin: Beuth 1987
85. N.N.  
DIN Fachbericht 20: Schnittstellen der rechnerintegrierten Produktion. Berlin: Beuth 1989
86. N.N.  
DIN: Geschäftsprozeßmodellierung und Workflowmanagement: Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Rahmen der entwicklungsbegleitenden Normung (EBN). Berlin: Beuth 1996
87. N.N.  
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation: CAD Anwenderbefragung 1999. <http://www.rdm.iao.fhg.de/cad/marktstudie/cadmarktstudie.html>
88. N.N.  
GiPP: Thesenpapier AK2 – Integrierte Prozeß- und Produktmodelle. In: Produktion 2000 Verbundprojekt "Geschäftsprozeßgestaltung mit integrierten Prozeß- und Produktmodellen", 1998, [http://www.siemens.de/zt\\_pp/ergebnis](http://www.siemens.de/zt_pp/ergebnis)

89. N.N.  
IAPPS - Integrated Automated Process Planning System. Brite Euram Project, Mid-Term Report, 11/1997
90. N.N.  
IDEF1X Manual - U. S. Air Force Integrated Computer Aided Manufacturing Program. D Appleton Company, USA 1986
91. N.N.  
ISO 10303-11: Industrial Automation Systems and Integration - Product Data Representation and Exchange, Part 11: The EXPRESS Language Reference Manual. ISO 1994
92. N.N.:  
SAP: Mit dem Import und Export komplexe Systemlandschaften beherrschen. Firmenpublikation 1999
93. N.N.  
VDI Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Grundlagen, 2. Aufl. Berlin: Beuth 2000
94. N.N.  
VDI/VDE-Richtlinie 3715: Prozeßmeß- und Prüftechnik für Leiterplattenbaugruppen in SMD-Technik. Berlin: Beuth 1994
95. N.N.  
Workflow Management Coalition: The Workflow Reference Model. Document Number TC00-1003 Issue 1.1, 1998. <http://www.aiim.org/wfmc>
96. Osmer, U.:  
Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality. Dissertation, Universität Karlsruhe 1998
97. Pawlischek, H.:  
SMT-Bestückungstechniken. In: Handbuch der Leiterplattentechnik, Band 2 - Neue Verfahren, Neue Technologien. Saulgau: Eugen G. Leuze 1991
98. Prokop, G.; Pfeiffer, F.:  
Combined Planning of Robot's Position and Joint Control for Automated Assembly. In: Proc. of 32nd Annual Technical Meeting, Society of Engineering Science, 1995, Oct. 28 - Nov. 2, New Orleans, LA, 1995, pp. 453-454
99. Raasch, I.; Bella, D. F.; Müller, O.:  
Weitere Fortschritte in der Topologie und Formoptimierung unter Verwendung von MSC/NASTRAN als Analysepaket. In Tagungsband: VDI-Berechnungstagung 1998, Würzburg 25.-26.09.1998
100. Rabe, M.:  
Beginnt ein neues Zeitalter der Simulation? In: Deussen, O.; Hinz, V.; Lorenz, P. (Hrsg.): Simulation und Visualisierung 99, S. 3-18. Delft [u.a.]: SCS 1999

101. Radtke, M.:  
Konzept zur Gestaltung prozeß- und integrationsgerechter Produktmodelle. Dissertation, Universität Kaiserslautern 1995
102. Rauh, E.:  
Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe. Dissertation, Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 1998
103. Reinhart, G.; Bauer, L.; Meier, H.; Wagner, P.; Weißenberger, M.:  
Vernetzte Entwicklung komplexer mechatronischer Produkte. In: ZWF, 94 (1999) 4, S. 191 ff.
104. Reinhart, G.; Brandner, St.:  
Prozessmanagement im Engineeringbereich mit PDM-Systemen. Management & Computer, Heft 3/1996
105. Reinhart, G.; Feldmann, K.:  
Simulation - Schlüsseltechnologie der Zukunft? München: Herbert Uzt 1997
106. Reinhart, G.; Selke, C.:  
Effiziente Erstellung von Simulationsmodellen durch Integration ins informationstechnisch Umfeld. In: Feldmann, K.; Reinhart, G. (Hrsg.): Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion, S. 253-277. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer 1999
107. Röhrs, G.:  
Datenbanksysteme - Konzeptionelle Datenmodellierung und Datenbankarchitekturen. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer 1995
108. Rothhaupt, A.:  
Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung. Dissertation, Universität Erlangen. München, Wien: Carl Hanser 1995
109. Sauer, W.; Wohlrabe, H.; Zerna, T.:  
Bestimmung der Maschinenfähigkeit und Prozeßfähigkeit während der Fertigung von Flachbaugruppen. GMM-Fachbericht zur Leiterplatte '97, S. 221-231. Berlin: VDE-Verlag 1997
110. Sauter, J.:  
Integrierte Topologie- und Gestaltoptimierung in der virtuellen Produktentstehung. In Tagungsband: Deutsche MSC Anwenderkonferenz, Weimar 21.-22.06.1999
111. Schäfer, W.:  
Steuerungstechnische Korrektur thermoelastischer Verformungen an Werkzeugmaschinen. Dissertation, TU Aachen. Aachen: Shaker 1994
112. Schalla, A.-J.:  
Täglich geplant. In: Arbeitsvorbereitung (AV) 32 (1995) 1
113. Schlögl, W.:  
Referenzmodell maschinennaher Simulationskomponenten. In: Wenzel, S.

- (Hrsg.): Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik, S. 151-170. Delft [u.a.]: SCS 2000
114. Schraft, R. D.; Wolf, E.; Leicht, T.:  
Bestückautomaten. Heidelberg: Hüthig 1989
115. Schulz, C.:  
Ein Referenzmodell für die Entwicklung wissensbasierter Systeme zur Unterstützung der Arbeitsplanerstellung. Dissertation, Universität Kaiserslautern 1992
116. Splanemann, R.:  
Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen aus systemneutral definierten Unternehmensdaten. Dissertation, Universität Bremen 1995
117. Spur, G.:  
Fabrikbetrieb. München, Wien: Carl Hanser 1994
118. Spur, G.; Krause, F.-L.:  
Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik. München, Wien: Carl Hanser 1997
119. Spur, G; Ising, M.:  
Virtualisierung der Werkzeugmaschinenentwicklung. ZWF 94 (1999) 12
120. Stehle, T.:  
Berechnung thermischer Verformungen und Verlagerungen an Werkzeugmaschinen und Möglichkeiten zur Kompensation. Dissertation, Uni Stuttgart 1997
121. Stephan, M.:  
Fehlersensitive Produktgestaltung in integrierten Systemarchitekturen. Dissertation, TU Berlin. Potsdam: UNZE 1996
122. Sully, Ph.  
Modelling the world with objects. New York [u.a.]: Prentice Hall 1993
123. Tauber, A.:  
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponenten der Montageplanung. Dissertation, TU München. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer 1990
124. Thim, C.:  
Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation. Dissertation, Universität Erlangen. München, Wien: Carl Hanser 1992
125. Tzafestas, S.:  
Modern Manufacturing Systems: An Information Technology Perspective. In: Tzafestas, S. (Hsgb.): Advanced Manufacturing Series - Computer-Assisted Management and Control of Manufacturing Systems, S. 1-56. London: Springer 1997
126. Vossen, G.:  
Datenmodelle, Datenbanksprachen und Datenbank-Managementsysteme. Bonn: Addison-Wesley 1987

127. Weber, J.:  
Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien. Dissertation, Universität Karlsruhe 1998
128. Weck, M. (Hrsg.):  
Simulation in CIM. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer 1991
129. Weck, M.; Cramer, E.; Dammer, M.; Pühl, S.:  
Communication System to Support the Design of Products by Utilization of Fuzzy Information. In Tagungsband: 32nd CIRP International Seminar on Manufacturing Systems 1999, Leuven/Belgien 24.-26.05.1999
130. Weck, M.; Dammer, M.:  
Die virtuelle Werkzeugmaschine - Simulation als Hilfsmittel zur effizienten Produktgestaltung. In: Konstruktion, 49 (1997), S. 21 ff.
131. Weck, M.; Heckmann, A.:  
Finite-Elemente-Vernetzung auf Basis von CAD-Modellen. Konstruktion 45 (1993) 1, S. 34-40
132. Weck, M.; Hessel, Ch.; Müller-Held, B.  
The Virtual Machine Tool. In: Production Engineering VII/1, München: Carl Hanser 2000
133. Wenzel, S.; Meyer, R.:  
Kopplung der Simulation mit Methoden des Datenmanagements. In: Kuhn, A.; Reinhardt, A.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Handbuch Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik, S. 347-368. Wiesbaden: Vieweg 1993
134. Wenzel, S.:  
Verbesserung der Informationsgestaltung in der Simulationstechnik unter Nutzung autonomer Visualisierungswerkzeuge. Dissertation, Universität Rostock. Dortmund: Verlag Praxiswissen 1998
135. Wenzel, S. (Hrsg.):  
Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik. Delft [u.a.]: SCS 2000



## **Lebenslauf**

Wolfgang Schlögl

geboren am 11. September 1968 in Fürth

ledig

- |               |  |
|---------------|--|
| 09/74 - 08/78 | Grundschule in Fürth   |
| 09/78 - 08/79 | Heinrich-Schliemann-Gymnasium in Fürth   |
| 09/79 - 06/88 | Hardenberg-Gymnasium in Fürth<br>Abschluss: Abitur   |
| 07/88 - 09/89 | Grundwehrdienst in Iserlohn  |
| 10/89 - 03/95 | Studium der Fertigungstechnik<br>an der Universität Erlangen-Nürnberg<br>Abschluss: Dipl.-Ing. Univ.   |
| 04/95 - 09/00 | Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für<br>Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik<br>der Universität Erlangen-Nürnberg,<br>dort ab 06/98 Oberingenieur der Gruppe<br>"Rechnergestützte Planung" |