

Wissensbasierte Planung und Beurteilung von Montagesystemen in der Luftfahrtindustrie

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Robert Sebastian Weidner
aus Hamburg

Hamburg 2014

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg
Laboratorium Fertigungstechnik
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundes-
wehr Hamburg
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding
Institut für Produktionsmanagement und -technik
Technische Universität Hamburg-Harburg
- Tag der mündlichen Prüfung: 07. Februar 2014

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Laboratorium Fertigungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg, für die hervorragenden Randbedingungen zum wissenschaftlichen Arbeiten sowie den fachlichen Rat und die konstruktiven Hinweise, die zum Gelingen der Promotion beigetragen haben.

Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding für die nützlichen Denkanstöße und sein Interesse an meiner Arbeit sowie die Übernahme des Koreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay danke ich für den Vorsitz der Prüfungskommission.

Für die schöne gemeinsame Zeit an der Professur sowie die Diskussionen und Zusammenarbeit danke ich allen wissenschaftlichen Mitarbeitern. Hervorzuheben sind meine Zimmerkollegen Frau Nanxi Kong und Herr Dr.-Ing. Dennis Derfling sowie meine Kollegen aus der Robotik Herr Nils Clausing, Herr Kim Schwake und Herr Henry Hameister.

Besonderen Dank gilt auch meinem ehemaligen Kommilitonen Herrn Uli Krause, den Mitarbeitern des Labors, den studentischen Hilfskräften sowie unserer Sekretärin Frau Vera Frey, die meine Arbeiten stets unterstützt haben.

Ein großer und herzlicher Dank für den Rückhalt und die Unterstützung gilt auch meiner Familie.

Hamburg, im Februar 2014

Robert Weidner

Kurzzusammenfassung

Wissensbasierte Planung und Beurteilung von Montagesystemen in der Luftfahrtindustrie

Die Entwicklung von Produktionssystemen stellt eine komplexe und mit Unsicherheiten behaftete Aufgabe dar, die durch eine Vielzahl unternehmensinterner und -externer Faktoren beeinflusst wird. Diesen Planungsprozess gilt es, durch adäquate Methoden und Werkzeuge zu unterstützen.

Zur Unterstützung von Teilaktivitäten im Bereich der Planung und Beurteilung von Produktionssystemen finden sich im Stand der Technik und Forschung unterschiedliche Ansätze. Schwachstellen dieser Ansätze sind insbesondere die Entwicklung von Montagesystemen nach dem Top-down Ansatz, eine uneinheitliche Planungs- und Beurteilungsgrundlage, eine mangelnde Berücksichtigung stochastischer und dynamischer Aspekte sowie eine geringe Automatisierung routinemäßiger Schritte. Ein wesentliches Charakteristikum dieser Ansätze ist die Betrachtung von Montagesystemen im Rahmen der Grobplanung. Da zu so frühen Entwicklungsphasen oftmals keine fundierten Informationen vorliegen, ist stets eine grobe Bewertung, die in der Regel mit ausgewählten statisch berechneten Kennwerten sowie deterministischen Annahmen durchgeführt wird, möglich. Inhalt der anschließenden Feinplanung ist bei all diesen Ansätzen lediglich noch die Ausarbeitung einer favorisierten Systemlösung.

Aufbauend auf dem gegenwärtigen Handlungsbedarf wurde das PEAS-Konzept (Planning and Evaluating Assembly Systems-Konzept) zur vollständigen Planung und multikriteriellen Beurteilung von Montagesystemen entwickelt. Die Nutzung von identifizierten Befähigern erfolgt mit dem Ziel, die Planungszeiten zu verkürzen, die Planungskosten zu verringern sowie die Absicherung zu erhöhen. Das Konzept stellt keine grundlegend neue Methode zur Montagesystemplanung dar, sondern dient vielmehr als ergänzendes Hilfsmittel. Der Ansatz ist durch die Verwendung eines Wissensspeichers als Planungs- und Beurteilungsgrundlage, Erstellung von Varianten für Montagesysteme auf Basis vorentwickelter Module, Betrachtung aller auf Basis des Wissensspeichers möglicher Varianten einschließlich ihrer Beurteilung, Planungsabsicherung mittels eines integrierten stochastischen Simulationsmodells zur Be-

rücksichtigung von Unsicherheiten und anlauf- sowie serienspezifischer Effekte und durch die Automatisierung routinemäßiger Tätigkeiten gekennzeichnet.

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte PEAS-Konzept, welches aus den drei Bausteinen Wissensspeicher, Systemverarbeitung und Beurteilung besteht, ist auf luftfahrtspezifische Anforderungen ausgerichtet. Als Planungsgrundlage des neuen Ansatzes dient der Baustein „Wissensspeicher“, der die notwendigen Informationen zu den Montagemodulen, den Montageprozessen sowie zu den Bauteilen enthält. Mit Hilfe der „Systemverarbeitung“ werden für ein vorgegebenes Planungsproblem zum einen unter Anwendung eines kombinatorischen Ansatzes alle auf Basis des Wissensspeichers möglichen Varianten für Montagesysteme berechnet. Zum anderen werden mit einem stochastischen Simulationsmodell technische, ökonomische, soziale und ökologische Kennwerte unter Einbezug dynamischer Größen wie Lerneffekte berechnet. Im Baustein „Beurteilung“ werden die Ergebnisse für den Anwender aufbereitet und in Kennfeldern dargestellt. Diese Vorgehensweise erlaubt im nächsten Schritt eine detaillierte Szenario- und Einflussanalyse.

Das PEAS-Konzept ist als modulare Planungsumgebung in MATLAB implementiert. Bedienoberflächen, die sowohl für die Eingabe der Randbedingungen als auch für die Darstellung der Ergebnisse verfügbar sind, stellen die Schnittstelle zum Anwender dar.

Die Validierung des entwickelten Konzepts sowie der softwaretechnischen Umsetzung liefert erste Erkenntnisse über das Anwendungsfeld; das Werkzeug lässt sich für erste überschlägige Analysen bis hin zu detaillierten Szenario- und Einflussanalyse einsetzen. Die Leistungsfähigkeit wurde anhand von zwei exemplarischen Montageaufgaben aus dem Bereich der Strukturmontage nachgewiesen. Hierfür wurden die Ergebnisse aus Teilbereichen mit Ergebnissen aus Simulationsstudien, Laborapplikationen und dem konventionellen Planungsvorgehen verglichen.

Abstract

Knowledge-based planning and evaluation of assembly systems in aviation industry

Uncertainties as well as a variety of company internal and external factors influence the development of production systems. Adequate methods and tools are necessary for the planning processes.

Concerning the assistance of sub-activities for planning and evaluating production systems, several approaches can be found in the state of art and research. Weaknesses of these approaches are especially the development of assembly systems based on the top-down approach, a non-uniform planning and assessment basis, a lack of attention to stochastic and dynamic aspects as well as a low automation of routine steps. A characteristic of these common approaches persists in the consideration of assembly systems under a rough planning. Due to often missing established information in early development phases, a rough evaluation has to be performed. As a general rule, selected static characteristic values are calculated with deterministic assumptions. Content of the following detailed planning is the elaboration of the favored system solution.

On the basis of the identified need for action, a new concept (PEAS concept – Planning and Evaluating Assembly Systems concept) for complete planning and multi-criteria evaluating of assembly systems is developed. Identified enablers are used to reduce planning time, to diminish planning costs and to increase the planning securing. The concept does not represent a fundamentally new method for planning assembly systems, but rather serves as a complementary tool. This concept is characterized by six points: application of a knowledge storage as planning and assessment basis, creating variants for assembly systems based on pre-developed modules, considering of all possible variants based on the knowledge storage including their assessment, planning protection via employing an integrated stochastic simulation model for the consideration of uncertainties, ramp-up and series-specific effects and automating routine tasks.

The developed PEAS concept, consisting of the three blocks knowledge storage, system processing and evaluation, is aligned on aviation-specific requirements. The „knowledge storage“ contains the necessary information for the assembly modules, the assembly processes as well as for the components and is furthermore used as planning basis. The block „system processing“ calculates all possible assembly systems based on the knowledge storage by using a combinatorial approach and different technical, economical, social and environmental characteristics with a stochastic simulation model including dynamic variables such as learning effects. The simulation results are visualized in the block „evaluation“. This procedure allows a detail scenario and an impact analysis in the following steps.

The PEAS concept is implemented in MATLAB as a modular planning environment. User interfaces are available for the entry of planning conditions as well as for the presentation of the results.

The validation of the developed concept and the software technical implementation provide first insights about the field of applications. The tool can be used for first rough analyses up to detail scenario and impact analyses. The effectiveness has been demonstrated with two exemplary assembly tasks in the field of structure assembly. The benefits of sub-areas are worked out with a comparison of the results from simulation studies, laboratory applications and conventional planning approaches.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xiii
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen	xv
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Ausgangssituation	3
1.3 Zielsetzung	6
1.4 Aufbau der Arbeit	7
2 Gegenwärtige Situation in der Luftfahrtindustrie	9
2.1 Begriffsdefinitionen	9
2.2 Montagetechnische Grundlagen	27
2.3 Planungs- und Bewertungsprozesskette	30
3 Stand der Technik und Forschung	35
3.1 Planung und Bewertung von Montagesystemen	35
3.2 Methodisches Vorgehen	44
3.3 Planungsmethoden	44
3.4 Analyse- und Bewertungsmethoden	53
3.5 Methodenvergleich	57
3.6 Fazit und Handlungsbedarf	60
3.7 Ansatz und Einordnung der Arbeit	63
3.8 Abgrenzung des Betrachtungsbereichs	66
4 Entwicklung eines Konzepts zur Planung und Beurteilung von Montagesystemen	67
4.1 Zielsetzung und Anforderungen	67
4.2 Eingesetzte Methoden und Werkzeuge	74
4.3 Neuartigkeit des Konzepts	74
4.4 Grundaufbau und Definitionen	76
4.5 Methodisches Vorgehen	78
4.6 Einbindung in aktuellen Entwicklungsprozess	79

5	Entwicklung einer Bewertungsmethode und eines Bewertungsmodells	81
5.1	Anforderungen	81
5.2	Bewertungsmethode	82
5.3	Bewertungsmodell	84
5.4	Kennwertberechnung	88
6	Entwicklung eines Simulationsmodells	91
6.1	Aufbau des Modells	91
6.2	Identifikation von Eingangs- und Ausgangsparametern	94
6.3	Modell zur Berechnung von Varianten für Montagesysteme	99
6.4	Simulationsmodell zur Berechnung der Kennzahlen	103
7	Entwicklung eines Simulationsbaukastens	119
7.1	Anforderungen	119
7.2	Notation des Datenschemas und Datenmodells	124
7.3	Aufbau des Simulationsbaukastens	125
7.4	Datenverfügbarkeit	130
8	Umsetzung des Konzepts in eine softwaretechnische Umgebung	133
8.1	Rahmenbedingungen	133
8.2	Softwareeinsatz	134
8.3	Architektur und Funktionalität	134
9	Erprobung des Werkzeugs	145
9.1	Validierungsziele	145
9.2	Experimentelles Umfeld	146
9.3	Beispielhafte Montageaufgaben	146
9.4	Validierungsergebnisse	160
10	Bewertung des PEAS-Konzepts und der softwaretechnischen Umsetzung	163
10.1	Überprüfung der Zielsetzung	163
10.2	Potentiale und Risiken	164
11	Zusammenfassung und Ausblick	167
11.1	Zusammenfassung	167
11.2	Ausblick	170
	Literaturverzeichnis	171
A	Montageaufgaben	189

Abkürzungsverzeichnis

CIM	C omputer I ntegrated M anufacturing
CFK	C arbon- f aserverstärkter K unststoff
COSEM	C omputergestützte S trukturierte E ntwicklung von M ontagesystemen
GUI	G raphical U ser I nterface
IMS	I ntegrated M anufacturing S olution
KLR	K osten- und L eistungsrechnung
M	M eilenstein
MG	M aturity G ates
MRL	M anufacturing R eadiness L evel
MTBF	M ean T ime b etween F ailure, zu Deutsch: mittlerer Ausfallabstand
MTM	M ethods T ime M easurement
MTTR	M ean T ime t o R epair, zu Deutsch: mittlere Ausfalldauer
OEE	O verall E quipment E ffectiveness
PD	P rocess D esigner
PEAS	P lanning and E valuating A ssembly S ystems
PLS	P lant S imulation
PPR	P rodukt-, P rozess und R essourcen-Datenmodell
PS	P rocess S imulate
QG	Q uality G ates
SE	S imultaneous E ngineering
SOP	S tart o f P roduction
TBF	T ime b etween F ailures, zu Deutsch: produktive Laufdauer
TRL	T echnology R eadiness L evel
TTR	T ime t o R epair, zu Deutsch: Reparaturzeit

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Funktionen und Skalare

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a_i	Stk.	Anzahl der Präzedenzbeziehungen für Montageschritt i
A	Stk./Std.	Ausbringungsleistung
A_{gef}	Stk./Std.	geforderte Produktionsrate
A_{Out}	Stk.	Output
am_i	kg	Abfallmenge eines Moduls i während der Ausführung
AM	kg	Abfallmenge bei der Produktion mit einem System
aw_i	Stk.	Wiederholungen eines Montageschritts i
b_i	–	Bauteil i
b_{ij}	Pkt.	Bewertungspunkte für Kennzahl i und Lösung j
b_{ki}	–	Bauteil k für Montageschritt i
B_j	Pkt.	Bewertungspunkte für Lösung j
c	Stk.	Anzahl der Kennzahlen eines Kennzahlensystems
d_i	m	Distanz/Wegstrecke bei Handhabungsaufgabe i
D	–	Depressionswert bzw. Ablaufexponent
e	Stk.	Anzahl tatsächlicher Montageschritte
e_{jk}	–	Eignungsgrad der Kombination j, k
f_{jk}	–	Notwendigkeitsbeziehung zwischen Modul j und k
F	–	Formfaktor
g_i	–	Gewichtungsfaktor für Kennzahl i
G_{Auto}	%	Automatisierungsgrad eines Systems
$G_{Belegung}$	%	Belegungsgrad eines Systems
$G_{Leistung}$	%	Leistungsgrad eines Systems
$G_{Nutzung}$	%	Nutzungsgrad eines Systems
$G_{Qualitaet}$	%	Qualitätsgrad eines Systems
g_{Reife}^i	%	Reifegrad des Moduls i

G_{Reife}	%	Reifegrad eines Systems
G_{Ruest}	%	Rüstgrad eines Systems
$G_{Standard}$	%	Standardisierungsgrad eines Systems
$g_{Verschmutz}^i$	%	Verschmutzungsindex des Moduls i
$G_{Verschmutz}$	%	Verschmutzungsgrad eines Systems
G_{Wirk}	%	Montagewirkungsgrad eines Systems
gm_i	Pkt.	Gefahr des Moduls i
GM	Pkt.	Gefahr eines Systems
j	Stk.	Anzahl der vorgegebenen Montageschritte
k_i	–	Kennzahl i
$K_{Anschaffung}$	Euro	Anschaffungskosten
$K_{Betrieb}$	Euro	Betriebskosten
$K_{Instandhaltung}$	Euro	Instandhaltungskosten
K_{LCC}	Euro	Life Cycle Cost
ko_i	–	Komplexität des Montageschritts i
$K_{Verwertung}$	Euro	Verwertungskosten
l_i	–	Lösung des Montageschritts i
L	–	Lösung/Variante für Montagesysteme
la_i	dB(A)	Lautstärke des Moduls i
LA	dB(A)	Lautstärke eines Systems
m	Stk.	Anzahl notwendiger Module für ein Montagesystem
m_i	–	Montagemodul i
M	%	Mengenflexibilität eines Systems
M_{Gesamt}	Stk.	Gesamtanzahl verwendeter Module eines Montagesystems
$M_{Standard}$	Stk.	Anzahl der standardisierten Module eines Montagesystems
ms_i	–	Montageschritt i
$MTBF$	Min.	Mean Time between Failures
$MTTR$	Min.	Mean Time to Repair
n	Stk.	Anzahl betrachteter Szenarios (Pfade)
N	–	Multiplikator für Erstaussführung einer Operation
OEE	%	Overall Equipment Effectiveness
o_i	–	Montageprozess i
p	Stk.	Anzahl betrachteter Perioden
P_{Auto}	Stk.	Anzahl automatisierter Prozesse
$P_{Manuell}$	Stk.	Anzahl manueller Prozesse
p_0	MPa	Referenzschalldruck
p_i	MPa	Schalldruck des Moduls i

PE_{gut}	Stk.	gut produzierte Einheiten
PE_{Gesamt}	Stk.	Gesamtanzahl produzierter Einheiten
PV	–	Primärmontagevorgang
q	Stk.	Anzahl unterschiedlicher Einzelteile, Baugruppen und Produkte
r	–	Anzahl unterschiedlicher Realisierungen
R	–	Faktor für den Serienanlauf
s	–	Anzahl unterschiedlicher Prozesse im Baukasten
sa_i	g/Std.	Schadstoffausstoß des Moduls i
SA	g/Std.	Schadstoffausstoß eines Systems
SV	–	Sekundärmontagevorgang
t	Min.	Zeitgröße
t_i	mm	Toleranz des Montageschritts i
T_{Anlage}	Min.	Anlagenlaufzeit
T_{Bearb}	Min.	Bearbeitungszeit
T_{Beleg}	Min.	Belegzeit
T_{DLZ}	Min.	Durchlaufzeit eines Produktionsauftrags
$t_{Erwartung}$	Min.	Erwartungswert der Zeit
t_{Inst}^i	Min.	Installationszeit des Moduls i
T_{Inst}	Min.	Installationszeit eines Systems
T_{Kontr}	Min.	Kontrollzeit
T_{Liege}	Min.	Liegezeit
$T_{Nutzung}$	Min.	Nutzungszeit
T_{Ruest}	Min.	Rüstzeit
T_{Trans}	Min.	Transportzeit
$T_{UntZeit}$	Min.	Untersuchungszeitraum
$T_{Vorgabe}$	Min.	Vorgabezeit
t_{∞}	Min.	Bearbeitungszeit im eingeschwungenem Zustand
TBF	Min.	Time between Failures
TTR	Min.	Time to Repair
u_{jk}	–	Präzedenzbeziehung zwischen Prozess j und k
v_{jk}	–	Verträglichkeit zwischen Modul j und k bzw. Modul j und Bauteil k
V	%	Verfügbarkeit
vs_i	m/s ²	Gefährdung eines Moduls i durch dessen Schwingungen
VS	m/s ²	Gefährdung eines Systems durch dessen Schwingungen
w	Stk.	Anzahl unterschiedlicher Montagemodule im Baukasten
X	–	Anzahl endlich vieler Elemente

\bar{x}_a	–	arithmetisches Mittel
\tilde{x}_α	–	α -Quantil
\bar{x}_g	–	geometrisches Mittel
x_i	Stk.	Anzahl notwendiger Bauteile für den Montageschritt i
x_0	–	Erwartungswert
x_1	–	Minimalwert eines Intervalls
x_2	–	Maximalwert eines Intervalls
$\tilde{x}_{0,5}$	–	Median
y	Stk.	Anzahl unterschiedlicher Lösungen für Montagesysteme
z_i	–	Zusatzmodul i
Z_i	–	Realisierungsmöglichkeit des Montageschritts i
ZR	%	Zuwachsrate
Δt_{stoch}	Min.	stochastische Abweichung einer Zeitgröße

Matrizen und Vektoren

Zeichen	Einheit	Bedeutung
\vec{B}_B	–	Vektor-Array der Komponenten und Bauteile
\vec{B}_O	–	Vektor-Array der Montageprozesse
\vec{B}_M	–	Vektor-Array der Montagemodule
\mathbf{E}	–	Matrix der Eignungsgrade von Modulen für Prozesse
\vec{G}	%	Vektor der Gewichtungsfaktoren eines Kennzahlensystems
\mathbf{L}	–	Lösungsmatrix
\mathbf{L}_{ges}	–	Lösungsmatrix der Varianten
$\tilde{\mathbf{L}}_{ges}$	–	Lösungsmatrix mit Zusatzmodulen
\mathbf{L}_{Zusatz}	–	Matrix-Array mit Zusatzmodulen
\vec{M}	–	Vektor-Array der Montagereihenfolge
\mathbf{M}_B	–	Matrix-Array der benötigten Bauteile
\mathbf{M}_{ges}	–	Matrix-Array der kompletten Montagereihenfolge
\vec{M}_{ges}	–	Vektor-Array der kompletten Montagereihenfolge
\mathbf{N}	–	Matrix der Notwendigkeiten
\mathbf{P}	–	Matrix der Präzedenzbeziehungen von Prozessen
\mathbf{R}	–	überprüfte Realisierungsmatrix
$\tilde{\mathbf{R}}$	–	komplette Realisierungsmatrix
\mathbf{V}_{MM}	–	Matrix der Verträglichkeiten zwischen Modulen
\mathbf{V}_{MB}	–	Matrix der Verträglichkeiten zwischen Modulen und Bauteilen

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Problemstellung

Produzierende Unternehmen, so auch die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Unternehmen aus der Luftfahrtindustrie, sind stetig neuen Herausforderungen ausgesetzt (vgl. [Mei12, S. 181], [Sch12, S. 211]), die sich vielschichtig äußern und in den vergangenen Jahren grundlegenden Veränderungen unterlagen (vgl. [Sch11a, S. 1]), siehe **Bild 1.1** links. Zentrale Herausforderung der Produktion ist heutzutage die Globalisierung (vgl. [Hei10, S. 1]), die zu einem erhöhten Wettbewerb durch steigende Konkurrenz und Kostendruck führt (vgl. [Lan11, S. 206], [Kam12, S. 186]).

Das Unternehmensumfeld konnte in den letzten Jahrzehnten als stabil und kontinuierlich charakterisiert werden (vgl. [Sch11a, S. 1]). Heutzutage lässt sich das Umfeld als dynamisch, diskontinuierlich, turbulent, komplex und unsicher beschreiben (vgl. [Rüh10, S. 1], [Sch11a, S. 1]). Merkmale, die dazu führen, sind u.a. kürzere Produktlebenszyklen (vgl. [Kar12, S. 228], [Bra12, S. 246]) mit einhergehenden kürzeren Entwicklungszeiten (vgl. [Lan11, S. 206]) sowie häufigerem Serienanlauf und -auslauf, zunehmend turbulente und unbeständige Märkte (vgl. [Mül07, S. 2], [Kam12, S. 186]), eine steigende Individualisierung der Kundenwünsche mit folglich größerer Varianten- bzw. Typenvielfalt (vgl. [Hei10, S. 1], [Kle11a, S. 922]), geringeren Stückzahlen (vgl. [Sch11a, S. 1], [Sch12, S. 211]) und steigender Produktkomplexität (vgl. [Kam12, S. 186], [Bra12, S. 246]), vermehrter internationaler Wettbewerb (vgl. [Hei10, S. 1], [Wag12, S. 193]) sowie starke Stückzahlschwankungen in kurzer Zeit (vgl. [Bra12, S. 248], [Mei12, S. 181]). Die zahlreichen Herausforderungen erschweren präzise Prognosen für zukünftige Entwicklungen und stellen Unternehmen damit vor Probleme (vgl. [Rüh10, S. 1], [Kre11, S. 912]).

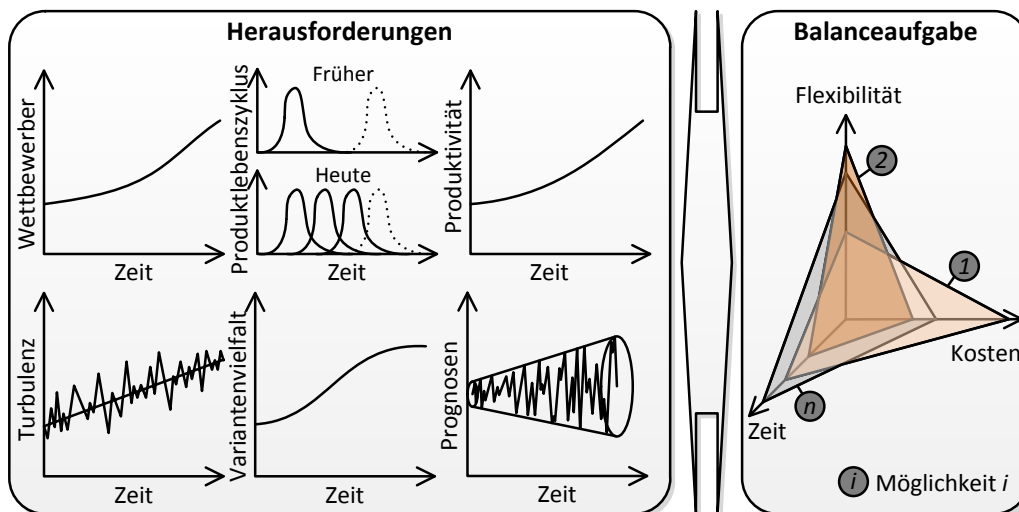


Bild 1.1: Herausforderungen produzierender Unternehmen (links) und Balanceaufgabe (rechts) (vgl. [Wei12, S. 243])

Von großer Bedeutung ist die Wettbewerbsfähigkeit der Produzenten und Lieferanten u.a. dadurch zu erhalten, dass in kurzer Zeit auf die sich verändernden Anforderungen reagiert werden kann. Dies erfordert den Einsatz von wandlungsfähigen, flexiblen, kostengünstigen und effektiven Produktionssystemen. (vgl. [Sch05, S. 48], [Kam12, S. 186])

Die aufgezeigten Faktoren gilt es bereits frühzeitig in der Entwicklungsphase von Produktionssystemen zu berücksichtigen. Die Schwierigkeit bei dessen Planung ist das Abwägen zwischen notwendiger Flexibilität, Kosten und Zeit (**Bild 1.1**, rechts).

Die zahlreichen Herausforderungen bewirken

- eine erhöhte Planungshäufigkeit (vgl. [Sch12, S. 211]),
- kürzere Planungszeiten (vgl. [Sto12, S. 217]),
- eine höhere Planungsflexibilität,
- eine steigende Planungskomplexität (vgl. [Kam12, S. 186], [Wag12, S. 193]) sowie
- steigende Planungsunsicherheiten (vgl. [Rüh10, S. 2], [Bra12, S. 246]).

Um diesen Gegebenheiten langfristig erfolgreich begegnen zu können, werden neuartige Methoden und Werkzeuge für den Planungsprozess, die als organisatorisches und softwaretechnisches Hilfsmittel einsetzbar sind, benötigt. Einerseits können sie zur Entscheidungsunterstützung herangezogen werden, andererseits können sie helfen, Planungskosten und -zeit einzusparen.

1.2 Ausgangssituation

Für die Planung von Produktionssystemen gibt es bereits eine Reihe unterschiedlicher Methoden und Werkzeuge. Unternehmen der Luftfahrtindustrie setzen vor allem standardisierte Konstruktions- und Simulationsprogramme ein. Einen immer größeren Stellenwert nehmen dabei u.a. die Materialflusssimulation und die Visualisierung von neuen Konzepten nach dem Prinzip der Digitalen Fabrik ein. Standardisierte Werkzeuge decken nicht immer den gewünschten Funktionsumfang ab. Deshalb werden häufig individuelle, speziell entwickelte Programme bzw. Berechnungstabellen verwendet, welche auf die spezifischen Anforderungen abgestimmt sind.

Die Planung neuer Produktionssysteme für die Montage von Flugzeugen bzw. Flugzeugbaugruppen stellt eine komplexe Aufgabe dar. Berücksichtigt werden müssen hierbei eine Vielzahl von Anforderungen, die durch das Produkt, die Kunden bzw. das Unternehmensumfeld, das Unternehmen und die Produktionssysteme resultieren (vgl. **Bild 1.2**). Die Anzahl und Komplexität der Einflussgrößen sowie deren Zusammenwirken beeinflussen maßgeblich den erforderlichen und gerechtfertigten Planungsaufwand.

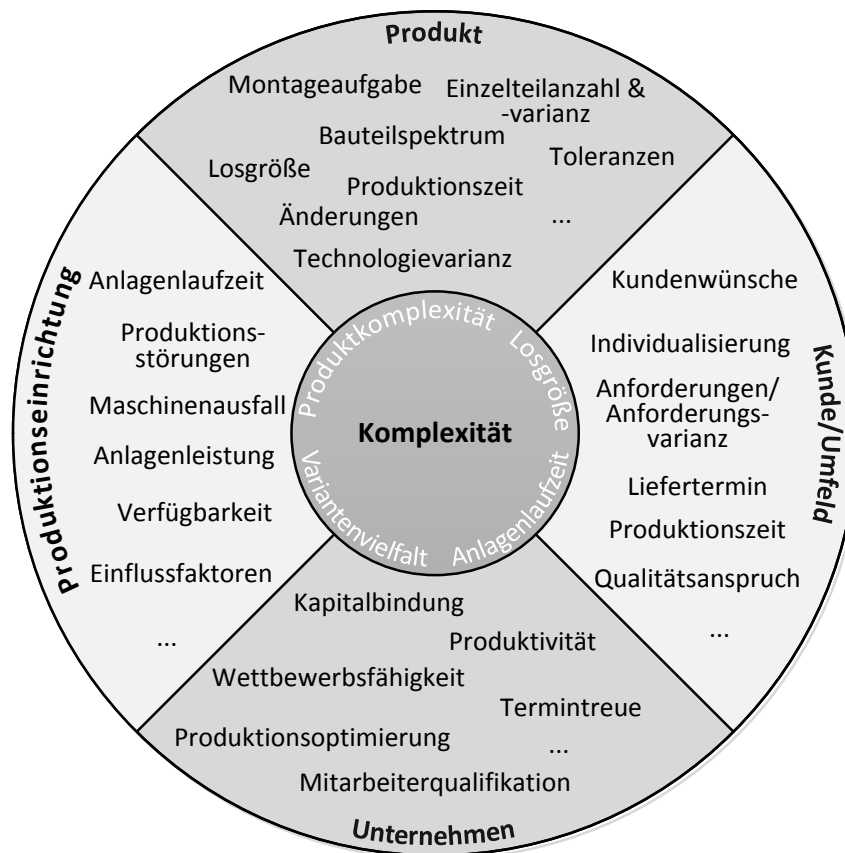


Bild 1.2: Einflussgrößen im Planungsprozess

Bei Flugzeugen handelt es sich um sehr komplexe Produkte, die durch den hohen Grad der Individualisierung gekennzeichnet sind (z.B. durch eine individuelle Innenausstattung und Triebwerke, die unmittelbare Auswirkung auf die Flugzeugstruktur besitzen können). Die Produktion erfolgt hierbei oftmals über mehrere Jahrzehnte auf ein und derselben Anlage. Folglich müssen die Anlagen hinsichtlich unterschiedlicher und konträrer Anforderungen ausgelegt sein, um eine Montage über einen langen Zeitraum für zum Teil im Planungsprozess unbekanntes Produktspektrum gewährleisten zu können.

Die Produktion von Flugzeugen unterscheidet sich wesentlich, etwa von der eines Automobils. Die Besonderheiten des Herstellungsprozesses eines Flugzeugs im Vergleich zum Automobil sind in **Bild 1.3** qualitativ anhand charakteristischer Kenngrößen dargestellt. Die Ausprägungen der Kenngrößen bei der Produktion eines Flugzeugs lassen sich deutlich abgrenzen von denen bei der Produktion eines Automobils. Bezüglich des Inhalts dieser Arbeit ist besonders hervorzuheben, dass die Produktionseinrichtungen beim Flugzeugbau über einen sehr langen Zeitraum genutzt werden.

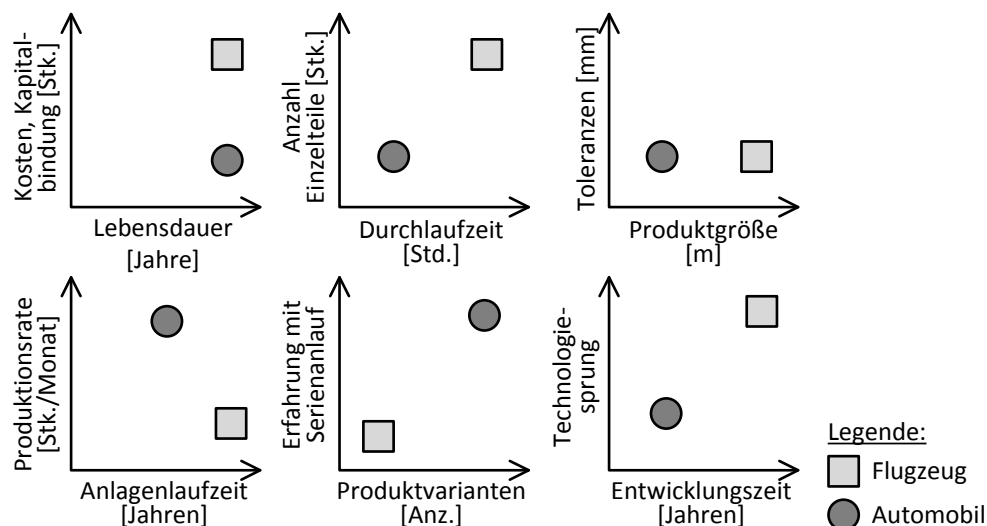


Bild 1.3: Qualitativer Vergleich der Produktion eines Flugzeugs und eines Automobils

Wie **Bild 1.3** aufzeigt, ist die Luftfahrtindustrie durch besondere Randbedingungen charakterisiert. Hierzu zählen u.a. eine hohe Kapitalbindung, eine hohe Produktkomplexität und große Technologiesprünge bei neuen Programmen. Diese einzigartigen Randbedingungen erfordern eine sorgfältige Planung sowie angepasste, aufeinander abgestimmte und effiziente Anlagen während der gesamten Produktionszeit. Zur Unterstützung des Planungsprozesses entsprechender Anlagen werden weitere Methoden bzw. Hilfsmittel benötigt, welche auf die individuellen Anforderungen abgestimmt sind.

Eine besondere Bedeutung kann in diesem Zusammenhang stochastischen und dynamischen Aspekten zukommen. **Bild 1.4** soll den Zeitbezug und die Eindeutigkeit an exogener

und endogener Daten verdeutlichen. Während statische Verfahren von einer einperiodigen Betrachtung ausgehen, ermöglichen dynamische Verfahren eine mehrperiodige Betrachtung. Dynamische Verfahren erlauben somit u.a. den Einbezug von Lerneffekten und zeitabhängigen Größen (z.B. Ausfallwahrscheinlichkeiten, Produktionsraten und Nachfragen). Auf der Seite der Daten lässt sich die Eindeutigkeit differenzieren. Im Fall von deterministischen Annahmen sind diese eindeutig vorgegeben. Insofern die Daten von zufälligen Einflüssen beeinflusst werden, sind Wahrscheinlichkeiten anzugeben.

Die Wahl des für die Planung notwendigen Zeitbezugs sowie der Datenqualität hängt von der jeweiligen Fragestellung ab. Beispielsweise würden konkrete Zeitpunkte mit deterministischen Daten für eine Untersuchung der optimalen Durchlaufzeit eines Montagesystems genügen. Dahingegen ermöglichen die Betrachtung eines Zeitraums und die Angabe von Wahrscheinlichkeiten für Daten eine Analyse unter Berücksichtigung des Zeitablaufs mit Unsicherheiten (z.B. Ausfallwahrscheinlichkeit) unter Einbezug von z.B. Lerneffekten.

		ZEITBEZUG			
		statisch		dynamisch	
		Betrachtung eines konkreten Zeitpunkts: Modell abstrahiert von der Zeit		Betrachtung eines Zeitraums: Modell beschreibt Veränderung des Systems in der Zeit	
EINDEUTIGKEIT	deterministisch	Wert - aus Theorie - aus Messung - aus Schätzung Beispiel: Untersuchung z.B. der optimalen Durchlaufzeit eines Montagesystems	Wert - aus Analyse : : :	Funktion der Zeit - aus Theorie - aus Messung - aus Schätzung Beispiel: Untersuchung von dynamischen Zusammenhängen bei Montagesystemen unter Einbezug von z.B. Lerneffekten und Nachfrage	Zeitfunktionswerte - aus Analyse : : :
	stochastisch	Verteilung - aus Theorie - aus Messung - aus Schätzung Beispiel: Planung von Investitionen zu einem Zeitpunkt unter Unsicherheiten	Wertemenge (Stichprobe) - Realisierungen aus Analyse : : :	stochastischer Prozess - aus Theorie - aus Messung - aus Schätzung Beispiel: Planung von Montageprozessen im Zeitablauf mit Unsicherheiten (z.B. schwankende Bearbeitungszeit) unter Einbezug von z.B. Lerneffekten	Werteverlaufmenge (Stichprobenmenge) - Zeitreihe von Realisierungen aus Analyse : : :
		exogene Daten	endogene Daten	exogene Daten	endogene Daten

Bild 1.4: Einordnung des Datenbedarfs und der Ergebnisse in Abhängigkeit vom Modelltyp

1.3 Zielsetzung

Aus den beschriebenen Herausforderungen für die Planung und Bewertung von Produktionssystemen leitet sich die vorliegende Arbeit ab. Dieser Prozess soll durch einen neuen Ansatz unterstützt werden. Die Ziele dieser Arbeit sind die Entwicklung eines rechnergestützten Planungs- und Bewertungskonzepts sowie einer softwaretechnischen Umsetzung. Im Fokus steht dabei die Montage von Flugzeugen mit ihren individuellen Anforderungen.

Der neue Ansatz soll den Planungsprozess dahingehend unterstützen, dass die Planungsqualität gesteigert, die Planungszeit verkürzt und die Planungskosten reduziert werden. Befähiger, wie die Modularisierung und Standardisierung von Produktionssystemen, die Methode der Kombinatorik sowie die Verwendung von Simulationsmodellen und eines Wissensspeichers sollen dies unterstützen. Die Modularisierung und Standardisierung von Produktionssystemen führen dazu, dass sich ein Baukastensystem für den Aufbau von Produktionssystemen aufstellen lässt. Der Baukasten soll im Rahmen dieser Arbeit genutzt werden, um darauf aufbauend nach dem Bottom-up-Prinzip alle auf Basis des Baukastens möglichen Varianten für Montagesysteme berechnen zu können. Zur Beurteilung der Varianten wird ein Kennzahlensystem aus wirtschaftlichen, technischen, sozialen und ökologischen Kennwerten verwendet. Dieses wird auf die spezifischen Anforderungen der Luftfahrtindustrie ausgelegt. Die Berechnung der Kennwerte wird mit Hilfe eines stochastischen Simulationsmodells unter Berücksichtigung dynamischer Effekte realisiert. Eine Generierung und Analyse unterschiedlicher Szenarien steht hierbei besonders im Fokus. Zur Auswertung werden die Simulationsergebnisse aufbereitet und als Kennfelder sowie als Diagramme dargestellt. Die Grundlage für die Kennzahlberechnung bilden die Informationen aus dem Wissensspeicher, in dem Daten zu den Modulen für Montagesysteme, zu den Prozessen sowie zu den Bauteilen abgelegt sind.

Bei der Entwicklung des Konzepts zur Planung und Bewertung von Montagesystemen sowie einer softwaretechnischen Umsetzung, die zur Demonstration der Eignung dient, werden grundlegende wissenschaftliche Erkenntnisse aus den Gebieten der rechnergestützten Planung und Bewertung von Produktionssystemen aufgegriffen. Darauf aufbauend wird der neue Ansatz entwickelt. Unter Zuhilfenahme eines Simulationswerkzeugs werden die Einsatzmöglichkeiten des neuen Verfahrens nachgewiesen und Erkenntnisse für die Umsetzung der Resultate in der Industrie bereitgestellt.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die methodische Vorgehensweise der Arbeit ist in **Bild 1.5** dargestellt. In **Kapitel 2** wird nach einer Definition der Kernbegriffe das Hauptaugenmerk auf die gegenwärtige Situation in der Luftfahrtindustrie gelegt. Dabei werden speziell die Trends, das Vorgehen, die Einflussgrößen und Randbedingungen sowie der aktuelle Planungsprozess und Technologien aufgezeigt. Auf diese Weise soll ein breites Fundament zur Entwicklung eines eigenen Konzepts gelegt werden.

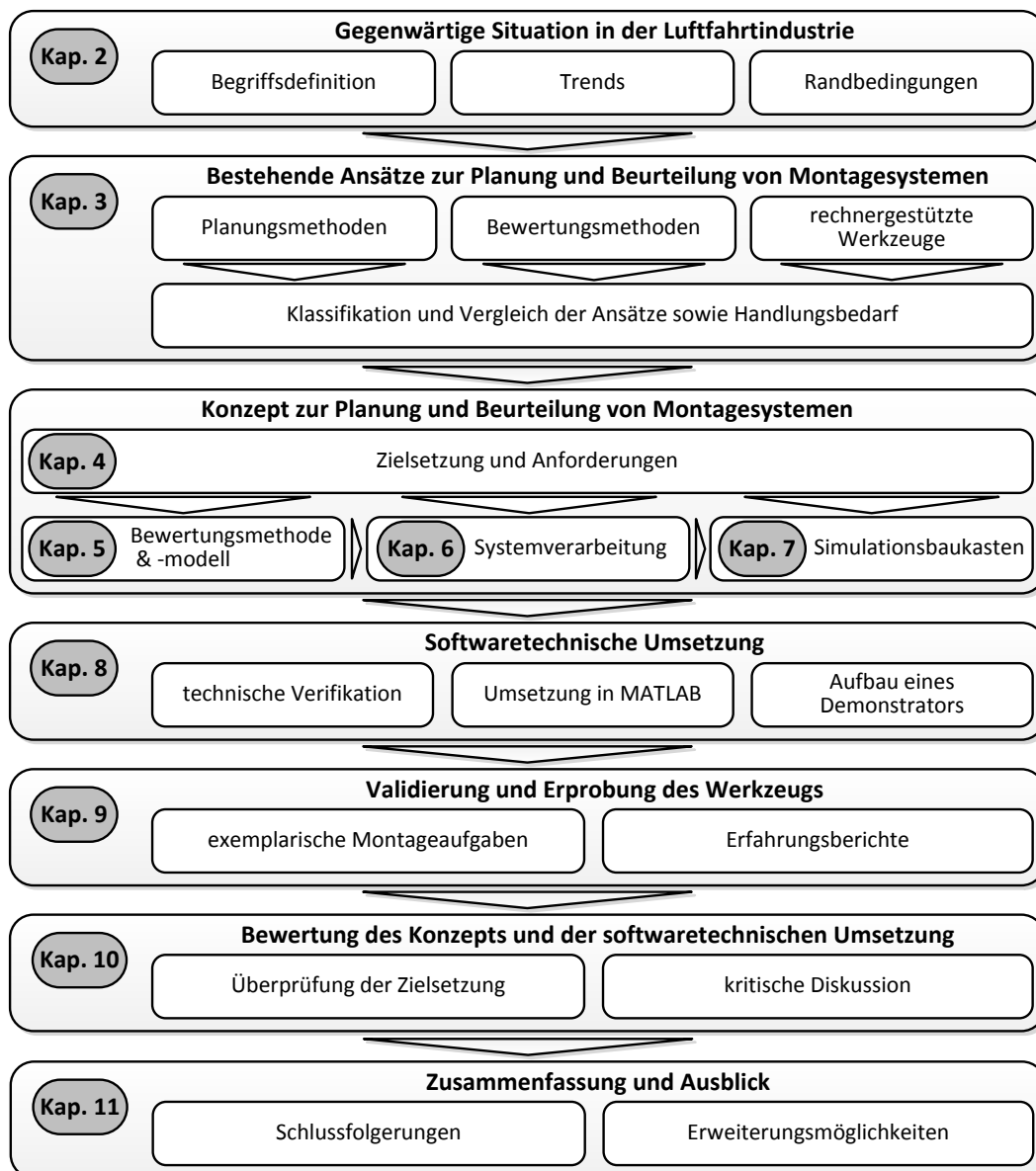


Bild 1.5: Struktur, Inhalt und Methoden der Arbeit

Im Anschluss werden in **Kapitel 3** klassische Bewertungskennzahlen, die bestehenden Planungs- und Bewertungsmethoden sowie rechnergestützte Methoden vorgestellt. Die Me-

thoden werden hinsichtlich der Herausforderungen in der Luftfahrtindustrie klassifiziert und verglichen. Schließlich wird der Handlungsbedarf für ein neues Konzept zur Planung und Beurteilung von Montagesystemen mit softwaretechnischer Umsetzung abgeleitet. Darauf aufbauend wird auf die Befähiger und Potentiale des neuen Ansatzes sowie dessen Einordnung in den aktuellen Planungszyklus eingegangen.

Kapitel 4 befasst sich mit der Vorstellung des neuen Konzepts PEAS (Planning and Evaluating Assembly Systems). Nach einer kurzen Diskussion der verfolgten Ziele werden der Grundaufbau sowie die Bausteine vorgestellt und grundlegende Begriffe definiert. Abschließend soll darauf eingegangen werden, wie für die Konzept-Entwicklung methodisch vorgegangen wird und wie das Konzept in den derzeitigen Planungs-, Entwicklungs- und Bewertungsprozess integriert werden kann.

Die **Kapitel 5 bis 7** befassen sich mit der Entwicklung der Bewertungsmethode und des Bewertungsmodells, der Simulationsmodelle für die Systemverarbeitung (Berechnung der Montagesysteme und der Kennzahlen) sowie dem dafür ausgelegten Wissensspeicher. Abschließend wird auf die Datenverfügbarkeit eingegangen.

Zur Umsetzung des in den Kapiteln 5 bis 7 hergeleiteten Konzepts wird ein softwarebasiertes Planungs- und Beurteilungswerkzeug entworfen. Die einzelnen Werkzeugbausteine werden in einem Programmsystem umgesetzt. Das Vorgehen dabei wird in **Kapitel 8** aufgezeigt und beschrieben.

In **Kapitel 9** wird auf die Erprobung des Werkzeugs eingegangen. Dafür werden beispielhafte Planungsprobleme mit Hilfe der entwickelten Software analysiert. Die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse soll Aussagen über die Leistungsfähigkeit des Verfahrens, der Vorgehensweise, der verwendeten Parameter und der implementierten Algorithmen ermöglichen.

Eine abschließende Bewertung des entwickelten Konzepts inklusive seiner softwaretechnischen Umgebung erfolgt in **Kapitel 10**. Dazu wird auch auf die damit einhergehenden Chancen und Risiken eingegangen.

Kapitel 11 liefert eine Zusammenfassung der Konzeptentwicklung und eine kritische Bewertung der erzielten Ergebnisse. Offene Punkte und Ansätze für weitere Entwicklungs- und Forschungsaktivitäten werden im Ausblick aufgezeigt.

Kapitel 2

Gegenwärtige Situation in der Luftfahrtindustrie

Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit stehen die Planung und Beurteilung von Montagesystemen. Grundvoraussetzung einer wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit dem Themengebiet ist zum einen die Schaffung und Definition eines Begriffsystems und zum anderen die Darstellung von bisher entwickelten und evtl. eingesetzten Lösungsansätzen. In den folgenden Abschnitten werden Begriffe definiert, montagetechnische Grundlagen eingeführt sowie Planungs- und Entwicklungsprozessketten aufgezeigt. Existierende Lösungsansätze aus dem Stand der Technik und Forschung werden in Kapitel 3 dargestellt.

2.1 Begriffsdefinitionen

Nachfolgend wird definiert, was im Rahmen dieser Arbeit unter Produktionsplanung, Produktionszielen, Montageplanung, Montagesystem, Produktionsanlauf sowie Rechnerunterstützung verstanden wird.

2.1.1 Produktionsplanung

Unter dem Begriff Produktion wird die Kombination von Produktionsfaktoren (z.B. Rohstoffe, Energie und Arbeitskraft) zur Herstellung von Produkten verstanden (vgl. [Sch96, S. 5-32 f.]). Inhalt einer Planung ist die Ideenfindung, die Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen sowie die Ergebnisdokumentation. Grundlage hierfür bilden Ziele, Vorgaben und Prognosen. (vgl. [Wie10, S. 15], [Dan09, S. 5], [Deu89, S. 6]) Gegenstand der Produktionsplanung ist die

Planung der herzustellenden Produkte, der dafür benötigten Produktionsfaktoren sowie der erforderlichen Produktionsprozesse (vgl. [Dom93, S. 4 & 8], [Sch06, S. 28]).

Im Rahmen dieser Arbeit umfasst die Produktion die Fertigung von Teilen und die Montage (vgl. ähnliche Definition in [War95, S. 1 ff.]). Des Weiteren wird die Produktionsplanung auf die Gestaltung von Produktionssystemen reduziert. Für die Gestaltung von Produktionssystemen existieren in der Literatur unterschiedliche, systematische Vorgehensweisen, die in Abschnitt 3.3 auszugsweise dargestellt sind.

2.1.2 Produktionsziele

Zur Erreichung von Unternehmenszielen kommt der Produktion eine besondere Bedeutung zu. Der Unternehmenserfolg kann nachhaltig nur durch eine starke Einbindung der Produktion in die Entwicklung der strategischen Gesamtziele gesichert werden. Die Produktionsziele lassen sich aufgrund der organisatorischen Zuordnung bei den Funktionsbereichszielen einordnen. (vgl. [Mos07, S. 31]) Zur Klassifizierung existieren eine Vielzahl von Ansätzen (vgl. [Blo04, S. 9 ff.], [Kie09, S. 15 ff.]):

- quantitative und nicht-quantitative Ziele,
- operationale und nicht-operationale Ziele,
- monetäre und nicht-monetäre Ziele,
- wirtschaftliche und nicht-wirtschaftliche Ziele sowie
- taktische, operative und strategische Ziele.

Zentrales monetäres Ziel vieler Unternehmen ist die Senkung der Produkt-Herstellungskosten (vgl. [Mos07, S. 31]). Durch diese Maßnahme sollen meistens Wettbewerbs- und Wachstumsziele erreicht werden (vgl. [Mos07, S. 31]), indem der Gewinn als Differenz von Erlösen und Kosten [Kis01, S. 10] gesteigert wird. Darüber hinaus können neben der Gewinnmaximierung weitere wirtschaftliche Ziele wie z.B. die Produktivitätssteigerung und die Vergrößerung des Marktanteils im Vordergrund stehen.

Solch eine Optimierung lediglich einzelner Faktoren reicht im Rahmen der Planung allerdings oftmals nicht aus. Die Herausforderung bei der Planung besteht vielmehr darin, die Produktion hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien zu optimieren. Dazu zählen derzeit vor allem die Kosten, die Zeit und die Qualität (bezeichnet als magisches Dreieck). Das Entscheidungs-dreieck kann sowohl auf die Produktion als auch auf den Planungsprozess angewendet werden. Oberstes Ziel sollte es sein, die einzelnen Zielgrößen zu verbessern. In diesem Fall bedeutet dies, die Qualität zu erhöhen und die Kosten sowie die Zeit zu senken. Unter dem Aspekt der Erzielung eines messbaren Qualitätssprungs sind neue Strategien und Methoden interessant und werden gegebenenfalls sogar technisch erforderlich. In welcher Ausprägung eine Niveauerhöhung stattfindet, hängt dabei von

mehreren Faktoren ab. So kann bspw. die Produktions- und Planungszeit verkürzt werden, indem Aufgaben bzw. Teilaufgaben ausgelagert werden. Damit einher geht jedoch in der Regel eine geringere Einflussmöglichkeit auf die Technologie, die Umsetzung sowie die Qualität.

Senkung von Kosten und Zeit

Die zunehmende Individualisierung von Produkten führt im Allgemeinen zu deren Komplexität. Als Folge dessen steigt die Komplexität des Montageprozesses sowie der Produktionssysteme. Zudem ist das Unternehmen stetigen Änderungen im Umfeld ausgesetzt, z.B. dynamischen Absatzmengen, wechselnden Kundenwünschen und schwankenden Altersstrukturen.

Erschwerend hinzu kommen in der Luftfahrtindustrie Aspekte wie große Technologiesprünge bei neuen Flugzeugprogrammen aufgrund des großen technologischen Fortschritts zwischen den Flugzeuggenerationen. Innovationssprünge können u.a. durch den Einsatz neuer Materialien und neuer Technologien entstehen. Diese Randbedingungen wirken sich unmittelbar auf die Anlagen sowie die eingesetzten Verfahren aus.

Vor dem aufgezeigten Hintergrund steigt die Komplexität bei der Planung von Montagesystemen. Dies darf nicht zu Lasten von Kosten, Zeit und Qualität gehen. Die Qualitätssteigerung sollte langfristig nicht durch erhöhte Kosten oder einen erhöhten Zeitbedarf realisiert werden. Zur Unterstützung des Planungsprozesses werden aktuell Werkzeuge und Methoden entwickelt. Das Bestreben zielt z.B. darauf ab, zusätzlichen Personalaufwand oder Ausgaben für Fremdleistungen sowie Fehlinvestitionen zu vermeiden. Aufgrund der erkennbar stetigen Steigerung der Komplexität gilt es, die Produktions- und Planungszeit zu verringern, um mit den vorhandenen Mitarbeitern und ohne Fremdvergabe zurechtzukommen.

Erhöhung von Qualität

Wie erwähnt, steht der Forderung nach sinkenden Kosten und Zeiten die gewünschte Erhöhung der Qualität der Produkte, der Produktionssysteme sowie der Planung (z.B. Absicherung) gegenüber. Nur durch Steigerung der Planungsqualität lassen sich langfristig die Anforderungen wie z.B. Qualität der Produkte und der Produktionssysteme, Kundenzufriedenheit, Wirtschaftlichkeit, Rechtsgrundlagen und Normen erfüllen.

2.1.3 Montageplanung

Der Inhalt der Montageplanung kann je nach Fragestellung variieren. Im Folgenden werden deswegen zum einen die Montageplanung in den Produktlebenszyklus eingeordnet und we-

sentliche Aufgaben der Montageplanung beschrieben. Zum anderen werden die Einflussgrößen auf die Montageplanung und deren Randbedingungen aufgezeigt.

2.1.3.1 Einordnung der Montageplanung

Die Arbeitsvorbereitung bildet das Bindeglied zwischen Konstruktion und Fertigung, siehe **Bild 2.1**. Sie gliedert sich in die Teilbereiche Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung. Alle Planungsaufgaben, die für die fertigungsgerechte Herstellung der Erzeugnisse notwendig sind, beinhaltet die Arbeitsplanung. Diese unterteilt sich in Fertigungs-, Montage- und Materialplanung, die simultan ausgeführt werden können. (vgl. [Jon00a, S. 11]) Darüber hinaus lassen sich die einzelnen Planungsaufgaben weiter in langfristige, kurzfristige und in solche, die sowohl lang- als auch kurzfristig anfallen, untergliedern (vgl. [Eve97, S. 6 f.]).

Die Arbeitssteuerung beinhaltet dahingegen die termin-, kapazitäts- und mengenbezogene Planung und Steuerung der Fertigungs- und Montageprozesse (vgl. [Eve97, S. 13 ff.]).

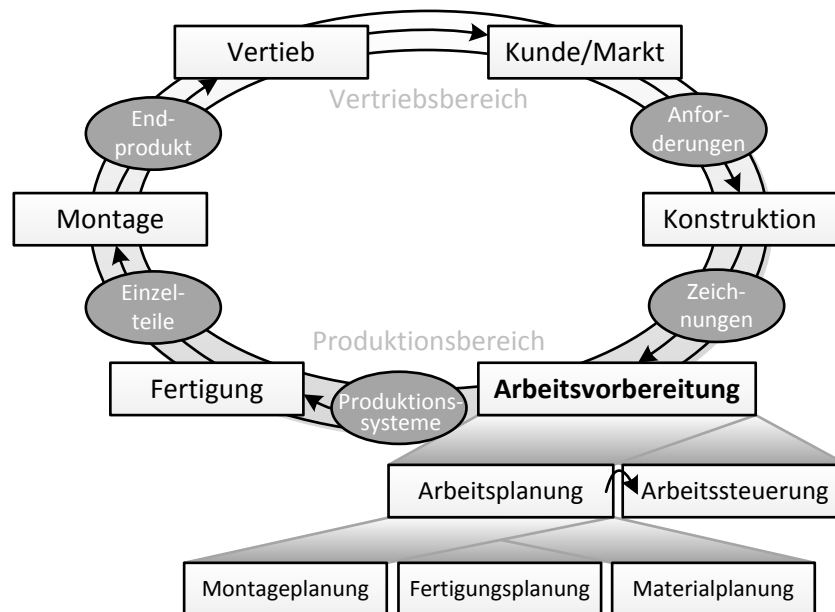


Bild 2.1: Einordnung der Montageplanung (vgl. [Eve97, S. 4], [Ste97, S. 4], [AWF68]; Darstellung in Anlehnung an [Jon00a, S. 11])

In der vorliegenden Arbeit wird bei der Montageplanung vor allem die Neuplanung von Montagesystemen betrachtet. Erkenntnisse daraus lassen sich jedoch für die Anpassungsplanung, bei der bereits bestehende Montageeinrichtungen modifiziert werden, verwenden. Bei der Neuplanung werden diese hingegen von Grund auf ohne Einschränkungen neu geplant.

2.1.3.2 Aufgaben der Montageplanung

Bei der Montageplanung handelt es sich um einen komplexen, mehrstufigen Prozess (vgl. z.B. [Jon00a, S. 12]). Hintergrund sind zahlreiche, sich unterscheidende Ein- und Ausgangsinformationen sowie eine enge Verzahnung mit anderen Bereichen des betrieblichen Umfelds wie Konstruktion, Fertigung, Personalwesen und Vertrieb.

Die Arbeitsinhalte der Montageplanung unterscheiden sich in der Literatur. Aus diesem Grund ist es notwendig, festzulegen und zu definieren, welche Planungsaufgaben in die Betrachtung bei der Entwicklung eines neuen Konzepts zur Planung und Beurteilung einbezogen werden sollen. Um ein besseres Verständnis für den Umfang der Montageplanung zu erlangen, werden einige für die Arbeit relevante Planungsaufgaben in Anlehnung an Feldmann [Fel97, S. 12 ff.] kurz vorgestellt und definiert. Betrachtet werden ausschließlich Planungsaufgaben, welche die Montageanlage betreffen.

Erfassung der Ausgangssituation

Um ein neues Montagesystem zu planen bzw. ein bestehendes zu modifizieren, gilt es im ersten Schritt, die Ausgangssituation zu erfassen. Dazu zählt die Erfassung von Daten über den Auftrag, die Projektorganisation, den Ist-Zustand der Montageanlage, das verfügbare Personal, der Kosten- und Zeitrahmen sowie die gesamten Produkteigenschaften. (vgl. [Bul86, S. 59 ff.], [Gro84, S. 37 ff., S. 50 ff.], [REF87, S. 121 ff.]

Ermittlung der Planungsziele

Aus der aufgenommenen Ausgangssituation und den Unternehmensanforderungen an die Zukunft gilt es, die Planungsziele zu definieren (vgl. [Bul86, S. 62 ff.], [Gro84, S. 44 ff., S. 53 ff.]). Dazu können bspw. geringe Herstellungskosten, geringe Durchlaufzeiten, aber auch eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Produktionsmenge gehören.

Planen von Montagefolgen

Ausgehend von der Produktstruktur muss in diesem Planungsschritt die Reihenfolge ermittelt werden, die durchzuführen ist, um aus Einzelteilen ein Produkt zu erhalten. Konventionell wird dieses in Form von Vorranggraphen dargestellt. (vgl. [Bul86, S. 94 ff.], [Par92, S. 37], [Tön91, S. 91], [Fel92, S. 21 ff.]

Entwurf eines Ablaufplans

Aufbauend auf dem im vorherigen Schritt ermittelten Vorranggraphen wird ein Ablaufplan in Form eines Graphen oder einer Liste erstellt. Dabei enthält das Ergebnis neben der Fügefolge auch alle anderen für die Montage erforderlichen Vorgänge (z.B. Speichern, Handhaben und Prüfen). (vgl. [Bul86, S. 94 ff.], [Gro84, S. 61 ff.]) Im Rahmen der Entwicklung des neuen Konzepts wird dieser Ablaufplan herangezogen.

Umsetzungskonzept für Teilbereiche

Nach dem Entwurf des Ablaufplans wird analysiert, welche Arbeitsinhalte ausgeführt werden können. Hierbei werden in der Regel mehrere Lösungsvarianten betrachtet und grob skizziert. Die so ermittelten Umsetzungen können erste Anhaltswerte für die weitere Planung geben (z.B. Kosten und Zeiten). (vgl. [Bul86, S. 277 ff.]

Kapazitätsteilung

Auf Basis der Anhaltswerte für Zeiten (Vorgabezeit) wird der Kapazitätsbedarf auf die Arbeitsplätze aufgeteilt. Zudem werden die Ergebnisse des vorherigen Schritts überprüft. Bspw. wird dabei der Grad der Automatisierung einzelner Arbeitsschritte analysiert. (vgl. [Bul86, S. 126 ff.], [Gro84, S. 62 ff.]

Entwerfen der Prinzipanordnung

Im Anschluss an die Planung der einzelnen Realisierungen lassen sich räumliche Anordnung und Verkettungen von Arbeitsplätzen und -stationen zu Teilsystemen entwerfen. Das Montagesystem besteht aus der Summe von Teilsystemen. Ausgehend von der Prinzipanordnung können erste Abschätzungen des Flächenbedarfs formuliert werden. (vgl. [Bul86, S. 166 ff.], [Gro84, S. 78 ff.]

Auswahl von Betriebsmitteln

Das wesentliche Ziel dieser Aufgabe liegt darin, die geeigneten Betriebsmittel zur Ausführung aller Arbeitsschritte zu ermitteln. Faktoren wie z.B. Produktionsmenge und Flexibilität müssen dabei zwingend berücksichtigt werden, da nicht alle Lösungen gleichermaßen geeignet sind. In diesem Zusammenhang zählen zu den Betriebsmitteln alle Anlagen, Maschinen und sonstigen Geräte, die indirekt oder direkt an der Ausführung der Montage beteiligt sind (in Anlehnung an [REF93, S. 43]). In Anlehnung an DIN 33400 beinhaltet dies bspw. Anlagen, Einrichtungen, Maschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen sowie Betriebs- und Hilfsstoffe.

Organisation des Materialflusses

Der Materialfluss kann einen großen Einfluss auf die Gestaltung von Produktionssystemen besitzen. Ziel dieses Planungsschritts ist es, eine optimale Gestaltung des Materialflusses der Einzelteile zu erreichen. Hierbei werden Aspekte wie die Organisation des Materialflusses und die Disposition von Einzelteilen und Betriebsmitteln analysiert. (vgl. [Bul86, S. 174 ff.]

Festlegen der Arbeitsinhalte

Auf der Basis der Kapazitätsteilung und der verwendeten Ressourcen werden die Montageaufgaben aus dem Arbeitsplan sowie die arbeitsplatzspezifischen Bedingungen zu Arbeitsinhalten verarbeitet. (vgl. [Bul86, S. 135 ff.], [Gro84, S. 64 f.]

Layoutplanung

Ziel dieses Planungsschritts ist die Detaillierung der Prinzipanordnung und die Anpassung an die räumlichen Gegebenheiten (vgl. [Bul86, S. 250 ff.], [Gro84, S. 67 ff.]). Heutzutage finden dafür in der Regel Simulationswerkzeuge aus dem Gebiet der Digitalen Fabrik ihre Anwendung.

Arbeitsplatz-/Arbeitsstationsgestaltung

Die ausgewählten Betriebsmittel werden entsprechend der festgelegten Arbeitsinhalte und Kapazitätsteilung zu Arbeitsplätzen bzw. Arbeitsstationen zusammengestellt. (vgl. [Bul86, S. 250 ff.], [Gro84, S. 67 ff.])

Ablaufsimulation

Eine Ablaufsimulation wird zur Analyse und Bewertung des Zeitverhaltens sowie des Ablaufs eingesetzt. Mit ihr lassen sich Betriebspunkte, Taktzeiten, Durchlaufzeiten, Maschinen- bzw. Personal-Verfügbarkeit und Pufferdimensionierung ermitteln. Diese Kenngrößen können als Orientierung bei der Optimierung des Montagesystems verwendet werden, da sie bereits frühzeitig Informationen darüber geben, ob die vorab festgelegten Ziele erreicht werden können (z.B. Ausbringungsmenge). (vgl. [Bul86, S. 199 ff.])

Vorgabezeitermittlung

Um einen Kapazitätsbedarf zu ermitteln bzw. einen Kapazitätsabgleich durchführen zu können, werden Vorgabezeiten benötigt. Zur frühzeitigen Bestimmung können unterschiedliche Methoden Verwendung finden (z.B. Schätzung durch Vergleich, Planzeitwertermittlung und Systeme vorbestimmter Zeiten wie Methods-Time Measurement). In späteren Planungsphasen lassen sich die ermittelten Vorgabezeiten für weitere Analysen einsetzen. (vgl. [Bul86, S. 107 ff.], [REF71, S. 65])

Investitionsrechnung

Investitionsrechnungen werden durchgeführt, um eine Entscheidung zwischen Alternativen zu unterstützen. Mit dieser Methode lassen sich die Rentabilität einer Investition und Einschätzung des Investitionsrisikos beurteilen und somit die Zielerreichung überprüfen. (vgl. [Bul86, S. 71 ff.], [Gro84, S. 112 ff.]) Eine erste Investitionsabschätzung kann der Investitionsrechnung vorausgehen, um bereits frühzeitig eine grobe Überprüfung durchzuführen.

Bestimmung des Arbeitssystemwerts

Um Varianten abschließend beurteilen zu können, wird der Arbeitssystemwert (Vorteilhaftigkeit eines Systems in Relation zu einem anderen System) bestimmt. Dabei werden auch nicht exakt quantifizierbare Kriterien wie bspw. Flexibilität hinsichtlich Produktänderungen einbezogen. (vgl. [Bul86, S. 193 ff.], [Gro84, S. 113 ff.])

Einholen von Angeboten für die Betriebsmittel

Für den Aufbau eines Montagesystems sind Betriebsmittel erforderlich. Inhalt dieses Planungsschritts ist deswegen die Analyse der auf dem Markt angebotenen Betriebsmittel (z.B. hinsichtlich Preis, Qualität und Lieferzeit) inklusive der Angebotseinholung. Zur Berücksichtigung nicht quantifizierbarer Kriterien können weitere Methoden wie bspw. die Nutzwertanalyse eingesetzt werden.

2.1.3.3 Einflussgrößen auf die Montageplanung

Bei der Montageplanung können unternehmensinterne und -externe Einflüsse von Bedeutung sein. Im Folgenden soll ein Überblick über Einflussgrößen gegeben werden, die bereits in frühen Planungs- und Entwicklungsphasen Berücksichtigung finden sollten. Die zunehmende Unsicherheit, Komplexität und Dynamik während des Produktlebenszyklus kann den langfristigen unternehmerischen Erfolg erschweren.

Unsicherheiten

In der Entscheidungssituation werden verschiedene Informationsarten unterschieden, siehe **Bild 2.2** (vgl. [Rüh10, S. 31]). Der Unterschied zwischen der Entscheidung unter Sicherheit und der Entscheidung unter Unsicherheit liegt darin, wie zukünftige Zustände vorausgesagt werden können. Bei Entscheidungen unter Sicherheit liegen dem Entscheider ausreichend Informationen vor, die es ihm ermöglichen, die zukünftigen Zustände (z.B. der Umwelt oder der Module) mit Sicherheit vorauszusagen (vgl. [Rüh10, S. 32]). In der Realität ist dies aber eher der seltenere Fall. Meistens können exakte Zustände nicht vorhergesagt werden. In diesem Fall handelt es sich um eine Entscheidung unter Unsicherheit.

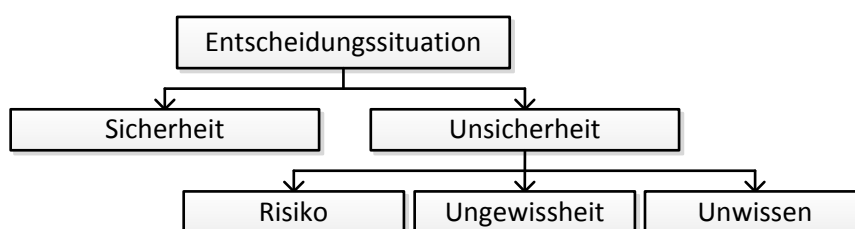


Bild 2.2: Informationsarten in der Entscheidungssituation (vgl. [Rüh10, S. 31], [Möl08, S. 28])

Unter Unsicherheit versteht die betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre das Risiko, die Ungewissheit und das Unwissen (vgl. [Möl08, S. 28]). Das Risiko bezeichnet das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Ereignisschwere für zukünftige Ereignisse, die bekannt oder abschätzbar sind (vgl. [Wöh02, S. 123], [Sal03, S. 42 f.]). Die Auswirkungen der Ereignisse können dabei sowohl negativ als auch positiv sein (vgl. [DIN03]). Bei Ungewissheiten sind die

möglichen Ausprägungen der Zukunft zwar bekannt, konkrete Wahrscheinlichkeiten liegen aber nicht vor. Wenn sich auch die Zustände nicht erschließen lassen, handelt es sich um Unwissen (vgl. [Möl08, S. 28]).

Unsicherheiten spiegeln sich am Produkt, an Montagevorgängen sowie an Montagesystemen wider. Der Entstehungsprozess von Unsicherheiten ist auszugsweise in **Bild 2.3** dargestellt. Hierbei wird ein Bezug zur jeweiligen Phase des Lebenszyklus hergestellt. Unsicherheiten entstehen bspw. aus individuellen und schwankenden Produkthanforderungen wie Funktionsumfang, Kosten und Stückzahl. Folgende Fragestellungen können dabei u.a. auftreten:

- Welche Produkthanforderungen müssen bei der Planung berücksichtigt werden?
- Welche Art von Anforderungen gibt es?
- Wie sind die Geometrie, das Gewicht sowie die Anschlussstellen und um welchen Werkstoff handelt es sich?
- Wie sind die Toleranz- bzw. Genauigkeitsanforderungen?
- Könnten noch Veränderungen im Laufe des Lebenszyklus auftreten und welche Auswirkungen haben diese?

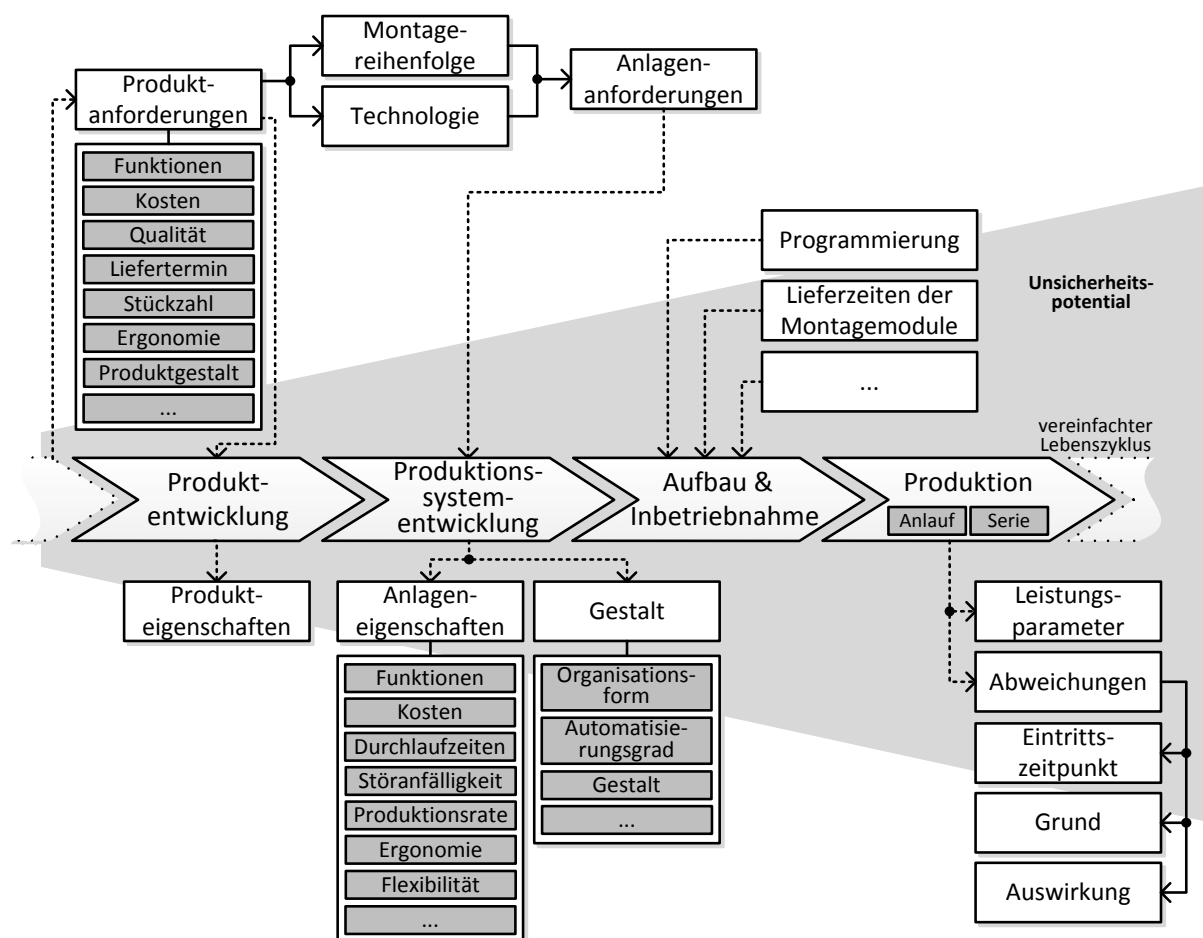


Bild 2.3: Entstehungsprozess für die Unsicherheit

Die Produkteigenschaften und -anforderungen wirken sich unmittelbar auf die Anforderungen an die Produktionsanlagen aus. Hervorzuheben sind hier zwei Aspekte: Zum einen wirken sich Produkteigenschaften auf die notwendigen Technologien, zum anderen auf die Montagereihenfolge aus. Fragestellungen, die für die Definition der Anlagenanforderung helfen könnten, sind z.B.:

- Welche Anforderungen werden an die Anlage gestellt (Systemleistung, Kosten etc.)?
- Welche Betriebsmittel sind für das Montageproblem zu bevorzugen?
- Können weitere Varianten auf der Anlage montiert werden?
- Welche Flexibilität hat die Anlage?
- Welcher Automatisierungsgrad und welche Organisationsform sind zu bevorzugen?
- Was sind geeignete Betriebsparameter?
- Wie robust bzw. fehleranfällig ist die Anlage?

Da Anlageeigenschaften sowie die Anlagegestalt die Produktion maßgeblich bestimmen, kommt der Definition der Anlagenanforderungen eine wichtige Bedeutung im Rahmen der Planung von Produktionssystemen zu.

Im Anschluss an die Anlagenentwicklung ist die Anlage aufzubauen sowie in Betrieb zu nehmen. Wie schnell dieser Schritt durchgeführt werden kann, hängt von weiteren Größen wie Lieferzeiten, Programmierung und Verfügbarkeit von Mitarbeitern ab.

Bereits in der Entwicklungsphase werden Leistungsparameter der Anlage berechnet. Ob diese berechneten Eigenschaften in der Realität tatsächlich eintreten, kann nicht vorausgesagt werden. Hier gehen unterschiedliche interne und externe Einflüsse wie z.B. Störungen und Lieferengpässe ein.

Die durch die Produkte und die Montagesysteme entstehenden Unsicherheiten übertragen sich auf den gesamten Planungsprozess, der in der Luftfahrtindustrie im Vergleich zu anderen Industrien lang ist. Konsequenzen für die Planung werden oftmals erst verzögert im Projektverlauf erkannt, sodass Anpassungen dann nur mit großem Aufwand möglich sind. Zudem gibt es für Entwicklungsaufgaben im Allgemeinen keine eindeutigen Lösungen (vgl. [Web98, S. 9]), vielmehr beinhalten sie ein Unsicherheitspotenzial (vgl. [Gru02, S. 14]).

Die aufgezeigten Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Produkt und dem Montagesystem haben inhaltliche Unsicherheiten zur Folge, denen durch iteratives Entwickeln und Analysieren von Anforderungen und Eigenschaften begegnet werden kann (vgl. [Gru02, S. 14]). Unter dem oft vorherrschenden hohen Zeitdruck sind Iterationszyklen jedoch nur begrenzt möglich (vgl. [Bie95, S. 137 ff.]). Da die Anforderungen und Randbedingungen an die Montagesysteme erst im Laufe des Entwicklungsprozesses zunehmend konkretisiert werden, wird vorerst mit unvollständigen Informationen gearbeitet, sodass weitere Unsicherheiten entstehen können (vgl. [Gru02, S. 14]).

Komplexität

Eine weitere Einflussgröße bei der Montageplanung stellt die Komplexität¹ des Umfelds², der Produkte, der Montagevorgänge und der Montagesysteme dar. Speziell im Flugzeugbau wirken darauf besondere Anforderungen, die aus den Gegebenheiten hervorgehen. Im Folgenden werden exemplarische Beispiele aus dem Luftfahrtbereich zur Verdeutlichung aufgeführt. Der Zusammenhang sowie die Treiber, die zu einer Erhöhung der Anlagenkomplexität führen, sind auszugsweise in **Bild 2.4** dargestellt. Zusätzlich ist gekennzeichnet, ob das Produkt, die Montagevorgänge oder das Montagesystem jeweils beeinflusst wird.

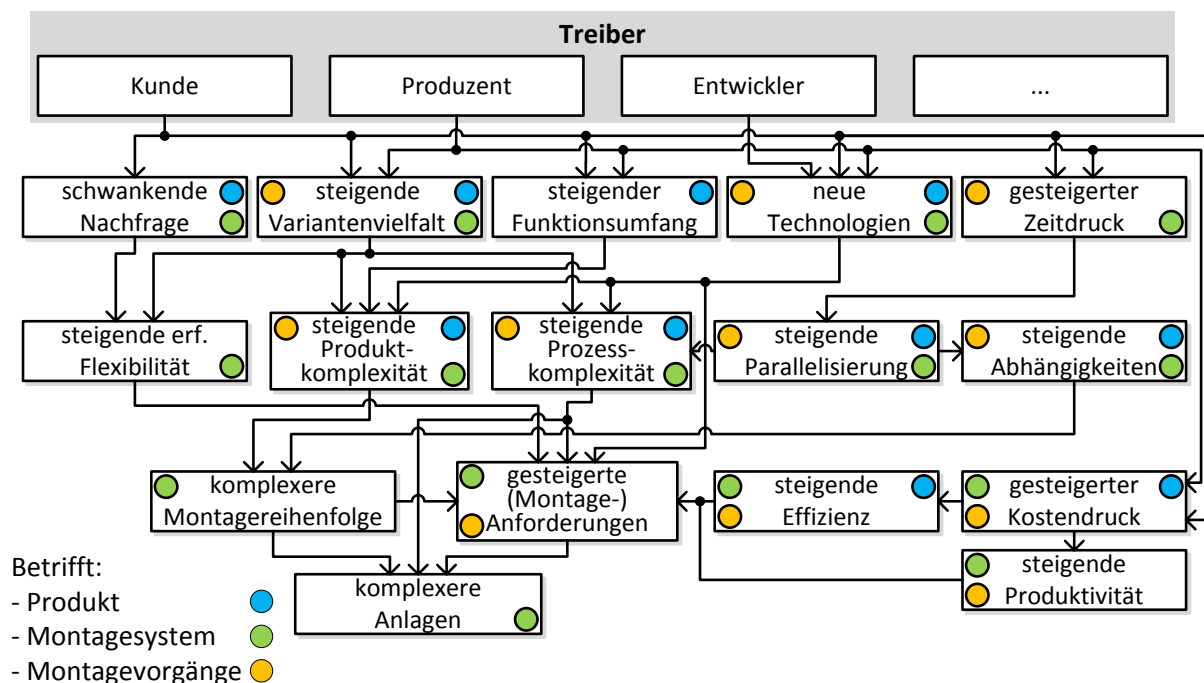


Bild 2.4: Entstehungsprozess der Komplexität

Induziert durch u.a. den Kunden, den Produzenten und die Entwickler ergeben sich z.B. schwankende Produktnachfragen mit einhergehender Individualisierung, ein steigender Funktionsumfang von Produkten, vermehrter und zum Teil sprunghafter Einsatz neuer Technologien sowie ein gesteigerter Zeit- und Kostendruck. All dies führt dazu, dass eine höhere Flexibilität erforderlich ist, die Produkt- und Prozesskomplexität steigt, eine Parallelisierung von Arbeitsschritten notwendig ist und die Effizienz sowie die Produktivität zu steigern sind. Als Folge dessen ergeben sich komplexere Montageabläufe und höhere Anforderungen an die Montage.

¹Die Komplexität beschreibt die Vielfalt, die Anzahl sowie das Zusammenwirken von Elementen in einer betrachteten Einheit.

²Unter dem Umfeld wird in diesem Zusammenhang sowohl die umliegende Produktion als auch das Unternehmensumfeld verstanden. Hinter dem Unternehmensumfeld verbergen sich bspw. die Lieferanten der Module/Systeme sowie der Bauteile und Komponenten, aber auch die Kunden.

Um die steigende Komplexität des Produkts, der Prozesse und der Montagesysteme beherrschen zu können, sind zwangsläufig immer mehr Mitarbeiter in den Entwicklungsprozess von neuen Flugzeugen sowie von Produktionssystemen eingebunden. Dies erfordert neuartige Strategien und Methoden, um zum einen eine effektive und parallele Zusammenarbeit zu ermöglichen und zum anderen die Absicherung im Planungsprozess zu verbessern.

Dynamik

Als dritte Eigenschaft beeinflusst die Dynamik³ die Planung von Produktionssystemen. Die Dynamik kann durch unternehmensexterne und -interne Ursachen hervorgerufen werden und wirkt sich auf die Produkte, die Montagevorgänge und die Montagesysteme aus. **Bild 2.5** soll auszugsweise die Zusammenhänge beschreiben.

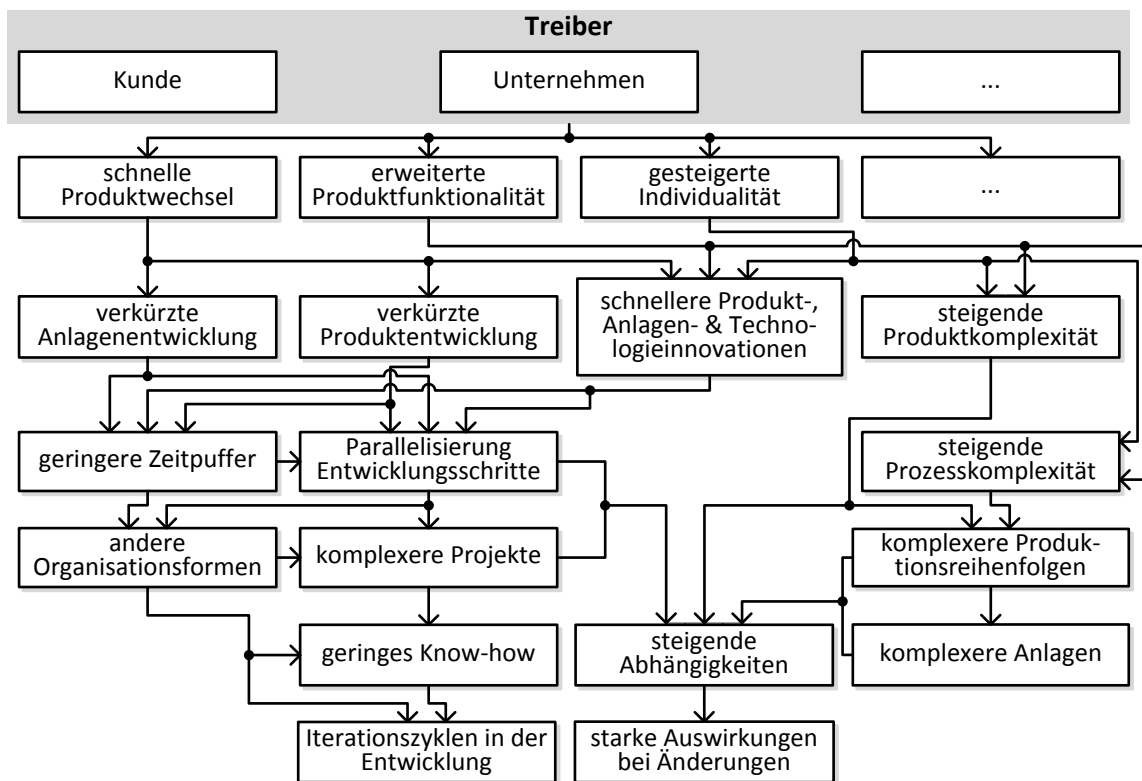


Bild 2.5: Entstehungsprozess von Dynamik in der Produktentwicklung und Montageplanung (in Anlehnung an [Gru02, S. 17], [Sar93, S. 16])

Gesteuert durch eine dynamische Produktnachfrage sind die produzierenden Unternehmen gezwungen, auf zum Teil stark schwankende Mengennachfragen zu reagieren. Erschwerend kommt die steigende Individualisierung hinzu. Darüber hinaus müssen oftmals Änderungen am Produkt – hinsichtlich geänderter Randbedingungen und Anforderungen (z.B. Funktionen) – durchgeführt werden, obwohl der Entwicklungsprozess eigentlich schon zu weit fort-

³Unter der Dynamik wird die Häufigkeit, die Stärke bzw. Varianz von Änderungen der Einflussfaktoren verstanden.

geschritten ist. Darüber hinaus ergeben sich als Folge von kürzeren Produktlebenszyklen und einem zunehmenden Wettbewerb kürzere Produktentwicklungszeiten, die wiederum den Einsatz von neuen Technologien und Strategien erfordern.

Aufbauend auf der Produktgestalt, den verwendeten Werkstoffen sowie den erforderlichen Technologien sind die Montagesysteme zu entwickeln. Das bedeutet, dass jede Produktänderung auch eine Veränderung am Montagesystem bedeuten kann. Aus diesem Grund bieten sich flexible Anlagen an, mit denen (zumindest in bestimmten Grenzen) auf Änderungen in den Planungsprämissen (z.B. Produktionsrate, Varianten etc.) reagiert werden kann.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die Marktbedürfnisse zwischen dem Entwicklungsbeginn bis zum Serienanlauf bzw. bis zum Auslaufen des Programms ändern können. Bislang kann das daraus resultierende Änderungsrisiko sowie dessen Auswirkungen oft nicht abgeschätzt werden. Neben den erwähnten unternehmensexternen Ursachen können auch unternehmensinterne Ursachen zu einer Dynamik führen. Hierzu zählen z.B. neue Organisationsformen oder Referenzprozesse, neue, bislang nicht-beherrschbare Produktkonzepte oder Technologien, unvorhersehbare Zwischenergebnisse oder unerwartete technische Probleme (vgl. [Gru02, S. 17]). Weitere Ursachen sind inhaltliche Abhängigkeiten aufgrund einer parallelen Entwicklung von Produkten und Montagetechnik (vgl. [Rog98, S. 15]), eine stetige Weiterentwicklung der Wissensbasis, Know-How- und Personal-Fluktuationen sowie unerwartete Ressourcenausfälle (vgl. [Gru02, S. 17]).

Darüber hinaus sind weitere dynamische Größen wie Lerneffekte und Standzeiten inklusive der Ausfallwahrscheinlichkeiten bei der Planung von Montagesystemen zu berücksichtigen.

Wie aufgezeigt, können die Unsicherheit, die Komplexität und die Dynamik das Produkt, die Prozesse und die Montagesysteme betreffen. Folglich gilt es, diesen Herausforderungen bei der Planung von Montagesystemen gerecht zu werden.

2.1.3.4 Randbedingungen der Montageplanung

Zur Planung und Beurteilung von Montagesystemen ist es notwendig, die Rahmenbedingungen, Einfluss- und Zielgrößen zu kennen. Ein Auszug von relevanten Größen bei der Montageplanung ist in **Bild 2.6** zusammengefasst. Wie dargestellt, gilt es bei der Montageplanung eine Vielzahl an unterschiedlichen Wissensgebieten zu berücksichtigen. Diese reichen von der Montagetechnik bis hin zum Unternehmensmanagement. Entscheidende Auswirkung besitzen die verwendeten Einzelteile und Baugruppen, das endgültige Produkt sowie die Projektziele. Insgesamt können sich zum Teil konträre Zielgrößen ergeben.

Hohe Bedeutung bei der Planung von Montagesystemen für den Einsatz in der Luftfahrtindustrie kommt der strategischen Planung, in der vorliegenden Arbeit wird darunter insbesondere

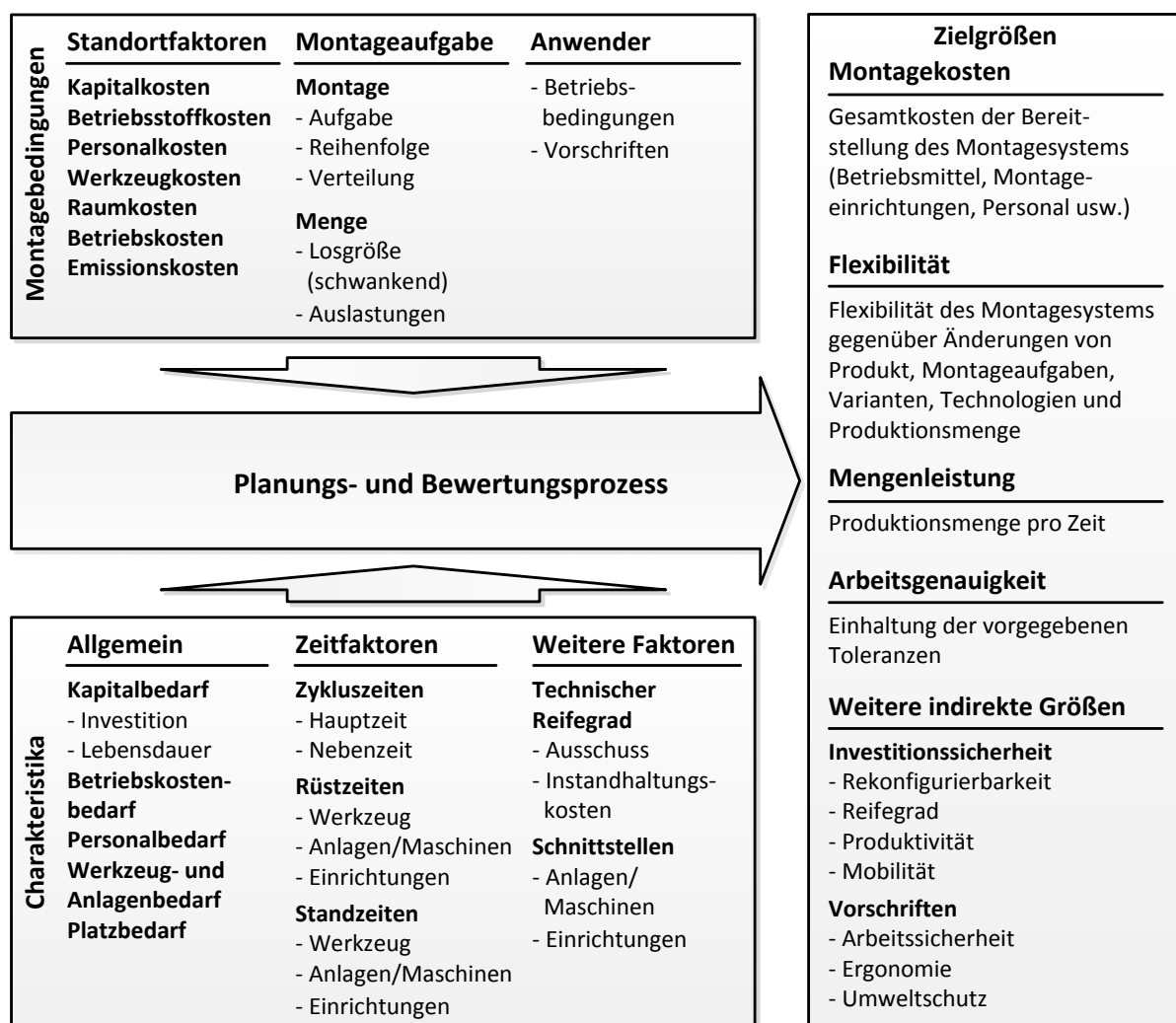


Bild 2.6: Rahmenbedingungen und Zielgrößen der Montageplanung (in Anlehnung an [Sim05, S. 74])

die Verfügbarkeit von Maschinen und Ressourcen verstanden, zu. Die Verfügbarkeit und die damit verbundenen Montagetechnologien können nicht kurzfristig beeinflusst werden. Des Weiteren sind lange Anlagenlaufzeiten und lange Planungs- und Beschaffungszeiten einzukalkulieren.

2.1.4 Montagesystem

Im Rahmen der Arbeit soll in erster Linie die Montage betrachtet werden. Nach der VDI-Richtlinie 2815 [VDI78] wird darunter der „Zusammenbau von Teilen und/oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen in der Fertigung“ bezeichnet (vgl. [VDI78], [Kon03, S. 3]). Systeme, die derartige Aufgaben ausführen, werden als Montagesysteme bezeichnet (vgl. z.B. [Sch92a, S. 10]). Das Montagesystem ist eine Einrichtung, die be-

stimmte Aufgaben bei der Durchführung von Montageprozessen erfüllt (vgl. [Spu86, S. 593]). Wesentliche Eingangs- und Ausgangsgrößen sind in **Bild 2.7** aufgezeigt. Diese Größen sind eingeteilt nach ihrer Zugehörigkeit zu den Kategorien Material, Informationen, Energie und Emission, letztere nur bei den Ausgangsgrößen.

Ein Montagesystem besteht im Kern aus einer materiellen, einer dispositiven und einer operativen Komponente. Die Materialien stellen die materiellen Komponenten dar. Die Montageplanung und Steuerung des Montageablaufs beinhaltet die dispositive Komponente, während die operative Komponente das Montagepersonal und den eigentlichen Montageprozess umfasst. (vgl. [Kra00, S. 4])

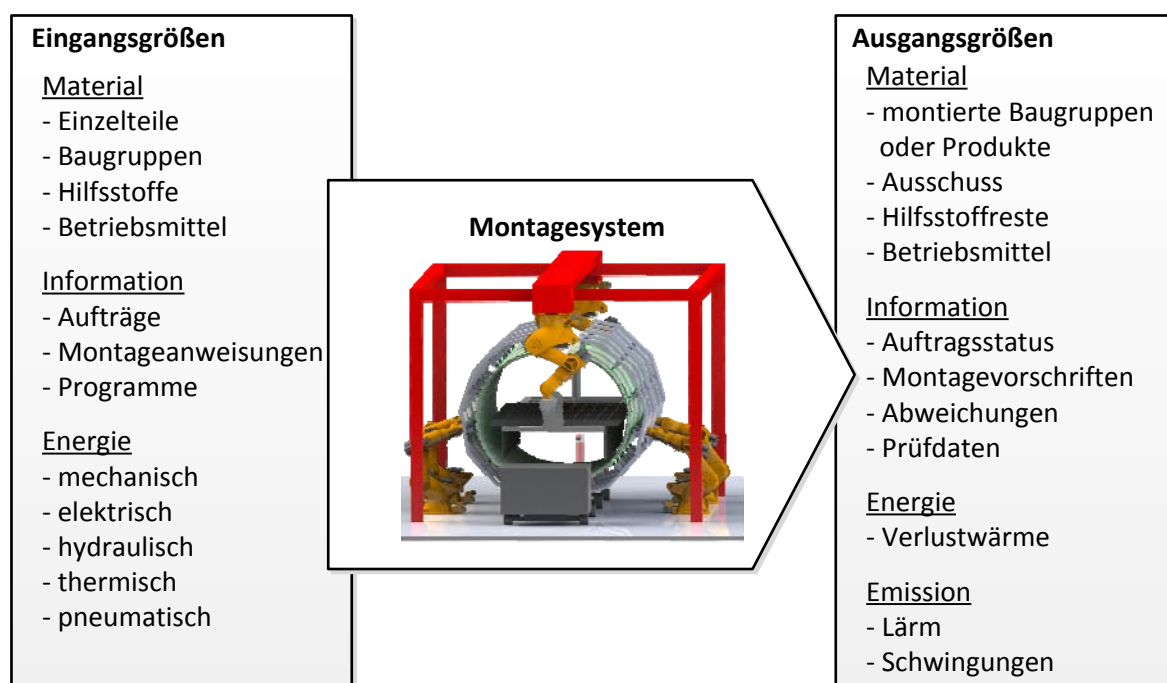


Bild 2.7: Ein- und Ausgangsgrößen eines Montagesystems (vgl. [Spu86])

Für die Definition eines Montagesystems gibt es nach Loferer [Lof02] eine aufgabenorientierte und eine geräteorientierte Herangehensweise (vgl. [Lof02, S. 15]). Bei der geräteorientierten Herangehensweise wird die Gesamtheit aller für eine Montageaufgabe notwendigen Geräte als Montagesystem bezeichnet (vgl. z.B. [BMF84, S. 46], [Hes93, S. 43]).

In dieser Arbeit wird die aufgabenorientierte Definition nach Schmidt [Sch92a] verwendet. Gemäß dieser Definition führt das Montagesystem eine definierte Montageaufgabe aus. Das Montagesystem besteht dabei aus einem oder mehreren Montagemodulen, die jeweils eine oder mehrere Funktionen einer Montageaufgabe erfüllen. Ein Montagemodul kann sich wiederum aus mehreren Montagekomponenten zusammensetzen. Jede dieser Komponenten führt einzelne Funktionen oder Elementarprozesse aus.

2.1.5 Produktionsanlauf

In der Literatur existiert keine einheitliche Definition für den Begriff Produktionsanlauf. Gemeinsam haben die Quellen, dass sie den Anlauf als Übergangsphase vom Produktentwicklungsprozess zum Serienprozess beschreiben (vgl. z.B. [Bru10, S. 11 ff.], [Wei06, S. 14]). In Anlehnung an Zeugträger werden im Rahmen der Arbeit unter Produktionsanlauf alle Tätigkeiten verstanden, die zeitlich nach dem Aufbau der Produktionsanlage beim Hersteller und bis zum Erreichen der geplanten Produktionsleistung (Kammlinie) erfolgen [Zeu98, S. 8].

Der Produktionsanlauf wird durch Neuerungsfälle hervorgerufen. Ausgelöst werden diese bspw. durch Einführung neuer Produkte und Varianten (vgl. z.B. [Bis07]), Aufbau neuer Produktionssysteme (vgl. z.B. [Voi05, S. 11]), Reorganisation von bestehenden Produktionsanlagen (vgl. z.B. [Lai03, S. 1 ff.]) oder Behebung von Störungen (vgl. z.B. [Hei10, S. 12]).

In **Bild 2.8** ist der Serienanlauf in den Produktentstehungsprozess eingeordnet. In der Serienanlaufphase werden in der Regel die Entwicklungsergebnisse aus einer Laborumgebung in die Produktion transferiert. Bei komplexen Produkten, so auch bei neuen Flugzeugprogrammen, wird dies in der Regel schrittweise vollzogen, sodass sich der Vorgang in die Pilot- und Hochlaufphase unterteilt (vgl. z.B. [Wan98, S. 4], [Fit06, S. 2]). In der Pilotphase, die in die Vor- und Nullserie untergliedert ist, werden die Fertigungs- und Montageeinrichtungen erprobt und optimiert (vgl. z.B. [Bru10, S. 15], [Wan98, S. 24]). Nach erfolgreichem Pilotprojekt wird der Produktionshochlauf, und damit die Herstellung des ersten Serienprodukts, gestartet (SOP - Start of Production). Diese Phase wird durch das Erreichen einer stabilen Produktion (Kammlinie) beendet.

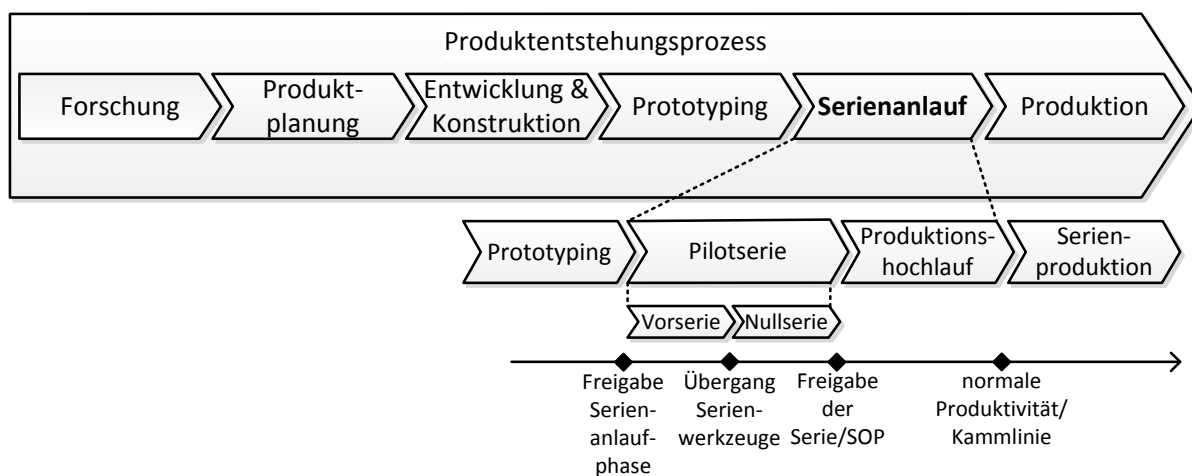


Bild 2.8: Einordnung des Serienanlaufs (vgl. [Bru10, S. 17])

2.1.6 Rechnerunterstützung

Seit mehreren Jahrzehnten gehören Simulationstechniken zu unentbehrlichen Werkzeugen in unterschiedlichen Fachbereichen und Anwendungsfeldern. Simulationen werden u.a. zur Planung, Bewertung und Überwachung von Prozessen und Systemen in der Produktion und der Logistik eingesetzt. Auf diese Weise werden Lösungskonzepte abgesichert, Rationalisierungspotential aufgedeckt sowie eine kurzfristigere Entscheidungsfindung unterstützt. (vgl. z.B. [Eym11, S. 9], [Kos95, S. 59 ff.])

Sinngemäß bedeutet der Begriff Simulation „nachbilden“ [VDI00a]. Sobald das Ausführen von bspw. Experimenten und Prozessen in der Realität aus Gründen wie Komplexität und Kostenaufwand (vgl. [Dom02]) ausscheidet, wird ein in der Regel vereinfachtes Szenario nachgebildet. Ausgelöst wird solch eine Modellbildung durch eine Fragestellung, die durch das Modell respektive den Simulationsergebnissen beantwortet werden soll.

Vorgehensweise

Um Simulationen bzw. Simulationsmodelle erfolgreich einsetzen zu können, ist eine strukturierte Vorgehensweise erforderlich. In der Literatur existieren unterschiedliche Wege, die allesamt einen ähnlichen Aufbau besitzen: Vorbereitung, Durchführung und Auswertung (vgl. z.B. [VDI00b], [Tem91], [Wit94]). Diese Einteilung lässt sich weiter untergliedern. Als Leitfaden zur Durchführung von Simulationsstudien kann das in **Bild 2.9** dargestellte Schema verwendet werden.

Oftmals wird angenommen, dass eine Simulation als Optimierungsverfahren eingesetzt werden kann. Das ist jedoch ein Trugschluss. Die Simulation bietet vielmehr die Möglichkeit, unterschiedliche Systemkonfigurationen zu analysieren. Verbesserungen eines Systems lassen sich aber nur durch iterative Modellmodifikationen erreichen (vgl. z.B. [Kos95], [Eve96]).

Klassifikation von Simulationsmodellen

Zur Klassifikation von Simulationsmodellen können unterschiedliche Merkmale herangezogen werden. Grundlegend lassen sich das Bausteinkonzept, das Listenkonzept, das Sprachkonzept, das Petri-Netz-Konzept, die bedienungstheoretischen Ansätze, die automatentheoretischen Konzepte und die Ansätze der künstlichen Intelligenz unterscheiden (vgl. [Noc91, S. 6 ff.]). Darüber hinaus ist auch eine Klassifizierung hinsichtlich des Anwendungsbereichs, der Softwareebene und der Systemimplementierungssprache möglich (vgl. [Har90]). Am häufigsten wird jedoch, wie in **Bild 2.10** dargestellt, eine Klassifizierung hinsichtlich des Zeitverhaltens und der Zeitablaufssteuerung durchgeführt.

Näher wird auf diese Ansätze nicht eingegangen. Detaillierte Beschreibungen lassen sich z.B. in [Pag91], [Noc90], [Lie95], [Meh94] finden.

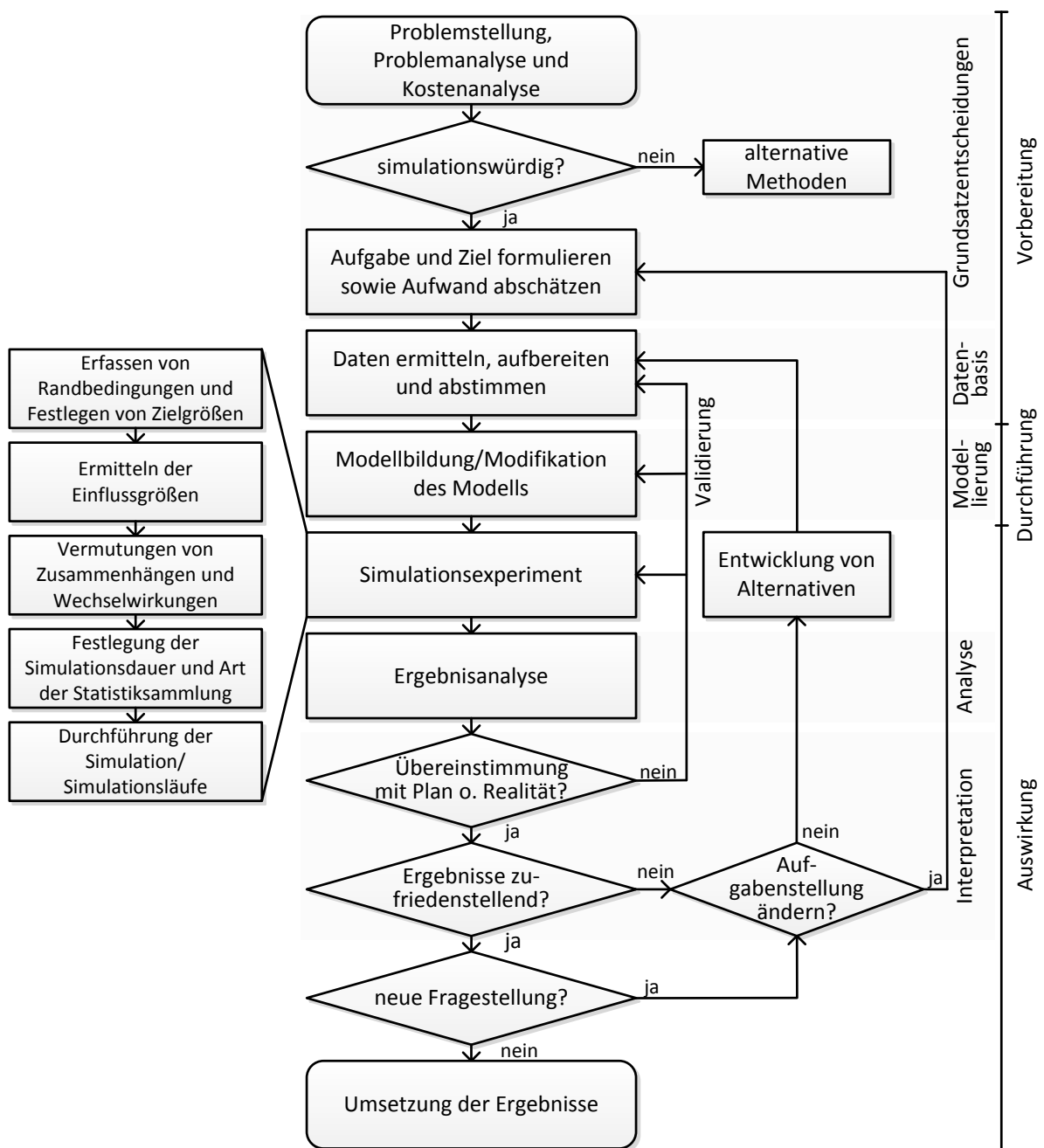


Bild 2.9: Vorgehensweise für eine Simulationsstudie (vgl. [Ohl06, S. 62], [Kos95, S. 105], [VDI00b])

Nutzen, Risiken und Grenzen einer Simulationsanwendung

Für den Einsatz von wissenschaftlichen Methoden wird vorausgesetzt, dass Nutzen, Grenzen sowie Risiken bekannt sind und berücksichtigt werden (vgl. z.B. [Pag91, S. 19 ff.]).

Wesentlicher Vorteil einer Simulation ist unter anderem ein modularer, teilweise objektorientierter Aufbau von Modellen, welche die Flexibilität bezüglich Änderungen gewährleisten (vgl. [Jen07, S. 12]). Darüber hinaus sind Simulationen flexibler und besser anwendbar als analy-

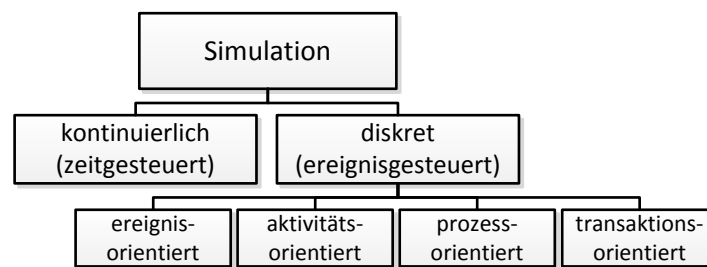


Bild 2.10: Klassifikation von Simulationsmodellen (vgl. z.B. [Mat89], [Pag91, S. 4 ff.], [Jen07, S. 10 ff.]

tische Modelle (vgl. [Kos95, S. 69]). Des Weiteren können die Funktionalität eines Systems abgebildet, überprüft und bewertet sowie eine Analyse der Auswirkung stochastischer Größen auf einzelne Systemparameter durchgeführt werden. Weitere Aspekte wie z.B. das Einschwingverhalten sowie Extremsituationen oder dynamisches Systemverhalten lassen sich mit Simulationsmodellen ebenfalls untersuchen. (vgl. [Jen07, S. 12])

Eine große Stärke der Simulation sind die geringen Kosten (sie hängen in erster Linie vom Aufwand der Modellerstellung ab) sowie die Möglichkeit der Wiederholung von Experimenten. Durch einen gezielten Einsatz der Visualisierung von Prozessen und Abläufen ist es möglich, Schwachstellen zu erkennen und das Verständnis sowie die Akzeptanz bei Entscheidungsträgern zu erhöhen. (vgl. [Jen07, S. 13])

Die Aussagekraft der Simulationsergebnisse hängt ganz wesentlich von der Qualität der Eingangsdaten und des Modells ab. Je detaillierter das Modell, desto detailliertere Ergebnisse können bei entsprechender Qualität der Eingangsdaten berechnet werden. Grundvoraussetzung für praxisrelevante Ergebnisse ist dabei ein Modell, das möglichst nahe an der Realität ist. Daher sind die Datenerfassung, die Modellbildung und die Auswertung der Simulationsergebnisse entscheidend und können zeitintensiv sein sowie Expertenwissen erfordern. Entstandene Qualitätsmängel lassen sich nur schwer erkennen und führen leicht zu Fehlentscheidungen. (vgl. [Jen07, S. 13]) Daher muss auf die Modellierung und Datenerhebung besondere Sorgfalt gelegt werden.

Abschließend sind in **Bild 2.11** die Grenzen bei der Modellbildung und Simulation zusammengefasst.

2.2 Montagetechnische Grundlagen

In der industriellen Fertigung wird unter dem Begriff Montage der planmäßige Zusammenbau von meist unterschiedlichen Einzelteilen und vormontierten Baugruppen zu einem kompletten Produkt verstanden (vgl. [Kon03, S. 3]). Dabei handelt es sich in der Regel um den letzten

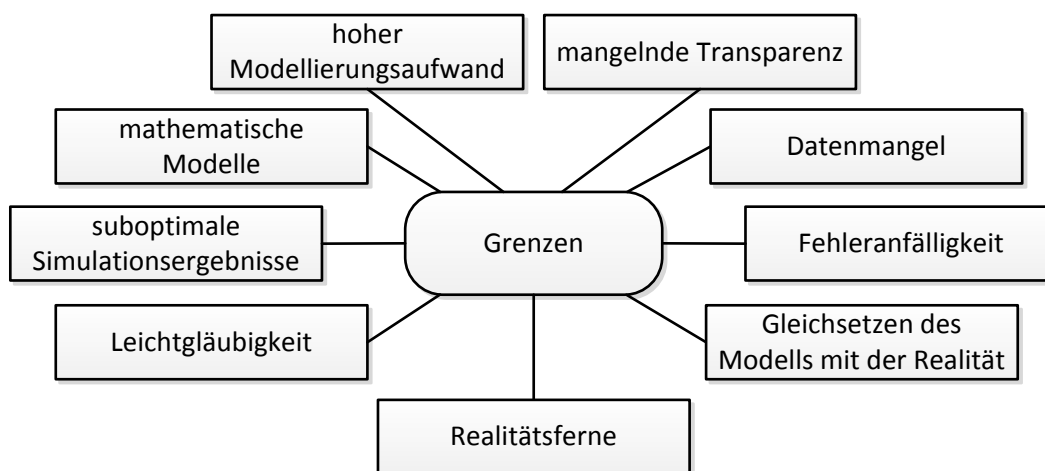


Bild 2.11: Grenzen der Simulation (vgl. z.B. [Pag91, S. 20])

Produktionsschritt. Als Folge dessen haben Produktänderungen eine Auswirkung auf die Produktionssysteme. (vgl. [Jon00a, S. 6])

2.2.1 Eingesetzte Montageprozesse

Unter Anwendung von Montagefunktionen lassen sich Produkte montieren. Diese lassen sich in primäre und sekundäre Montagefunktionen einteilen. In **Bild 2.12** sind Funktionen für Montageprozesse auszugsweise dargestellt. Ausführlicher sind diese in den entsprechenden Normen beschrieben (z.B. [DIN86], [VDI90]). An der Vielzahl der unterschiedlichen Funktionen sind die Komplexität der Aufgabenstellung, aber auch die Risiken, die bei der Planung von Montagesystemen berücksichtigt werden müssen, erkennbar.

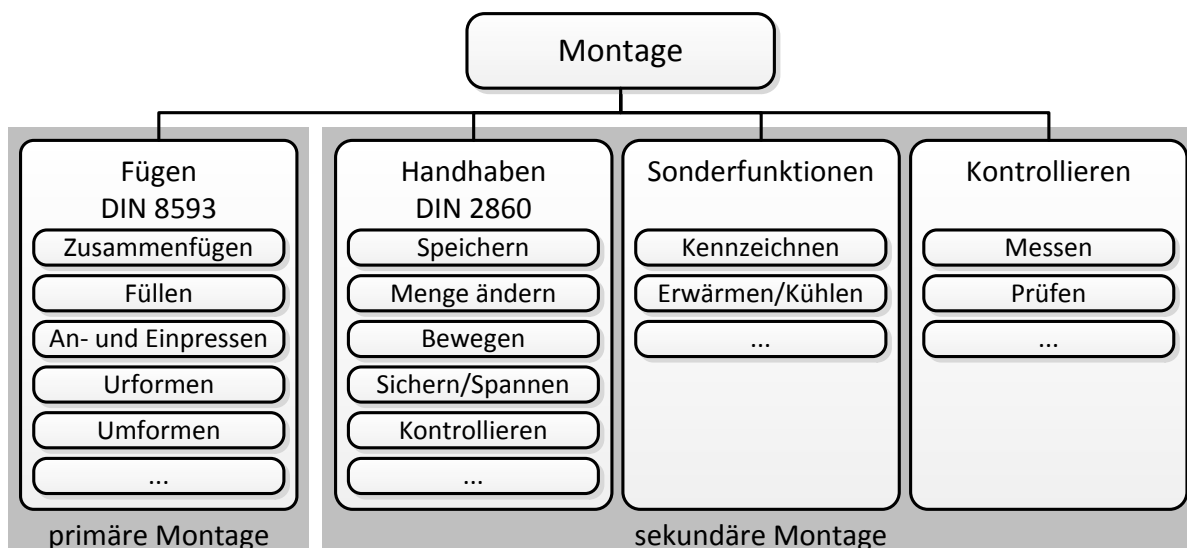


Bild 2.12: Einteilung der Montagefunktionen (vgl. z.B. [DIN86], [VDI90], [Kon03, S. 4])

In der Praxis werden diese Funktionen oftmals in Kombination verwendet, so bspw. beim Positionieren von Schalenteilen in der Strukturmontage (vgl. [Wei13, S. 28]). Beim erwähnten Anwendungsfall wird nicht nur die Position des Bauteils gemessen, sondern simultan das Bauteil bewegt und gespannt. Die parallelen Aufgaben haben eine deutliche Erhöhung der Montageaufgabenkomplexität zur Folge.

2.2.2 Eingesetzte Technologien

Die in der Luftfahrtindustrie eingesetzten Technologien unterscheiden sich zum Teil grundlegend von denen anderer Branchen. Treiber sind vor allem darin zu sehen, dass spezielle Anforderungen an das Produkt und die Montage gestellt werden. Allem voran handelt es sich um eine Art Unikatfertigung – jedes Flugzeug wird kundenspezifisch aufgebaut.

Für die hochkomplexe und zeitintensive Montage von Flugzeugen (vgl. [Wol04, S. 414]), die sich allgemein in Struktur-, Ausrüstungs- und Ausstattungsmontage einteilen lässt (vgl. [Eng09b]), werden unterschiedliche Technologien eingesetzt. Bei den bis heute eingesetzten Produktionsanlagen handelt es sich in der Regel um Spezialmaschinen (vgl. [Wol04, S. 414]), die für feste Randbedingungen und einzelne Produktvarianten entwickelt wurden und teils mehrere Jahrzehnte eingesetzt werden. Demzufolge besitzen die kostenintensiven Anlagen eine relativ geringe Flexibilität hinsichtlich Änderungen am Produkt bzw. Varianten sowie Produktionsraten. Anpassungen an andere Randbedingungen sind oft nur schwer zu realisieren.

Die Montagelinien sind mit unterschiedlichen Organisationsformen (z.B. Baustellen- und Fließprinzip) und Automatisierungsgraden (komplett manuelle bis voll automatisierte Arbeitsschritte) aufgebaut. Die ggf. Taktung aufeinander folgender Stationen kann unterschiedlich sein.

2.2.3 Trends bei Technologien, Werkstoffen und Prozessen

Neue Technologien, Werkstoffe und damit verbundene Prozesse besitzen einen entscheidenden Einfluss auf die künftige Produktion (vgl. **Bild 2.13**). Treiber dafür sind überwiegend wirtschaftliche, soziale und umwelttechnische Aspekte.

Bspw. hat der Wunsch nach umweltfreundlicheren und größeren Flugzeugen zur Verwendung neuer Werkstoffe geführt. Das führt wiederum dazu, dass neue Technologien (z.B. Fügeverfahren) eingesetzt werden müssen. Die steigende Nachfrage nach Flugzeugen verlangt eine effektivere Produktion mit einer ausgewogenen Automatisierung, die unter anderem mit der Belegschaft interagiert. Die Belegschaft wird zunehmend älter, sodass eine bessere Ergo-

nomie erforderlich wird. Zudem besitzt die zunehmende kundenspezifische Anpassung auf individuelle Wünsche einen großen Einfluss auf Montageablauf sowie Montageeinrichtungen.



Bild 2.13: Trends für zukünftige Produktionssysteme in der Luftfahrtindustrie

2.3 Planungs- und Bewertungsprozesskette

Nachdem im letzten Abschnitt die in der Luftfahrtindustrie eingesetzten Prozesse und Technologien kurz beschrieben wurden, wird im Folgenden die aktuelle Planungs- und Bewertungsprozesskette aufgezeigt.

Für den Planungs- und Bewertungsprozess werden simultan unterschiedliche Meilensteinpläne verwendet. Die bedeutendsten sind der Meilensteinplan zur Flugzeugentwicklung (vgl. [Eng09a, S. 39 ff.]), der Meilensteinplan für die „Technology Readiness Levels“ (TRL) (vgl. [Man95, S. 1 ff.], [Whe10, S. 4 ff.], [DOD11, S. 1 ff.] und der Meilensteinplan der „Manufacturing Readiness Levels“ (MRL) (vgl. [Whe10, S. 3 ff.], [OSD11, S. 1-6 ff.], [Sul10, S. 1 ff.]).

2.3.1 Flugzeugentwicklungsprozess

Der Prozess zur Entwicklung eines Fluggeräts gliedert sich nach Engelmann [Eng09a] in zwölf Schritten mit 13 Meilensteinen (M), die auch als Quality Gates (QG) oder Maturity Gates (MG) bezeichnet werden. Mit ihnen lassen sich die Reifestufen des Entwicklungsprozesses gliedern. Ausgangspunkt für die Entwicklungsprozesskette ist die in **Bild 2.14** dargestellte

Marktuntersuchung, bei der die Bedürfnisse aufgenommen und analysiert werden. Dieser Schritt bildet die Grundlage zur Entwicklung neuer Flugzeugmodelle und Derivate, für die im zweiten Schritt ein Basiskonzept entwickelt und abschließend definiert wird. Da in der Regel unterschiedliche Konzepte zur Auswahl stehen, werden diese im dritten Schritt hinsichtlich der gestellten Anforderungen bewertet. Mit dem vierten Meilenstein wird schließlich ein Konzept ausgewählt und im weiteren Entwicklungsprozess detaillierter betrachtet. Dafür wird zunächst ein Feinkonzept erstellt, welches im nächsten Schritt genauer spezifiziert und für den Vertrieb freigegeben wird. Im Anschluss an die Freigabe werden die Vermarktung sowie die Detailkonstruktion gestartet. Mit Abschluss des achten Meilensteins wird mit der Fertigung und Beschaffung begonnen. Mit Inbetriebnahme der Endlinie werden die ersten Flugzeuge montiert, die es in den weiteren Entwicklungsschritten zu testen gilt. Dazu wird zunächst ein Ground-Test angewendet, der mit dem Erstflug abgeschlossen wird. Folgend werden diverse Flugproben durchgeführt, die in der Musterzulassung enden.

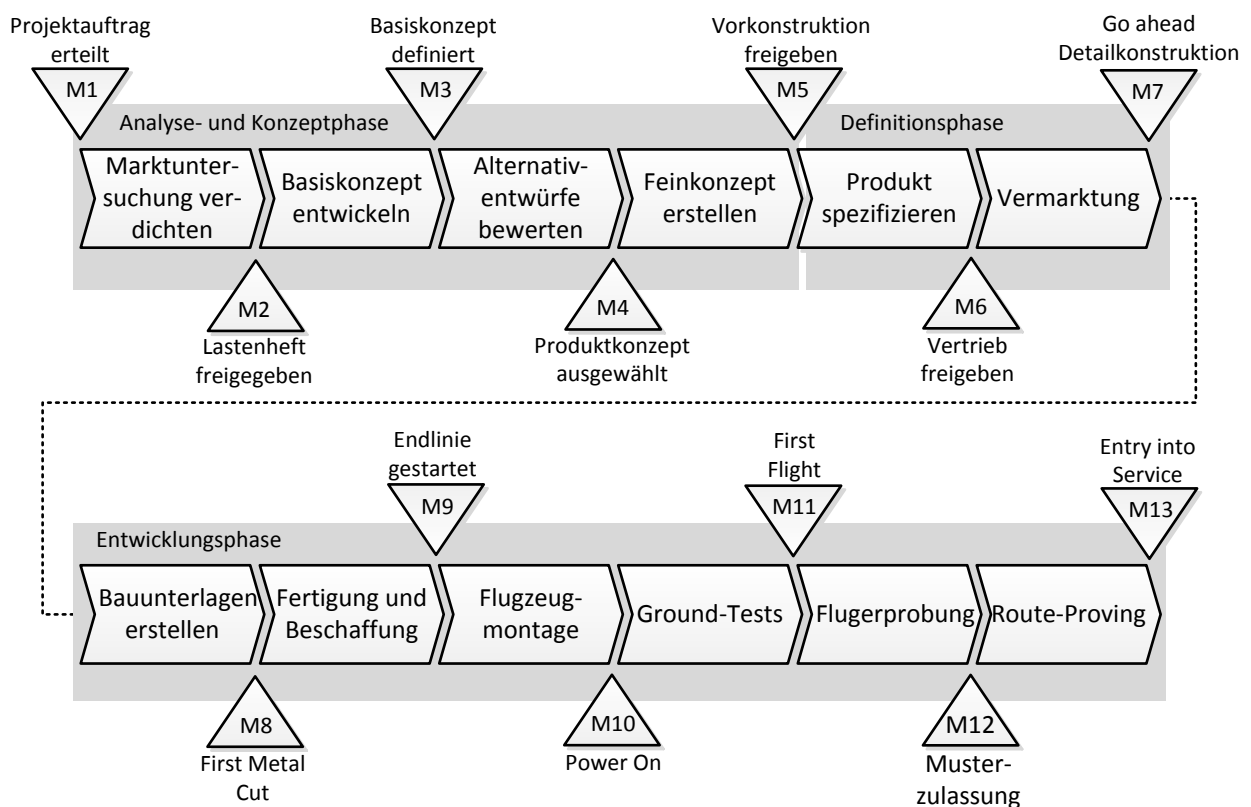


Bild 2.14: Meilensteinplan für die Flugzeugentwicklung (vgl. [Eng09a, S. 40])

2.3.2 Technology Readiness Levels

Zur strukturierten Vorgehensweise bei der Technologieentwicklung lässt sich der im Folgenden dargestellte Meilensteinplan nach dem Technology Readiness Levels (TRL, zu Deutsch

technologischer Reifegrad) verwenden (vgl. [Man95, S. 1]). Die Grundlagen des TRL wurden von dem United States Gouvernement erarbeitet, ebenso auch beim Meilensteinplan des Manufacturing Readiness Levels (MRL) (vgl. z.B. [DOD11], [Whe10], [OSD11], [Sul10]). Prinzipiell gibt es für den Meilensteinplan unterschiedliche Definitionen. Näher eingegangen wird auf die in **Bild 2.15** skizzierte Vorgehensweise mit neun Meilensteinen, die sich sechs Phasen zuordnen lassen.

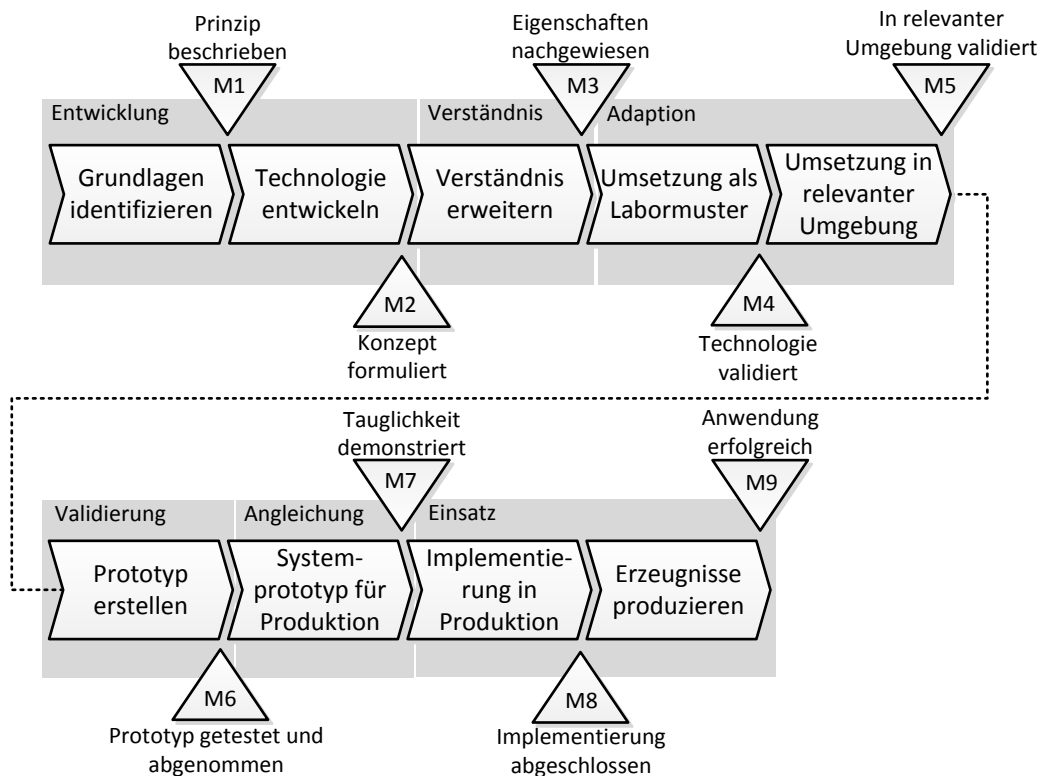


Bild 2.15: Meilensteinplan nach Technology Readiness Level (vgl. [Man95, S. 1 ff.], [DOD11, S. 2-13 f.], [Sul10, S. 20])

Im ersten Schritt werden grundlegende Prinzipien der neuen Technologie beobachtet und berichtet. Mit Abschluss des zweiten Meilensteins wird das neue Prinzip bzw. die neue Technologie formuliert. Somit ist die Phase der Entdeckung abgeschlossen. Anschließend werden für die formulierte Konzeptionierung das Verständnis durch analytische und experimentell kritische Funktions- und Eigenschaftsnachweise erweitert (sinngemäß auch „Verständnisphase“). Danach werden die gewonnenen Informationen in einzelne Komponenten des Konzepts oder einen Versuchsaufbau adaptiert. Zum Abschluss des vierten Levels findet eine Validierung statt. Im nächsten Schritt wird die Technologie bzw. das Konzept in einer relevanten Umgebung getestet und abgenommen. Mit Beendigung der Forschung und Entwicklung wird im Meilenstein Sechs die Validierungsphase abgeschlossen. Dafür wird die neue Technologie mittels eines Prototyps in einer relevanten Umgebung demonstriert, bevor die Technologie zum Einsatz in der Serienproduktion vorbereitet wird. Zum Meilenstein Sieben wird ein Pro-

totyp an die Bedingungen der Serienproduktion angepasst und die Tauglichkeit demonstriert. Im ersten Teil der Einsatzphase wird das entwickelte und umgesetzte System anhand von Tests und Demonstrationen in der Produktion an einem ersten Erzeugnis validiert. Der neunte und letzte Meilenstein wird in der Regel nach der Produktion einiger Erzeugnisse erreicht. Die Anzahl der dafür notwendigen Erzeugnisse ist produktspezifisch. Durch Meilenstein Neun gilt die neue Technologie nachweislich als serientauglich.

2.3.3 Manufacturing Readiness Levels

Der Meilensteinplan des Manufacturing Readiness Levels (MRL, zu Deutsch Fertigungsreifeegrad) unterstützt die strukturierte Vorgehensweise der Fertigungsmethoden- und Prozessentwicklung (vgl. z.B. [Whe10], [Sul10], [OSD11]). Dabei werden die Entwicklungsphasen einer neuen Methode bzw. eines neuen Prozesses spezifischen technischen Meilensteinen zugeordnet. Der Ablauf ist ähnlich dem des Technology Readiness Levels. Insgesamt umfasst der MRL-Meilensteinplan neun Schritte, die in vier teils ineinander fließende Phasen mit abschließender Bewertung unterteilt sind. Durch die Bewertung soll die Weiterentwicklung von unnötigen und unwirtschaftlichen Methoden und Prozessen verhindert werden.

In **Bild 2.16** sind die Phasen und MRL-Meilensteine dargestellt. Zu Beginn findet die Ideenphase statt, welche die ersten drei Meilensteine beinhaltet. Im ersten Schritt wird die Idee formuliert. Dabei werden in Form von Studien Ziele, Defizite und Chancen aufgenommen und analysiert. Anschließend werden unter Anwendung von Studien und Analysen von Material- und Prozessansätzen spezielle Konzepte entwickelt, um so ein Verständnis für die Herstellbarkeit und das Risiko zu erlangen. Diese Konzepte gilt es unter Verwendung von analytischen und/oder Laborexperimenten zu validieren und zu bewerten. Dabei wird über das weitere Vorgehen der erarbeiteten Idee entschieden, die in der folgenden Bewertungs- und Validierungsphase detaillierter entwickelt wird. Im Vordergrund steht die Erarbeitung von Informationen, welche die Leistungsfähigkeit von neuen Methoden bzw. Prozessen beschreibt. Diese Phase beinhaltet die nächsten zwei Meilensteine. Zunächst wird die neue Technologie mit Hilfe von Tests validiert, bevor anschließend die Leistungsfähigkeit anhand eines Versuchsaufbaus in einer tatsächlichen Umgebung demonstriert wird. Mit Abschluss des fünften Meilensteins findet eine technische Bewertung statt.

In den folgenden Meilensteinen, die der Demonstrations- und Implementierungsphase angehören, wird der Demonstrator getestet und weiterentwickelt. Primäres Ziel dabei ist der Nachweis der erforderlichen Leistungsfähigkeit für die Fertigung. Zunächst wird im sechsten Meilenstein eine umfassende Verifizierung der Leistungsfähigkeit unter Verwendung aller möglichen Prozessparameter im relevanten Umfeld durchgeführt. Anschließend wird der vollständige Prozess mit einer der Produktion entsprechenden Stückzahl getestet. Mit Ab-

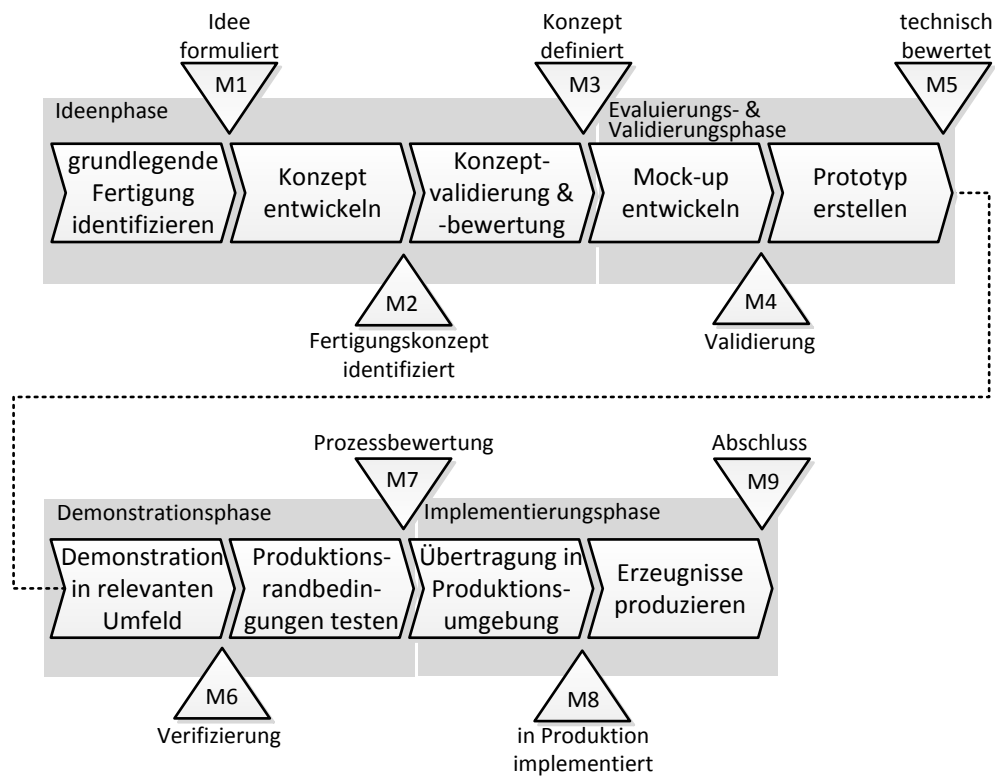


Bild 2.16: Manufacturing Readiness Level Meilenstein (vgl. [Whe10, S. 10 ff.], [OSD11, S. 2-2 ff.], [Sul10, S. 4 ff.]

schluss dieser Phase ergibt sich die Prozessbewertung. Verläuft diese positiv, beginnt die letzte Phase, die Implementierungsphase. In Schritt acht wird der neue Prozess in der realen Produktionsumgebung implementiert und parallel zur laufenden Produktion stetig verbessert, jedoch nicht weiter modifiziert. Nach Produktion einer programmspezifischen Anzahl von Erzeugnissen ist der letzte Meilenstein erreicht.

Kapitel 3

Stand der Technik und Forschung

Um den komplexen Herausforderungen in der Luftfahrtindustrie gerecht werden zu können, gilt es, geeignete Methoden einzusetzen. Im Folgenden soll ein Überblick über existierende Methoden gegeben werden, die grundsätzlich bei der Planung und Beurteilung von Montagesystemen eingesetzt werden können. Zunächst wird dafür auf Planungsgegenstand, -horizont, -aufgaben und -ziele eingegangen sowie das methodische Vorgehen definiert. Anschließend werden klassische Bewertungskriterien und existierende Methoden der Produktionsplanung aufgezeigt. Dabei werden Methoden der Planung und Bewertung getrennt voneinander betrachtet. Abschließend werden die Ansätze anhand geeigneter Kriterien klassifiziert, um eine aussagekräftige Vergleichsübersicht zu erhalten. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird der Handlungsbedarf dieser Arbeit abgeleitet.

3.1 Planung und Bewertung von Montagesystemen

Montagesysteme bestehen aus verschiedenen Komponenten wie Personal, Betriebsmitteln etc. und stellen komplexe Systeme dar. Die verschiedenen Komponenten werden häufig auch als Produktiveinheiten oder Ressourcen bezeichnet. Jede dieser Komponenten besitzt spezifische Eigenschaften, ist mit anderen Komponenten verknüpft und wird Arbeitsaufgaben zugeteilt. (vgl. [Ohl06, S. 44]) Die Gesamtheit der Komponenten führt die notwendigen Montageschritte aus und transformiert somit die Eingangskomponenten und -bauteile (Einzelteile) zu Bauteilen bzw. Produkten (Erzeugnis).

3.1.1 Planungsgegenstand und Planungsphasen

Um die existierenden Methoden im Anschluss an die Vorstellung bewerten zu können, wird zunächst der Betrachtungsgegenstand eingegrenzt. Für die hierarchische Gliederung einer Fabrik gibt es in der Literatur (leicht) unterschiedliche Einteilungen (vgl. z.B. [Möl08, S. 10], [Zen06, S. 37], [Wes05, S. 56], [Wie02, S. 123]). Somit werden Montagesysteme unterschiedlich weit gefasst. **Bild 3.1** stellt die im Rahmen dieser Arbeit verwendete hierarchische Abgrenzung der verschiedenen Systemgrenzen dar. Betrachtet werden sollen Montagesysteme; ganze Fabriken und Netzwerke können jedoch auch betrachtet werden, indem die Ergebnisse einzelner Montagesysteme zusammengeführt werden.

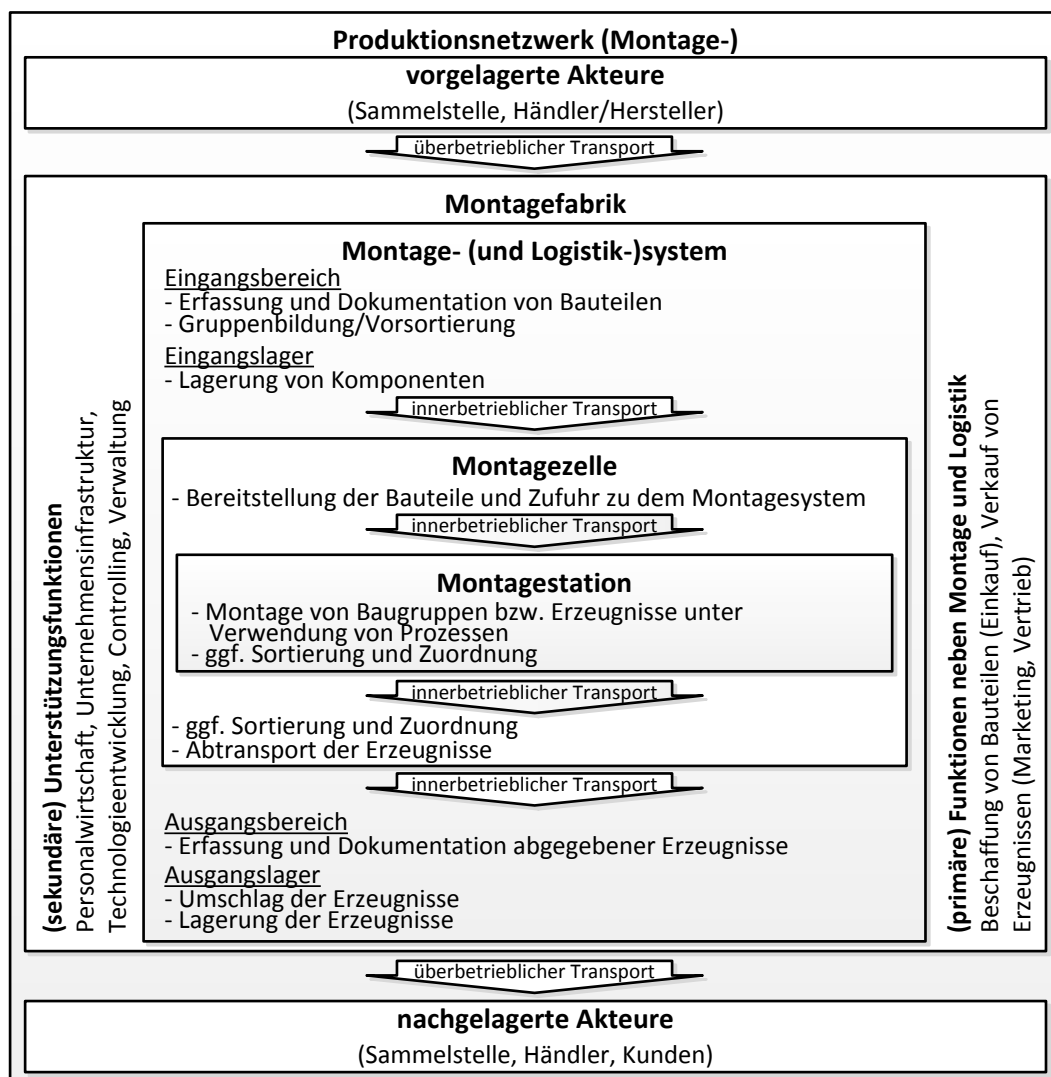


Bild 3.1: Hierarchische Abgrenzung des Betrachtungsbereichs (in Anlehnung an [Ohl06, S. 45]), vgl. [Wes05, S. 56], [Zen06, S. 37], [Möl08, S. 10])

Die Planung findet in unterschiedlichen Phasen statt. Je nach Literatur unterscheiden sich Abfolge, Iteration und Inhalte der Schritte geringfügig (vgl. Methoden in Abschnitt 3.3; sowie z.B. [Ohl06, S. 54 ff.], [Kra00, S. 13 ff.], [Rei10, S. 14 ff.]). Die Vorgehensweise ist im Allgemeinen:

- Problemanalyse,
- Problemformulierung,
- Ausarbeitung und Konzeption sowie
- Systemeinführung und -betrieb.

Einen wichtigen Teilaspekt in der Planung stellt die Beurteilung dar (vgl. z.B. [Ohl06, S. 46]). Hierbei werden in der Regel unterschiedliche Varianten für eine Systemlösung miteinander verglichen.

3.1.2 Planungshorizonte, -aufgaben und -ziele

Planungsmethoden können hinsichtlich unterschiedlicher Horizonte, Aufgaben und Ziele ausgelegt sein. Bei den Planungshorizonten werden die Planungsaktivitäten bzw. -aufgaben entsprechend der zeitlichen Reichweite eingeordnet. Hierfür wird folgende Einteilung unternommen (vgl. z.B. [Sim05, S. 53], [Ciu04, S. 34]), [Dan01, S. 59 ff.]:

- langfristige bzw. strategische Planung (> 5 Jahre),
- mittelfristige bzw. taktische Planung (1-5 Jahre) sowie
- kurzfristige bzw. operative Planung (< 1 Jahr).

Im Rahmen der langfristigen Planung, die einen Planungshorizont von über fünf Jahren hat, werden Strategien entwickelt, mit denen die Wettbewerbs- und Leistungsfähigkeit der Produktion erreicht werden können. Bei der taktischen Planung werden Entscheidungen über die Leistungsfelder (Montageprogramm) und die eingesetzte Technologie getroffen. Die kurzfristige Planung dient zur Bestimmung der Montageprogrammplanung. Diese beinhaltet Angaben zu verwendeten Montageobjekten, Produktionsmenge, Ablaufplanung, Reihenfolgeplanung und Steuerung inklusive Auftragsveranlassung und Überwachung. (vgl. z.B. [Ciu04, S. 34])

Insbesondere mit Blick auf die vorliegende Arbeit ergeben sich spezifische Anforderungen und Aufgaben, die über die Berücksichtigung verschiedener Planungshorizonte abzudecken sind. Im Bereich der langfristigen Planung ist einerseits an die Festlegung des Leistungsspektrums des Montagesystems hinsichtlich des Produktspektrums (z.B. ausgewählte oder alle möglichen Produkte) und andererseits an die Art der Wertschöpfung (nur bestimmte Tätigkeiten der Montage, jegliche Tätigkeiten der Montage oder auch Tätigkeiten der Fertigung) zu denken. Die mittelfristige Planung behandelt die Konkretisierung der Strategien für Montagesysteme. Dabei ist in erster Linie die Gestaltung der Aufbau- und Ablaufstruktur gemeint. Die Aufbaustruktur beschäftigt sich mit der räumlichen Anordnung, Organisation und

Gebildestruktur. Dagegen beinhaltet die Ablaufstruktur die Gestaltung der systeminternen Abläufe und Anbindung an die umgebenen Systeme und Prozesse (vgl. z.B. [Sch08, S. 5 ff.], [Hab74, S. 13 & 96]). Bei der kurzfristigen Planung werden Entscheidungen über die Bereitstellung von benötigten Materialien, Programmplanung, Personalplanung, Potentialplanung sowie Produktionsprozessplanung getroffen (vgl. z.B. [Sch08, S. 6], [Ohl06, S. 49]).

Die Planung von Montagesystemen kann durch unterschiedliche Anlässe angestoßen werden, die sich in Neuplanung, Umplanung und Anpassungs- bzw. Erweiterungsplanung differenzieren lassen (vgl. z.B. [Rei11, S. 18]). Bei einer Neuplanung gilt es, ein neues Montagesystem für eine konkrete Fragestellung zu planen. Inhalt der Umplanung ist die Planung eines Montagesystems, welches bereits in der Vergangenheit zur Montage verwendet worden ist. Im Gegensatz dazu wird bei einer Anpassungs- bzw. Erweiterungsplanung ein bereits geplantes Montagesystem an die neuen Randbedingungen modifiziert.

Im Zuge der Planung von Montagesystemen können unterschiedliche, zum Teil konträre, komplementäre und indifferente Ziele verfolgt werden. Als Erweiterung zu **Bild 2.6** und in Anlehnung an [Ohl06, S. 52], [Per00, S. 42] und [Lie01] ergeben sich die generellen Planungsziele aus **Bild 3.2**, die sich in wirtschaftliche, technologische, ökologische, legislative und soziale Ziele klassifizieren lassen.

Wirtschaftlich	Technologisch	Ökologisch	Legislativ	Sozial
<ul style="list-style-type: none"> - geringe Investitionskosten - geringe Betriebskosten - steigender Umsatz/Gewinn - langfristige Wettbewerbsfähigkeit - hohe Termintreue 	<ul style="list-style-type: none"> - ausreichende Qualität - hohe Flexibilität in Bezug auf die Produktionsmenge, Varianten und Änderungen - geringe Störanfälligkeit - hohe Mengenleistung - kurze Durchlaufzeiten - hoher Auslastungsgrad - ausgewogener Automatisierungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Emissionen - Vermeidung human-/ökotoxischer Stoffe - geringe Baugröße - Ressourceneffizienz 	<ul style="list-style-type: none"> - Gesetzes Einhaltung - Einhalten von Grenzwerten und Bestimmungen 	<ul style="list-style-type: none"> - angemessene Arbeitsbedingungen und -umfänge - Mitarbeitermotivation und -zufriedenheit - Arbeitssicherheit - Qualifikationsförderung - Ergonomie

Bild 3.2: Ziele bei der Planung von Montagesystemen (in Erweiterung zu [Ohl06, S. 52], [Per00, S. 42])

3.1.3 Bewertungskennzahlen

Für die Beurteilung einer Produktion bzw. von Produktionssystemen lassen sich Kennzahlen heranziehen, welche Maßgrößen in Form einer quantitativen Informationen zu Eigenschaften bzw. Zielanforderungen darstellen (vgl. [Gla01, S. 12], [Eve02, S. 72]). Unterscheiden lassen sich absolute und relative Kennzahlen (vgl. [San04, S. 12], [Gla01, S. 15 f.]). Zur Bewertung von technischen Systemen gibt es eine Reihe unterschiedlicher Kennzahlen. Sie messen

technische, ökonomische, ökologische und soziale Aspekte. Im Folgenden werden gängige Kennzahlen dargestellt.

Life Cycle Cost K_{LCC}

Die Life Cycle Cost umfassen alle Kosten eines Produktlebenszyklus, von der Produktidee bis zur Rücknahme vom Markt (vgl. z.B. [Bar96, S. 3-2], [Sys06, S. 89]). Zur Berechnung existieren unterschiedliche Modelle (vgl. z.B. [Sae92], [DIN05], [Las06], [Ohl06]), welche alle die Gesamtkosten in einmalige und wiederkehrende Kosten differenzieren (vgl. [Sch09, S. 39]). Darüber hinaus unterteilen die meisten Ansätze den Lebenszyklus in die Abschnitte Anschaffung, Betrieb, Instandhaltung und Verwertung (vgl. [Sch09, S. 39], [Sae92, S. 45 f.]). Hieraus ergeben sich die Life Cycle Cost K_{LCC} zu

$$K_{LCC} = K_{Anschaffung} + K_{Betrieb} + K_{Instandhaltung} + K_{Verwertung}. \quad (3.1)$$

Zu den Anschaffungskosten zählen die Positionen Beschaffung, Entwicklung, Installation, Schulung, Umbau und Transport. Kosten für Werkstoffe, Verbrauchsstoffe, Personal, Abfall und Ersatzteilbevorratung werden als Betriebskosten zusammengefasst. Instandhaltungskosten umfassen den Aufwand für geplante und ungeplante Instandhaltungsmaßnahmen. Hierzu zählen unter anderem Ersatzteile, Personalkosten, Produktionsausfall und Reparaturkosten. (vgl. [Sch09, S. 39], [DIN05, S. 8], [Sae92]) Kosten für die Stilllegung, Zerlegung und Beseitigung von Systemen sowie für das Recycling werden unter den Verwertungskosten aggregiert (vgl. [DIN05, S. 24 f.]).

Durchlaufzeit T_{DLZ}

Die Durchlaufzeit umfasst die Zeitspanne eines Produktionsauftrags (vgl. [Wie10, S. 262 f.], [Paw07, S. 33], [Sch11a, S. 52]). Folglich beinhaltet sie alle Montagetätigkeiten inklusive dem Ein- und Austakten der Bauteile, Baugruppen und Komponenten. Die Durchlaufzeit setzt sich aus den folgenden Anteilen zusammen (vgl. [Wie10, S. 260 ff.], [Ras98, S. 57], [Paw07, S. 33]):

- Bearbeitungszeit T_{Bearb} : Die Bearbeitungszeit gibt die Zeitspanne an, die für die Herstellung des Erzeugnisses benötigt wird (vgl. [Erl10, S. 60]). Gewollte, prozessbedingte Liegezeiten können auch zur Bearbeitungszeit gehören.
- Rüstzeit T_{Ruest} : Die Rüstzeit gibt die Zeitspanne an, die notwendig ist, um eine Anlage auf eine andere Bearbeitungsaufgabe anzupassen (z.B. Einrichten aufgrund eines Variantenwechsels) (vgl. [Hel10, S. 1397]). Sie setzt sich aus der Rüstgrundzeit (Vorbereitung der Betriebsmittel wie Auf- und Abrüsten), Rüstverteilzeit (unregelmäßig auftretende Zeiten wie Abkaufzeit einer Maschine) und Rüsterholungszeit (Zeit für Erholung des Personals) zusammen (vgl. [Wie10, S. 215], [Erl10, S. 62]).

- Liegezeit T_{Liege} : Die Liegezeit beinhaltet ungewollte Wartezeiten eines Produktionsauftrags (vgl. [Neb07, S. 343]. Die Wartezeit lässt sich in arbeitsbedingte Liegezeit, Lagerungszeit, störungsbedingte Liegezeit und durch den Menschen bedingte Liegezeit differenzieren (vgl. [Wie10, S. 260]).
- Transportzeit T_{Trans} : Die Transportzeit gibt die Zeit an, die für den Transport vor und nach der Bearbeitung erforderlich ist.
- Kontrollzeit T_{Kontr} : Die Zeitspanne zur Überprüfung der ausgeführten Produktionsschritte wird unter der Kontrollzeit zusammengefasst.

Für die Berechnung der Durchlaufzeit eines Produktionsauftrags werden die einzelnen Zeiteile aufsummiert. Die Beschreibung erfolgt nach Gleichung 3.2.

$$T_{DLZ} = T_{Bearb} + T_{Ruest} + T_{Liege} + T_{Trans} + T_{Kontr} \quad (3.2)$$

Ausbringungsleistung A

Die Ausbringungsleistung bzw. Produktionsmenge beschreibt den Output eines Systems innerhalb eines Untersuchungszeitraums (z.B. Stück/Std.) (vgl. [Sch11a, S. 75], [Heg03, S. 21]). Diese Kennzahl lässt sich als Quotient des Outputs A_{Out} zum Untersuchungszeitraum $T_{UntZeit}$ [Sch11a, S. 75] bestimmen (siehe Gleichung 3.3).

$$A = \frac{A_{Out}}{T_{UntZeit}} \quad (3.3)$$

Zuwachsrate ZR

Die Zuwachsrate stellt ein Kriterium zur Analyse der Anlaufphase dar. Sie beschreibt die Steigerung der Produktionsmenge pro Zeiteinheit. Zur Berechnung wird die Ausbringungsleistung A von aufeinanderfolgenden Zeitpunkten, z.B. t_0 und t_1 , miteinander in Relation gesetzt, siehe Gleichung 3.4 (vgl. [Sch04, S. 70]).

$$ZR = \frac{A(t_{i+1})}{A(t_i)} \quad (3.4)$$

Die Aussagekraft der Größe hängt entscheidend von der Wahl der Zeiteinheit ab. Interessant ist hier insbesondere der Periodenvergleich.

Belegungsgrad $G_{Belegung}$

Der Belegungsgrad ist eine aus der Durchlaufzeit abgeleitete Kennzahl. Sie beschreibt das Verhältnis der Belegungszeiten aller beteiligten Arbeitsplätze zur gesamten Durchlaufzeit der Aufträge und ist somit ein Index für die Prozessdichte, Maß für die Umlaufbestände sowie

Liege- und Wartezeiten (vgl. [Kle07, S. 17]). Der Belegungsgrad $G_{Belegung}$ für ein Produktionssystem ergibt sich aus der Belegzeit T_{Beleg} und der Durchlaufzeit T_{DLZ} nach Gleichung 3.5 (vgl. [Kle07, S. 103]).

$$G_{Belegung} = \frac{T_{Beleg}}{T_{DLZ}} \quad (3.5)$$

Nutzungsgrad $G_{Nutzung}$

Das Verhältnis zwischen der Nutzungszeit $T_{Nutzung}$ und der Belegungszeit T_{Beleg} entspricht dem Nutzungsgrad einer Station bzw. eines Systems. Hierbei werden alle auftretenden Ausfallzeiten berücksichtigt. Die Berechnung des (Gesamt-)Nutzungsgrad $G_{Nutzung}$ erfolgt nach Gleichung 3.6. (vgl. [Lot06, S. 381])

$$G_{Nutzung} = \frac{T_{Nutzung}}{T_{Beleg}} \quad (3.6)$$

Rüstgrad G_{Ruest}

Der Rüstgrad beschreibt den Quotienten aus den Rüstzeiten T_{Ruest} und den Bearbeitungszeiten T_{Bearb} (vgl. [Rot99, S. 60]). Diese Kennzahl beschreibt demnach den Rüstanteil, der je Produkt notwendig ist (sowohl bei Produktwechsel als auch bei gleichen Produkten). Zur Berechnung des Rüstgrads G_{Ruest} wird die benötigte Rüstzeit T_{Ruest} mit der Bearbeitungszeit T_{Bearb} ins Verhältnis gesetzt (siehe Gleichung 3.7).

$$G_{Ruest} = \frac{T_{Ruest}}{T_{Bearb}} \quad (3.7)$$

Montagewirkungsgrad G_{Wirk}

Wirtschaftliche Montagekonzepte zeichnen sich unter anderem dadurch aus, dass unnötige Bewegungen des Montageobjekts bei sämtlichen Handhabungs- und Fügeoperationen vermieden werden. Der wirtschaftliche Wirkungsgrad eines Montagesystems lässt sich durch Einteilung der Handhabungs- und Fügeoperationen in Primär- und Sekundärvorgängen ermitteln. (vgl. [Lot06, S. 59]) Der Montagewirkungsgrad soll eine Aussage über die Effizienz der Montage ermöglichen und lässt sich durch Gleichung 3.8 beschreiben. Zu den Primärmontagevorgängen PV zählen alle Aufwendungen an Zeit, Energie, Information und Teilebereitstellung zur Vervollständigung eines Erzeugnisses, die zur Steigerung der Wertschöpfung dienen (z.B. Greifen und Einschrauben von Teilen). Dagegen beinhalten die Sekundärmon-

tagevorgänge *SV* nur Tätigkeiten, die keine Wertschöpfung zur Folge haben, aber notwendig sind (z.B. Transportieren und Ablegen). (vgl. [Lot06, S. 59 ff.]

$$G_{Wirk} = \frac{\sum PV}{\sum PV + \sum SV} \quad (3.8)$$

Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit eines Produktionssystems bzw. einer Station ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauteil, eine Einheit oder ein System während eines definierten Zeitintervalls unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt (vgl. [DIN90], [VDI98], [Rüh10, S. 13]). Somit beschreibt die Zuverlässigkeit die Wahrscheinlichkeit, dass ein gestarteter Bearbeitungszyklus vollständig und ohne Störungen unter Einhaltung vorgegebener Toleranzen ausgeführt wird (vgl. [Abe05], [DIN02]). Kenngrößen der Zuverlässigkeit sind die Mean Time between Failures (*MTBF*; zu Deutsch: mittlere stillstandsfreie Laufdauer) und Mean Time to Repair (*MTTR*; zu Deutsch: mittlere Stördauer) (vgl. [DIN90]).

Die Mean Time between Failure *MTBF* für ein System *h* wird durch Gleichung 3.9 berechnet. Hierbei gibt *TBF_{i,h}* die störungsfreien Laufabschnitte *i* einer Station bzw. eines Systems *h* (Time between Failures; zu Deutsch: Zeit zwischen Fehlern) und *Anz.TBF_h* die Anzahl der Laufdauerabschnitte der Station bzw. des Systems *h* an. (vgl. [Heg03, S. 20])

$$MTBF_h = \frac{\sum_i TBF_{i,h}}{\text{Anz.TBF}_h} \quad (3.9)$$

Gleichung 3.10 beschreibt die Berechnungsvorschrift für die Mean Time to Repair *MTTR* für ein System *h*. *TTR_{i,h}* (Time to Repair, zu Deutsch: Reparaturzeit) ist die Dauer der Reparatur- oder Instandsetzungsmaßnahme (Stördauer) *i* einer Station bzw. eines Systems *h* und *Anz.TTR_h* die Anzahl der notwendigen Maßnahmen für die Reparatur und Instandsetzung einer Station bzw. eines Systems *h*. (vgl. [Heg03, S. 20])

$$MTTR_h = \frac{\sum_i TTR_{i,h}}{\text{Anz.TTR}_h} \quad (3.10)$$

Overall Equipment Effectiveness *OEE*

Eine Kennzahl zur Bewertung des Wirkungsgrads und der Prozesssicherheit einer Maschine, Anlage etc. ist die Overall Equipment Effectiveness (*OEE*) bzw. Gesamtanlageneffektivität (vgl. [Kle11b, S. 80]). Die Kennzahl ist das Produkt aus den Einzelkenngrößen Verfügbarkeit

V , Leistungsgrad $G_{Leistung}$ und Qualitätsgrad $G_{Qualitaet}$ (siehe Gleichung 3.11) (vgl. [Nak95, S. 43]).

$$OEE = V \cdot G_{Leistung} \cdot G_{Qualitaet} \quad (3.11)$$

Dabei gilt:

- Verfügbarkeit V : Die Verfügbarkeit V eines Systems ergibt sich aus dem Verhältnis von der stillstandsfreien Laufdauer zur Betriebsdauer (vgl. [Lot06, S. 382 f.], [Nak95, S. 43]) und beschreibt somit die Qualität des Diensts (vgl. [Kai99, S. 10]). Sie ergibt sich unter Verwendung der Zuverlässigkeitsgrößen zu (vgl. [Lot06, S. 382 f.]):

$$V = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}. \quad (3.12)$$

- Leistungsgrad $G_{Leistung}$: Die erforderliche Zeit einer Ausführung bestimmter Arbeitsaufgaben kann unterschiedlich sein. Dies kann mit Hilfe des Leistungsgrads $G_{Leistung}$ beurteilt werden (vgl. [REF97, S. 125 f.]). Hierfür wird die Ist- und Sollleistung ins Verhältnis zueinander gesetzt. Berechnen lässt es sich bspw. mit der Vorgabezeit $T_{Vorgabe}$, der Gesamtanzahl an produzierten Einheiten PE_{Gesamt} und der Anlagenlaufzeit T_{Anlage} (Gleichung 3.13) (vgl. [Nak95, S. 43]).

$$G_{Leistung} = \frac{T_{Vorgabe} \cdot PE_{Gesamt}}{T_{Anlage}} \quad (3.13)$$

- Qualitätsgrad $G_{Qualitaet}$: Der Qualitätsgrad $G_{Qualitaet}$ beschreibt das Verhältnis von guten produzierten Einheiten PE_{gut} zur Gesamtzahl an produzierten Einheiten PE_{Gesamt} (vgl. [Nak95, S. 43] (Gleichung 3.14).

$$G_{Qualitaet} = \frac{PE_{gut}}{PE_{Gesamt}} \quad (3.14)$$

Automatisierungsgrad G_{Auto}

Der Automatisierungsgrad beschreibt den Anteil an automatisierten Prozessen einer Montageaufgabe (vgl. [Mos07, S. 49]) und lässt sich mit zwei unterschiedlichen Ansätzen berechnen (vgl. [Han02b, S. 13]): Zeitanteile oder Anzahl der Operationen als Referenzwert. Wird beispielsweise die Anzahl an manuellen Prozessen $P_{Manuell}$ und automatisierten Prozessen P_{Auto} herangezogen, gilt die Berechnungsvorschrift aus Gleichung 3.15.

$$G_{Auto} = \frac{P_{Auto}}{P_{Auto} + P_{Manuell}} \quad (3.15)$$

3.2 Methodisches Vorgehen

Zur Planungsunterstützung werden in der Regel Methoden herangezogen, mit Hilfe derer die Qualität der Ergebnisse bei gleichzeitig geringerem Aufwand gesteigert werden soll. In der Literatur werden diese Methoden unterschiedlich kategorisiert (vgl. z.B. [Kra00], [Ohl06], [Glo07], [Rei10]).

Reichenbach [Rei10] klassifiziert die Methoden in unternehmensspezifische Ansätze, allgemeine Methoden und softwaregetriebene Lösungen. Ohlendorf [Ohl06] beschreibt zwei Möglichkeiten. Bei der ersten Variante werden konventionelle und simulationsgestützte Ansätze unterschieden. Darüber hinaus (Variante zwei) zeigt er auf, dass Methoden in analytische, heuristische, prognostische sowie Bewertungs- und Entscheidungsinstrumente untergliedert werden können.

In der vorliegenden Arbeit werden die Methoden in Anlehnung an Reichenbach [Rei10] in allgemeine und softwaregetriebene Lösungen kategorisiert und vorgestellt.

3.3 Planungsmethoden

Planungsmethoden werden im Allgemeinen eingesetzt, um als Lösung für Fragestellungen zielorientiert technische Systeme zu entwickeln (vgl. **Bild 3.3**). Im Fokus dieser Arbeit steht der Aufbau von Montagesystemen. Entwickelt werden hierbei in der Regel, häufig auch iterativ, Varianten. In den letzten Jahrzehnten sind mit der Zielsetzung der Planungsunterstützung von Montagesystemen (allgemein Produktionssystemen) eine Vielzahl von Ansätzen entwickelt worden. In der Literatur werden zahlreiche Konzepte und Methoden behandelt, die häufig auch rechnergestützt umgesetzt wurden (vgl. z.B. [Kra00], [Cis05], [Ohl06], [Rei10]).

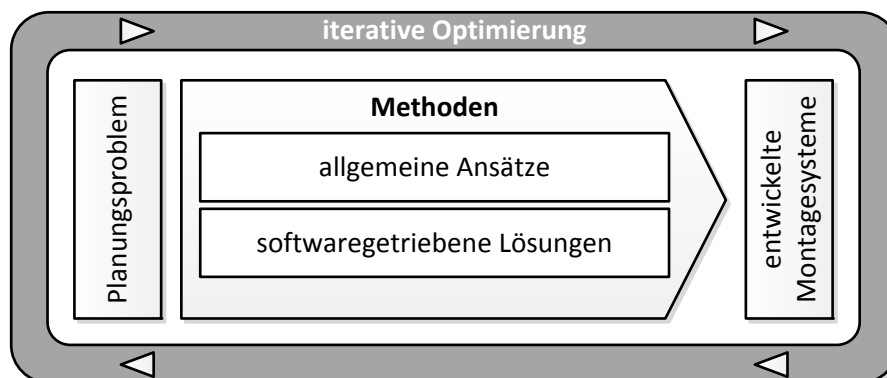


Bild 3.3: Methoden-Klassifikation und Vorgehen zur Planungsunterstützung (Darstellung in Anlehnung an [Mül07, S. 41])

Im Folgenden werden ausgewählte Methoden beschrieben und in allgemeine und softwaregetriebene Ansätze klassifiziert. Eine Reihe der Methoden ist allgemein gehalten, sodass ihr Einsatz nicht auf die Anwendung bei Montageproblemen beschränkt ist. Die Reihenfolge der Darstellung hat im Hinblick auf die Wichtigkeit keinerlei Bedeutung.

3.3.1 Allgemeine Methoden

VDI-Richtlinie 2221 und 2222

Die VDI-Richtlinie 2221 [VDI93] und 2222 [VDI82] beschreibt eine klassische Methode zum Entwickeln und Konstruieren von technischen Systemen und Produkten (vgl. z.B. [Rei10, S. 28]). Diese Methode ist im Maschinenbau und in der Softwareentwicklung weit verbreitet, kann aber in ihren Grundprinzipien auch auf die Montageplanung übertragen werden (vgl. z.B. [Fel97, S. 31]). Durch eine Bündelung methodischer Ansätze wurde ein international anerkanntes Vorgehensmodell zur Produktentwicklung geschaffen (vgl. z.B. [Pah07, S. 21 ff.]). Aufgebaut ist die Methode aus insgesamt fünf Grundschritten, die in **Bild 3.4** dargestellt sind.

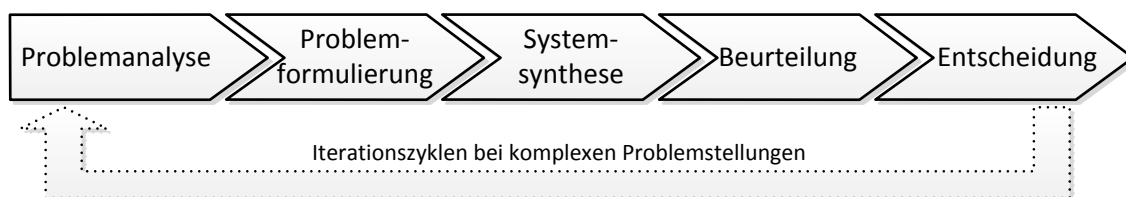


Bild 3.4: Vorgehensmodell nach VDI2221 (vgl. [VDI93])

Ausgehend von Informationen über die Aufgabe, Schwerpunkte, Bedingungen und möglichen Lösungswegen wird das Problem formuliert. Dabei gilt es, die Anforderungen so genau wie möglich festzuhalten, ohne eine Vorfixierung zu erreichen. Anschließend gilt es, in der Phase der Systemsynthese Lösungsideen zu erarbeiten und konkrete Lösungen miteinander zu kombinieren. Hierbei findet noch keine Bewertung statt; es sollen ausschließlich unterschiedliche Lösungsvarianten entwickelt werden. Darüber hinaus sollen alle Informationen, die zur Lösungsauswahl beitragen, gesammelt werden. Die Beurteilung der unterschiedlichen Lösungsvarianten hinsichtlich ihrer Eigenschaften erfolgt im folgenden Schritt. Darauf aufbauend fällt die Entscheidung, welches die bevorzugte Lösung ist. Diese Lösung gilt es iterativ weiterzuentwickeln sofern ein viel versprechender Entwicklungsprozess betrachtet wird. (vgl. z.B. [Pah07, S. 21 ff.])

Bei komplexen Planungsaufgaben wird diese Abfolge von Schritten in der Regel iterativ wiederholt.

Methode nach Bullinger

Die Methode nach Bullinger ist eine ausführliche Richtlinie zur systematischen Montageplanung (vgl. [Bul86, z.B. S. 51]). Die Vorgehensweise besteht ebenfalls aus sechs Planungsphasen, siehe **Bild 3.5**. Fester Bestandteil dieser Methode ist eine regelmäßige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Bewertung der ermittelten Ergebnisse (vgl. z.B. [Fel97, S. 32]). Iterationszyklen zu früheren Planungsphasen können angewendet werden. Darüber hinaus wird ein simultaner Ablauf von Konstruktion und Montageplanung gefordert.

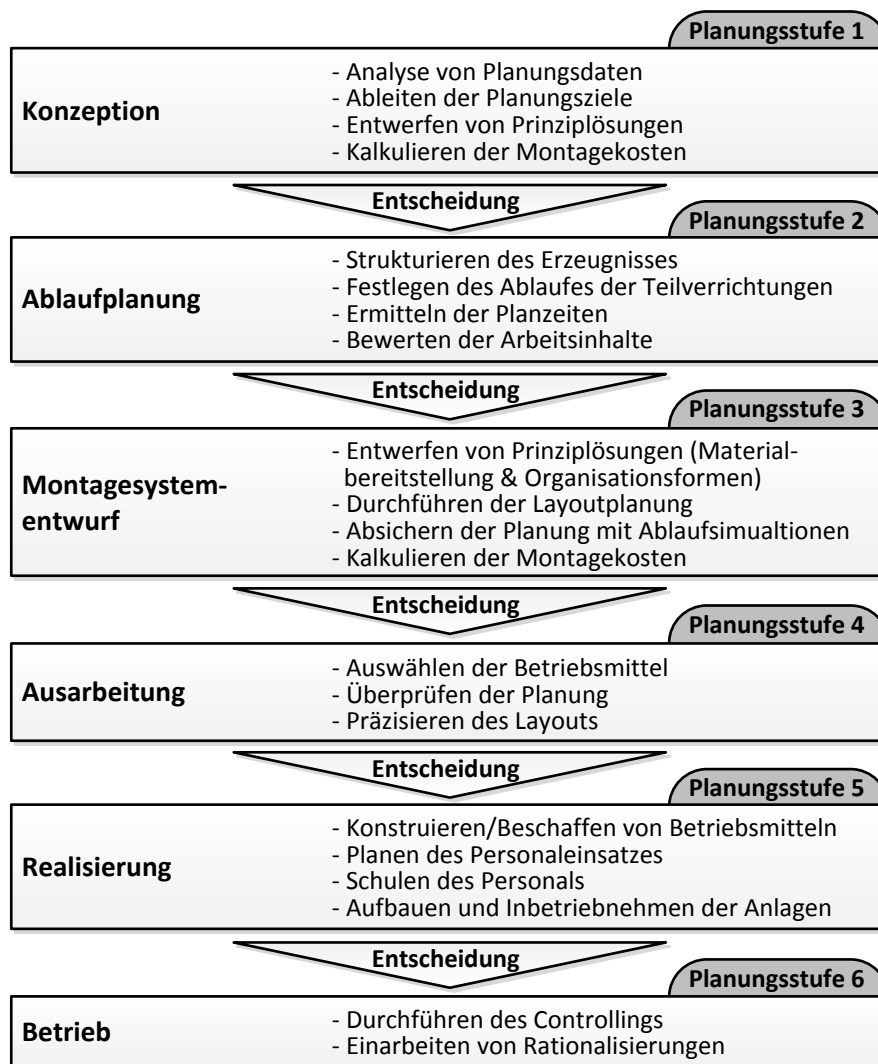


Bild 3.5: Planungsmethode nach Bullinger (vgl. [Bul86, S. 50 ff.]

Methode nach Grob und Haffner

Grob und Haffner [Gro84] entwickelten zu Beginn der 80-er Jahre eine Planungssystematik zur Gestaltung von Arbeitssystemen. Diese besteht aus acht Planungsschritten. Die Basis für die Planung bilden die Erfahrungen, die zunächst in zahlreichen vorgelagerten Arbeitsstrukturierungsprojekten im Unternehmen zu sammeln sind. Der Hauptunterschied zu vielen

anderen Methoden ist die vorangestellte Schwachstellenanalyse. Daraus werden in mehreren, darauffolgenden Schritten Planungsziele und Systemkriterien ermittelt. In der fünften Planungsphase wird die Planung der Montageanlage betrachtet. Diese ist in Arbeitsumgebung, Arbeitsorganisation, Werkstattsteuerung und Personalorganisation untergliedert.

Methode nach Merz

Im Unterschied zu den anderen vorgestellten Methoden schlägt Merz [Mer87, S. 18] eine Aufteilung der Montageplanungsinhalte in eine Struktur- und eine Auslegungsplanung vor. Merz teilt die Aufgabenbereiche in Detaillierungsebenen ein, welche die zeitliche Abfolge der Planung vorgeben, siehe **Bild 3.6**. Die Detaillierungsebenen sind der Montageteilbereich, das Montagesystem, das Montageteilsystem und die Montagestation.

Die Aufteilung in diese Planungsbereiche geht einher mit einem Bruch des durchgängigen Planungsablaufs zwischen der Strukturplanungsphase und der Auslegungsphase. Dadurch wird die Rückwirkung der Detailplanung auf die grobe Planungsphase erschwert und es entsteht ein starrer Planungsablauf (vgl. z.B. [Jon00a, S. 25]).

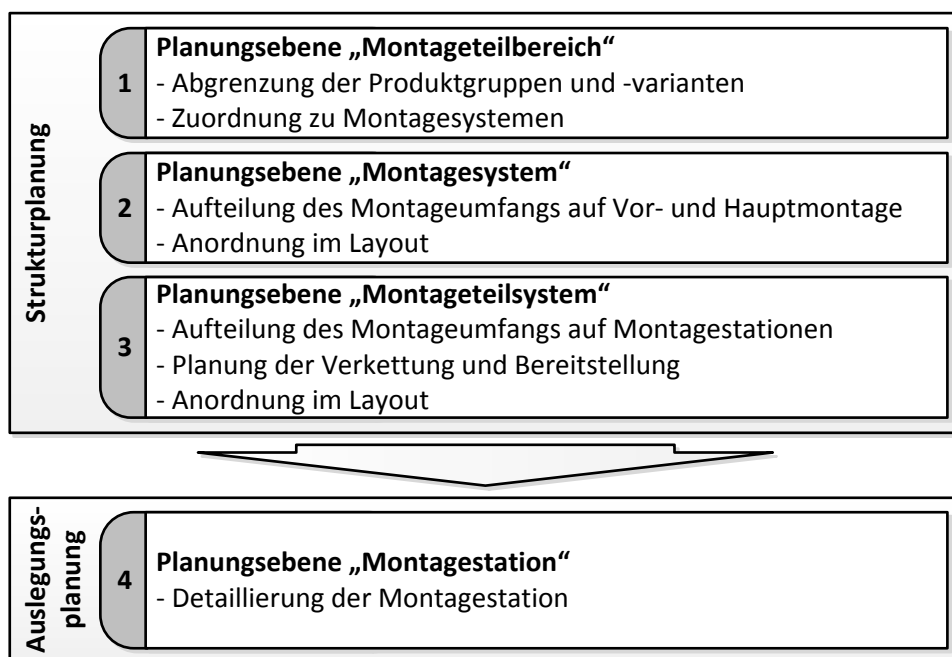


Bild 3.6: Planungssystematik nach Merz (vgl. [Mer87, S. 18 ff.], [Jon00a, S. 24])

Methode nach Deutschländer

Die Methode für die Montageplanung nach Deutschländer [Deu89] stellt eine umfassende und in sieben Hauptfunktionen unterteilte, strukturierte Sammlung von Planungsaufgaben dar (vgl. [Deu89, S. 47]). Daraus lässt sich eine aufgabenbezogene Planungssystematik ableiten, sofern eine Abstimmung auf spezifische Anwendungsfälle durchgeführt wird (vgl. z.B.

[Fel97, S. 35]). Im Vergleich zu anderen Methoden ist bei diesem Ansatz eine starke Vernetzung (Informationsausgleich) der unterschiedlichen Planungsaufgaben und den Aufgaben benachbarter Bereiche erkennbar (vgl. [Deu89, S. 50]).

6-Stufen-Methode nach REFA

Die 6-Stufen-Methode nach REFA stellt einen verfahrens- und anlagenneutralen Leitfaden für die Planung von komplexen Produktionssystemen dar (vgl. z.B. [Lot06, S. 407]). Der Gesamttablauf der Planungssystematik ist in sechs Stufen aufgeteilt, die verschiedene Analyse- und Planungsaufgaben beinhalten, siehe **Bild 3.7**. Nach der Erarbeitung von Zwischenergebnissen wird jeweils eine Entscheidungsphase durchlaufen. Dadurch wird vor jedem Folgeschritt eine Eingrenzung der Ergebnisse bzw. Varianten herbeigeführt (vgl. z.B. [REF87]).

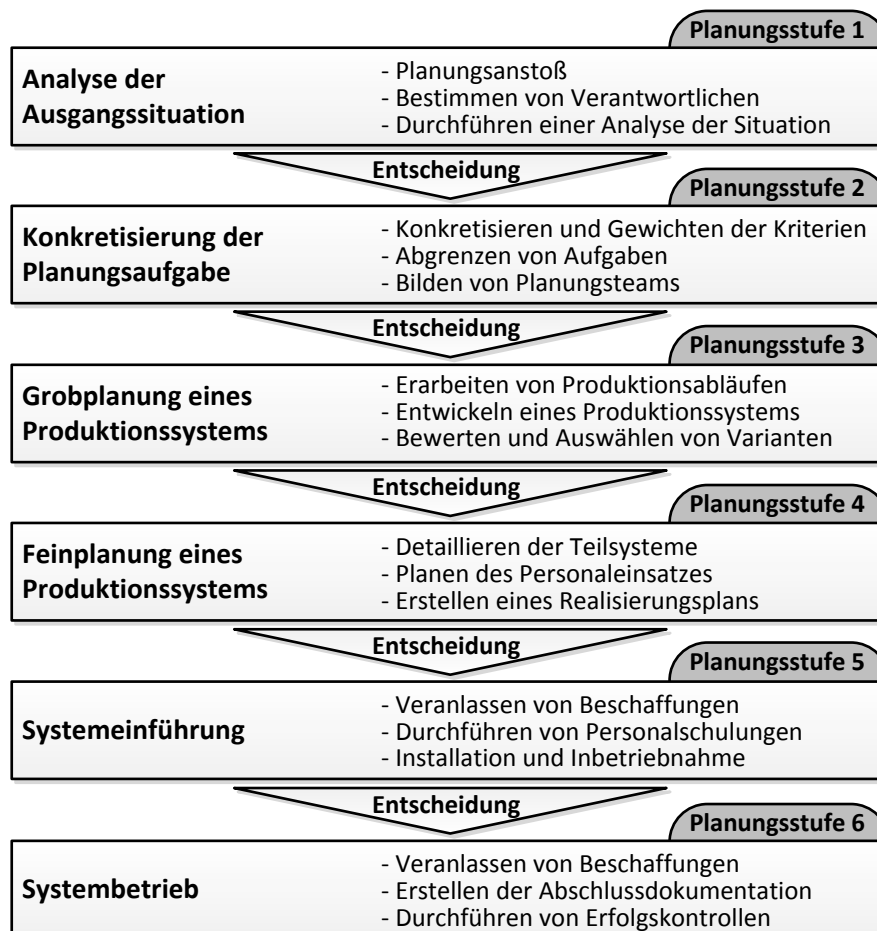


Bild 3.7: 6-Stufen-Planungssystematik nach REFA (vgl. [Lot06, S. 408])

Methode nach Lotter

Die Methode nach Lotter (vgl. [Lot92, Lot06]) ist speziell auf die Montageplanung ausgerichtet. Diese allgemeingültige Planungssystematik beinhaltet zwölf Schritte (vgl. **Bild 3.8**), die je nach Produkt eine unterschiedliche Vorgehensweise erfordern. Die spezifische Anpassung ist von der Produktgestaltung, Komplexität und dem Produktionsvolumen abhängig.

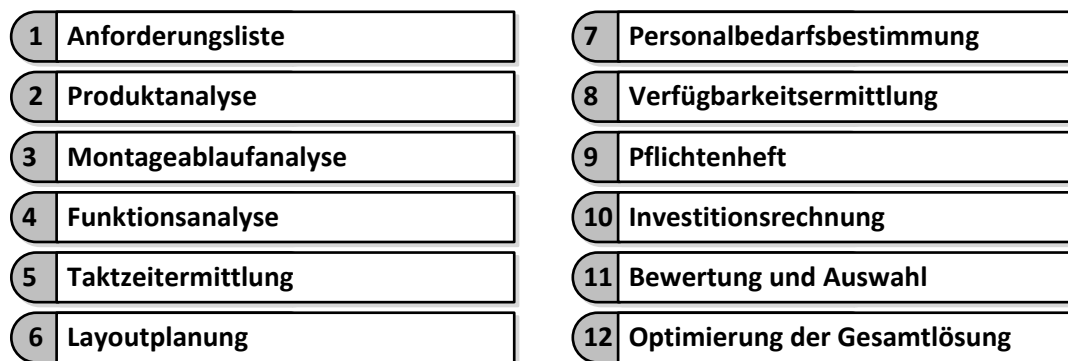


Bild 3.8: Planungssystematik nach Lotter (vgl. [Lot06, S. 409])

Nach Lotter wird ausgehend von einer Anforderungsliste das Produkt hinsichtlich seiner Montagegerechtigkeit analysiert. Damit werden die produktspezifischen Vorrangbeziehungen ermittelt, aus denen anschließend Fügerangfolgen abgeleitet werden. Nachdem der Montageablauf festgelegt ist, wird mit Hilfe einer Funktionsanalyse das funktionale Umsetzungskonzept ermittelt. Darauf folgen weitere Planungsphasen, welche die Zeitermittlung, Layoutplanung, Personalbedarfsermittlung und Verfügbarkeitsermittlung beinhalten. Schließlich wird die Wirtschaftlichkeit der ausgearbeiteten Varianten durch eine Investitions- und Platzkostenrechnung bestimmt, sodass sich eine geeignete Lösung ergibt.

Methods-Time Measurement

Das Methods-Time Measurement (MTM¹) ist eine arbeitswissenschaftliche Methode (vgl. z.B. [MTM07]). Sie bildet im industriellen Umfeld oftmals die Ausgangsbasis für eine Prozessplanung (vgl. z.B. [Rei10, S. 21]). Mit Hilfe der MTM lassen sich Vorgabezeiten für Tätigkeiten ermitteln, indem die jeweiligen tatsächlichen Aufwände herangezogen werden. Der Zeitbedarf einzelner Tätigkeiten wird dabei empirisch ermittelt und in tabellarischer Form festgehalten. Zur Bestimmung von Gesamtzeiten werden die Teilzeiten aufsummiert. Nach Auffassung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin [BAA08] eignet sich diese Methode ausschließlich für manuelle Tätigkeiten. Hierfür werden die Tätigkeiten in einzelne Gruppen

¹Methods-Time Measurement kann als Methodenzeitmessung übersetzt werden. MTM-Verfahren sind Instrumente zur Dokumentation, Strukturierung, Planung und Gestaltung von Arbeitsmethoden mit Hilfe festgelegter Prozessbausteine. (vgl. [Bri10]) Das MTM ist eine Methode zur Analyse von Arbeitsabläufen. Dafür werden die Bewegungsabläufe in Grundbewegungen gegliedert. Jeder Grundbewegung ist wiederum ein Normzeitwert zugeordnet. (vgl. z.B. [MTM07])

unterteilt: Elementar-Bewegungen, zusammengesetzte Bewegungen und Hilfsbewegungen. Laut [BAA08] ergeben sich mit dem MTM-Verfahren sehr detaillierte und realitätsnahe Ergebnisse.

Simultaneous Engineering

Eine oft verwendete und weit verbreitete Methode in der Industrie ist das Simultaneous Engineering (SE) (vgl. z.B. [Gru06, S. 50]). Sie zeichnet sich durch Überlappungen bzw. Parallelisierungen von Planungsphasen aus, wie bspw. eine integrierte und zeitparallele Produktentwicklung und Prozessplanung oder Planungs- und Realisierungsaktivitäten.

Wie **Bild 3.9** zeigt, ist das Ziel des Simultaneous Engineering, die Entwicklungs-, Herstellungs- und Planungszeit zu reduzieren. Der Ansatz dabei ist die frühzeitige Integration aller Unternehmensbereiche in die Planung (vgl. z.B. [Pic06]). Gleichzeitig werden dadurch Entwicklungs- und Produktionskosten reduziert sowie die Produkt- und Prozessqualität gesteigert (vgl. z.B. [Bos07]).

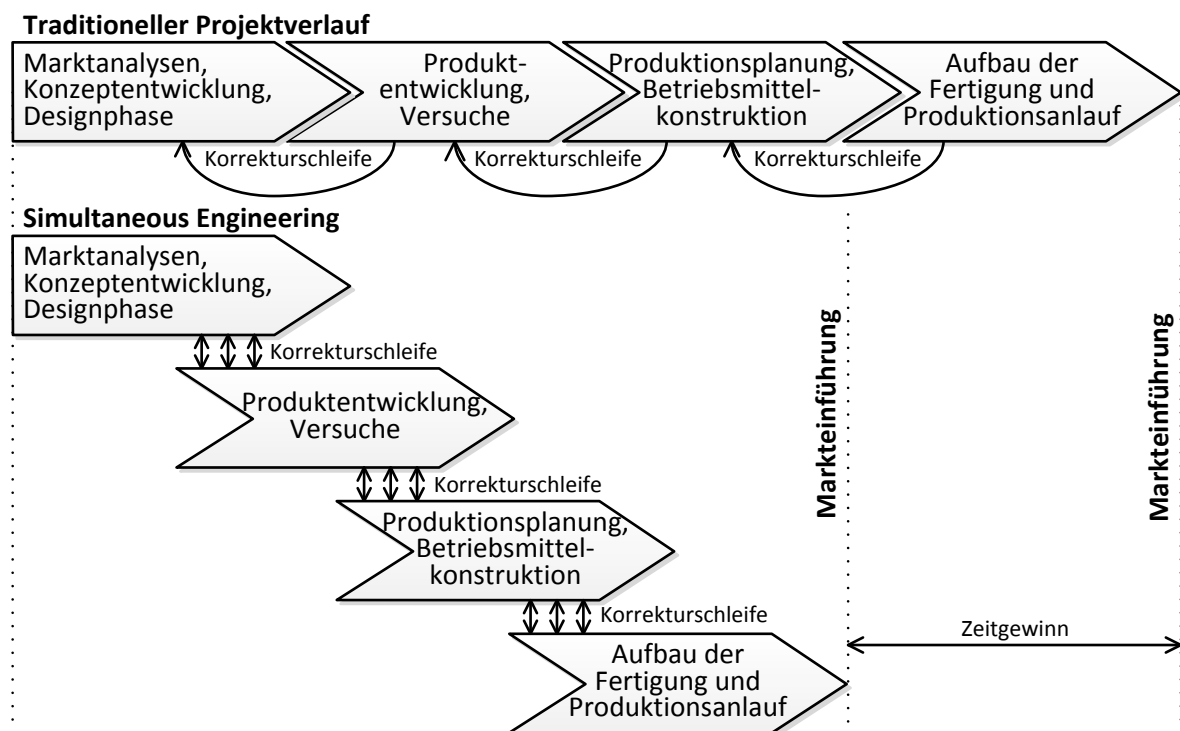


Bild 3.9: Planungsphase beim Simultaneous Engineering im Vergleich zum traditionellen Vorgehen (vgl. [Bos07, S. 67])

3.3.2 Softwaregetriebene Lösungen

Die Anzahl an softwaregetriebenen Methoden und Lösungen (allgemein rechnergestützte Werkzeuge) wächst stetig. Die gestiegenen Anforderungen an die Montageplanung mit einer zum Teil enorm hohen Komplexität machen eine geeignete Rechnerunterstützung nahezu erforderlich. Durch den Einsatz von rechnergestützten Methoden können insbesondere Planungsrisiken und Störanfälligkeiten von kapitalintensiven Montageanlagen vermindert werden (vgl. z.B. [Fel97], S. 48).

Planungssystem COSEM

COSEM (Computergestützte Sturkturierte Entwicklung von Montagesystemen) wurde von Schuster [Sch92b] entwickelt. Dieses Montageplanungssystem, welches eine ganzheitliche Betrachtung verfolgt, besteht aus einem Montagesystemplanungsmodul, Montageprozessplanungsmodul, Komponentenkatalog, Kalkulationsmodul und Investitionsmodul. Zusätzlich werden bei diesem System betriebswirtschaftliche Aspekte wie eine Kalkulation und Investitionsrechnung integriert. Für die Datenverwaltung steht ein relationales Datenbanksystem zur Verfügung. Für die Visualisierung der Montagesysteme wird ein 3D-Simulationssystem verwendet.

Hintergedanke bei der Entwicklung von COSEM war die Unterstützung des Simultaneous Engineering bei der Produktentwicklung und Montageplanung. Hierfür werden frühzeitig die Fügeprozesse mittels einer graphischen Simulation und einer anschließenden Montagebeurteilung überprüft.

Der Fokus dieses Systems liegt insbesondere auf einer 3D-Simulation. Dadurch werden frühere Phasen der Planung, wie die Ablaufplanung, nicht unterstützt und die Weiterverwendung des zugrundeliegenden Datenmodells für die Umsetzung einer mit COSEM geplanten Anlage ist nicht angedacht (vgl. z.B. [Fel97, S. 49]).

Planungssystem von DELMIA

Basierend auf der CATIA Architektur wurde das Softwarewerkzeug DELMIA (Digital Enterprise Lean Manufacturing Interactive Application) entwickelt. Dieses System stellt dem Nutzer Werkzeuge für die Planung sowie zur Visualisierung, Simulation und Absicherung von Produktionsplanungen zur Verfügung (vgl. z.B. [Hab08]). DELMIA verfolgt mit dieser Software erste Ansätze in die Richtung der Digitalen Fabrik indem Aspekte des CIM (Computer Integrated Manufacturing) aufgegriffen und erweitert wurden (vgl. [Rei10], S. 24). Laut DELMIA verfügt dieses Werkzeug über die umfassendste und leistungsfähigste Palette digitaler Lösungen, die weltweit erhältlich ist (vgl. z.B. [Hab08]). DELMIA bietet auch für anspruchsvolle Produktionsprozesse Lösungen inklusive weiterer Optimierungen an. Die Basis des Systems

bildet das Produkt-, Prozess- und Ressourcen-Datenmodell (PPR) von Dassault Systems, das während des Produktionsplanungsprozesses als interdisziplinäre Kommunikationsplattform dient (vgl. z.B. [Rei10], S. 24). Das Modell bildet die Grundlage für eine automatisierte Generierung standardisierter Arbeitsunterlagen. Zusätzlich spielt es eine wichtige Rolle zur Durchführung beschleunigter und stabiler Produktionsanläufe mit dem Ergebnis höherer Reifegrade und geringerer Gesamtkosten (vgl. z.B. [Kie07]).

Planungssystem eM-Workplace und eM-Human

Die Planungswerkzeuge eM-Workplace (ursprünglich Robcad) und eM-Human sind 3D-Simulationswerkzeuge, die zu den Siemens PLM Systemen gehören. Die Oberfläche dieses Werkzeugs ermöglicht es, sowohl Roboter als auch Bewegungsabläufe von menschlichen Ressourcen zu programmieren und simulativ darzustellen. Darüber hinaus ist die Darstellung eines gesamten Ablaufs des Montageprozesses möglich. Aus der Simulation lassen sich schließlich einzelne Bewegungs- oder Montagezeiten ermitteln. Zudem ist das Planungssystem zur Visualisierung sowie Erreichbarkeits- und Kollisionsanalyse geeignet. (vgl. z.B. [Rei10, S. 25])

Planungssystem ERGOPLAN von DELMIA

Beim Planungssystem ERGOPLAN handelt es sich um ein DELMIA-Werkzeug zur Planung von manuellen Montageabläufen. Aufgebaut ist es aus mehreren eigenständigen Modulen, die jeweils bestimmte Aufgabenbereiche abdecken. Zur Verfügung stehen Module zur Produktanalyse, zur Planung der Produktherstellungsprozesse, der Arbeitsstationen, der ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung und zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens (vgl. z.B. [Rei10, S. 23]). Eine gemeinsame Datenbasis bildet den Grundbaustein für alle Software-Module.

Integrated Manufacturing Solution

Die Integrated Manufacturing Solution (IMS) ist eine Software zur Fabrikplanung der Firma IFAKT GmbH (Informationen von www.ifakt.de). Sie besitzt einen modularen Aufbau, der jeweils für spezielle Aufgaben entwickelt ist. Eingesetzt wird die IMS-Software vor allem zur Planung von Produktions- und Logistiksystemen sowie zur Feinplanung von Aufträgen. Die Software ermöglicht es z.B. Szenarios und Lernkurven vorzugeben bzw. zu modellieren.

Planungssystem Process Designer, Process Simulate und Plant Simulation

Bei dem Process Designer (PD), Process Simulate (PS) und Plant Simulation (PLS) handelt es sich um 2D- und 3D-Umgebungen, die sich zum Planen von automatisierten und manu-

ellen Produktionsprozessen, Produktionslinien bis hin zu ganzen Produktionswerken eignen. Alle drei Planungssysteme gehören zur Gruppe der Siemens PLM Software und können im Verbund verwendet werden.

Die Planungssysteme zeichnen sich dadurch aus, dass sie Produkt- und Prozessentwicklung verknüpfen. Damit wird es dem Anwender ermöglicht, eine Aussage über die Machbarkeit eines Produkts treffen zu können. Eingesetzt wird die Softwarekombination zur Entwicklung von Prozessplänen, zur Koordination von Produktionsressourcen und der Prozessmodellierung sowie zur Konstruktion von Produktionslinien. Durch erweiterte Funktionalitäten wird eine Beurteilung von Prozesszeiten, unterschiedlichen Varianten, Alternativplanungen und Kostenberechnungen ermöglicht. Darüber hinaus ist eine kinematische Simulation, eine automatische Montageplanung und eine Ressourcenmodellierung durchführbar. (vgl. z.B. [Rei10, S. 26], [Zen06, S. 40])

3.4 Analyse- und Bewertungsmethoden

Analyse- und Bewertungsmethoden werden in der Regel eingesetzt, um Lösungsvarianten zu untersuchen und zu bewerten (vgl. **Bild 3.10**). Das Ziel der Analyse und Bewertung ist die Ermittlung einer geeigneten Lösung hinsichtlich der herangezogenen Kennzahlen. In den vergangenen Jahrzehnten wurden eine Reihe von Methoden zur Analyse und Bewertung von Montagesystemen entwickelt. Im Unterschied zu den Planungsmethoden existieren hier kaum rechnergestützte Werkzeuge. Die entwickelten Methoden sind meist auf die Lösung von Teilproblemen ausgerichtet.

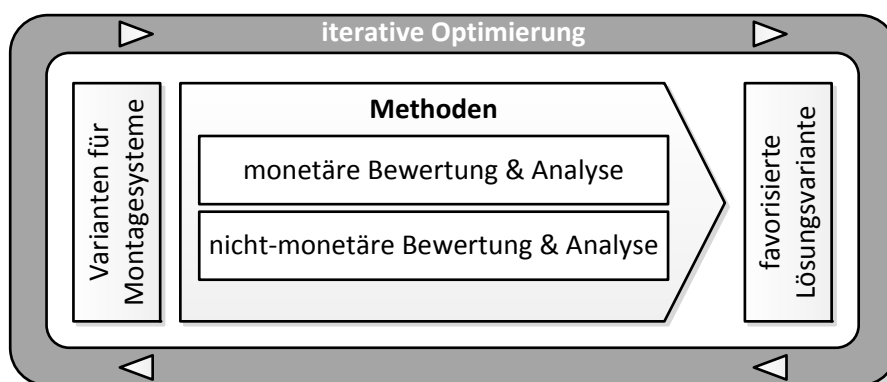


Bild 3.10: Methoden-Klassifikation und Vorgehen bei der Analyse und Beurteilung
(Darstellung in Anlehnung an [Mül07, S. 41])

Im Folgenden werden gängige Methoden aus dem Stand der Technik dargestellt. Diese Ansätze werden hinsichtlich ihrer Zielgrößen der monetären und nicht-monetären Analyse bzw. Bewertung eingeteilt.

3.4.1 Monetäre Analyse und Bewertung

Investitionsrechnung

Die Investitionsrechnung dient zur Entscheidungsunterstützung und kann bei zweierlei Fragestellungen eingesetzt werden: Beurteilung hinsichtlich der Vorteilhaftigkeit einer einzelnen Investition sowie Beurteilung mehrerer Varianten hinsichtlich des Investitionsvolumens bzw. der Wirtschaftlichkeit (vgl. [Las06, S. 25], [Mül07, S. 54]). In Ergänzung zu den Investitionsmaßnahmen erwähnt Laskowski [Las06, S. 25], dass auch eine Implementierung der Reparatur- oder Wartungskosten denkbar sei. Für die Investitionsrechnung existieren zwei unterschiedliche Verfahren, die statische und die dynamische Investitionsrechnung (vgl. [Bec12, S. 38]). Statische Verfahren sind durch eine einperiodige Betrachtung charakterisiert, dynamische Verfahren sind hingegen mehrperiodig (vgl. [Bec12, S. 38]). **Bild 3.11** zeigt einige gängige Methoden der Investitionsrechnung.

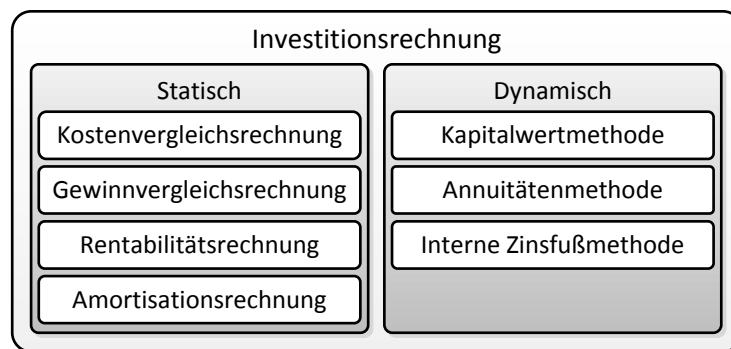


Bild 3.11: Einteilung der Investitionsrechnungs-Verfahren (vgl. [Mül07, S. 54])

Detaillierter wird an dieser Stelle nicht auf die einzelnen Verfahren eingegangen. Weiteres kann der Literatur entnommen werden (vgl. z.B. [Las06], [Mül07], [Bec12], [Web12]).

Kosten- und Leistungsrechnung

Hauptziel der Kosten- und Leistungsrechnung (KLR) ist, die anfallenden Kosten eines Unternehmens zu erfassen und diese nach einem definierten Schlüsselprinzip den hergestellten Produkten zuzuordnen (vgl. [Nie07, S. 43]), um auf diese Weise die Entscheidungsträger zu unterstützen (vgl. [Oss08, S. 8]). Im Vergleich zur Investitionsrechnung wird die KLR in regelmäßigen Zeitabständen durchgeführt, um Informationen über Anregungen, Alternativen, Vorgaben, Kontrollen und Ziele zu erarbeiten (vgl. [Mül07, S. 42], [Eve96, S. 8-4]). Unterschiedliche Strukturen und Systeme können dabei Anwendung finden (vgl. [War96, S. 38], [Mül07, S. 42 ff.]). Bei der Struktur werden Verfahren zur Zurechenbarkeit der Kosten unterschieden. Dazu zählen die Kostenarten-, Kostenstellen- und Kostenträgerrechnung. Die Systeme der KLR werden nach dem Zeitbezug und dem Betrachtungsumfang differenziert.

Zeitbezogene Systeme sind die Istkosten-, Normalkosten- und Plankostenrechnung; Systeme für den Betrachtungsumfang sind die Vollkosten- und Teilkostenrechnung.

Tiefere Informationen zu der Kosten- und Leistungsrechnung können der einschlägigen Literatur entnommen werden (vgl. z.B. [Mül07], [Nie07], [Eve96], [War96], [Oss08]).

Kostenkalkulation

Basierend auf der KLR wurden weitere Verfahren entwickelt. Eines ist die Kostenkalkulation (auch Kostenträgerstückrechnung). Die Kalkulation findet ihre wesentliche Anwendung bei der Ermittlung von Herstell- oder Selbstkosten, Vorbereitung der kurzfristigen Ergebnisrechnung und Bewertung von Beständen. (vgl. [Coe07, S. 104 f.]

Prozesskostenrechnung

Im Unterschied zur Kosten- und Leistungsrechnung werden bei der Prozesskostenrechnung die entstandenen Kosten bzw. kalkulierten Kosten den Kostenträgern verursachungsgerecht zugeordnet (vgl. [Mül07, S. 50]). Für die Durchführung existieren in der Literatur unterschiedliche Ansätze (vgl. z.B. [Mül07, S. 50], [Wil04]). Auf Einzelheiten wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

Kosten-Nutzen-Analyse

Analysen, bei denen Kosten und Nutzen ins Verhältnis gesetzt werden, können unter der Kosten-Nutzen-Analyse zusammengefasst werden. Zur Ermittlung von vorteilhaften Varianten zu einem Stichtag werden Aufwendungen und Erträge für die gesamte Nutzungsdauer in (abgezinste) Geldeinheiten umgerechnet. Diese Geldeinheiten können auch sekundäre Effekte und qualitative Auswirkungen beinhalten, die mit Umrechnungsfaktoren in Geldwerten ausgedrückt werden. (vgl. [Krö07, S. 43])

Wirtschaftlichkeitsrechnung

Die Wirtschaftlichkeitsrechnung wird eingesetzt, um das Verhältnis aus Nutzen zu Aufwand zu bewerten (vgl. [Kra00, S. 24]). Hierfür stehen eine Reihe unterschiedlicher Verfahren zur Verfügung, die ausführlich z.B. in [Kra00], [Lot06] beschrieben sind. Unterschiede existieren vor allem im implementierten Zielsystem. Für rein monetäre Beurteilungen lassen sich klassische, statische und dynamische Verfahren anwenden. Darüber hinaus können Verfahren der erweiterten Wirtschaftlichkeitsrechnung auch nicht monetäre Zielgrößen einbeziehen. (vgl. [Kra00, S. 25 ff.], [Lot06, S. 444 ff.]

3.4.2 Nicht-monetäre Analyse und Bewertung

Energiebewertung

Zur Bewertung des Energiebedarfs von Produktionssystemen existieren eine Reihe unterschiedlicher Ansätze (vgl. z.B. [Abe12], [Eis11]). Ziel all dieser Ansätze ist primär eine Abschätzung des Energieverbrauchs und eine Optimierung der von Anlagen benötigten Energie. Zur Zielerreichung finden vor allem Simulationsmodelle Einsatz.

Zunehmend wird versucht, die Energiebewertung in den konventionellen Planungsprozess zu integrieren, siehe z.B. die Methode zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Fabriken nach Engelmann [Eng09a]. Darüber hinaus wird die Energie oftmals über Kosten beurteilt und folglich als monetäre Größe berücksichtigt (vgl. z.B. [Spe98, S. 147 ff.]).

Nutzwertanalyse

Für eine qualitative Bewertung von Alternativen kann die Nutzwertanalyse angewendet werden (vgl. [Lot06, S. 422]). In der Regel werden dafür nicht-monetäre Kriterien verwendet (vgl. [Lot06, S. 422]), monetäre Kriterien wären generell aber auch möglich. Das Vorgehen beruht auf einem entscheidungstheoretischen Modell (vgl. [Krö07, S. 43]). Der Gesamtnutzen von Alternativen wird dabei schrittweise ermittelt (vgl. [Lot06, S. 422 f.]), um aufbauend auf dem Ergebnis eine Entscheidung treffen zu können.

Beurteilung der Systemleistung

Zur Bewertung der Systemleistung von Produktionssystemen und -stationen werden in der Regel Leistungskennzahlen herangezogen (vgl. [Nie07, S. 46 ff.], [Rüh10, S. 12 ff.], [Lot06, S. 378 ff.]). Typische Kennzahlen sind z.B. Anlageneffektivität (OEE), Ausbringungsmenge, Leistungsgrad, Nutzungsgrad, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit. Die Berechnung kann mit analytischen Ansätzen, Verfahren der nichtlinearen Dynamik sowie simulationsgestützten Ansätzen erfolgen (vgl. [Rüh10, S. 16 ff.]).

Technologiebewertung

Die Technologiebewertung besitzt das Ziel, Bedeutungen von Technologien oder Ergebnisse von Technologieentscheidungen zu ermitteln und zu beurteilen (vgl. [Sch11b, S. 309]). Die Bewertung kann quantitativ oder qualitativ mit definierten Bewertungsmaßstäben durchgeführt werden. Klassische Kriterien sind Funktionsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit, Wohlstand, Sicherheit, Gesundheit, Umweltqualität sowie Persönlichkeitsentfaltung und Gesellschaftsqualität (vgl. [VDI00c]).

Für die Bewertung und Folgenabschätzung von Technologien stehen eine Vielzahl an Methoden zur Verfügung (vgl. [Krö07, S. 39 ff.], [Neu12, S. 11 ff.], [Sch11b, S. 309], [VDI00c]), z.B.

Trendextrapolation, Brainstorming, Delphi-Expertenumfrage, Risiko-Analyse, Modellsimulation, Szenario-Gestaltung, Kosten-Nutzen-Analyse und Nutzwertanalyse. Aus den klassischen Methoden wurden weitere Vorgehensweisen abgeleitet, welche in der Regel Anpassungen auf Spezialfälle sowie eine Verfeinerungen darstellen (vgl. [Hal02], [Krö07], [Neu12], [Wul12]). Näher wird an dieser Stelle nicht auf die einzelnen Methoden eingegangen; einzelne Methoden wurden bereits separat beschrieben.

Flexibilitätsbewertung

Für die Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen hinsichtlich Volumen und Produkten existiert eine Reihe unterschiedlicher Methoden. Ausführlicher sind diese in [Rüh10, S. 26 ff.] beschrieben. Die Ansätze haben unterschiedliche Herangehensweisen. Es gibt Ansätze, die sich auf die Umgestaltung und Erweiterung der klassischen Kostenrechnung um Flexibilitätskriterien konzentrieren, während andere auf ereignisorientierten Simulationsmodellen oder der Implementierung von Faktoren, die Reaktionen von Systemen auf Änderungen beschreiben, aufbauen.

3.5 Methodenvergleich

Die in Abschnitt 3.3 vorgestellten Planungsmethoden besitzen alle ein ähnliches Vorgehen zur Entwicklung von Produktionssystemen bzw. technischen Systemen nach dem Top-down-Ansatz: Analyse der Ausgangssituation, Konkretisierung der Aufgabe, Grob- und Feinplanung sowie Systemeinführung und -betrieb. Unterschiede weisen sie in der Unterteilung bzw. Detaillierung von Planungsschritten auf. Als Unterstützung zur Bewertung von Lösungsvarianten lassen sich, wie in Abschnitt 3.4 aufgezeigt, unterschiedliche Bewertungsmethoden einsetzen. Aufgrund der Vielzahl an Methoden und ihrer Spezialisierung auf Teilprobleme sind sie ohne Kriterienkatalog nur eingeschränkt vergleichbar.

Zur Gegenüberstellung der im Rahmen der Arbeit vorgestellten Methoden aus dem Stand der Technik und der Wissenschaft werden im Folgenden Klassifikationskriterien herangezogen. Die Ergebnisse werden in einer Bewertungsmatrix dargestellt. Daraus wird ein konkreter Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit abgeleitet.

3.5.1 Klassifikationskriterien

Für die Methodenklassifizierung werden fünf Hauptkriterien und 21 Unterkriterien herangezogen (in eigener Erweiterung zu [Ohl06, S. 95 ff.]). Einige Kriterien können ausschließlich zur

Klassifikation entweder von Planungs- oder von Bewertungsmethoden herangezogen werden, andere gelten für beide Methoden gleichermaßen.

Im Bereich der Planungsmethoden zählt der Planungsfokus zu den Hauptkriterien. Der Planungsfokus lässt sich weiter in Subkriterien unterteilen. Dazu zählen die innerbetriebliche Logistik, das Systemlayout bzw. die Systemkonfiguration sowie die eingesetzten Technologien und Werkzeuge.

Ein Kriterium, das sowohl für Planungsmethoden als auch für Bewertungsmethoden angewendet wird, ist das Instrument. Das Planungs- bzw. Bewertungsinstrument wird hinsichtlich der Entwicklung und des Vorgehens unterschieden. Zum einen wird nach Eigenentwicklung und Standardsoftware/-methode differenziert. Zum anderen wird der Prozess hinsichtlich des Automatisierungsgrads bewertet (manuell, teilautomatisiert und vollautomatisiert).

Die in den Methoden berücksichtigten Parameter und Aspekte werden unter dem Hauptkriterium Berücksichtigung bewertet. Als Subkriterien fließen der Umgang mit Unsicherheiten, der Einbezug verschiedener Szenarien, die Abbildung des Serienanlaufs sowie die Häufung und Art der Störungen ein.

Ein weiteres Klassifikationskriterium betrifft die Quellen der einbezogenen Daten und Informationen. Daten bzw. Informationen können Herstellerangaben (Kosten, Eigenschaften, Zeiten etc.), Expertenschätzungen sowie deterministische oder stochastische Annahmen sein, sie können aber auch aus Versuchen/Studien stammen.

Abschließend wird die verwendete Planungsmethode klassifiziert. Dazu werden die Subkriterien so gewählt, dass eine Zuordnung in analytische, heuristische, prognostische (simulative/simulationsbasierte) und bewertende/entscheidende (entscheidungsunterstützende) Verfahren erfolgt.

3.5.2 Vergleich der vorgestellten Methoden

Um die Unterschiede zwischen den vorgestellten Planungs- und Bewertungsmethoden in übersichtlicher Form darzustellen, werden diese zusammen mit den im vorangehenden Abschnitt eingeführten Klassifikationskriterien in Matrixform gebracht, siehe **Tabelle 3.1** für Planungsmethoden und **Tabelle 3.2** für Bewertungsmethoden. Für die Bewertung werden drei unterschiedliche Einstufungen berücksichtigt:

- Bewertungsmerkmal voll zutreffend/berücksichtigt (●),
- Bewertungsmerkmal bedingt zutreffend/bedingt berücksichtigt/berücksichtbar (◐) und
- Bewertungsmerkmal nicht zutreffend/nicht berücksichtigt (○).

Tabelle 3.1: Bewertung existierender Planungsmethoden

		REFA	Bullinger	Deutschländer	Grob & Haffner	Lotter	Merz	MTM	SE	VDI	COSEM	DELMIA	eM-Plattform	ERGOPLAN	IMS	PD, PS & PLS
Planungs- fokus	innerbetriebliche Logistik	●	●	●	◐	○	◐	●	●	●	●	●	●	○	●	●
	Layout/Konfiguration	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	○	◐	●
	Technologien & Werkzeuge	●	●	●	●	●	●	◐	●	●	◐	●	◐	○	●	◐
Instrument	Eigenentwicklung	○	○	●	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○
	Standardsoftware/-methode	●	●	◐	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●
	manuelle Planung	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	teilautomatisierte Planung	○	○	○	○	○	○	●	●	○	●	●	●	●	●	●
	vollautomatisierte Planung	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Berücksich- tigung	Unsicherheiten	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◐	◐
	Szenarien	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○
	Aspekte des Serienanlaufs	○	◐	○	○	○	○	○	○	○	○	◐	○	○	●	◐
	Störungen	○	○	○	○	○	○	◐	○	○	○	○	●	○	◐	◐
Datenquelle	Herstellerdaten	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●
	Abschätzungen	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Versuche	○	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	deterministische Annahmen	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	stochastische Annahmen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	◐	●
Planungs- methode	analytisch	○	○	○	○	○	○	◐	○	○	○	◐	○	○	○	○
	heuristisch	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	prognostisch (insb. Simulation)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	●	●
	bewertend/entscheidend	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	◐	●	●	●

Tabelle 3.2: Bewertung existierender Analyse- und Bewertungsmethoden

		Investitionsrechnung	Kosten- & Leistungsrechnung	Kostenkalkulation	Prozesskostenrechnung	Kosten-Nutzen-Analyse	Wirtschaftlichkeitsrechnung	Energiebewertung	Nutzwertanalyse	Beurteilung der Systemleistung	Technologiebewertung	Flexibilitätsbewertung
Instrument	Eigenentwicklung	○	○	○	○	○	●	●	○	○	●	●
	Standardsoftware/-methode	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	○
	manuelle Bewertung	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	teilautomatisierte Bewertung	●	●	●	●	○	●	●	○	●	●	●
	vollautomatisierte Bewertung	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○
Berücksichtigung	Unsicherheiten	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Szenarien	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Aspekte des Serienanlaufs	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Störungen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Datenquelle	Herstellerdaten	●	○	●	●	●	●	●	○	●	●	○
	Abschätzungen	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Versuche	●	○	○	○	○	●	○	○	●	●	○
	deterministische Annahmen	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	stochastische Annahmen	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○

3.6 Fazit und Handlungsbedarf

In den letzten Abschnitten wurde eine Vielzahl von Methoden für die Planung und Beurteilung von Produktionssystemen aufgezeigt. Ferner wurde mittels eines Kriterienkatalogs dargestellt, dass die Methoden unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Festzuhalten ist, dass bereits Methodenansätze existieren, welche das gegenwärtige Anforderungsprofil von Teilschritten der Montagagesystemplanung und -beurteilung berücksichtigen. Defizite sind vor allem für folgende Punkte zu nennen:

- Betrachtung von Varianten in früher Entwicklungsphase: Bei Verwendung konventioneller Planungsmethoden werden Varianten für Montagesysteme in der Regel im Rahmen der Grobplanung, d.h. bereits während einer frühen Entwicklungsphase, miteinander

verglichen. Aufbauend auf den Ergebnissen der Grobplanung wird im Anschluss an die Bewertung der Varianten die Feinplanung durchgeführt.

- **Annahmen und Zeitbezug:** Die Bewertung der Varianten für Systemlösungen erfolgt meist auf Grundlage von deterministischen Annahmen und der Betrachtung einer Periode (statisch); gängig ist die Verwendung von Abschätzungen und Mittelwerten. Statische Modelle haben den Vorteil, mit einem vergleichbar geringen Aufwand betrieben werden zu können. Bei der Entscheidungsfindung auf Basis der Modellergebnisse dürfen die Modellgrenzen jedoch nicht außer Acht gelassen werden. Insbesondere ist zu beachten, dass ein statisches Modell lediglich eine Situation beschreibt. Durch deterministisch vorgegebene Eingangsdaten bleiben Zufälligkeiten unberücksichtigt. Das Modell baut im Wesentlichen auf Mittelwerten auf, sodass Abweichungen konsequent unbeachtet bleiben. Entspricht die betrachtete Ausgangssituation inklusive ihrer Entwicklung nicht exakt den Modellannahmen, so liefert das Modell unpräzise, im ungünstigsten Fall sogar zu optimistische Ergebnisse (vgl. [Ohl06, S. 56]).

Beispielsweise ist ein statisch, deterministisches Modell für eine Untersuchung der optimalen Durchlaufzeit eines Montagesystems geeignet. Dabei können Unsicherheiten und Zusammenhänge im Zeitablauf wie z.B. Lernkurven jedoch keine Berücksichtigung finden.

- **Uneinheitliche Planungs- und Beurteilungsgrundlage:** Die bei aktuellen Methoden zur Planung und Beurteilung von Produktionssystemen verwendeten Daten sind sehr uneinheitlich und nicht durchgängig. Für unterschiedliche Schritte werden verschiedene Quellen verwendet. Darüber hinaus handelt es sich nicht immer um fundierte Daten. Die Parameter werden in der Regel als bekannt und fest angenommen, ohne Abweichungen zu berücksichtigen. Die Entscheidungsfindung ist oft erfahrungsgeprägt. Abhilfe kann z.B. dadurch geschaffen werden, dass für jeden Prozessschritt auf einen einheitlichen Datenpool zurückgegriffen wird.
- **Mangelnde Berücksichtigung von Unsicherheiten sowie anlauf- und serienspezifischer Größen:** Für die Planung und Beurteilung von Produktionssystemen wird meistens ein einziges Szenario, selten eine geringe Anzahl an potentiellen Szenarien verwendet. Somit wird der Einfluss von Unsicherheiten in Form von z.B. schwankenden Bearbeitungszeiten und Störungen gar nicht bzw. nur unzureichend berücksichtigt. Daraus resultierend wird eventuell eine Systemlösung auf Basis eines zu optimistischen Szenarios bewertet. Eine Aussage über Systemgrößen für schlechte Szenarien ist lediglich dann möglich, wenn von Beginn ungünstige Verläufe berücksichtigt werden. Darüber hinaus werden bei den gängigen Methoden in der Regel lediglich feste Kennzahlen berechnet, die Aussagen über die gesamte Anlagenlaufzeit liefern. Hiermit ist es zum einen nicht möglich, Aussagen speziell über den Serienanlauf sowie den Serienbetrieb zu machen, zum anderen bleiben zeitabhängige Unsicherheiten und Effekte unberück-

sichtigt (z.B. Eintrittszeitpunkt und Auswirkung von Ereignissen wie Ausfälle sowie Lerneffekte). Zusammenfassen lässt sich, dass die Verwendung von statischen Kennwerten keine detaillierte Analyse von Szenarien und Einflussgrößen unterstützt, was eine unzureichende Planungsabsicherung zur Folge hat.

Beispielsweise ist die Berücksichtigung von Wahrscheinlichkeiten und zeitabhängigen Zusammenhängen interessant bei der Analyse von Montagesystemen, um Unsicherheiten (z.B. Ausfallwahrscheinlichkeit und Abweichungen vom Erwartungswert) sowie dynamische Effekte wie Lernkurven zu berücksichtigen.

- Geringe Automatisierung von Planungs- und Beurteilungsschritten: Aktuelle Ansätze verlangen einen hohen Grad an manueller Durchführung. Es ist lediglich eine geringe Automatisierung erkennbar, die bei zunehmender Häufigkeit, Unsicherheit und Komplexität von Planungs- und Bewertungsaufgaben zu weiteren Schwierigkeiten, insbesondere einer hohen Fehleranfälligkeit, führen kann.
- Beschränkung auf die Entwicklung von Produktionssystemen bzw. technischen Systemen nach dem Top-down-Ansatz: Mit Hilfe der konventionellen Planungsmethoden werden die Systemlösungen deduktiv, das bedeutet vom Allgemeinen zur Systemlösung, entwickelt. Aufgrund der zunehmenden Modularisierung und Standardisierung erschließen sich neue Lösungswege: die Bottom-up-Planung von Produktionssystemen. Die im Stand der Technik dargestellten Ansätze unterstützen die Entwicklung von entsprechenden Modulen.

Für die Planung und Beurteilung von Montagesystemen der Zukunft lassen sich aus den Defiziten folgende notwendige Forderungen sowie Lösungsansätze ableiten:

- Die Verwendung einheitlicher und fundierter Daten als Eingangsdaten. Qualitativ bessere Eingangsdaten ergeben verlässlichere Ergebnisse. Zu den Daten zählen alle Informationen über das Produkt, die Prozesse und die Montagemodule, die für die Planung erforderlich sind. Zur Realisierung soll ein Wissensspeicher implementiert werden.
- Die Ergänzung der herkömmlichen Planungssystematik hinsichtlich eines Vorgehens zur Konfiguration von Montagesystemen aus vorentwickelten Modulen. Dieser Algorithmus erlaubt es, alle Systemlösungen, die durch die Eingangsdaten ermöglicht werden, für die Planung und Beurteilung zu betrachten. Die Realisierung einer vollständigen Berechnung von Lösungsvarianten stellt u.a. der Ansatz der Kombinatorik dar.
- Die Implementierung eines stochastischen Simulationsmodells zur Berücksichtigung von Unsicherheiten sowie zur Generierung zufälliger Szenarien, um hierdurch die Planungsqualität und damit die Absicherung zu verbessern. Die Ergebnisse der stochastischen Simulation ermöglichen es, Aussagen und Einflüsse zufälliger Parameter, Randbedingungen und Szenarien zu treffen.

- Die Implementierung einer Analysemöglichkeit des Serienanlaufs sowie der Produktion. Lösungsansatz hierfür stellt die Berechnung von Systemkennzahlen für Perioden einer Anlagenlaufzeit dar (Dynamik).
- Die Gestaltung einer rechnergestützten Umgebung zur Vereinfachung routinemäßiger Tätigkeiten. Durch eine softwaretechnische Umsetzung des entwickelten Konzepts kann eine Erhöhung der Automatisierung und Standardisierung des Planungsprozesses erreicht werden.

Abschließend ist der beschriebene Forschungsbedarf in **Tabelle 3.3** zusammengefasst. Er unterteilt sich in vier wesentliche Teilgebiete.

Tabelle 3.3: Forschungsbedarf

Forschungsbedarf	Details
Wissensspeicher	<ul style="list-style-type: none"> – Methode zur Ablage der Daten – Erweiterung der herkömmlichen Informationen – Einheitliche Datengrundlage zur Planung und Beurteilung
Planungssystematik	<ul style="list-style-type: none"> – Methode zur vollständigen Lösungsberechnung
Bewertungsmethode	<ul style="list-style-type: none"> – stochastisches Simulationsmodell unter Berücksichtigung dynamischer Effekte – Lösungs-, Einfluss- und Szenarioanalyse – Beurteilung der Systemleistung im Anlauf und in der Produktion
Umsetzung	<ul style="list-style-type: none"> – softwaretechnischer Demonstrator – Automatisierung und Standardisierung von Routinetätigkeiten

3.7 Ansatz und Einordnung der Arbeit

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht die Entwicklung eines neuen Konzepts zur Planung und Beurteilung von Montagesystemen. Neue, identifizierte Befähiger werden hierbei genutzt, um die Planungszeit zu verkürzen, die Planungskosten zu senken und die Absicherung zu steigern (siehe **Bild 3.12**). Die voranschreitende Modularisierung von Montagesystemen sowie die Standardisierung stellen die ersten beiden Befähiger dar. Diese führen dazu, dass sich ein Baukastensystem aufbauen lässt, welches sich für die Konfiguration von Montagesystemen nutzen lässt (Bottom-up-Planung). Dieser Baukasten enthält in der vorliegenden Arbeit Module für die einzelnen Montagesysteme, die fiktiv oder real zur Verfügung stehen. Zunächst ist der Aufbau dieses Baukastensystems mit zusätzlicher Arbeit verbunden. Mit zunehmendem Inhalt wird hierdurch jedoch die Planung vereinfacht sowie objektive Informationen zur Verfügung gestellt. Die Verwendung eines Baukastensystems im Rahmen des neuen Ansatzes führt zum Befähiger Kombinatorik. Aufgrund einer vorangeschalteten Feinplanung von Modulen ist es möglich, automatisiert alle auf Basis des Baukastens möglichen

Lösungen bei der Variantenbetrachtung mit einzubeziehen (im Folgenden bezeichnet als vollständige Planung). Dieses Vorhaben sowie die Beurteilung der Varianten werden durch Simulationsmodelle, die u.a. stochastische und dynamische Aspekte berücksichtigen, unterstützt. Die erforderlichen Informationen über die Module, Prozesse und Bauteile, die für die Planung und Beurteilung benötigt werden, werden durch einen Wissensspeicher bereitgestellt.

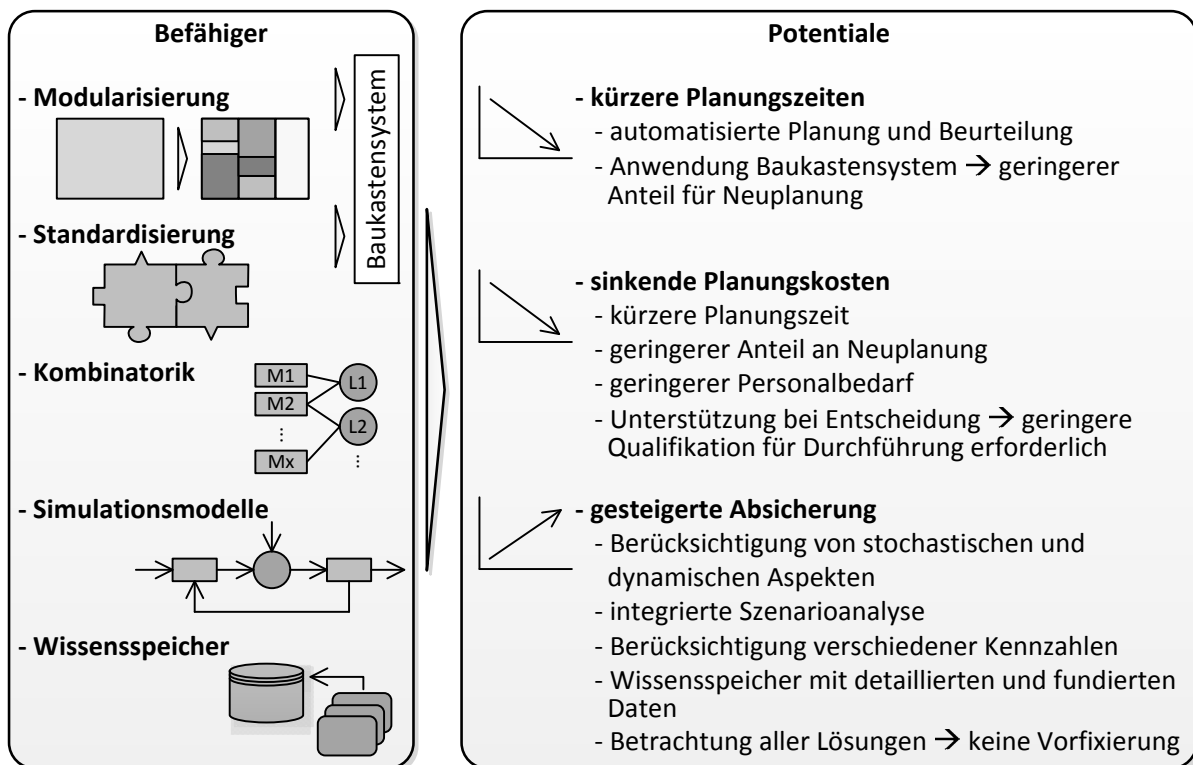


Bild 3.12: Befähiger und Potentiale des neuen Ansatzes

Die Verwendung der beschriebenen Befähiger soll zu kürzeren Planungszeiten, gesenkten Planungskosten sowie zu einer höheren Planungsqualität führen. Die kürzere Planungszeit kann durch die Automatisierung routinemäßiger Schritte erreicht werden. Hierfür werden Simulationsmodelle verwendet, die für jede Planungsaufgabe durch den Planer zu parametrisieren sind. Darüber hinaus bilden vorentwickelte Module die Grundlage für die Konfiguration von Montagesystemen.

Die reduzierten Planungskosten werden neben der geringen Planungszeit vor allem auf die Verwendung von vorentwickelten Modulen sowie die Automatisierung zurückgeführt. Durch die Verwendung eines Baukastensystems als Planungsgrundlage können Kosten für die Neuplanung eingespart werden. Dieser Aspekt sowie die Automatisierung von regelmäßig wiederkehrenden Schritten führen dazu, dass weniger Personal benötigt wird. Weiterhin wird nicht mehr so hoch qualifiziertes Personal benötigt, da die Entscheidungsgrundlage automatisiert aufbereitet und dargestellt wird.

Die erhöhte Planungsqualität ist auf unterschiedliche Aspekte zurückzuführen. Simulationsmodelle zur Konfiguration und zur Berechnung unterschiedlicher Kennzahlen berücksichtigen u.a. stochastische und dynamische Aspekte. Dieses ermöglicht z.B. eine Szenarioanalyse, sodass eine detailliertere und aussagekräftigere Bewertung möglich ist. Darüber hinaus ermöglicht der Ansatz der Kombinatorik die Berücksichtigung aller Lösungen für Montagesysteme (die mit den Modulen eines Baukastensystems möglich sind) im Rahmen einer detaillierten Bewertung. Des Weiteren erhöht die Verwendung eines Wissensspeichers die Daten- und somit die Planungsqualität. Sie ist zum einen auf eine feinere Modellierung, zum anderen auf die Rückkopplung von modulspezifischen Informationen zurückzuführen.

In der vorliegenden Arbeit soll keine grundsätzlich neue Methode für die Planung und Beurteilung von Montagesystemen entwickelt werden. Vielmehr soll der neue Ansatz zur Planung und Beurteilung von Montagesystemen die Phase der Systementwicklung unterstützen (siehe **Bild 3.13**). Hierbei wird nicht das klassische Vorgehen aus Grob- und Feinplanung angewendet, sondern es werden vorentwickelte Module für Montagesysteme verwendet, die in einem vorangegliederten Schritt entwickelt werden (siehe detaillierter in Abschnitt 4.3). Die Planung von Montagesystemen wird folglich auf Basis entwickelter Module, die sich in einem Baukastensystem zusammenfassen lassen, nach dem Bottom-up-Ansatz durchgeführt.

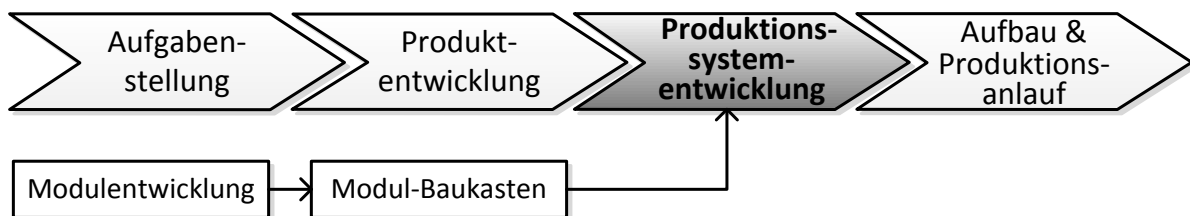


Bild 3.13: Einordnung des neuen Ansatzes zur Planung und Beurteilung von Montagesystemen in den klassischen Planungszyklus

Die Planungsschritte für die Entwicklung von Montagesystemen nach dem neuen Ansatz, die sich aufgrund einer modifizierten Herangehensweise zu aktuellen Planungsmethoden unterscheiden, sind in **Bild 3.14** dargestellt. Durch Verwendung eines Baukastensystems und einer darauf aufbauenden Bottom-up-Planung von Montagesystemen ist die Feinplanung der Module vorab durchzuführen. Die Daten der Module für die Montagesysteme sowie die Daten zu den Prozessen und Bauteilen werden in einem Wissenspeicher abgelegt und für die weiteren Planungsschritte verwendet. Der Wissenspeicher wird kontinuierlich erweitert bzw. mit Erkenntnissen aus dem Einsatz aktualisiert. Wie bei konventionellen Vorgehensweisen stellt die Definition des Planungsproblems den Anstoß dar. Darauf aufbauend wird die Systemverarbeitung, welche die Berechnung der Montagesysteme sowie der Kennzahlen beinhaltet, durchgeführt. Im Anschluss an die Simulation werden die Ergebnisse aufbereitet und zur Beurteilung genutzt. Nach Auswahl eines favorisierten Montagesystems gilt es dieses, wie

auch beim konventionellen Planungsvorgehen, aufzubauen, in Betrieb zu nehmen sowie das System einzusetzen.

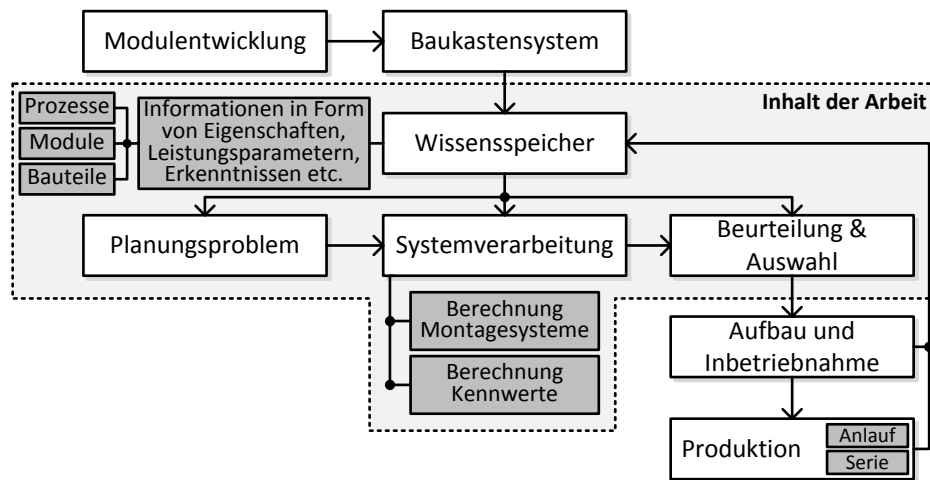


Bild 3.14: Phasen mit neuem Ansatz zur Planung und Beurteilung von Montagesystemen

3.8 Abgrenzung des Betrachtungsbereichs

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt der Handlungsbedarf sowie der Ansatz und die Einordnung der Arbeit aufgezeigt wurden, gilt es, den Betrachtungsbereich sowie die Zielgruppe des neuen Konzepts festzulegen.

Das zu entwickelnde Konzept soll unterschiedliche Hierarchieebenen einer Fabrik beinhalten. Hierzu zählen die Ebenen Station, Zelle und System bzw. Linie. Darüber hinaus lassen sich Montagesegmente, Fabriken und Netzwerke als vernetzte Montagelinien betrachten. Die Ebene der Prozesse wird beim Konzept als Eingangsgröße aufgegriffen.

Der Inhalt der Arbeit richtet sich vor allem an Planer von Montagesystemen der Luftfahrtindustrie, deren spezifischen Anforderungen Berücksichtigung finden. Des Weiteren lassen sich das Konzept (allgemein Werkzeug) sowie die Ergebnisse für die Entscheidungshilfe einsetzen, womit das Management angesprochen ist.

Das Konzept lässt sich neben der Planung von Montagesystemen jedoch auch zur Ermittlung optimaler Betriebsparameter, zur Nachkalkulation und zur reaktiven Feinsteuerung einsetzen.

Kapitel 4

Entwicklung eines Konzepts zur Planung und Beurteilung von Montagesystemen

Das folgende Kapitel beschreibt das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept zur Planung und Beurteilung von Montagesystemen, kurz PEAS (Planning and Evaluating Assembly Systems). Es bildet den Kern der vorliegenden Arbeit. Zunächst werden als Ausgangspunkt die Anforderungen an das PEAS-Konzept definiert und die Zielsetzungen, die damit erreicht werden sollen, festgelegt. Darauf aufbauend wird der Konzeptaufbau im Überblick vorgestellt. Die Schritte und Bausteine des Konzepts werden im Detail erläutert, seine Funktionsweise sowie die eingesetzten Methoden und Werkzeuge werden aufgezeigt. Abschließend wird der Unterschied des neuen Ansatzes zu herkömmlichen Ansätzen beschrieben.

4.1 Zielsetzung und Anforderungen

Wie eingangs erwähnt, stehen produzierende Unternehmen von heute vor der Bewältigung unterschiedlicher Herausforderungen. Es gilt, die Planungsqualität bei Reduzierung der Planungszeit und -kosten zu erhöhen. Die Entwicklung effizienter und produktiver Produktionssysteme für die Fertigung und Montage ist für Unternehmen unabdingbar, um langfristig erfolgreich am Markt zu existieren.

4.1.1 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines neuen Konzepts, welches die Planung und Beurteilung von Montagesystemen in der Luftfahrtindustrie unterstützt und in einem Softwaretool prototypisch umgesetzt werden kann. Unter Berücksichtigung verschie-

dener Komponenten-, Bauteil- und Baugruppenspektren als mögliche Eingangsgrößen und den produzierten Montageerzeugnissen als Ausgangsgrößen sollen mit dem Konzept Montagesysteme gestaltet werden. Die so ermittelten Montagesysteme sollen unterschiedliche, zum Teil konträre anwenderspezifische Kriterien, wie z.B. geringe Investitionskosten oder geringe Durchlaufzeiten, bestmöglich erfüllen.

Das Planungs- und Beurteilungskonzept beschränkt sich auf innerbetriebliche Montage- und Logistiksysteme. Zeitlich gesehen ist der Betrachtungsgegenstand dem taktischen Planungshorizont zuzurechnen, der zwischen der strategischen und der operativen Managementebene angeordnet ist. Dementsprechend bleiben folgende Aspekte unberücksichtigt (in Anlehnung an [Ohl06, S. 103 f.]):

- Vorgelagerte Aktivitäten wie Entwicklungsprozesse.
- Überbetriebliche Planungsaufgaben (z.B. Planung von Montagenetzwerken) sowie Problemstellungen aus dem strategischen Bereich (z.B. Standortplanung).
- Nicht wertschöpfende Unterstützungsbereiche wie Materialeinkauf, Finanzbuchhaltung, Wareneingang/-annahme, Verkauf/Vertrieb, Warenausgang, Auftragsabwicklung etc. Hingegen werden die innerbetriebliche Logistik und notwendige Montagehilfsschritte in die Betrachtung einbezogen.

Im Wesentlichen verfolgt das Konzept acht primäre Ziele, die in **Bild 4.1** zusammengefasst sind und nachfolgend kurz erläutert werden.

Ziel 1: Entwicklung und Integration eines komplett digitalen Konzepts zur Planung und Beurteilung von Montagesystemen in der Luftfahrt

Das erste Ziel des Konzepts ist eine komplett digitale Planung mit integrierter Beurteilung von Montagesystemen unter Berücksichtigung luftfahrtspezifischer Anforderungen. Die Ergebnisse finden Anwendung bei der Absicherung bzw. Unterstützung von z.B. Investitionsmaßnahmen und Betriebsparametern. Bisher herrscht bei der Montageplanung im Allgemeinen eine geringe Durchgängigkeit der Systeme und Methoden (vgl. [Mot08], S. 70). Dies gilt es mit diesem Vorhaben zu verbessern. Angestrebt ist eine frühzeitige Möglichkeit zur Abschätzung und Beurteilung der prinzipiellen Machbarkeit von Montagesystemen im Rahmen der Entwicklung neuer Anlagen. Die Vorgehensweise hierbei unterscheidet sich von konventionellen Planungsmethoden (vgl. neuen Ansatz in **Bild 3.14**). Dem neuen Ansatz ist eine Modulentwicklung vorangeschaltet. Die Ergebnisse werden für die weitere Entwicklung aufgegriffen, indem aus diesen Modulen Montagesysteme konfiguriert werden. Für die anschließende Beurteilung der konzipierten Montagesysteme wird nicht nur das klassische Kennzahlensystem, bestehend aus Kosten, Zeit und Qualität, herangezogen, sondern zudem weitere technische, ökonomische, soziale und ökologische Kriterien. Dieses unter Umständen umfangreiche Beurteilungssystem wird im Rahmen dieses Konzepts definiert und in den Planungsprozess integriert.



Bild 4.1: Zielsetzung des PEAS-Konzepts

Ziel 2: Integration relevanter Daten in einem Wissensspeicher als Grundlage der rechnerunterstützten Planung und Beurteilung

Ein elementares Ziel des Konzepts ist die Erstellung eines Modells, das die Integration der relevanten Daten, d.h. die Eingangsgrößen der Planung und Beurteilung, erlaubt. Zu den Eingangsgrößen, die der sogenannte Wissensspeicher enthalten soll, gehören Daten zu den Montageprozessen, Montagemodulen etc. Darüber hinaus gibt es weitere, für die automatisierte Planung und Bewertung notwendige Informationen, die abgespeichert werden müssen. Hierzu zählen z.B. Eignungsgrade, Kosten und Toleranzen der Module bzw. Bauteile. Durch ein in das Planungswerkzeug integriertes Datenmodell sollen redundante und damit oftmals widersprüchliche Datenbestände vermieden werden. Das Datenmodell soll nicht nur Grundlage für das Konzept und die softwaretechnische Umsetzung sein, sondern kann darüber hinaus als Grundlage für andere Tätigkeiten dienen.

Ziel 3: Vollständige Automatisierung von routineartigen Planungs- und Beurteilungsschritten auf Basis des Wissensspeichers

Ein weiteres Ziel des neuen Konzepts ist die Automatisierung von routinemäßigen Abläufen. In der ständig verkürzten Entwicklungszeit gilt es, unterschiedliche Varianten für Montagesysteme zu planen und zu bewerten, um sich frühzeitig ausreichend abzusichern.

Im Fokus des dritten Ziels steht vor allem die Automatisierung der Berechnung von potentiellen Modulkombinationen für Varianten von Montagesystemen und Kennwerten sowie die darauf basierende Aufbereitung und Darstellung der Simulationsergebnisse. Grundvoraussetzung für die Umsetzung dieses Vorhabens ist die Modularisierung von Montagesystemen sowie dessen Standardisierung, durch die ein Baukastensystem für Montagesysteme ermöglicht wird. Die vorentwickelten Module des Baukastensystems erlauben den Vorschlag von 80:20-Lösungen für Montagesysteme. Ein Simulationsmodell kann an dieser Stelle genutzt werden, um basierend auf Standards Vorschläge für Montagekonzepte bzw. Montagesysteme zu berechnen und diese hinsichtlich vorgegebener Kriterien zu beurteilen.

Ziel 4: Vollständige Ermittlung von Varianten für Montagesysteme

Ziel vier beeinflusst maßgeblich die Grundstruktur des Simulationsmodells zur Ermittlung von Varianten für Montagesysteme. Mit Hilfe eines kombinatorischen Ansatzes werden alle auf Basis des Wissensspeichers möglichen Lösungen für ein vorgegebenes Planungsproblem ermittelt (bezeichnet als vollständig). Dadurch wird gewährleistet, dass alle möglichen Lösungen (auch diejenige, die in Realität unwahrscheinlich sind) berücksichtigt werden. Hintergrund ist, dass eine bestmögliche Lösung für eine Montageaufgabe nur durch Betrachtung und Beurteilung verschiedenartiger Lösungsansätze gefunden werden kann. Darüber hinaus ist es die Aufgabe der Montageplanung, verschiedene Planungsvarianten und -versionen zu erarbeiten. Entsprechend soll das PEAS-Konzept eine vollständige Planungsunterstützung anbieten.

Ziel 5: Implementierung eines multikriteriellen Kennzahlensystems zur Beurteilung der Varianten

Für die Beurteilung der Varianten müssen aussagefähige Kennzahlen herangezogen werden. Es sind Kennzahlen zu berücksichtigen, die eine weite Bandbreite abdecken und sich ergänzen, um so die Planungssicherheit zu steigern. Verwendung finden sollen hierbei Kennzahlen aus dem Stand der Technik (vgl. Abschnitt 3.1.3), die ggf. hinsichtlich der Anforderungen erweitert bzw. modifiziert werden. Zur Auswahl einer favorisierten Lösung soll es ermöglicht werden, alle Kennzahlen unter Verwendung von Gewichtungsfaktoren zu berücksichtigen, um vom Modell die spezifisch geeignete Lösung vorgeschlagen zu bekommen.

Ziel 6: Berücksichtigung von Unsicherheiten

Das Ergebnis eines Planungsprozesses hängt entscheidend von den getroffenen Annahmen ab, die als Eingangsgrößen in den Prozess und Wissensspeicher einfließen. Realistische Annahmen sind dabei in der Regel schwer zu treffen, dies liegt an der hohen Komplexität, Dynamik und Unsicherheit, die Unternehmen maßgeblich beeinflussen. Somit gilt es, ein geeignetes Modell zu verwenden, mit dem Unsicherheiten in Form von z.B. Abweichungen von

erwarteten Zeiten sowie Eintrittszeitpunkt und Auswirkungen von Störungen im Serienanlauf sowie im Serienbetrieb modelliert werden können. Zur Ausrichtung des Modells ist folglich zunächst eine Analyse der Stör- und Einflussgrößen der Produktion, speziell hinsichtlich des Serienanlaufs, erforderlich. Die in der Analyse berücksichtigten Faktoren sind in **Bild 4.2** dargestellt. Die Größen sind dem Prozess, Produkt, Material/Rohstoff, Organisation/Personal, Informationen/Umfeld sowie der Maschine zugeordnet. Quantitativ bestimmbare Größen werden im Simulationsmodell sowie im Wissenspeicher berücksichtigt.

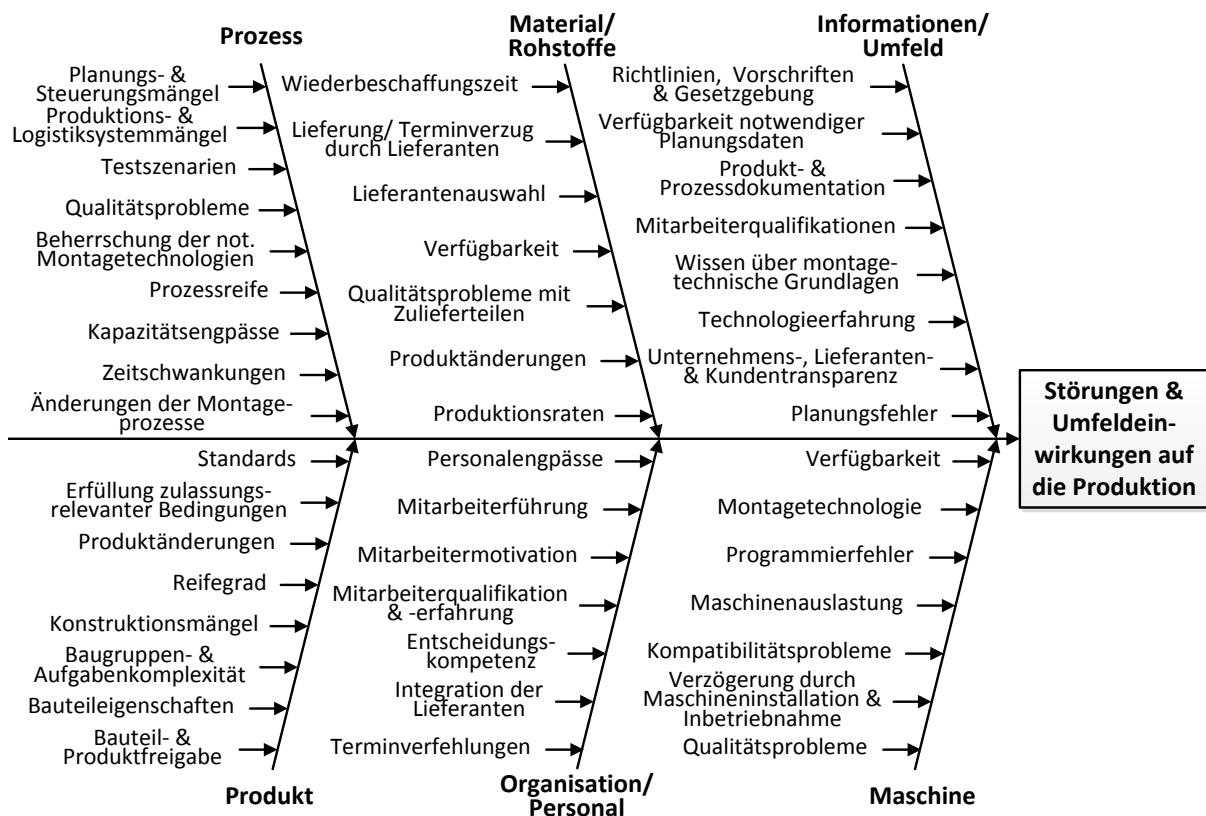


Bild 4.2: Stör- und Einflussgrößen einer Produktion (speziell Serienanlauf) (in Erweiterung zu [SR10, S. 13])

Ziel 7: Szenarioanalyse zur Abschätzung von Auswirkungen auf Zielgrößen

Wie das sechste Ziel beschreibt, können unterschiedlich getroffene Annahmen einen großen Einfluss auf den Planungsprozess haben. Um unterschiedliche Annahmen sowie deren Auswirkungen auf Zielgrößen abschätzen zu können, ist eine Szenarioanalyse hilfreich. Eine Szenarioanalyse baut entweder auf manuell vorgegebenen Szenarien oder auf maschinell erzeugten Szenarien auf. Im Rahmen der Arbeit wird eine zufällige Szenariogenerierung, in einem vom Anwender definierten Bereich für relevante Parameter, durchgeführt. Dadurch ist es möglich ein größeres Spektrum an Verläufen sowie Verläufe, die bislang noch unberücksichtigt blieben, zu berücksichtigen, was die Qualität der Beurteilung positiv beeinflusst.

Ziel 8: Berücksichtigung anlaufspezifischer und serienspezifischer Anforderungen

Wie bereits eingangs der Arbeit beschrieben worden ist, hat der Serienanlauf in der Luftfahrtindustrie aufgrund der sehr langen Zeit bis zur Kammlinie einen hohen Stellenwert bei der Planung. Aktuelles Planungswerkzeug ist jedoch nicht darauf ausgelegt, sodass der Serienanlauf in der Planung nahezu unberücksichtigt bleibt. Das neue Konzept soll die Analyse des Serienanlaufs sowie der Serienproduktion unterstützen. Anlaufspezifische Faktoren wurden bereits bei der Analyse der Stör- und Einflussgrößen erarbeitet (siehe **Bild 4.2**).

4.1.2 Anforderungen

Die Anforderungen an das PEAS-Konzept lassen sich aus dem identifizierten Handlungsbedarf (siehe Abschnitt 3.6) sowie der Zielsetzung (siehe Abschnitt 4.1.1) ableiten. Demnach sollte das neue Konzept zur Planung und Beurteilung von Montagesystemen mindestens folgende Punkte berücksichtigen:

- Implementierung eines umfangreichen Wissensspeichers als Planungs- und Beurteilungsgrundlage,
- Erweiterung der herkömmlichen Systemverarbeitung um einen Algorithmus zur
 - vollständige Berechnung von Montagesystemen,
 - Szenarioanalyse, um Auswirkungen unterschiedlicher Annahmen abschätzen zu können,
- Berücksichtigung von Unsicherheiten in Form von z.B. zeitlichen Schwankungen und Störungen im Serienanlauf sowie in der Produktion,
- multikriterielles Bewertungssystem, bestehend aus ökonomischen, technologischen, sozialen und ökologischen Kennwerten,
- Berücksichtigung anlaufspezifischer und serienspezifischer Einflussfaktoren und
- Umsetzung des Konzepts in eine softwaretechnische Umgebung zur Vereinfachung von routinemäßigen Tätigkeiten (z.B. Varianten- und Kennwertberechnung, Ergebnisdarstellung und -auswertung), die sich durch eine unkomplizierte und intuitive Bedienbarkeit auszeichnet.

Darüber hinaus wäre es wünschenswert, wenn das Konzept weitere Anforderungen erfüllte. Hierzu zählen:

- Automatisierung der Berechnung und Bewertung von Montagesystemen: Die unterschiedlichen Montagesysteme sollen aufbauend auf den im Wissensspeicher hinterlegten Daten möglichst hoch automatisiert berechnet und bewertet werden. Hierfür gilt es, geeignete und allgemeingültige Algorithmen zu implementieren, die sich sowohl für die Berechnung von Varianten als auch zur Berechnung der Kennzahlen eignen. Die

Automatisierung der Planung und Beurteilung beschleunigt zum einen den Planungsprozess. Zum anderen kann der Aufwand bei der Ermittlung eines geeigneten Montagesystems bzw. von Montagesystemkonfigurationen verringert werden. Zusätzlich ist dieser Schritt der Automatisierung unerlässlich, wenn eine große Anzahl und Vielfalt an Varianten analysiert werden sollen.

- Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen im Bewertungsmodell: Das Kennzahlensystem sollte die Anforderungen der Luftfahrtindustrie berücksichtigen. Bspw. spielt hierbei der Serienanlauf eine wichtige Rolle. Diese Phase bis zum Erreichen der Kammlinie in der Produktion kann im Vergleich zu anderen Branchen deutlich länger andauern (bis zu zehn Jahren). Zudem besitzen die Hersteller in der Luftfahrtindustrie mit dem Serienanlauf relativ wenig Erfahrung, was im Vergleich zu anderen Industriezweigen an der geringen Anzahl von Flugzeugprogrammen liegt, die jedoch sehr lange produziert werden.
- Benutzerschnittstellen zur einfachen Bedienung und besseren Akzeptanz für
 - Eingangsdaten: Hierzu zählen vor allem die Eingangsdaten des Wissensspeichers sowie die benutzerspezifischen Eingaben zum Planungsproblem. Empfehlenswert ist dabei sowohl die Möglichkeit zum Anlegen eines neuen Wissensspeichers als auch die Möglichkeit, einen vorhandenen zu erweitern bzw. die Parameter anzupassen.
 - Ausgangsdaten: Eine Visualisierung und Darstellung der Simulationsergebnisse mit der Möglichkeit einer detaillierteren Analyse ist anzustreben. Dabei ist eine Auswertung der unterschiedlichen Szenarien mit eventueller Ableitung charakteristischer Größen inbegriffen.
- Analyse paralleler Module von Montagesystemen: Im Rahmen der Auswertung ist eine Analyse charakteristischer Kennzahlen in Abhängigkeit der Anzahl parallel eingesetzter Module anzustreben. Dieser Schritt ermöglicht es dem Planer zu untersuchen, ob sich die höheren Investitionskosten rentieren und welche Auswirkung parallele Module auf weitere Systemkenngrößen besitzen.
- Analyse unterschiedlicher Organisationsformen: Je nach Montageaufgabe ist evtl. eine andere Organisationsform zu bevorzugen, z.B. das Fließprinzip oder Werkbankprinzip. Eine Auswahl von Organisationsformen im Konzept ist wünschenswert.
- Berücksichtigung des Unternehmensumfelds: Das Umfeld produzierender Unternehmen kann einen großen Einfluss besitzen. Zur Implementierung in der Planungsumgebung sollte ein geeignetes Umfeldmodell entwickelt werden. Auch hierbei spielen die Anforderungen an Unternehmen der Luftfahrtindustrie eine entscheidende Rolle.
- Allgemeines und erweiterbares Konzept: Angestrebt ist die Entwicklung eines Konzepts, das sich auf unterschiedliche Fragestellungen anwenden lässt. Eine offene Gestaltung ist anzustreben, um es bei Bedarf anpassen zu können.

4.2 Eingesetzte Methoden und Werkzeuge

Die Ermittlung der Varianten für Montagesysteme wird im Rahmen des PEAS-Konzepts mit Hilfe der Kombinatorik durchgeführt. Dies führt zu einer vollständigen Betrachtung möglicher Systemlösungen. Alle Lösungen werden in der anschließenden Beurteilung miteinander verglichen. Hierfür wird ein multikriterielles Kennzahlensystem verwendet, welches aus ökonomischen, technologischen, ökologischen und sozialen Kennzahlen besteht. Für die Berechnung wird ein stochastisches Simulationsmodell verwendet, welches auch dynamische Aspekte berücksichtigt. Die Berechnungsergebnisse werden für die Auswertung aufbereitet und in Kennfeldern etc. dargestellt.

Für die komplette Planung und Beurteilung werden vorparametrisierte Modelle verwendet. Daten des Wissensspeichers (Informationen zu den Modulen, Prozessen und Bauteilen) sowie benutzerspezifische Angaben (insbesondere Simulationsparameter) werden für die Parametrisierung verwendet.

4.3 Neuartigkeit des Konzepts

Im Vergleich zu den konventionellen Methoden der Planung und Beurteilung von Montagesystemen werden durch das PEAS-Konzept eine Vielzahl von neuen Aspekten aufgegriffen, um eine anforderungsgerechtere Auslegung von Montagesystemen zu erzielen. Der Anreiz für die neue Vorgehensweise kommt durch das derzeit aufkommende Bestreben nach einer höheren Standardisierung und einer steigenden Modularisierung von Produktionssystemen zustande. Voraussetzung für die Umsetzung ist der Einbezug eines Modulbaukastens bzw. einer Modularchitektur. Somit geht dem Einsatzbereich der Neuentwicklung eine Feinplanung der Module für Montagesysteme voraus, auf dessen Basis die Montagesysteme vollständig geplant und beurteilt werden.

In **Bild 4.3** ist der Planungsablauf herkömmlicher Ansätze im Vergleich zum neuen Ansatz des PEAS-Konzepts dargestellt. Ausgangspunkt einer Neuplanung von Montagesystemen ist die Einführung eines neuen Produkts oder Änderungen an aktuellen Produkten. Ausgelöst wird dadurch die Entwicklung des neuen bzw. modifizierten Produkts (siehe Prozesskette in Abschnitt 2.3). Zur Montage dieser Produkte werden geeignete Montagesysteme benötigt. Im ersten Schritt der Planung werden gleichermaßen bei beiden Ansätzen die Anforderungen samt Montagereihenfolge definiert. Die Parameter der Anforderungen sowie der Montagereihenfolge sind mit Unsicherheiten behaftet und deren Auswirkungen sind meistens unklar. Montagesysteme werden vor allem aufbauend auf produktgetriebenen Anforderungen entwickelt. Bei konventionellen Planungsmethoden wird die Entwicklung von Montagesystemen

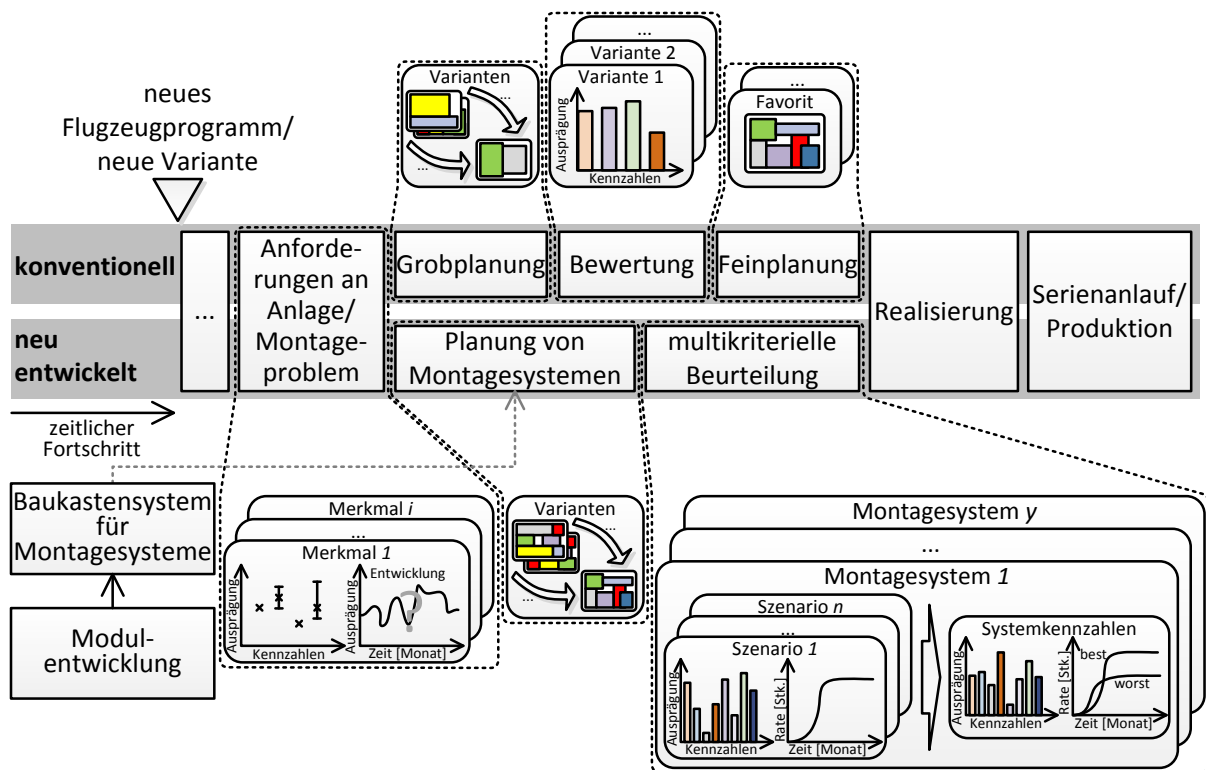


Bild 4.3: Gegenüberstellung des konventionellen und neu entwickelten Planungsablaufs

in der Regel nach dem Top-down-Ansatz durchgeführt. Hierbei werden in der Grobplanung zunächst unterschiedliche Varianten entwickelt, die anschließend bewertet werden. Für die Bewertung einzelner Varianten werden meistens ausgewählte ökonomische und technische Kennzahlen verwendet, mit denen in der Regel eine charakteristische Größe für die gesamte Anlagenlaufzeit berechnet wird. Nach der Auswahl eines Favoriten wird herkömmlich die Feinplanung durchgeführt. Beim neuen Ansatz erfolgt die Konzipierung von Montagesystemen auf Grundlage von bereits entwickelten Modulen für Montagesysteme (Baukastensystem) nach einem Bottom-up-Ansatz. Betrachtet werden hierbei alle auf Basis des Baukastens möglichen Varianten, ohne bereits im Vorfeld einige davon auszuschließen. Durch die Verwendung fundierterer Daten mittels vorentwickelter und evtl. getesteter Module sowie einer detaillierteren Modellierung der Zusammenhänge und der Berücksichtigung dynamischer und stochastischer Effekte ist eine genauere Beurteilung aller Varianten möglich. Verwendet wird hierfür ein multikriterielles Kennzahlensystem, welches aus ökonomischen, technologischen, sozialen und ökologischen Kennzahlen besteht. Diese werden mit Hilfe eines Simulationsmodells berechnet. Die Berechnung der Kennzahlen erfolgt für definierte Zeitintervalle des gesamten Anlagenlebenszyklus. Auf Basis der Simulationsergebnisse lässt sich eine Szenarioanalyse durchführen, mit der zum einen die Auswirkungen von unsicheren Eingangs- und Störgrößen abgeschätzt werden können. Zum anderen lassen sich Systemkennzahlen für gute und schlechte Szenarien sowie Eingangsparameter und Voraussetzungen ermitteln.

Im Anschluss an die Beurteilung erfolgt die Auswahl der optimalen Variante. Die letzten Schritte bei beiden Ansätzen beinhalten den Aufbau des Montagesystems sowie der Serienanlauf und die Serienproduktion.

Die entwickelte softwaretechnische Umgebung, die auf dem PEAS-Konzept basiert, integriert die Planung und Beurteilung in einem erweiterbaren, anpassbaren und modularen Werkzeug. Schnittstellen zum Anwender sind der Wissensspeicher, die Parameterabfrage sowie die Kennfelddarstellung im Rahmen der Beurteilung. Die Prozesse, Module für Montagesysteme und Bauteile inklusive ihrer spezifischen Eigenschaften sind im Wissensspeicher frei anleg-, definier- und bearbeitbar. Dadurch können sie den individuellen Gegebenheiten angepasst werden. Im Rahmen der Beurteilung ermöglicht die Softwareumgebung, alle Ergebnisse in Kennfeldern und Diagrammen darzustellen.

4.4 Grundaufbau und Definitionen

Das entwickelte Konzept PEAS besteht aus mehreren Hauptschritten. Ausgehend von einer konkreten Problemstellung – einer spezifischen Montageaufgabe mit gegebenen Bauteilen und Randbedingungen – werden alle aus dem Baukasten möglichen Varianten für Montagesysteme berechnet. Welche dieser Montagesystemkonfigurationen das Optimum repräsentiert, wird in der anschließenden Beurteilung ermittelt. Die Kennzahlen für die Beurteilung werden mit Hilfe eines stochastischen Simulationsmodells unter Berücksichtigung dynamischer Aspekte berechnet.

Der Grundaufbau des verfolgten Ansatzes ist in **Bild 4.4** als Drei-Säulen-Darstellung aufgezeigt. Das Konzept besteht aus drei Bausteinen: dem Simulationsbaukasten, der Systemverarbeitung mit dem Algorithmus für die kombinatorische Berechnung von Varianten für Montagesysteme sowie dem stochastischen Simulationsmodell und der Beurteilung mit abschließender Visualisierung der Ergebnisse.

Der Baustein Simulationsbaukasten dient als Wissensspeicher und beinhaltet den Großteil der notwendigen Informationen über die Module für Montagesysteme, Bauteile und Montageprozesse. Dazu zählen bspw. Informationen zu Prozesszeiten inklusive potentieller Abweichungen, Eignungsgrade der Module, Präzedenzbeziehungen der Prozesse und Verträglichkeiten zwischen den Modulen und Bauteilen. Zusätzlich werden für Teilschritte des Konzepts weitere benutzerspezifische Angaben benötigt, die jeweils an entsprechender Stelle abgefragt werden. Auf die abgespeicherten Informationen wird im weiteren Verlauf zurückgegriffen. Der Datenspeicher stellt einseitig die Schnittstelle zwischen der Planung und dem Produkt, den Prozessen und den Ressourcen dar. Somit bildet er die Grundlage der anderen beiden Konzept-Bausteine.

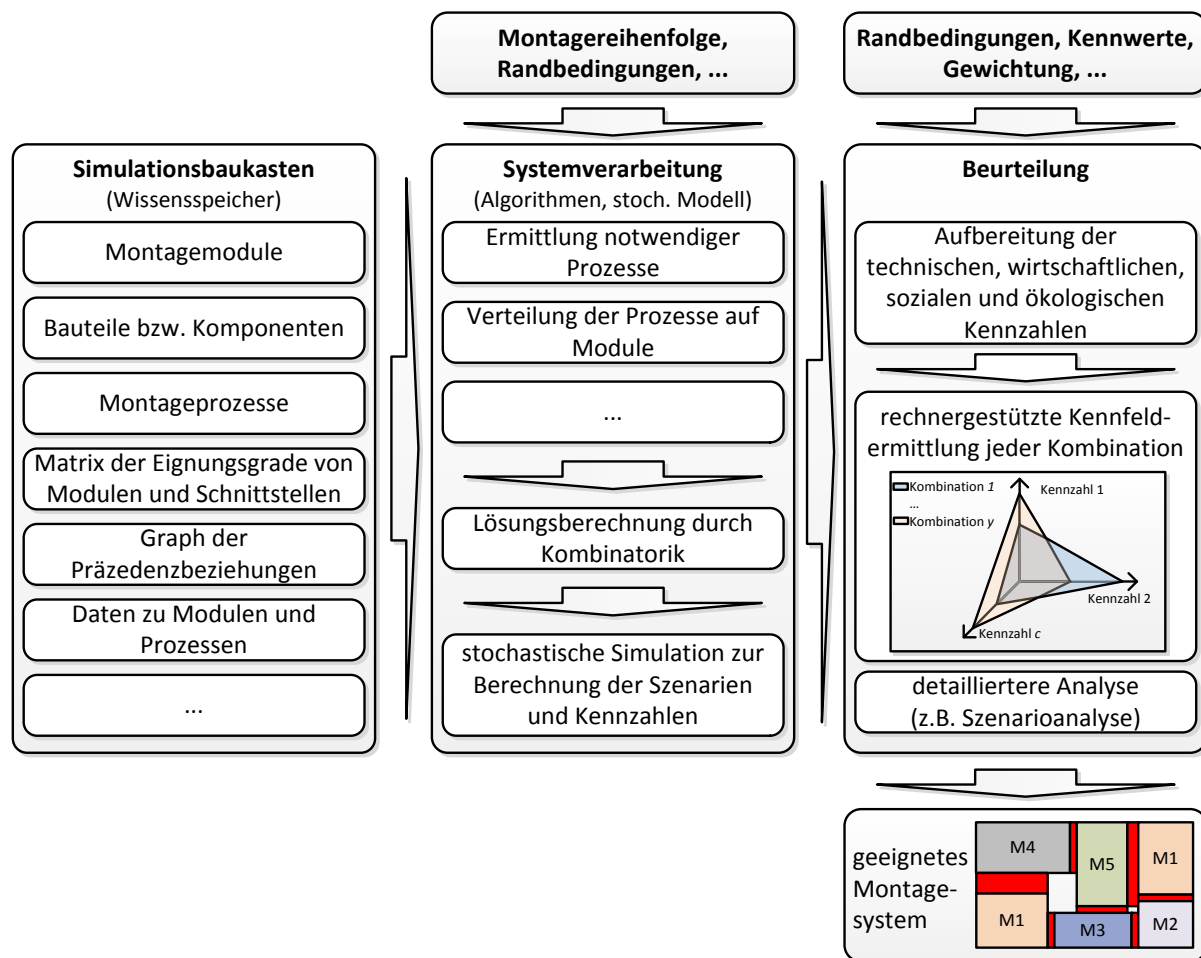


Bild 4.4: Grundaufbau des Konzepts PEAS als Drei-Säulen-Darstellung (vgl. [Wei11a, S. 702], [Wei11b, S. 845])

Der zweite Baustein beinhaltet die Algorithmen und Modelle der Systemverarbeitung. Diese sind notwendig, um zum einen die unterschiedlichen Montagesysteme vollständig zu berechnen und zum anderen die Bewertungsgrundlagen zu ermitteln. Zur Berechnung der Varianten für Montagesysteme wird die Methode der Kombinatorik, auch als vollständige Enumeration bezeichnet, angewendet. In diesem Schritt wird neben der Berechnung der Montagesysteme bereits die Umsetzbarkeit für das implementierte Planungsproblem überprüft. Dazu werden zusätzliche Informationen zur Montagereihenfolge, bestehend aus Prozessen und Bauteilen, sowie weiteren Randbedingungen benötigt, die aus dem Wissensspeicher abgefragt werden.

Für die Berechnung der Kennwerte, die bei der Beurteilung genutzt werden, wird ein stochastisches Simulationsmodell verwendet. Neben stochastischen Größen sollen hierbei auch dynamische Aspekte berücksichtigt werden. Mit dem Modell wird schließlich die Grundlage für die Durchführung einer Szenarioanalyse geschaffen. Für diesen Schritt benötigte Eingangsgrößen wie Informationen zu den Modulen und der Aufgabe stammen aus den benutzerspezifischen Angaben und dem Wissensspeicher.

Im Anschluss an die Systemverarbeitung müssen die Simulationsergebnisse aufbereitet und ausgewertet werden. Dafür wird der Beurteilungs-Baustein herangezogen. Für die Beurteilung aller berechneten Montagesysteme und generierten Szenarien werden unterschiedliche technische, wirtschaftliche, soziale und ökologische Kennwerte verwendet, die anwenderspezifisch in Kennfeldern dargestellt werden können. Anhand der Kennfelder lässt sich entweder die am besten geeignete Lösung unter allen Montagesystemen durch den Anwender ermitteln oder durch das System vorschlagen. Insofern eine Lösung vorgeschlagen werden soll, gilt es eine Gewichtung der Kennzahlen vorzugeben.

Die Ausgestaltung der einzelnen Bausteine des neuen Konzepts wird in den Kapiteln 5 bis 7 beschrieben.

4.5 Methodisches Vorgehen

Um die in Abschnitt 4.1.1 gesteckten Ziele zu erreichen, wird das in **Bild 4.5** dargestellte methodische Vorgehen für die Entwicklung der einzelnen Bausteine angewendet. Das gewählte methodische Vorgehen soll zum einen dazu beitragen, dass die Anforderungen an die Planung Berücksichtigung finden, zum anderen kann nur dadurch eine erfolgreiche Interaktion der Bausteine gewährleistet werden. Eine elementare Voraussetzung dafür ist, dass die jeweilig notwendigen Informationen und Daten transferiert bzw. an geeigneter Stelle zur Verfügung gestellt werden können.

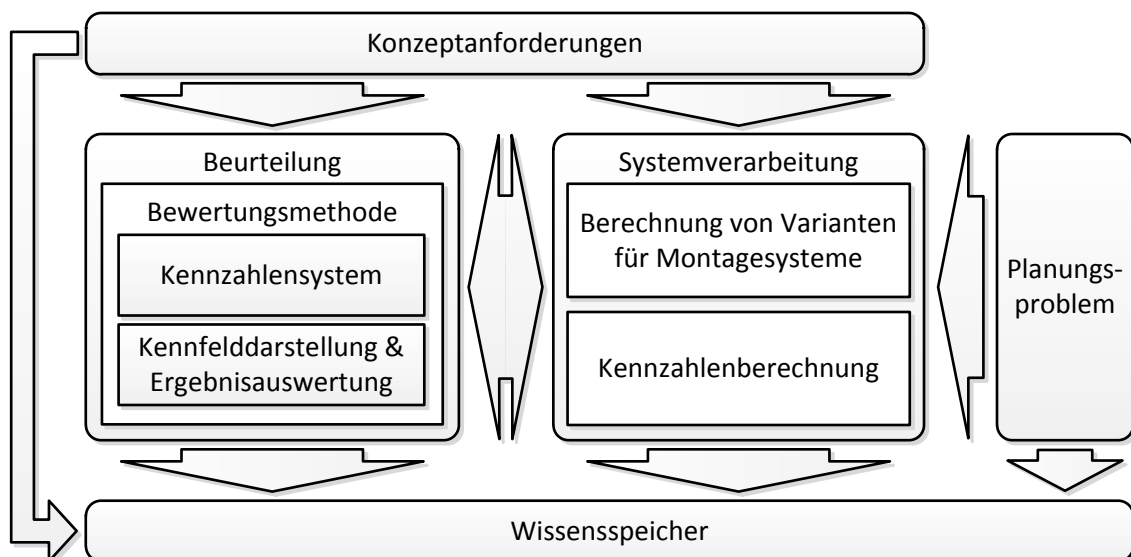


Bild 4.5: Methodisches Vorgehen bei der Baustein-Entwicklung

Die Konzeptanforderungen sind bei der Entwicklung der drei Bausteine Wissensspeicher, Systemverarbeitung und Beurteilung zu berücksichtigen. Der erste Entwicklungsschritt beinhaltet die Ermittlung einer Bewertungsmethode sowie eines multikriteriellen Kennzahlensystems. Die Ergebnisse dieses Schritts müssen bei der Systemverarbeitung berücksichtigt werden. Im Rahmen der Systemverarbeitung werden aufbauend auf dem vorgegebenen Planungsproblem Varianten für Montagesysteme und Kennzahlen berechnet. Im Anschluss gilt es, diese an den Beurteilungs-Baustein zu übermitteln, damit sie dort für die Auswertung aufbereitet werden können. Die Anforderungsdefinition des Wissensspeichers muss auf die Bausteine Beurteilung und Systemverarbeitung abgestimmt sein, da dieser die notwendigen Informationen für die gesamte Planung und Beurteilung zur Verfügung stellt.

4.6 Einbindung in aktuellen Entwicklungsprozess

Das Konzept kann in unterschiedlichen Entwicklungsschritten eingesetzt werden. In einem frühen Planungszeitraum können damit erste Szenarien und unterschiedliche Montagesysteme untersucht werden. Schon während der Produkt-Konzeptentwicklung lassen sich so Aussagen über die Montagesysteme und die Machbarkeit treffen, die zur Entscheidungsfindung herangezogen werden können.

Mit fortschreitender Projektlaufzeit lassen sich reale Daten aus den ersten Umsetzungen im Planungswerkzeug implementieren, um die Ergebnisse zu überprüfen bzw. zu verbessern. Diese Erfahrungswerte lassen sich darüber hinaus für zukünftige Planungsmaßnahmen verwenden.

Das Konzept kann auch erst nach dem Hochlauf der Produktion Einsatz finden. Dann kann es für die Ermittlung von Vorgabezeiten, geeigneter Betriebsparameter und eventuellen Optimierungsmaßnahmen verwendet werden. Die dazu benötigten Daten und Module sind im Wissensspeicher abgelegt, sodass das gewählte Montagesystem abgebildet werden kann. Zusätzlich benötigte Funktionen und Kennzahlen zur Analyse können in das Modell implementiert werden.

Nach den in Abschnitt 2.3 aufgezeigten Planungs- und Bewertungsprozessketten lässt sich das Konzept folglich in mehreren Phasen zur Unterstützung einsetzen, primär bleibt hier jedoch die Ideenphase zu nennen, für welche das Konzept ursprünglich entwickelt wird. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist nicht die Entwicklung einer komplett neuen Planungsmethode, sondern der Aufbau eines Konzepts zur Unterstützung der Planungsphase zur Entwicklung von Montagesystemen.

Kapitel 5

Entwicklung einer Bewertungsmethode und eines Bewertungsmodells

Zum Aufbau eines rechnergestützten Werkzeugs für die Planung und Beurteilung von Montagesystemen ist eine Bewertungsmethode inklusive einem Bewertungsmodell erforderlich. Die Bewertungsmethode beschreibt das Vorgehen. Das Modell dient als Grundlage für die Kennzahlenberechnung. Die berechneten Kennzahlen werden für die Beurteilung der unterschiedlichen Varianten für Montagesysteme herangezogen und lassen sich in Kennfeldern darstellen.

Die Ergebnisse der Beurteilung sollen durchgängig digital aus den Daten der berechneten Varianten für Montagesysteme und den Daten des Wissensspeichers ermittelt werden. Der Wissensspeicher ist folglich so auszulegen, dass die dort hinterlegten Informationen eine Berechnung der Kennzahlen zulässt.

5.1 Anforderungen

Ein bewährtes Prinzip bei der Planung von Montagesystemen ist die Entwicklung von Varianten. Diese werden bewertet, um die beste Lösung zu ermitteln. (vgl. mit Stand der Technik und Forschung in Kapitel 3)

Die Darstellung der Anforderungen an die Bewertungsmethode und das Bewertungsmodell ist in Anlehnung an Förster [För99, z.B. S. 27] in Bewertungsziel, -objekt, -dimension und -kriterien unterteilt.

Die Bewertung muss es ermöglichen, alle Varianten für Montagesysteme gegenüberzustellen, um mittels der dadurch aufgedeckten Unterschiede die am besten geeignete Lösung zu identifizieren.

Als Bewertungsobjekt gelten im Rahmen der Arbeit Montagesysteme, die der Ressourcenebene Station, Zelle und Linie zugeordnet werden. Eine Erweiterung auf anderen Ebenen ist jederzeit möglich. Zu beachten ist, dass durch die Einschränkung Aspekte, die sich durch eine Interaktion von einzelnen Einheiten auf anderen Ebenen ergeben, unberücksichtigt bleiben. Die ermittelten Montagesysteme unterscheiden sich in ihrer Modulzusammensetzung von anderen Montagesystemen. Das Modell zur Beurteilung soll dies als Bewertungsdimension multikriteriell berücksichtigen.

Darüber hinaus soll die Bewertungsmethode und das Bewertungsmodell es ermöglichen, die Varianten hinsichtlich teilweise konkurrierender und konträrer Kriterien zu analysieren, um so dem Anwender die beste Lösung aufzuzeigen.

Aus der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit lassen sich mit Hilfe der Randbedingungen folgende Anforderungen an die Bewertungsmethode sowie an das Bewertungsmodell ableiten:

- Monetäre und nicht monetäre Verfahren: Um eine multikriterielle Beurteilung zu ermöglichen ist ein Bewertungsmodell mit ökonomischen, technologischen, ökologischen und sozialen Kriterien aufzubauen. Die Kriterien dürfen sowohl weiche als auch harte Faktoren beinhalten, sollten jedoch berechenbar sein.
- Berücksichtigung von Unsicherheiten: Das Modell muss so gestaltet sein, dass es die bestehenden Unsicherheiten der zukünftigen Entwicklung abbildet und modelliert. Hierbei ist bspw. an die Einbindung unterschiedlicher Szenarien zu denken, um so Auswirkungen z.B. über Systemausfälle von Modulen und Störungen analysieren zu können.
- Analyse der Anlagenlaufzeit: In der Regel werden heutzutage ausschließlich statische Kennzahlen für Produktionssysteme berechnet. Darunter wird im Rahmen dieser Arbeit verstanden, dass die Kriterien-Ausprägung die Systemeigenschaft für die gesamte Anlagenlaufzeit charakterisiert. In der Realität ändern sich aber während der verschiedenen Phasen der Laufzeit die beeinflussenden Parameter, z.B. verringern sich Prozesszeiten aufgrund von Lerneffekten und Ausfallwahrscheinlichkeiten steigen. Aus diesem Grund gilt es, ein geeignetes Modell zur Verfügung zu stellen, mit dem diese Effekte abgebildet werden. Konkret bedeutet dies, dass relevante Kennzahlen schließlich für jede Periode im Betrachtungshorizont unter Berücksichtigung der Effekte zeitabhängiger Größen kalkuliert werden sollen.

5.2 Bewertungsmethode

Die Methode zur Bewertung der berechneten Montagesysteme beinhaltet in der vorliegenden Arbeit vier Schritte, die in **Bild 5.1** als Übersicht zusammengefasst sind.

Um eine aussagekräftige Bewertung zu ermöglichen, wird ein multikriterielles Kennzahlensystem benötigt (vgl. [Mos07, S. 37]). Die Berechnung der Kennzahlen erfolgt unter Anwendung

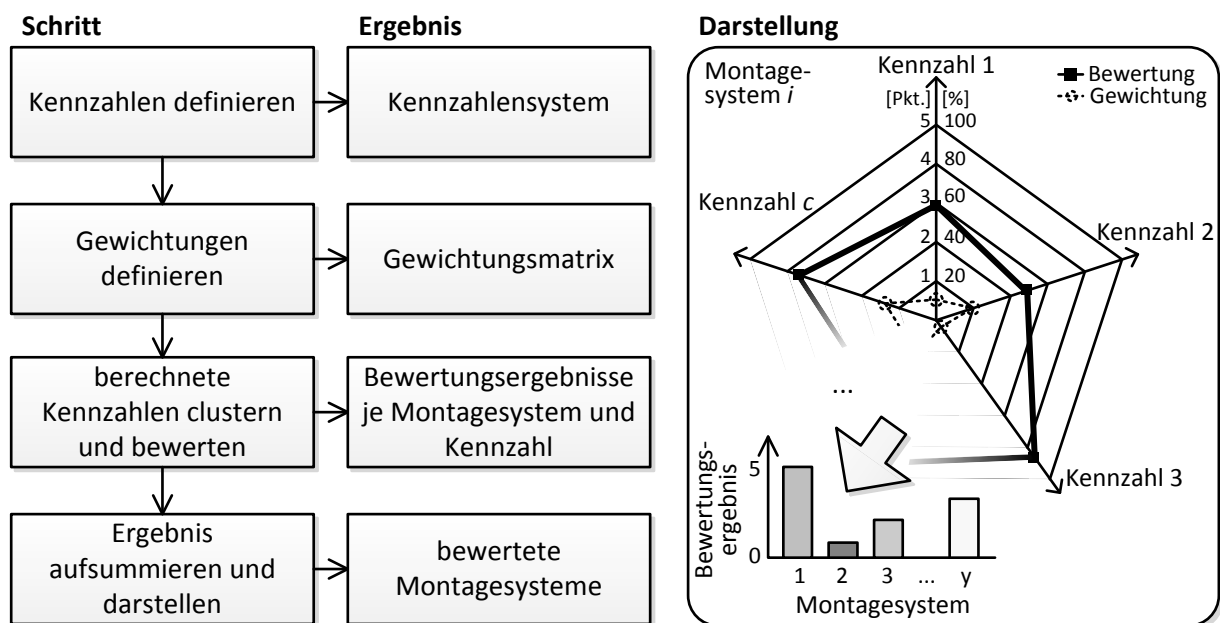


Bild 5.1: Vorgehensweise und Darstellung der Bewertungsmethode

eines stochastischen Simulationsmodells für unterschiedliche Szenarien. In der Beurteilung lassen sich zum einen Lagemaße dieser Simulationsergebnisse darstellen, zum anderen kann eine detaillierte Auswertung der Szenarien und Einflussgrößen erfolgen.

Damit die unterschiedlichen Kennzahlen in der Analyse der Montagesysteme adäquat Berücksichtigung finden, werden sie auf ein einziges Bewertungsergebnis pro Montagesystem komprimiert. Dazu wird zunächst eine Gewichtung der Kennzahlen vorgenommen. Um im Rahmen der Beurteilung das am besten geeignete Montagesystem vorschlagen zu können, müssen die Gewichtungen des Kennzahlensystems \vec{G} (eine Gewichtung pro Kennzahl) durch den Anwender vorgegeben werden. Der Vektor \vec{G} beinhaltet die Gewichtungsfaktoren g_i der Kennzahl i , $i = 1, \dots, c$ (Gleichung 5.1).

$$\vec{G} = (g_1, g_2, g_3, \dots, g_c)^T \quad (5.1)$$

Anschließend werden die berechneten Kennzahlen über alle Montagesysteme geclustert und mit Bewertungspunkten (von einem Punkt für eine schlechte Erfüllung bis hin zu fünf Punkten für eine sehr gute Erfüllung) bewertet. Für die Clusterung lassen sich prinzipiell unterschiedliche Ansätze verfolgen. Zur Einteilung der Clustergruppen wird eine lineare Aufteilung zwischen den minimalen und maximalen Ergebnissen der Kennzahlen verwendet, um eine detaillierte Unterteilung zu ermöglichen. Auf diese Weise ergeben sich Bewertungspunkte b_{k_i, L_j} für jede Kennzahl i und jede Lösung für ein Montagesystem L_j .

Das Bewertungsergebnis B_j für jedes Montagesystem j lässt sich nach der Berechnungsvorschrift in Gleichung 5.2 berechnen.

$$B_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^c g_i} \cdot \sum_{i=1}^c b_{k_i, L_j} \cdot g_i \quad (5.2)$$

Anhand dieser Ergebnisse lässt sich das am besten geeignete Montagesystem ermitteln: Je größer das Ergebnis, desto besser wird das Montagesystem angesehen.

5.3 Bewertungsmodell

Um die Leistungsfähigkeit des neuen Konzepts nachzuweisen, wird ein multikriterielles Kennzahlenmodell verwendet. Dieses Kennzahlenmodell beinhaltet klassische Kennzahlen aus dem Stand der Technik (vgl. Abschnitt 3.1.3) und für diese Arbeit exemplarisch definierte Kennzahlen auf Basis empirischer Werte.

Die für diese Arbeit exemplarisch definierten Kennzahlen werden verwendet, um eine multi-kriterielle Beurteilung mit technologischen, ökonomischen, sozialen und ökologischen Kennzahlen zu ermöglichen. Diese Kennzahlen wurden mit Hilfe von Experteninterviews und Recherchen identifiziert.

Die im Bewertungsmodell berücksichtigten Kennzahlen sowie die dafür benötigten Eingangsgrößen sind in **Bild 5.2** zusammengefasst. In die Übersicht sind die vereinfachenden Zusammenhänge zwischen den Parametern und Kennzahlen eingezeichnet. Die Fundstellen der Formeln für die einzelnen Kennzahlen stehen neben der jeweiligen Kennzahl (Kennzahl aus dem Stand der Technik mit Gleichungsnummern 3.x und für die Arbeit definierten Kennzahlen mit Gleichungsnummern 5.x). Die Berechnungsvorschriften der Kennzahlen aus dem Stand der Technik sind in Abschnitt 3.1.3 aufgezeigt. Die eigens definierten Kennzahlen werden im Folgenden beschrieben.

Standardisierungsgrad $G_{Standard}$

Unter der Standardisierung wird eine Vereinheitlichung von Objekten, z.B. Produkten und Prozessen, verstanden (vgl. [Dan08, S. 139 f.]). Im Rahmen der Beurteilung bezieht sich die Standardisierung auf die verwendeten Module des Montagesystems. Genau genommen beschreibt der Grad der Standardisierung $G_{Standard}$ das Verhältnis aus verwendeten standardisierten Modulen $M_{Standard}$ zu den insgesamt verwendeten Modulen M_{Gesamt} (Gleichung 5.3).

$$G_{Standard} = \frac{M_{Standard}}{M_{Gesamt}} \quad (5.3)$$

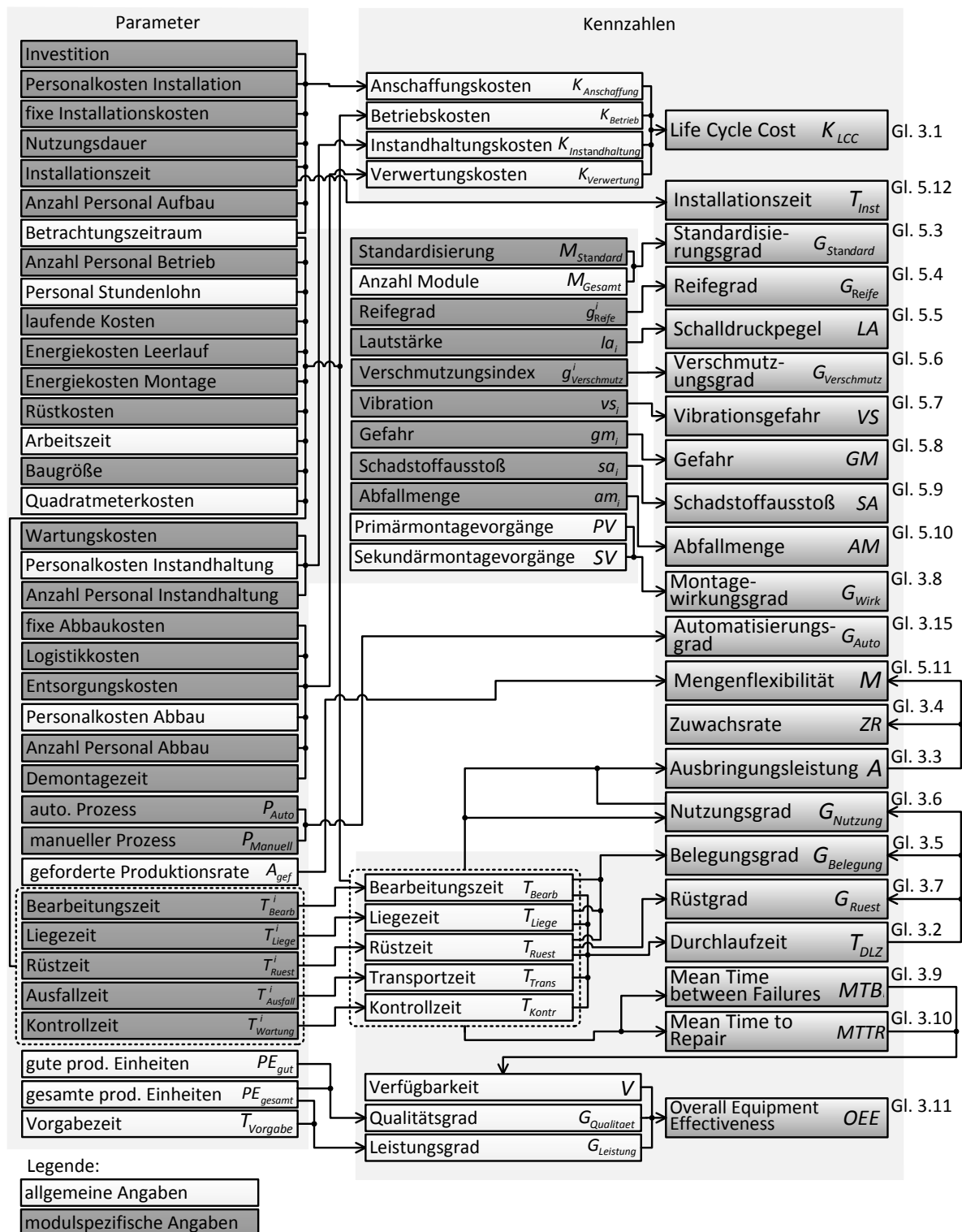


Bild 5.2: Übersicht und Zusammenhang der im Bewertungsmodell betrachteten Kennzahlen

Reifegrad G_{Reife}

Der Reifegrad G_{Reife} , der die Fähigkeit eines Systems hinsichtlich der Ausführung bestimmter Tätigkeiten beschreibt, besitzt speziell im Serienanlauf neuer Produkte eine besondere Bedeutung (vgl. [Hei10, S. 17 ff.]). Zur vereinfachten Berechnung werden die Reifegrade der verwendeten Module g_{Reife}^i (empirischer Wert, „5“ = geringer Reifegrad, „1“ = guter Reifegrad) quadriert (um ein erhöhtes Gewicht auf Module mit geringem Reifegrad zu legen), aufsummiert und durch die Anzahl der notwendigen Module m dividiert (Gleichung 5.4). Diese Kennzahl soll die Reife eines Montagesystems hinsichtlich der geforderten Aufgabe beschreiben.

$$G_{Reife} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m g_{Reife}^i{}^2 \quad (5.4)$$

Lautstärke LA

Die Lautstärke LA ist ein Maß dafür, ob und wie laut der Schall vom Menschen als Ereignis wahrgenommen bzw. empfunden wird. In Bezug auf die Arbeit soll mit Hilfe der Lautstärke bewertet werden, wie laut ein Montagesystem ist bzw. ob die Arbeit für den Menschen am Ort sogar gesundheitsschädlich ist. In letzterem Fall wird von Lärm gesprochen (vgl. [Ler09, S. 255]). Die Grenze, ab wann der Schall Lärm ist, wird von jedem Menschen anders empfunden. Neben der reinen Lärmbelästigung sind vor allem die gesundheitlichen Schäden von Bedeutung, die insbesondere bei lang andauernder Einwirkung von Schalldruckpegeln über 80 dB(A) auftreten. (vgl. [Ler09, S. 255]) Zur Beurteilung der Montagesysteme wird der Schalldruckpegel des gesamten Montagesystems berechnet. Zur Berechnung werden empirisch bestimmte Werte für die Modullautstärken la_i verwendet. Der Summenschalldruckpegel für ein Montagesystem lässt sich mit Gleichung 5.5 berechnen (vgl. [Ler09, S. 10]). Der Referenzdruck p_0 beträgt dabei $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Dies entspricht dem Schalldruck an der Hörschwelle bei 1 kHz (vgl. [Ler09, S. 10]). Als Schalldruck p_i wird der aus dem Modulschalldruckpegel la_i umgerechnete Schalldruck eingesetzt.

$$LA = 10 \cdot \log_{10} \sum_{i=1}^m \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^2 \quad (5.5)$$

Verschmutzungsgrad $G_{Verschmutz}$

Der Verschmutzungsgrad beschreibt die Sauberkeit an einem betrachteten Arbeitsplatz (vgl. [Wul12, S. 157]). Zur Berechnung des Verschmutzungsgrads $G_{Verschmutz}$ werden empirisch

bestimmte Indizes für die Verschmutzung der einzelnen Module $g_{Verschmutz}^i$ aufsummiert und durch die Anzahl der verwendeten Module m dividiert (Gleichung 5.6).

$$G_{Verschmutz} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m g_{Verschmutz}^i \quad (5.6)$$

Gefährdung durch Vibrationen VS

Neben dem Lärm sind auch Vibrationen gesundheitsgefährdend. Bewertet werden Vibrationen über die Beschleunigung (m/s^2). Um eine näherungsweise Aussage über die Vibrationen eines Montagesystems VS treffen zu können, werden die einzelnen Vibrationen der verwendeten Module vs_i (empirischer Wert) herangezogen. Für die Beurteilung wird die maximale Modulvibration ausgewählt (Gleichung 5.7).

$$VS = \max(vs_1, \dots, vs_m) \quad (5.7)$$

Gefahr GM

Gefahren GM , die von einem Montagesystem ausgehen können, sind ein wichtiger Aspekt, den es zu minimieren gilt. Gefahren können bspw. durch rotierende oder bewegliche Teile entstehen. Die Bewertung eines Montagesystems hinsichtlich dessen Gefahr wird nach Gleichung 5.8 mit Hilfe empirisch ermittelter modulspezifischer Werte gm_i für die Gefahr berechnet („1“ = geringe Gefahr bis hin zu „5“ = große Gefahr). Die Modulgefahr wird hierbei quadriert, um ein erhöhtes Gewicht auf Module mit großer Gefahr zu legen.

$$GM = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m gm_i^2 \quad (5.8)$$

Schadstoffausstoß SA

Eine ökologische Kennzahl eines Montagesystems charakterisiert der Schadstoffausstoß SA . Diese Kennzahl erlaubt einen Rückschluss auf die Belastung des umliegenden Umweltsystems (vgl. [Wul12, S. 160]). Für die Berechnung werden empirisch ermittelte Werte für den Schadstoffausstoß der verwendeten Montagemodule sa_i aufsummiert (Gleichung 5.9).

$$SA = \sum_{i=1}^m sa_i \quad (5.9)$$

Abfallmenge AM

Zur Bewertung der Ressourceneffizienz wird die Abfallmenge AM herangezogen. Diese Kennzahl gibt einen Anhaltspunkt für die Nachhaltigkeit eines Montagesystems (vgl. [Wul12, S. 160]). Die Berechnung wird mit Hilfe der Abfallmengen (empirischer Wert) der einzelnen Module am_i pro Produktionsmenge durchgeführt (Gleichung 5.10).

$$AM = \sum_{i=1}^m am_i \quad (5.10)$$

Mengenflexibilität M

Um das Potential für eine mögliche Steigerung der Produktionsrate bewerten zu können, wird die Mengenflexibilität M herangezogen. Sie drückt aus, um wie viel die Produktionsleistung A zum jeweiligen Zeitpunkt gesteigert werden kann, ohne ein weiteres Montagesystem zu installieren (vgl. [Kra02, S. 125]). Voraussetzung für eine Ratensteigerung ist, dass das System bislang nicht vollkommen ausgelastet ist. Im Rahmen der Beurteilung des verfolgten Ansatzes sollte, um die mögliche Ratensteigerung beurteilen zu können, eine geforderte Produktionsrate A_{gef} (konstant oder variabel) angegeben werden, die zeitabhängig sein kann. Diese wird mit der berechneten Ausbringungsleistung A ins Verhältnis gesetzt (Gleichung 5.11).

$$M = \frac{A}{A_{gef}} \quad (5.11)$$

Installationszeit T_{Inst}

Eine Kennzahl, die besonders für den Produktionsstart von Interesse ist, ist die Installationszeit T_{Inst} einer Anlage. Zur überschlägigen Bestimmung der Installationszeit im Rahmen dieser Arbeit werden Werte für die Installationszeiten der einzelnen Module t_{Inst}^i herangezogen. Die Berechnung für ein Montagesystem mit m unterschiedlichen Modulen erfolgt nach Gleichung 5.12.

$$T_{Inst} = \sum_{i=1}^m t_{Inst}^i \quad (5.12)$$

5.4 Kennwertberechnung

Die in **Bild 5.2** zusammengefassten Kennzahlen werden für die Beurteilung der im Simulationsmodell erzeugten Montagesysteme berechnet und lassen sich in Kennfeldern darstellen.

Einen entscheidenden Einfluss auf die Kennwertberechnung besitzen die verwendete Organisationsform, der Materialfluss und die Verkettung der Stationen. Die Organisation von Produktionssystemen kann funktions- und objektorientiert aufgebaut sein (vgl. [Zol11, S. 34]) (z.B. Werkstatt- und Fließprinzip). Dadurch wird die räumliche Strukturierung des Materialflusses, die vielfältig ausgeprägt sein kann, beeinflusst. In **Bild 5.3** ist die Eingrenzung für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachteten Montagesysteme dargestellt. Eine Berücksichtigung aller möglichen Organisationstypen, räumlicher Strukturen und Arten der Verkettung sind aufgrund des hohen Programmieraufwands nicht zielführend. Bei der Beurteilung soll es möglich sein, die Organisationstypen „Werkstattprinzip“, „Baustellenprinzip“ und „Fließprinzip“, die Reihen-, Parallel- und Reihen-Parallelanordnung mit einer starren Verkettung der Stationen analysieren zu können.

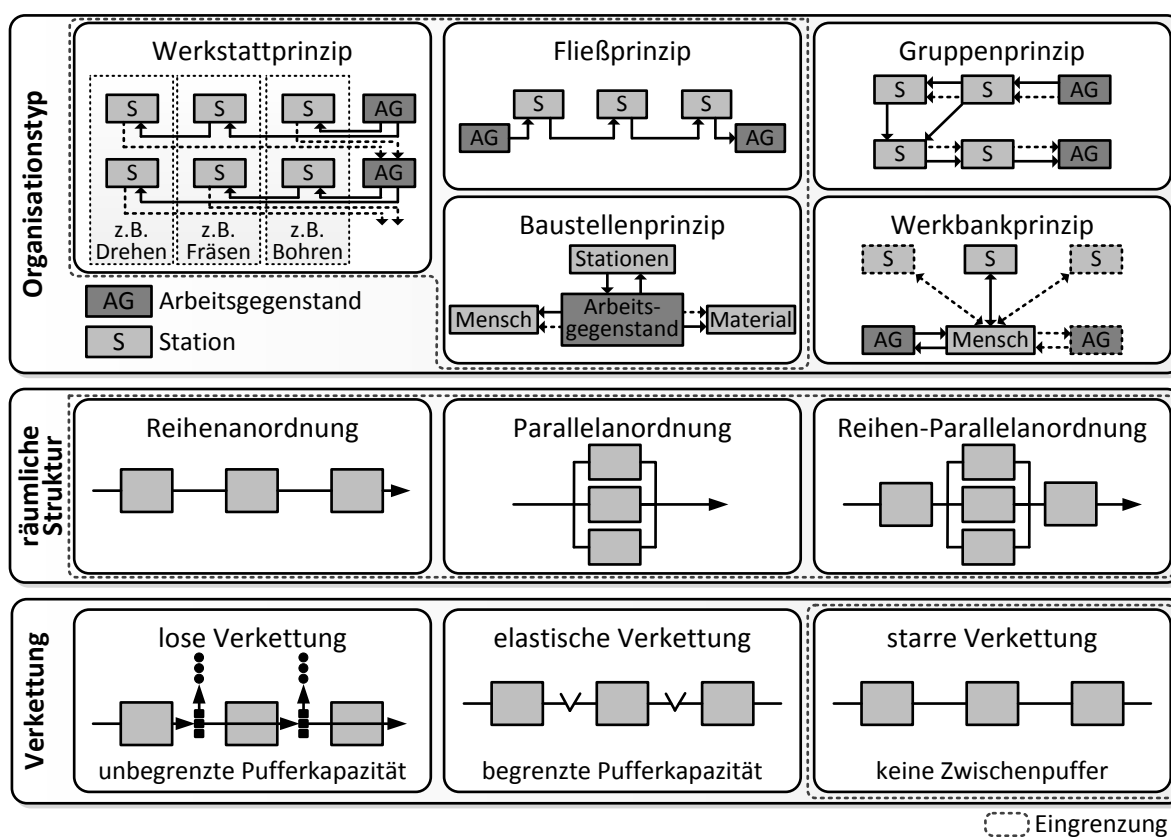


Bild 5.3: Abgrenzung für Kennwertberechnung (Darstellung in Anlehnung an [Löd08, S. 96], [Zol11, S. 34 ff.], [Lot06, S. 220 ff. & 376 ff.]

Vor der Berechnung von Kennwerten für alle Varianten von Montagesystemen ist die gewünschte Organisationsform auszuwählen, da hierdurch jeweils ein anderes Vorgehen für die Berechnung notwendig ist. Bspw. wird bei der Fließfertigung jedes Montagemodul für genau einen Montageschritt verwendet; bei der Werkstattfertigung hingegen ggf. auch für mehrere Montageschritte. Eine Analyse der räumlichen Struktur kann im Rahmen der Beurteilung erfolgen. An entsprechender Stelle werden die Möglichkeiten beschrieben.

Kapitel 6

Entwicklung eines Simulationsmodells

Die Modellbasis des Konzepts zur Planung und Beurteilung von Montagesystemen bildet ein Simulationsmodell, welches für die komplette Systemverarbeitung (vgl. **Bild 4.4**) verwendet wird. Im Mittelpunkt steht ein allgemeiner Ansatz, für den einige vereinfachende Annahmen getroffen werden. Eine Anpassung und Verfeinerung darüber hinaus ist grundsätzlich möglich.

Die Systemverarbeitung besteht aus zwei Hauptteilen:

- Automatisierte vollständige Berechnung von Varianten für Montagesysteme unter Verwendung von Modulen für Montagesysteme durch Anwendung eines kombinatorischen Algorithmus.
- Berechnung der Bewertungsgrundlage mit Hilfe eines stochastischen Simulationsmodells unter Berücksichtigung dynamischer Aspekte, um Aussagen über Unsicherheiten, Risiken und das Zeitverhalten treffen zu können sowie eine Szenarioanalyse zu ermöglichen.

Im Folgenden werden der Modellaufbau beschrieben, relevante, zu berücksichtigende Eingangs- und Ausgangsparameter des Bausteins aufgezeigt und die einzelnen Modelle vorgestellt.

6.1 Aufbau des Modells

Beruhend auf den Prämissen sowie Produktparametern werden die benötigten Ressourcen bzw. Montageeinrichtungen durchgängig auf Basis des Wissensspeichers geplant und beurteilt. Die Planung und Beurteilung eines gesamten Montagesystem gliedert sich im Rahmen der Arbeit in vier aufeinanderfolgende, ggf. iterativ auszuführende Hauptschritte: Definition des Planungsproblems, Berechnung von Varianten für Montagesysteme, stochastische Simulation unter Berücksichtigung dynamischer Aspekte und Beurteilung (vgl. **Bild 6.1**). Die

Schritte der Berechnung von möglichen Montagesystemen sowie die stochastische Simulation sind der Systemverarbeitung zugeordnet. Das dafür benötigte Planungsproblem wird im vorgelagerten Schritt definiert, die Ergebnisse der Systemverarbeitung werden für die Beurteilung verwendet.

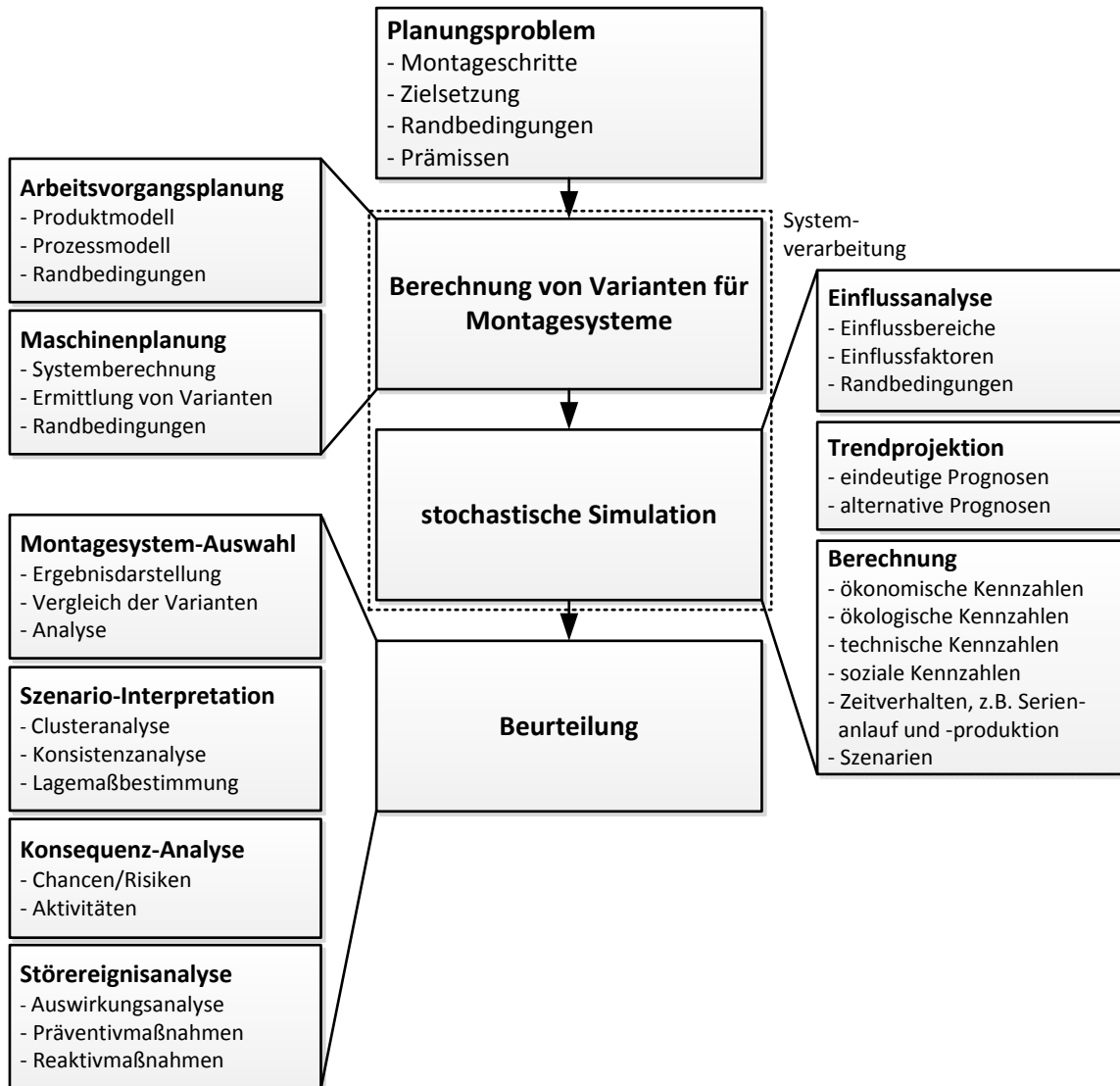


Bild 6.1: Vorgehen der Systemverarbeitung

Ausgangspunkt für die Entwicklung eines geeigneten Montagesystems, und damit noch vor Beginn der eigentlichen Systemverarbeitung anzusiedeln, ist ein konkretes Planungsproblem. Für das Planungsproblem gilt es, Zielsetzung, Randbedingungen und Prämissen zu definieren. Zentrale Bedeutung besitzt dabei die Montageaufgabe, bestehend aus einer Sequenz von Montageschritten. Diese Informationen sind in Interaktion mit den Montagetechnologien, Projektzielen und Anforderungen hinsichtlich des Produkts (z.B. Toleranzen, Geometrie und Gewicht) zu betrachten.

Mit Hilfe der Informationen zum Planungsproblem werden Varianten für Montagesysteme berechnet. Vollzogen wird dies in zwei Schritten: Arbeitsvorgangsplanung und Maschinenplanung. Begonnen wird mit einer Elementarisierung des zu erzeugenden Produkts sowie des dafür notwendigen Gesamtprozesses. Dazu erfolgt zunächst eine Untergliederung des Produkts in dessen elementare Komponenten bzw. Baugruppen um daraus die Produktstruktur abzuleiten. Die Produktstruktur beschreibt den Aufbau des Produkts, indem es die Summe aller notwendigen Abläufe für den Produktenstehungsprozess erfasst.

Für die Herstellung eines Erzeugnisses ist üblicherweise eine Sequenz von unterschiedlichen Montageprozessen notwendig. Das daraus resultierende Prozessmodell beschreibt in der Gesamtheit die Prozesskette.

Die Produktstruktur sowie das Prozessmodell stellen unentbehrliche Eingangsgrößen für weitere Planungsschritte dar. Aus dem Prozessmodell lässt sich der gesamte Arbeitsablauf bzw. -vorgang detailliert ermitteln. Nach REFA wird als Arbeitsvorgang der auf die Erfüllung einer Arbeitsaufgabe ausgerichtete Arbeitsablauf innerhalb eines Arbeitssystems verstanden [REF93]. Die beinhalteten Arbeitsschritte sind zeitlich und organisatorisch abgegrenzt. Schließlich erzeugt der Arbeitsvorgang die Ausführung einer Mengeneinheit für einen Auftrag.

Aufbauend auf den ermittelten elementaren Prozessschritten wird ein geeignetes (möglichst optimales) Montagesystem geplant. Dies ist Arbeitsinhalt der sogenannten Anlagenplanung. Zu berücksichtigen sind dabei unterschiedliche Faktoren, die u.a. das Montagesystem, die Mitarbeiter, die Technologien, das Know-How sowie die eingesetzten Hilfsmittel und Methoden betreffen. Demzufolge sind Montagesysteme hinsichtlich zahlreicher Faktoren bestmöglich auszulegen. Auf das Vorgehen bei der Berechnung von Varianten für Montagesysteme wird in Abschnitt 6.3 detailliert eingegangen.

In der nächsten Stufe gilt es, die verschiedenen Varianten für Montagesysteme unter Einsatz eines Simulationsmodells zu berechnen. Im Anschluss daran werden die ermittelten Lösungen für Montagesysteme beurteilt, sodass ein favorisiertes Montagesystem ausgewählt werden kann. Die Anzahl an unterschiedlichen Lösungen hängt vom Umfang des Simulationsbalkens sowie von der Eignung der dort hinterlegten Module für die Prozessschritte und Randbedingungen ab. Grundlage für die Beurteilung ist ein geeignetes Bewertungssystem. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierfür das in Kapitel 5 dargestellte System verwendet. Zur Berechnung der Kennzahlen wird ein stochastisches Simulationsmodell verwendet, welches die Anforderungen der Beurteilung erfüllen muss. Im Rahmen der Simulation sollen die Aspekte aus **Bild 6.1** berücksichtigt werden. Das Vorgehen für die stochastische Simulation sowie das Modell werden in Abschnitt 6.4 aufgezeigt.

Auf dem Ergebnis der stochastischen Simulation basiert die abschließende Beurteilung. Dazu werden die Daten an den dritten Konzeptbaustein (Beurteilung) übergeben. Zunächst wer-

den die Kennzahlen der unterschiedlichen Montagesysteme verglichen und analysiert. Im Anschluss können unter anderem eine Szenario-Interpretation, eine Konsequenz- und eine Störereignisanalyse durchgeführt werden (siehe Abschnitt 6.4.2.2).

6.2 Identifikation von Eingangs- und Ausgangsparametern

Noch vor der Entwicklung von Modellen zur Berechnung und Beurteilung von Varianten für Montagesysteme müssen die relevanten Eingangs- und Ausgangsparameter identifiziert werden. Die im Folgenden dargestellten Parameter stellen lediglich eine für diese Arbeit getroffene Auswahl dar und können je nach Fragestellung beliebig ergänzt werden. Bei der Identifizierung und Analyse montage- und unternehmensrelevanter Faktoren ist es erforderlich, eine große Bandbreite an Einflussgrößen, gleich welche Bedeutung sie besitzen, zu betrachten. So wird vermieden, dass nicht von Beginn an eventuell wichtige Parameter vernachlässigt werden.

6.2.1 Ermittelte Einfluss- und Eingangsgrößen

Die zu berücksichtigenden Einflussgrößen betreffen den im Rahmen der Arbeit verfolgten Betrachtungsbereich für Unternehmen der Luftfahrtindustrie. Im Fokus steht die Montage mit den spezifischen Anforderungen der Montageplanung (vgl. Abschnitt 2.1.3). Für die Identifizierung der wesentlichen Größen werden Erfahrungen aus Expertengesprächen und der Literatur genutzt. Aus den identifizierten Größen – die sowohl einzelne Stationen, aber auch das Unternehmen betreffen können – lassen sich Vernetzungen und Einflüsse ableiten. Hierbei müssen unter anderem die Störungen und Einflüsse in der Produktion aus **Bild 4.2** Berücksichtigung finden.

Für eine gesteigerte Übersichtlichkeit werden die Einfluss- und Eingangsgrößen in Größen des Planungsproblems, der Unsicherheiten sowie der Beurteilung klassifiziert, die jeweils zu unterschiedlichen Planungsphasen benötigt werden.

Planungsproblem

Ausgangsbasis für die Planung eines Montagesystems ist eine Montageaufgabe, die vom Anwender zu definieren ist. Dabei gilt es, ein geeignetes Montagesystem für einen vorgegebenen Zeithorizont zu ermitteln. Zur Bewerkstelligung dieser Aufgabe sind verschiedene Parameter als relevant identifiziert worden. Bei den betrachteten Fragestellungen handelt es sich um die Montage von Produkten mit in der Regel gleicher Montagereihenfolge (generische Prozessgraphen). Um auf der Basis einer Montagereihenfolge ein Montagesystem pla-

nen zu können, sind weitere Informationen notwendig. Pro Montageschritt zählen dazu Angaben zu den verwendeten Bauteilen, zur Anzahl der Wiederholungen, zur Distanz/Wegstrecke bei einer Handhabung, zu geforderten Toleranzen, zum Komplexitätsniveau, zur notwendigen Handhabung etc. Diese Einflussgrößen können beliebig ergänzt werden; sie richten sich nach der jeweiligen Fragestellung. Im Rahmen dieser Arbeit beschränkt sich dieses auf die im Folgenden beschriebenen Angaben:

- Montagereihenfolge: In der Montagereihenfolge (auch bezeichnet als Aufgabe oder Vorranggraph) werden die aufeinander folgenden Montageschritte, bestehend aus Prozessen, definiert (vgl. [Beu05, S. 22], [Sch94, S. 245]).
- Bauteile: Die Eingangsgröße Bauteil gibt an, welches Bauteil bzw. welche Bauteile für welchen Montageschritt verwendet werden. Die Bauteileigenschaften beeinflussen die Wahl von geeigneten Montagemodulen (z.B. durch das Material, das Gewicht und die Schnittstellen). In frühen Planungsphasen können die Bauteileigenschaften oftmals noch nicht exakt angegeben werden. Bspw. sind die Angaben hinsichtlich Geometrie, Gewicht, Anschlussstellen, Werkstoff sowie Lieferantenbedingungen mit Unsicherheiten behaftet. Zudem ist es möglich, dass sich die Anforderungen im Laufe der Planungsphase ändern.

Die Informationen über die Bauteile sind im Wissensspeicher zu hinterlegen. Bei der Implementierung der Montagereihenfolge wird abgefragt, welche Bauteile zu welchem Montageschritt zählen. Die mit Unsicherheiten behafteten Größen bleiben hierbei, wie auch in bereits entwickelten Methoden, nahezu unberücksichtigt. Einzig die Lieferantenbedingungen werden aufgrund des häufigen Auftretens einbezogen. (sie bewirken bis zu 92 % der Störungen; vgl. [Sch11a, S. 92 ff.]

- Anzahl Wiederholungen: Für die Berechnung von Kennzahlen ist die Information über die Wiederholungsanzahl jedes Montageschritts (z.B. Durchführung von zehn Bohrungen) notwendig.
- Handhabung: Hinter der Handhabung verbirgt sich die Information, ob das Bauteil zur Ausführung des Montageschritts gehandhabt werden muss oder nicht. Dies ist eine wichtige Eingangsgröße zur Bestimmung der möglichen Montagemodule. Bspw. kann ein Mensch nicht eingesetzt werden, wenn die Bauteilgewichte zu hoch sind.
- Distanz/Wegstrecke: Für den Fall, dass eine Handhabung der Bauteile bzw. des Bauteils notwendig ist, ist die Information über die zu überbrückende Distanz erforderlich, um ein geeignetes Modul auswählen zu können. Bspw. kann ein Modul nicht eingesetzt werden, wenn dessen Reichweite geringer ist als die geforderte Reichweite.
- Toleranzen: Einen großen Einfluss auf die Montage haben die Modulgenauigkeiten und die geforderten Toleranzen. Erstgenannte sind für jedes Modul im Wissensspeicher anzugeben. Die Informationen über Toleranzen beziehen sich auf jeden Montageschritt.

- Komplexitätsniveau: Das Komplexitätsniveau bezieht sich auf die Tätigkeit eines jeden Montageschritts. Es zeigt an, ob im vorliegenden Schritt besondere Schwierigkeiten vorliegen, wie die Erreichbarkeit des Montageorts (z.B. hinter komplexen Strukturen) oder die Komplexität der Aufgabe, die mit einem erhöhten Aufwand verbunden ist.
- Prozesskraft: Bei der Ausführung von bspw. Fügeverfahren und Bewegungen müssen Prozesskräfte aufgebracht werden. Diese werden mit dem Parameter Prozesskraft beschrieben.

Unsicherheiten

Auf die Produktion wirken unterschiedliche mit Unsicherheiten behaftete modulspezifische und allgemeine Faktoren (vgl. Abschnitt 2.1.3.3 und **Bild 4.2**). Unter diesem Aspekt sind für die Planung und Beurteilung folgende modulspezifische Größen von Interesse:

- Zeitliche Schwankungen: Für die Berechnung von Kennzahlen gilt es, zeitliche Schwankungen in die Modellierung einbeziehen zu können. Vor allem ist dabei an die Berücksichtigung von Schwankungen bei den Bearbeitungszeiten zu denken, aber auch Schwankungen der Rüstvorgänge, Installationsphase, Wartung und Instandhaltung etc. sind nicht zu vernachlässigen. Die Ursache derartiger Abweichungen vom Idealwert kann unternehmensinterne sowie -externe Gründe haben.
- Ausfall von Modulen und Personal: Die Auswahl eines Montagesystems bzw. einzelner Montagemodule und des Personals kann durch die jeweilige Ausfallwahrscheinlichkeit bzw. -häufigkeit beeinflusst werden. Deshalb ist dies im Planungsprozess bei der Berechnung der Kennzahlen zu beachten. Der Ausfall kann unterschiedliche Gründe besitzen, z.B. kann er aufgrund von Defekten, Krankheiten oder Veranstaltungen hervorgerufen werden. In der Regel handelt es sich hierbei um eine modulspezifische Größe. Im Fall von Personalausfall aufgrund einer Versammlung kann es sich hierbei jedoch auch um eine allgemeine Größe handeln.
- Lieferung von Montagemodulen: Die Verfügbarkeit von Modulen für Montagesysteme ist von Bedeutung, insofern ein System aufgebaut werden soll bzw. wenn ein defektes Modul ausgetauscht werden muss. Bei dieser Größe wird sowohl die Anzahl an unterschiedlichen Lieferanten als auch die Zeit für eine Beschaffung inklusive von Schwankungen berücksichtigt.
- Programmierfehler: Besonders in der Inbetriebnahmephase können Programmierfehler zum Stillstand einer Anlage führen. Aus diesem Grund ist dieser Aspekt bei der Beurteilung der Montagesysteme zu berücksichtigen.

Zu den allgemeinen Größen zählen:

- Fehlende und falsche Dokumentationen sowie Anleitungen: Besonders im Serienanlauf neuer Programme und Varianten kann es vorkommen, dass Dokumentationen und

Montageanleitungen fehlerhaft sind oder sogar gänzlich fehlen. Dies kann einen Zeitverzug hervorrufen, der einzukalkulieren ist. Im Einzelfall kann es sich bei dieser Größe auch um eine modulspezifische Größe handeln, insofern sie sich auf ein einzelnes Modul bezieht.

- Mitarbeiterführung und -motivation: Die Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter kann schwanken. Gründe hierfür können in der Mitarbeiterführung und -motivation liegen.
- Produktänderungen: Die Entwicklungsdauer neuer Flugzeuge ist im Vergleich zu anderen Industriezweigen extrem lang; sie kann mehrere Jahrzehnte betragen. Innerhalb dieses langen Zeitraums kann es zu Produktänderungen kommen, die wiederum eine Anpassung der Montagesysteme erfordern.
- Richtlinien, Vorschriften und Gesetzgebungen: Im Planungsprozess müssen unterschiedlichste Richtlinien und Vorschriften inklusive möglicher Änderungen berücksichtigt werden, z.B. für die Arbeitssicherheit und die Ergonomie am Arbeitsplatz. Hierbei handelt es sich in der Regel um allgemeine Anforderungen; im Speziellen können sie jedoch auch einzelne Module betreffen.
- Lieferung von Bauteilen: Wie bei der Lieferung von Modulen für Montagesysteme kann auch die Verfügbarkeit von Bauteilen eine wichtige Rolle einnehmen. In Analogie wird hierunter sowohl die Anzahl an unterschiedlichen Lieferanten als auch die Zeit für die Beschaffung verstanden.
- Sonstiger Produktionsausfall: Neben den bereits erwähnten Störungsgründen können weitere in der Regel allgemeine Aspekte einen Einfluss auf die Produktion haben, so z.B. Versammlungen und Stromausfälle. In Einzelfällen kann es sich bei dieser Größe auch um eine modulspezifische Größe handeln.

Beurteilung

Für die Parametrisierung des Bewertungsmodells sind neben den bereits identifizierten Größen für das Planungsproblems und die Unsicherheiten weitere Aspekte zu berücksichtigen. Dazu zählen:

- Anlagenlaufzeit und Arbeitszeit: Für die Beurteilung von Montagesystemen sollen Kennzahlen berechnet werden, welche die Eigenschaften der Anlage über die gesamte Nutzungsdauer charakterisieren. Diese Nutzungsdauer ergibt sich aus der Anlagenlaufzeit und der Arbeitszeit.
- Zeitintervalle: Bei existierenden Planungsmethoden werden nach Abschluss der Grobplanung in der Regel Kennzahlen berechnet, die Aussagen für die gesamte Nutzungsdauer ermöglichen. Dynamische Effekte wie Lernkurven und Ausfallwahrscheinlichkeiten bleiben unberücksichtigt. Vielmehr sollten Zeitintervalle (z.B. monatlich) vorgegeben werden, für die jeweils eine Kennzahl bestimmt wird.

- Szenarien: Zukünftige Ereignisse können meistens nicht exakt voraus gesagt werden. Dazu zählen bspw. zeitliche Schwankungen, der Eintritt und die Auswirkung von Abweichungen sowie die Nachfrage. Um eine genaue Aussage etwa über die Leistungsfähigkeit einer Anlage treffen zu können, gilt es, unterschiedliche Szenarien zu berücksichtigen. Durch eine Analyse der Zusammenhänge von Eingangs- und Ausgangsparametern lassen sich das Risiko sowie die Auswirkungen für Szenarien bestimmen.
- Serienanlauf: Der Serienanlauf stellt die Unternehmen der Luftfahrtindustrie vor große Herausforderungen. Das ist u.a. auf lange Programmlaufzeiten, der damit einhergehenden geringen Erfahrung mit dem Anlauf sowie auf große Technologiesprünge zwischen den Flugzeugprogrammen zurückzuführen. Im Anlauf neuer Produkte bzw. Produktvarianten spielen Lerneffekte eine große Rolle (vgl. [Wri36]). Somit müssen zum einen die Lernkurvenmodelle im Simulationsmodell implementiert werden und zum anderen muss eine detaillierte Aussage zu Anlaufzeitpunkten möglich sein.
- Kennzahlen: Im Rahmen der Beurteilung muss es möglich sein, die Varianten für Montagesysteme mit unterschiedlichen ökonomischen, technologischen, sozialen und ökologischen Kennzahlen zu bewerten. Diese gilt es bei der Modellierung mit einzubeziehen.

Je nach Anwendungsfall kann eine Erweiterung der definierten Größen und Aspekte erforderlich sein. Aus diesem Grund soll das Modell dieser Arbeit so ausgelegt sein, dass eine eventuelle Erweiterung möglich ist.

6.2.2 Ermittelte Ausgangsgrößen

Die Ausgangsgrößen müssen unterschiedliche Aspekte für die Berechnung von Varianten für Montagesysteme sowie für die Beurteilung erfüllen.

Das Ergebnis der Berechnung von Montagesystemen muss die Systemlösungen so detailliert beschreiben, dass die für die Kennzahlberechnungen benötigten Parameter auswertbar sind. Das beginnt mit einer ausführlichen Darstellung der Montageaufgabe inklusive ihrer Randbedingungen. Darüber hinaus zählen hierzu Angaben zur Zusammensetzung der ermittelten Montagesysteme (notwendige und zusätzlich benötigte Module).

Die Ausgangsgrößen der Beurteilung müssen es dem Anwender erlauben, die Varianten miteinander vergleichen zu können. Das bedeutet, dass die Kennzahlen adäquat aufbereitet und dargestellt werden müssen. Darüber hinaus muss es möglich sein, die unterschiedlichen Szenarien sowie dynamischen Effekte zu beurteilen und diese detailliert hinsichtlich der Einflussgrößen sowie deren Auswirkungen zu analysieren. Diese Anforderungen sind für alle berechneten Montagesysteme zu beachten.

6.3 Modell zur Berechnung von Varianten für Montagesysteme

Im folgenden Abschnitt wird die für das Vorhaben notwendige Modellbasis zur Ermittlung der Varianten für Montagesysteme entwickelt. Die Variantenermittlung erfolgt über eine Simulation. Um die Komplexität zu reduzieren, werden einige vereinfachende Annahmen getroffen. Der verfolgte Ansatz lässt sich grundsätzlich in mehreren Punkten erweitern.

Eingangsdaten für die Simulation der verschiedenen Montagesysteme sind die Daten aus dem Simulationsbaukasten sowie das vom Anwender vorgegebene Planungsproblem, bestehend aus einer Montagereihenfolge und Randbedingungen (z.B. Aufgabenkomplexität und verwendete Bauteile). Eine Übersicht des Ablaufs zur Berechnung der Montagesysteme ist in **Bild 6.2** dargestellt. Darin ist gekennzeichnet, in welchen Berechnungsschritt welche Eingangsdaten einfließen.

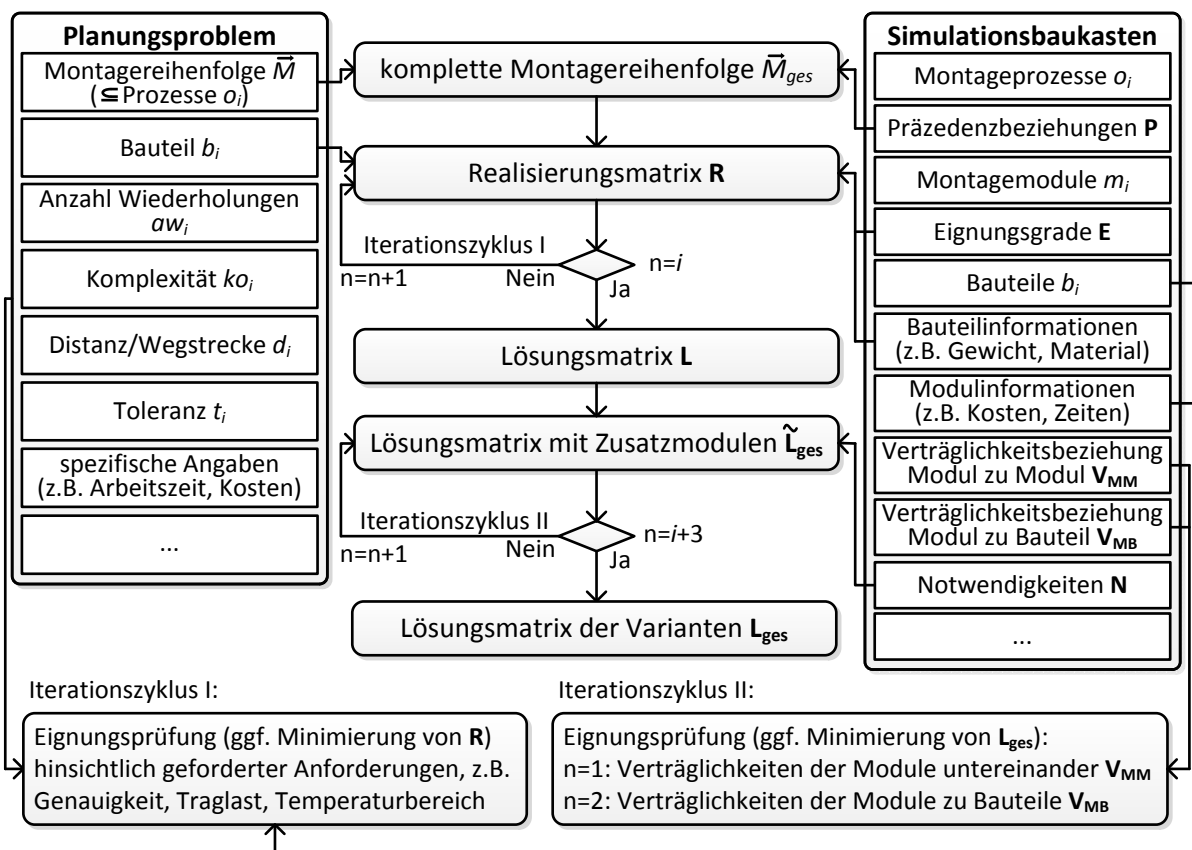


Bild 6.2: Übersicht des Algorithmus zur Berechnung von Varianten für Montagesysteme (in Anlehnung an [Wei11b, S. 846])

Ausgangspunkt der Planung ist ein definiertes Planungsproblem. In diesem Fall lautet das Planungsproblem, ein Montagesystem für eine bestimmte Montageaufgabe zu planen. Als Eingangsgröße zur Lösung dieses Problems gibt der Anwender eine Montagereihenfolge für

die durchzuführende Montageaufgabe an. Die Reihenfolge muss noch nicht unbedingt das komplette Prozessmodell darstellen. Formal wird die Montagereihenfolge in einem Vektor-Array \vec{M} mit j Elementen ausgedrückt (siehe Gleichung 6.1). Die Elemente des Arrays beschreiben die j verschiedenen Montageschritte, die zur Durchführung der Montageaufgabe notwendig sind. Bei den Montageschritten handelt es sich um Montageprozesse o_i , die es im Simulationsbaukasten im Vektor \vec{B}_O zu hinterlegen gilt.

$$\vec{M} = \begin{pmatrix} ms_1 \\ \vdots \\ ms_j \end{pmatrix} \left\{ \begin{array}{ll} ms_i, i = 1, \dots, j & : \text{Montageschritt } i \subseteq \vec{B}_O \\ \vec{B}_O & : \text{Vektor-Array der Montageprozesse} \\ j & : \text{Anzahl der durchzuführenden Montageschritte} \end{array} \right. \quad (6.1)$$

Darüber hinaus werden die benötigten Bauteile in dem Matrix-Array M_B hinterlegt (Gleichung 6.2). Sie müssen vor Beginn der Planung zu jedem Montageschritt aus \vec{M} angegeben werden. Damit hat das Matrix-Array M_B die Zeilendimension j ; die Spaltendimension richtet sich nach der Anzahl der jeweils notwendigen Bauteile, hier mit x_i bezeichnet. Die Bauteile setzen sich aus Elementen des Simulationsbaukastens (siehe \vec{B}_B) oder aus bereits montierten Baugruppen zusammen. Dabei muss nicht jeder Montageschritt die gleiche Anzahl an Bauteilen beanspruchen.

$$M_B = \begin{pmatrix} b_{1ms_1} & \dots & b_{xms_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{1ms_j} & \dots & b_{xms_j} \end{pmatrix} \left\{ \begin{array}{ll} ms_i, i = 1, \dots, j & : \text{Montageschritt } i \\ j & : \text{Anzahl der durchzuführenden} \\ & \text{Montageschritte} \\ b_k, k = 1, \dots, x_i & : \text{benötigtes Bauteil für } ms_i \\ x_i & : \text{Anzahl der notwendigen Bauteile für} \\ & ms_i \end{array} \right. \quad (6.2)$$

Vor der Berechnung von Systemlösungen muss insbesondere die Montagereihenfolge \vec{M} aus Gleichung 6.1 auf Vollständigkeit geprüft werden. Gegebenenfalls sind weitere Montageprozesse zur Montagereihenfolge hinzuzufügen. Vor der Erweiterung sind die eventuell zusätzlich benötigten Montageschritte mit Hilfe der Präzedenzbeziehungsmatrix¹ P aus dem Baukasten zu ermitteln. Temporär werden die Ergebnisse in der Matrix M_{ges} zwischengespeichert, siehe Gleichung 6.3. Die erste Spalte enthält die vom Benutzer vorgegebenen Montageschritte, in den weiteren Spalten sind die zuvor erforderlichen Montageschritte für

¹Eine Präzedenzbeziehung gibt an, ob ein bestimmter Prozess vor einem anderen ausgeführt werden muss. Bspw. muss erst ein Loch gebohrt werden, bevor ein Niet gesteckt und genietet werden kann.

die jeweiligen Montageprozesse abgelegt. Alle diese Präferenzen sind im Baukasten bei den Montageprozessen zu hinterlegen.

$$\mathbf{M}_{\text{ges}} = \begin{pmatrix} ms_1 & p_{1ms_1} & \cdots & p_{ams_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ms_j & p_{1ms_j} & \cdots & p_{ams_j} \end{pmatrix} \left\{ \begin{array}{l} ms_i, i = 1, \dots, j : \text{Montageschritt } i \\ j : \text{Anzahl der Montageschritte} \\ a_i : \text{Anzahl der Präzedenz-} \\ \quad \text{beziehungen für } ms_i \\ p_u, u = 1, \dots, a_i : \text{Präzedenzbeziehung } u_i \text{ für} \\ \quad ms_i \end{array} \right. \quad (6.3)$$

Aus der Matrix in Gleichung 6.3 wird anschließend das Vektor-Array der gesamten Montagereihenfolge \vec{M}_{ges} ermittelt. Dabei wird automatisiert kontrolliert, dass Montageschritte, die aus den Präzedenzbeziehungen abgeleitet worden sind, nicht doppelt in den vom Benutzer angegebenen Montageschritten berücksichtigt werden. Das Vektor-Array \vec{M}_{ges} besitzt dabei e Elemente. Für die anschließende Berechnung der Varianten für Montagesysteme wird ausschließlich das Vektor-Array \vec{M}_{ges} verwendet.

Aufbauend auf den in dem Array \vec{M}_{ges} gespeicherten Informationen werden für jeden Montageschritt Realisierungsmöglichkeiten ermittelt (Gleichung 6.4). Das bedeutet, dass je auszuführenden Montageprozess alle vorhandenen Module für Montagesysteme (\vec{B}_M) des Simulationsbaukasten hinsichtlich der Eignungsgrade (hinterlegt in Matrix \mathbf{E}) auf die Tauglichkeit analysiert werden. Ist ein Modul geeignet, wird es in der zum Montageschritt gehörenden Zeile in der Realisierungsmatrix $\tilde{\mathbf{R}}$ gespeichert. Somit befinden sich die r Realisierungen eines Montageschritts ms_i in der Zeile i der Realisierungsmatrix $\tilde{\mathbf{R}}$.

$$\tilde{\mathbf{R}} = \begin{pmatrix} Z_{1ms_1} & \cdots & Z_{rms_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1ms_j} & \cdots & Z_{rms_j} \end{pmatrix} \left\{ \begin{array}{l} Z_p, p = 1, \dots, r_i : \text{Modul } p \text{ zur Realisierung von } ms_i \\ r_i : \text{Anzahl unterschiedlicher Realisie-} \\ \quad \text{rungen für } ms_i \\ ms_i, i = 1, \dots, j : \text{Montageschritt } i \\ j : \text{Anzahl der Montageschritte} \end{array} \right. \quad (6.4)$$

Anschließend werden die Module der Realisierungsmatrix $\tilde{\mathbf{R}}$ hinsichtlich der definierten Randbedingungen iterativ überprüft. Hierfür können unterschiedliche Kriterien verwendet werden, die benutzerspezifisch anzugeben sind (z.B. Genauigkeit und Traglast). Die notwendigen Informationen für die Kontrolle werden dem Simulationsbaukasten entnommen. Erfüllt

ein Modul ein Kriterium nicht, wird es gestrichen. Das Ergebnis dieses Schritts ist eine reduzierte Realisierungsmatrix \mathbf{R} .

Auf der Basis der reduzierten Realisierungsmatrix \mathbf{R} können die unterschiedlichen Montagesysteme schließlich automatisiert berechnet werden. Die vollständige Lösungsermittlung erfolgt mit Hilfe der Gesetzmäßigkeiten der Kombinatorik.

Die mit Hilfe des kombinatorischen Ansatzes berechneten Lösungen für Varianten von Montagesystemen werden zeilenweise in dem Matrix-Array \mathbf{L} abgespeichert (Gleichung 6.5). In den Spalten befinden sich die für den jeweiligen Montageschritt notwendigen Module. Die Spaltenanzahl ist die Anzahl der auszuführenden Montageschritte, siehe \vec{M}_{ges} .

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} l_{1m_{ms_1}} & \cdots & l_{1m_{ms_j}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{ym_{ms_1}} & \cdots & l_{ym_{ms_j}} \end{pmatrix} \left\{ \begin{array}{l} l_{vw}, v = 1, \dots, y, \\ w = m_{ms_i}, \dots, m_{ms_j} \\ y \\ m_{ms_i}, i = 1, \dots, j \\ j \end{array} \right. \begin{array}{l} : \text{Lösung } v \text{ von } m_{ms_i} \\ \\ : \text{Anzahl unterschiedlicher} \\ \text{Lösungen} \\ : \text{Modul für Montageschritt } i \\ : \text{Anzahl der Montageschritte} \end{array} \quad (6.5)$$

Im nächsten Schritt der Lösungsberechnung wird analysiert, ob für den Einsatz einzelner Module zusätzliche Module notwendig sind, z.B. muss ein Industrieroboter verwendet werden, um einen Bohrendeffektor einsetzen zu können. Hierzu wird die Notwendigkeitsmatrix \mathbf{N} verwendet. Sollten Ergänzungen notwendig sein, werden diese in dem Matrix-Array \mathbf{L}_{Zusatz} abgespeichert (Gleichung 6.6). Sollten mehrere zusätzliche Module erforderlich sein, werden sie in weitere Spalten eingetragen.

$$\mathbf{L}_{Zusatz} = \begin{pmatrix} \sum z_{l_1} \\ \vdots \\ \sum z_{l_y} \end{pmatrix} \left\{ \begin{array}{l} z_{l_v}, v = 1, \dots, y \\ y \end{array} \right. \begin{array}{l} : \text{Zusatzmodul der Lösung } v \\ : \text{Anzahl Lösungen} \end{array} \quad (6.6)$$

Die Module des Lösungs-Arrays \mathbf{L} und die notwendigen Zusatzmodule \mathbf{L}_{Zusatz} beschreiben die berechneten Montagesysteme. Dies wird in dem Lösungs-Array $\tilde{\mathbf{L}}_{ges} = (\mathbf{L}, \mathbf{L}_{Zusatz})$ zusammengefasst. Im letzten Schritt wird untersucht, ob die Montagemodule der berechneten Lösungen überhaupt kombinierbar sind und ob die jeweils verwendeten Bauteile mit den Montagemodulen verträglich sind (z.B. bezüglich Geometrie, Werkstoff, Toleranzen, Schnittstellen etc.). Hierfür werden die Verträglichkeitsmatrix zwischen den Modulen \mathbf{V}_{MM} und die Verträglichkeitsmatrix zwischen den Modulen und Bauteilen \mathbf{V}_{MB} verwendet (siehe Gleichung 7.5 und 7.7 aus dem Wissensspeicher). Im Falle einer Unverträglichkeit zweier Module bzw. ei-

nes Moduls mit einem Bauteil wird die entsprechende Lösung eliminiert. Die resultierenden Lösungen für Montagesysteme werden in dem Lösungs-Array L_{ges} zusammengefasst. Jede Variante für ein Montagesystem wird durch eine Zeile aus L_{ges} beschrieben. Aufbauend auf den Informationen aus L_{ges} werden die unterschiedlichen Lösungen beurteilt bzw. die dafür notwendigen Beurteilungsgrundlagen berechnet.

Die Anzahl y der unterschiedlichen Lösungen für Varianten von Montagesystemen hängt von der Anzahl der Montageschritte sowie der Anzahl der für die Realisierung vorhandenen Montagemodule für jeden Montageschritt ab. Berechnen lässt sich die Anzahl mit Hilfe der Gleichung 6.7.

$$y = \prod_{i=1}^{\sum ms} (\text{Anzahl unterschiedlicher Module des Montageschritts } i) \quad (6.7)$$

6.4 Simulationsmodell zur Berechnung der Kennzahlen

Für die Auslegung und Konfiguration von Montagesystemen müssen neben den herkömmlichen montagetechnischen Randbedingungen zwingend eine Reihe weiterer Faktoren, wie z.B. Unsicherheiten, berücksichtigt werden. Bei der Bestimmung des am besten geeigneten Montagesystems handelt es sich um eine komplexe Aufgabe. Die Qualität der Planungsergebnisse hängt dabei entscheidend von den zuvor getroffenen Annahmen ab. Realistische Annahmen sind aufgrund der Komplexität, Dynamik und Unsicherheiten des Planungsproblems inklusive des Umfelds schwer zu treffen. Wie bereits im Handlungsbedarf dieser Arbeit aufgezeigt, kommen bei herkömmlichen Planungsmethoden und -umgebungen in der Regel Erfahrungswerte aus der Vergangenheit bzw. Abschätzungen zur Anwendung. In der Realität sind die Annahmen jedoch häufig mit Unsicherheiten behaftet.

Aus dem in der Arbeit bereits hergeleiteten Handlungsbedarf (siehe Abschnitt 3.6) lassen sich folgende Anforderungen an das Simulationsmodell der Bewertung zusammenfassen:

- Berücksichtigung von Unsicherheiten der Eingangsparameter wie auf die Montage wirkende Störungen und zeitliche Schwankungen,
- Durchführung von Szenario-Analysen zur Abschätzung von Auswirkungen variierender Annahmen und Modellparameter auf Zielgrößen und
- Berücksichtigung von Aspekten des Serienanlaufs sowie der Serienproduktion.

6.4.1 Eindeutigkeit der Daten

Das Simulationsmodell, mit Hilfe dessen die Kennzahlen zur Beurteilung der Montagesysteme berechnet werden sollen, muss hinsichtlich der gestellten Anforderungen ausgelegt sein. Die Qualität der Simulationsergebnisse wird neben der Datenqualität maßgeblich durch die Qualität des Modells beeinflusst. Je detaillierter das Modell inklusive der zugehörigen Eingangsparameter ist, desto detailliertere Ergebnisse lassen sich berechnen. Voraussetzung für praxisrelevante Ergebnisse ist, dass das Modell die Realität adäquat abbildet und ein nicht zu stark vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit ist.

In diesem Zusammenhang ist die Wahl der Eingangsparameter von großer Bedeutung. Unterschieden werden ein deterministischer und ein stochastischer Ansatz, die jeweils Vor- und Nachteile aufweisen. Bei jedem Planungsproblem ist individuell abzuwägen, welcher Ansatz besser geeignet ist.

Bei dem deterministischen Ansatz lassen sich die Ereignisse vorhersehen. Dies bedeutet, dass Zustände zu jedem Zeitpunkt der Vergangenheit und Zukunft mit hinreichender Genauigkeit angegeben werden können. Für die Simulation bedeutet das wiederum fest vorgegebene Parameter.

In der Praxis sind Ereignisse jedoch meist nicht vorhersehbar, sondern zufällig. Im besten Fall kann für sie eine Varianz um den Erwartungswert herum angegeben werden. Diese steigt mit größerer Entfernung in der Zukunft aufgrund zunehmender Unsicherheiten sowie einer umfassenderen und vielfältigeren Komplexität (vgl. [Rei91, S. 26]). Die Ereignisse und Zustände, die nicht über Erwartungswerte vorausgesagt werden sollen, können durch Verwendung eines stochastischen Simulationsmodells abgebildet werden.

Tabelle 6.1 fasst die Eignung der Ansätze im Hinblick auf die gestellten Anforderungen zusammen. Die Anforderungen an das Simulationsmodell werden nur durch den stochastischen Ansatz erfüllt. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Arbeit ein stochastisches Simulationsmodell verwendet. Dennoch ist es möglich, einzelne Parameter deterministisch vorzugeben. Dies muss jeweils an entsprechender Stelle definiert werden.

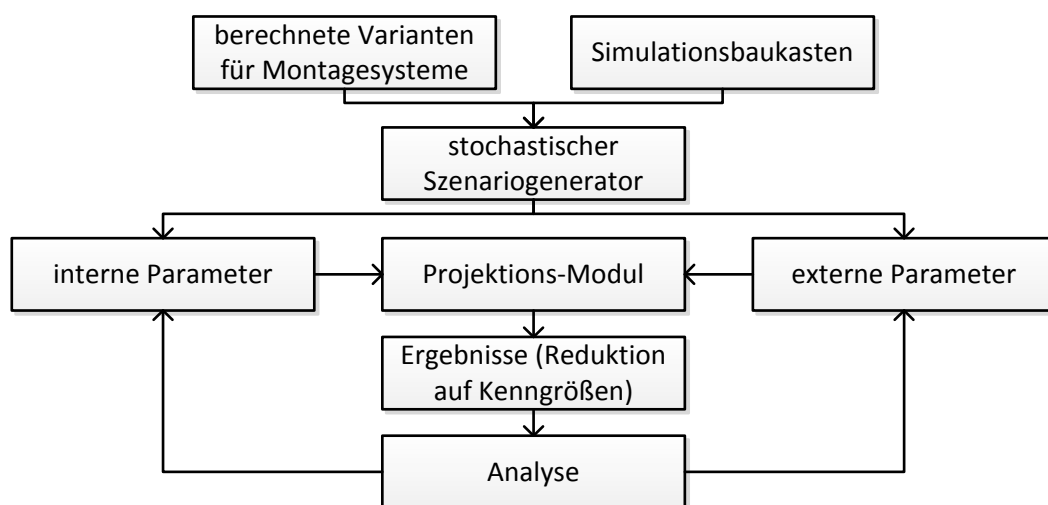
6.4.2 Stochastisches Simulationsmodell

Zur Beurteilung der unterschiedlichen, berechneten Montagesysteme werden die in Abschnitt 5.3 aufgeführten Kennzahlen genutzt. Zur Berechnung der Beurteilungsgrundlage wird ein stochastisches Simulationsmodell, welches ebenfalls dynamische Aspekte berücksichtigt, verwendet. Der Aufbau des Simulationsmodells ist in **Bild 6.3** dargestellt; auf die einzelnen Bausteine wird im Folgenden eingegangen, sofern dies nicht bereits erfolgt ist. Das stocha-

Tabelle 6.1: Gegenüberstellung der Daten-Eindeutigkeit (vgl. [Wei12, S. 236])

	Deterministisch	Stochastisch
Definition	Ergebnisse vorhersehbar → fest vorgegebene Parameter	Ergebnisse nicht vorhersehbar → Berechnung zufälliger Ereignisse auf Basis zufälliger Parameter
Unsicherheiten	nicht abbildbar	abbildbar
zeitliche Schwankungen	nur Angabe von festen Abweichungen möglich	Abbildung von Zufälligkeiten möglich
Störungen	nur Modellierung einer festen Störgröße denkbar	Abbildung zufälliger Störungen möglich
Szenarioanalyse	Beachtung von fest vorgegebenen Szenarien möglich	Berücksichtigung zufälliger Szenarien implementierbar

stische Modell kommt zur Anwendung, um zukünftige Ereignisse abzuschätzen und auf Ergebnisgrößen zu reduzieren. Dies erlaubt es, Aussagen über Risiken und Unsicherheiten zu treffen. Derartige Aussagen besitzen im Zusammenhang mit der Planung und Beurteilung von Montagesystemen einen entscheidenden Einfluss (vgl. [Rüh10, S. 31]). Mit Hilfe eines deterministischen Ansatzes wäre dieses nur begrenzt möglich.

**Bild 6.3:** Grundsätzliche Struktur des Modells (vgl. [Wei11b, S. 847], [Wei12, S. 236])

Mit den berechneten Varianten für Montagesysteme sowie der Informationen aus dem Simulationsbaukasten werden Ereignisse wie Störungen oder zeitliche Schwankungen generiert und charakteristische Ergebnisgrößen berechnet. Sollen (Teil-)Ereignisse als determiniert angenommen werden, also jegliche Unsicherheiten etc. vernachlässigt werden, dann ist eine Berechnung der Kennzahlen auf Grundlage von Erwartungswerten möglich. In Teilbereichen kann dies durchaus gerechtfertigt sein. Ein stabiler Vorgang ist Voraussetzung für eindeutige Daten (deterministisch). Aber gerade bei Fragestellungen hinsichtlich der Auswahl eines

am besten geeigneten Montagesystems können Unsicherheiten und Abweichungen einen entscheidenden Einfluss besitzen, sodass Erwartungswerte nicht immer ausreichen.

Bei der Analyse der Simulationsergebnisse ist zu beachten, dass der ermittelte Zustand nicht zwingend eintritt und das Modell häufig nicht in allen Teilen die Realität abbildet. Vielmehr ist das Ergebnis eine „Wenn-Dann-Aussage“; sollte die gemachte Annahme zutreffen und sich gleichzeitig das Modell wie die Realität verhalten, dann tritt das errechnete Ergebnis ein (vgl. [Zwi05, S. 123]).

6.4.2.1 Modell-Vorgehensweise

Um im Simulationsmodell potentielle Ereignisse wie z.B. Störungen sowie Parameter- und Annahmeabweichungen zu erzeugen, wird ein stochastischer Szenariogenerator verwendet. Für jeden als stochastisch angenommenen Parameter wird pro betrachtete Periode 1 bis p eine Realisierung der Zufallsvariablen generiert. Daraus ergibt sich pro Parameter ein Simulationspfad, der sich über den Zeithorizont von Periode 1 bis p erstreckt. Damit unterschiedliche Annahmen für jeden Parameter analysiert werden können, wird dieses Vorgehen n Mal durchgeführt (**Bild 6.4**, links), bis sich die Ergebnisverteilung stabilisiert. Das heißt, es werden n Pfade erzeugt. Jeder Pfad entspricht in der Simulation einem Szenario, im Speziellen auch als „Durchlauf-Szenario“² bezeichnet. Die sich durch die wiederholte Simulation ergebenden Pfade mit unterschiedlichen Ausprägungen zu den betrachteten Zeitpunkten spiegeln sich im Szenariotrichter wieder (**Bild 6.4**, rechts). Die vereinfachte Abbildung verdeutlicht die Entwicklungsmöglichkeiten eines Parameters mit zwei Unsicherheiten. Exemplarisch sind n Pfade, sprich n Durchlauf-Szenarien, dargestellt. Hier sind zwei Aspekte anzumerken: Erstens ist festzuhalten, dass die Unsicherheit eines Parameters größer wird, desto weiter der betrachtete Zeitpunkt in der Zukunft liegt. Zweitens ist die Komplexität zur Beschreibung der zukünftigen Zeitpunkte umfassender und vielfältiger, je weiter sie in der Zukunft liegen (vgl. [Rei91, S. 26]). Folglich umfasst der Szenariotrichter die Spannweite vom negativen bis zum positiven Extremfall.

Mit den so generierten Annahmen für die einzelnen Eingangsparameter, die sich in interne und externe Annahmen aufgliedern lassen, wird im nächsten Schritt eine Projektionsrechnung durchgeführt. Dabei werden unter intern Annahmen verstanden, die vom Unternehmen selbst beeinflusst werden können. Externe Annahmen werden vom Unternehmensum-

²Der Begriff „Szenario“ ist in der Literatur uneinheitlich definiert (vgl. [Rei91, S. 14], [Gau09, S. 56 ff.], [CAS99, Chapter 3 – Scenarios, S. 2]). Im Rahmen dieser Arbeit wird die Definition des Durchlauf-Szenarios nach [CAS99] verwendet. Mit einem Durchlauf-Szenario ist danach ein einzelner Lauf des parametrisierten Modells gemeint. Wenn bspw. das parametrisierte Modell 100.000 Mal durchlaufen wird, d.h. es werden 100.000 Simulationen zur Analyse herangezogen, so wird jeder der 100.000 Läufe als ein Szenario betrachtet. Eine andere Möglichkeit nach [CAS99] wäre die Betrachtung eines Parameter-Szenarios, welches die Verteilungen, die im Modell benutzt werden beschreibt.

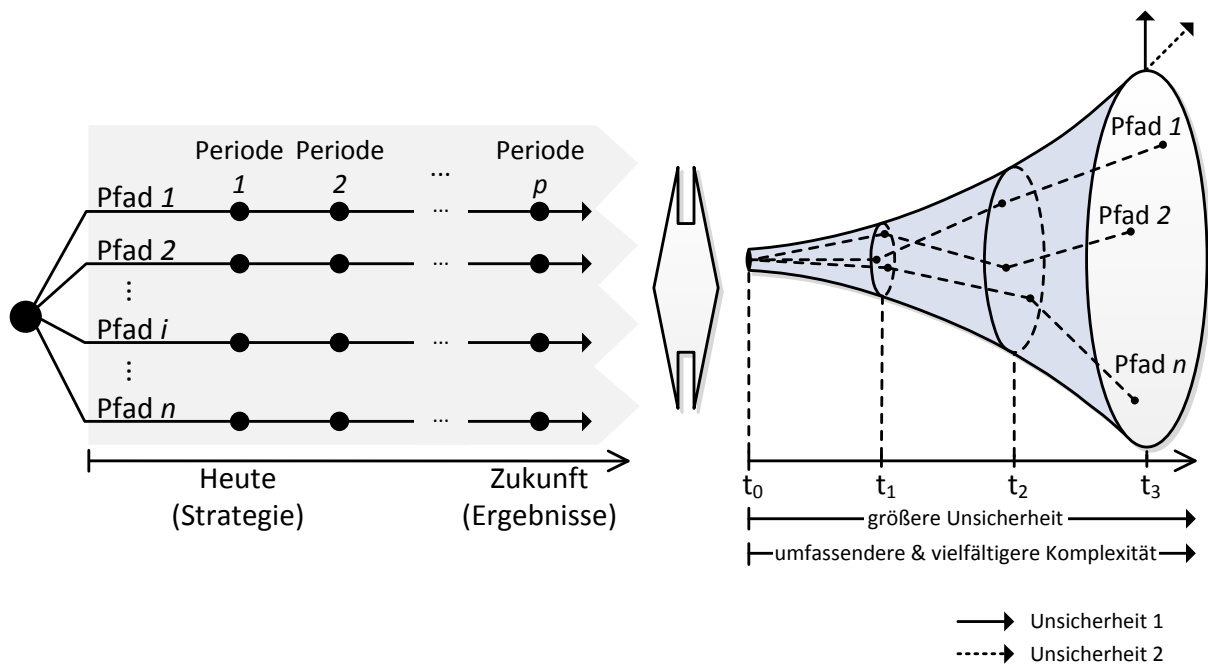


Bild 6.4: Pfadgenerierung (links) und Denkmodell zur Darstellung von Szenarien anhand zweier Unsicherheiten (rechts) (vgl. [Wei12, S. 237])

feld vorgegeben. Bis zur Projektionsrechnung werden die Annahmen durch generierte Realisierungen von Zufallszahlen beschrieben. Genau genommen beschreiben die generierten Realisierungen die Abweichung Δ vom Erwartungswert. Daraus ergibt sich z.B. für eine Zeitgröße t_i

$$t_i = t_{Erwartung} + \Delta t_{stoch}. \tag{6.8}$$

Im Anschluss an die Berechnung gilt es, die stochastischen Parameter auszuwerten. Zur Beschreibung der Eigenschaften lassen sich Verteilungsfunktionen verwenden (vgl. **Tabelle 6.2**).

Tabelle 6.2: Klassische Verteilungsfunktionen zur Berücksichtigung stochastischer Einflüsse (siehe [Ohl06, S. 135]; vgl. [Har82], [Bei97, S. 14 f.], [Kos95, S. 30 ff.]

Diskrete Verteilung	Stetige Verteilung	
- Binomialverteilung	- Normalverteilung	- Beta-Verteilung - Dreiecksverteilung
- Geometrische Verteilung	- Gleichverteilung	- Gammaverteilung - Erlangverteilung
- Poissonverteilung	- Exponentialverteilung	- Log-Normalverteilung - Weibullverteilung

Einschub zur Wahrscheinlichkeitsverteilung:

Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschreiben die Verteilung zufälliger Größen. Einige gängige Verteilungsfunktionen sind in **Tabelle 6.2** zusammengestellt. Um die Frage nach der

passenden Verteilungsfunktion für einen Anwendungsfall beantworten zu können, gilt es zunächst die Anforderungen zu definieren. Eine stetige Verteilungsfunktion ist zu bevorzugen, wenn Zufallsvariablen alle die für sie möglichen Werte annehmen kann. Im Rahmen der Arbeit sollte die Darstellbarkeit der Verteilung auf Basis des Mittelwerts sowie der Abweichungen möglich sein. Alle drei Größen werden für die jeweiligen Module für Montagesysteme im Wissensspeicher zur Verfügung gestellt. Wie sich durch die zwei unterschiedlichen Abweichungen (unten und oben) bereits andeutet, soll eine asymmetrische Verteilung abbildbar sein. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Montagezeiten in der Praxis häufiger oberhalb der idealtypischen theoretischen Zeitberechnung liegen und es folglich mehr Ausreißer nach oben als nach unten gibt (z.B. längere Prozesszeiten durch unvorhergesehene Toleranzabweichungen der Bauteile, fehlende Bauteile etc.).

All die genannten Anforderungen werden am besten durch eine Dreiecksverteilung (oder auch Simpson-Verteilung, vgl. [Har82, S. 196]) und durch eine asymmetrische Gaußverteilung (siehe Dichtefunktionen in **Bild 6.5**) erfüllt. Diese beiden Verteilungen werden in dem entwickelten Konzept für die stochastische Beschreibung diverser Zeiten implementiert.

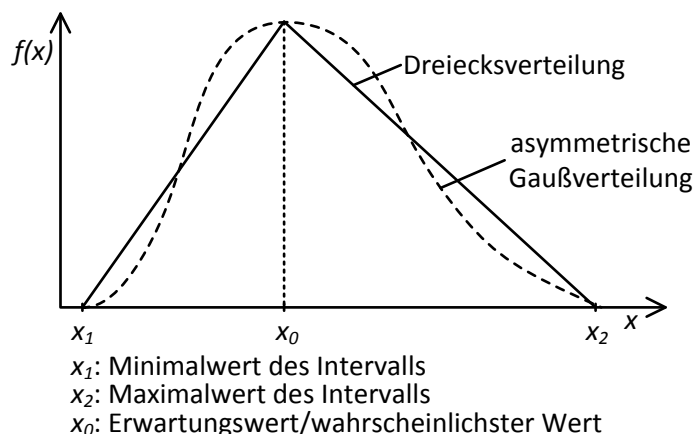


Bild 6.5: Dichtefunktion einer Dreiecksverteilung und einer asymmetrischen Gaußverteilung

Bei der Dreiecksfunktion handelt es sich um eine stetige Wahrscheinlichkeitsfunktion mit der auf dem Intervall $[x_1, x_2]$ definierten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (vgl. [Eva00, S. 187 ff.]):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2 \cdot (x - x_1)}{(x_2 - x_1) \cdot (x_0 - x_1)}, & \text{wenn } x_1 \leq x \leq x_0 \\ \frac{2 \cdot (x_2 - x)}{(x_2 - x_1) \cdot (x_2 - x_0)}, & \text{wenn } x_0 < x \leq x_2. \end{cases} \quad (6.9)$$

Die Dichteverteilung einer asymmetrischen Gaußverteilung aus dem Intervall $[x_1, x_2]$ wird nach Gleichung 6.10 beschrieben (vgl. [Jon00b, S. 90]). Die Gleichung ergibt sich aus einer symmetrischen Gaußverteilung, die bereichsweise definiert wird.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot (x_0 - x_1)}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{2 \cdot (2 \cdot (x_0 - x_1))^2}\right), & \text{wenn } x_1 \leq x \leq x_0 \\ \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot (x_2 - x_0)}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{2 \cdot (2 \cdot (x_2 - x_0))^2}\right), & \text{wenn } x_0 < x \leq x_2. \end{cases} \quad (6.10)$$

Die Dreiecksfunktion wird vor allem dann eingesetzt, wenn begrenzte Informationen über eine Verteilungscharakteristik vorliegen (vgl. [Ohl06, S. 136]). Zur Beschreibung dieser Funktion sind lediglich drei Werte notwendig: die untere Grenze x_1 und obere Grenze x_2 sowie der häufigste Wert x_0 (Erwartungswert). Deswegen bietet sich die Verwendung der Dreiecksverteilung bei bekannten Häufigkeitswerten und abschätzbaren Grenzen an (vgl. [Ohl06, S. 136]).

Bei der asymmetrischen Gaußverteilung, welche die Realität in der Regel besser abbildet, ist es wie bei der Dreiecksverteilung: Sie kann durch die gleichen drei Werte beschrieben werden.

Unter dieser Verteilungsannahme ist der Faktor zur Berücksichtigung der zufälligen Abweichung von der durchschnittlichen Größe abhängig vom Wert der häufigsten Wahrscheinlichkeit x_0 , der unteren Grenze x_1 und oberen Grenze x_2 sowie von den generierten Realisierung der Zufallszahlen, die für jeden Simulationsdurchlauf erzeugt werden. Dadurch nimmt die stochastische Abweichung bei jeder Berechnung einen neuen Wert an.

Analog zum Beispiel der Zeitvariablen steht jede Realisierung einer Zufallszahl für genau eine Auswirkung, bspw. eine genau beschriebene Abweichung vom Erwartungswert.

Die Projektionsrechnung liefert die Ergebnisgrößen des Modells und somit ein umfangreiches Datenmaterial. Resultat der Simulation ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der zufälligen Ergebnisse und somit auch der Kenngrößen (**Bild 6.6**, links). Die Ergebnisgrößen der Simulation können unterschiedliche Werte annehmen, die in der Abbildung der Größe nach sortiert sind. Neben einem erwarteten Ergebnis sind daher auch optimistische und pessimistische Ergebnis möglich. Ziel einer jeden Simulation ist es, eine stabile Verteilung der Ergebnis zu erhalten. Dazu wird die Anzahl der Wiederholungen (Pfade) im stochastischen Szenariogenerator solange erhöht, bis die Ergebnisverteilung stabil ist.

Aus den Simulationsergebnissen sollen im nächsten Schritt Aussagen abgeleitet werden. Für die Analyse der Daten wird in der Regel nicht die gesamte Verteilung verwendet. Die Verteilung wird vielmehr auf aussagekräftige Kennzahlen reduziert. Ausgangspunkt dafür ist eine Beobachtungsreihe x_1, \dots, x_n für charakteristische Größen (z.B. Prozesszeit und Modulausfall), die sich aus den Simulationsdurchläufen ergeben hat. Zur Beschreibung der Eigenschaften der Beobachtungsreihe dient eine Maßzahl, die z.B. in geeigneter Weise ein „Zentrum“ angibt (vgl. [Har82, S. 31]). Bei solch einer Maßzahl wird von einem Lagemaß ge-

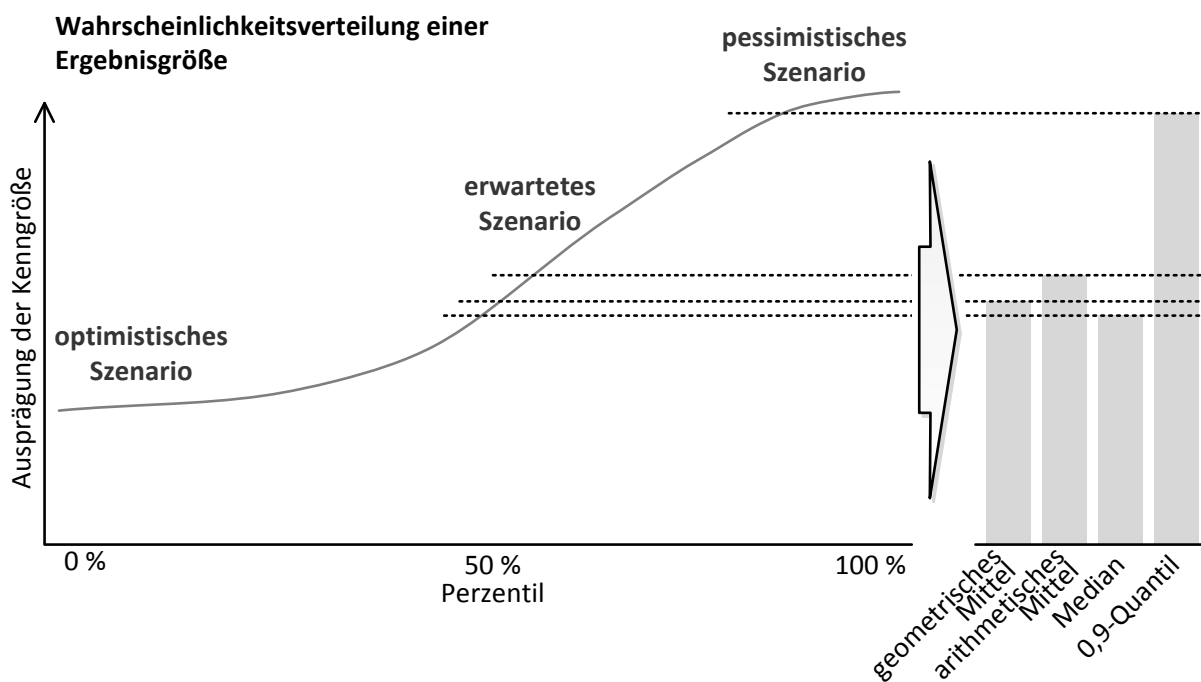


Bild 6.6: Durchlauf-Szenarien mit Lagemaßen am Beispiel einer Kenngröße (vgl. [Wei12, S. 237])

sprochen. In der Literatur werden unterschiedliche Maßzahlen aufgeführt (vgl. z.B. [Har82], [Koh10], [Büc07]). Im Rahmen dieser Arbeit sollen dem Anwender ebenfalls unterschiedliche Lagemaße zur Verfügung gestellt werden. Je nach Art der Abschätzung muss ein passendes Lagemaß ausgewählt werden. Hierzu zählen in der vorliegenden Arbeit das geometrische Mittel, das arithmetische Mittel, der Median und das α -Quantil, die im Folgenden eingeführt werden.

Einschub zum Lagemaß:

Sofern metrische Werte vorliegen, wird oft das arithmetische Mittel (synonym für Durchschnitt) verwendet (vgl. [Koh10, S. 33], [Har82, S. 31]). Das arithmetische Mittel eines Merkmals X mit den beobachteten Merkmalen x_1, \dots, x_n lässt sich mit der Gleichung 6.11 berechnen (vgl. [Har82, S. 31]).

$$\bar{x}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.11)$$

Der Median oder Zentralwert bezeichnet die Grenze zwischen zwei Hälften einer Beobachtungsreihe x_1, \dots, x_n . Das bedeutet, dass jeweils mindestens 50 % der Beobachtungen einen Wert größer oder gleich bzw. kleiner oder gleich dem Median annehmen. Gleichung 6.12 gibt den Median $\tilde{x}_{0,5}$ für den Fall, dass die Beobachtungswerte nach der Größe $x_{(1)} \leq \dots \leq x_{(n)}$ geordnet sind, an. (vgl. [Har82, S. 32])

$$\tilde{x}_{0,5} = \begin{cases} x_{((n+1)/2)} & , \text{ falls } n \text{ ungerade} \\ \frac{1}{2} \cdot x_{(n/2)} + x_{((n+2)/2)} & , \text{ falls } n \text{ gerade} \end{cases} \quad (6.12)$$

Der Vorteil des Medians zum arithmetischen Mittel ist, dass dieser auch bei ordinal skalierten Merkmalen verwendet werden kann und dass er robust gegen Ausreißer ist (vgl. z.B. [Har82, S. 32 f.]). Der Median gehört zur Gruppe der Quantile³ und wird auch als 0,5-Quantil bezeichnet. Nachteil der Quantile ist, dass für die Bestimmung des Lagemaßes nur ein Teil der Informationen verwendet wird (und zwar die Reihenfolge). Anders ist es beim arithmetischen und geometrischen Mittel, bei denen alle verfügbaren Informationen herangezogen werden.

Das α -Quantil einer geordneten Beobachtungsreihe $x_{(1)} \leq \dots \leq x_{(n)}$ lässt sich mit Hilfe der folgenden Gleichung bestimmen (vgl. [Har82, S. 34]).

$$\tilde{x}_\alpha = \begin{cases} x_{(k)} & , \text{ falls } n \cdot \alpha \text{ keine ganze Zahl ist} \\ & (k \text{ ist dann die auf } n \cdot \alpha \text{ folgende ganze Zahl)} \\ \frac{1}{2} \cdot x_{(k)} + x_{(k+1)} & , \text{ falls } n \cdot \alpha \text{ eine ganze Zahl ist} \\ & (\text{dann gilt } k = n \cdot \alpha) \end{cases} \quad (6.13)$$

Die letzte Möglichkeit, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Auswahl gestellt wird, ist das geometrische Mittel. Dieses empfiehlt sich, wenn die Merkmalsausprägungen relative Änderungen darstellen. In diesen Fällen wäre die Verwendung des arithmetischen Mittels ungeeignet, da die Gesamtänderung nicht durch eine Summe, sondern durch ein Produkt beschrieben wird. Gleichung 6.14 gibt an, wie das geometrische Mittel für eine Beobachtungsreihe x_1, \dots, x_n mit $x_i \geq 0$ für $i = 1, \dots, n$ berechnet werden kann. (vgl. [Har82, S. 35])

$$\bar{x}_g = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n} \quad (6.14)$$

Der Unterschied zwischen den vier vorgestellten Lagemaßen ist in **Bild 6.6** rechts anhand einer Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Kenngröße aufgezeigt. Jedes Lagemaß beschreibt auf seine Art und Weise die Verteilung bestmöglich. Auf den ersten Blick ist erkennbar, dass es zum Teil größere Abweichungen zwischen den Lagemaßen geben kann. Die Frage, die bei jeder Abschätzung individuell beantwortet werden muss, ist die Wahl des geeignetsten Lagemaßes.

³In der Statistik wird unter einem Quantil Q_α ein Merkmalswert bezeichnet, der angibt, unter welchem Wert der Anteil α aller Fälle der Verteilung liegt (vgl. [Har95, S. 114]).

Die Wahl eines geeigneten Lagemaßes soll abschließend anhand von zwei Fallbeispielen aufgezeigt werden:

- (a) Einhaltung vereinbarter Termine mit einem Kunden und innerhalb einer Fabrik:
Insofern Termine zwingend eingehalten werden müssen, sind besonders schlechte Szenarien heranzuziehen. Von Vorteil sein dürfte hierbei ein α -Quantil höheren Grads. Dieses Lagemaß berücksichtigt dafür z.B. die α -schlechtesten Durchlaufzeiten.
- (b) Kapazitätsplanung:
Um wirtschaftlich zu arbeiten, verfolgen Unternehmen eine hohe Auslastung der Anlagen. Die Auslastung steht wiederum im Widerspruch zur Termintreue. Eine hohe Auslastung hat geringe Kapazitätsreserven zur Folge, die wiederum für eine hohe Termintreue notwendig sind. (vgl. [Kle11b, S. 84]) Damit eine hohe Kapazität erreicht wird, ist im Vergleich zum ersten Beispiel ein Lagemaß notwendig, welches einen kleineren Wert für die Durchlaufzeit zur Folge hat. Für die Kapazitätsplanung kann am besten das arithmetische Mittel eingesetzt werden. Zeitliche Puffer sind bei der Kapazitätsplanung in der Regel nicht erwünscht.

Neben den beschriebenen stochastischen Einflüssen werden im Simulationsmodell Lerneffekte berücksichtigt. Lernkurvenmodelle beschreiben die Abnahme des Aufwands bzw. der benötigten Zeit in der industriellen Produktion mit zunehmender Anzahl an identischen Montageaufgaben oder ähnlich gefertigten Produkten. Lernkurven lassen sich über einen Graphen mit degressiv fallendem Verlauf darstellen (vgl. [Lie81, S. 14]). Als Gründer der Lernkurventheorie wird Wright (vgl. [Wri36]) genannt, der dieses Phänomen bei der Montagezeit von Flugzeugen beobachtete. Wright hat sich dabei auf die Betrachtung der modernen industriellen Produktion beschränkt (vgl. [Laa05, S. 15]). De Jong benennt die Ursachen des Lernprozesses. Die benötigte Zeit nimmt pro Ausführung eines (wiederholenden) Produktionsschritts aufgrund zunehmender Routine sowie Verbesserung der Werkstattorganisation, des verarbeiteten Materials, der Arbeitsweise und der Produktionshilfsmittel ab (vgl. [Jon60, S. 14], [Lie81, S. 12]).

Aufbauend auf der Theorie von Wright wurden eine Reihe von Lernkurvenmodellen entwickelt (vgl. z.B. [Lie81]). Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei unterschiedliche Modelle implementiert. Das erste Modell wurde in Anlehnung an das Lernkurvenmodell von Crawford [Cra44] definiert (vgl. **Bild 6.7** links):

$$t_i = t_\infty + t_\infty \cdot i^{-D}. \quad (6.15)$$

Dabei ist:

- t_i die Bearbeitungszeit für eine Operation nach $i = 1, \dots, I$ identischen Ausführungen,
- t_∞ die Bearbeitungszeit im eingeschwungenem Zustand,

- i die Anzahl der Ausführungen der betrachteten Operation und
- D der Depressionswert bzw. Ablaufexponent.

Die Parametrisierung des Modells aus Gleichung 6.15 muss im Einzelfall festgelegt werden. Ein typischer Wert kann $D = 0,6$ sein. Hierbei wird für die erste Ausführung die doppelte Zeit benötigt. Dieses Modell ist durch eine starke Abnahme des Mehraufwands innerhalb der ersten Ausführungen gekennzeichnet.

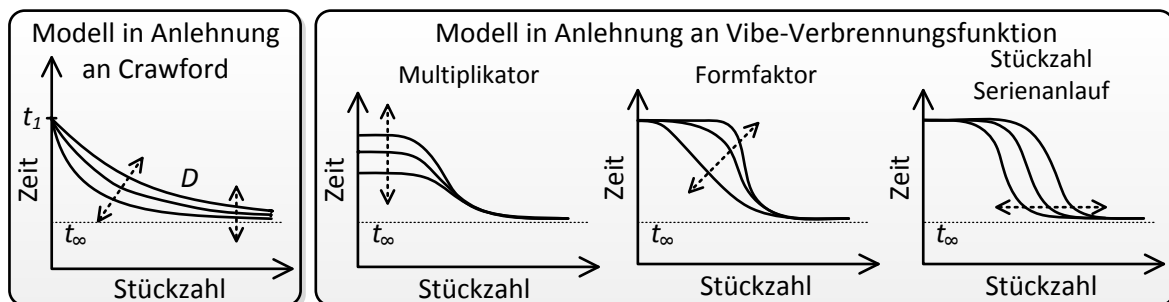


Bild 6.7: Implementierte Lernkurvenmodelle

Das zweite implementierte Modell soll eine detailliertere Modellierung der Anlaufform ermöglichen. Vor diesem Hintergrund wird ein eigens entwickeltes Modell verwendet, siehe Gleichung 6.16. Das Modell wurde in Anlehnung an die Vibe-Verbrennungsfunktion konzipiert (vgl. z.B. [Mer06, S. 167 ff.]) und ermöglicht die Einstellung der Anlaufkurve über die Parameter „Multiplikator“, „Formfaktor“ und „Stückzahl Serienanlauf“, siehe Modellierung der Lernkurve in **Bild 6.7** rechts. Damit wird eine detailliertere Anpassung erreicht, als sie mit Modellen aus dem Stand der Technik möglich ist.

$$t_i = N \cdot t_\infty - (N - 1) \cdot t_\infty \cdot (1 - e^{(-7 \cdot (i/R)^F)}) \quad (6.16)$$

Dabei ist:

- t_i die Bearbeitungszeit für eine Operation nach $i = 1, \dots, I$ identischen Ausführungen,
- t_∞ die Bearbeitungszeit im eingeschwungenem Zustand,
- i die Anzahl der Ausführungen der betrachteten Operation,
- N als Multiplikator für die Erstauführung,
- F als Formfaktor und
- R als Stückzahl für das Ende des Serienanlaufs.

Typische Werte für die Parameter N , F und R der Gleichung 6.16 hängen von dem jeweils betrachteten Einzelfall ab. Eine typische Parametrisierung kann $N = 5$, $F = 2$ und $R = 300$ sein. Dieses bedeutet, dass für die erste Ausführung fünf Mal so viel Zeit benötigt wird wie für die 300. Ausführung.

Durch eine regelmäßige Kontrolle der Simulationsergebnisse, einen Soll/Ist-Vergleich, können Rückschlüsse auf die Qualität der Annahmen gezogen werden (siehe Pfeile zwischen Analyse und Annahmen in **Bild 6.3**). Eventuell muss das Simulationsmodell modifiziert werden, um realitätsnähere Annahmen zu erhalten. Das ist im Zusammenhang mit der Qualität der Ergebnissen entscheidend: Bessere Annahmen ergeben qualitativ bessere Ergebnisse, sofern sich das Modell wie die Realität verhält.

6.4.2.2 Ergebnisauswertung

Die Auswertung der Simulationsergebnisse für die Varianten von Montagesystemen erfolgt in sieben Schritten (siehe **Bild 6.8**). In den ersten drei Schritten wird ein favorisiertes Montagesystem mit Hilfe berechneter charakteristischer Kennzahlen ausgewählt. Hierfür werden die Bewertungsmethode sowie das Kennzahlensystem aus Kapitel 5 verwendet. Anschließend wird das ausgewählte Montagesystem detaillierter analysiert. Ausgangsbasis bei der Auswertung sind die Simulationsergebnisse der einzelnen Montagesysteme. Berücksichtigung finden alle Szenarien (1 bis n) mit den betrachteten Perioden (1 bis p). Dieses in der Regel sehr umfangreiche Datenmaterial wird zunächst geeignet in einer Datenmatrix abgelegt, um darauf dynamisch zugreifen zu können. Für diese Daten werden im zweiten Schritt c charakteristische Kennzahlen berechnet. Hierbei wird über alle Ergebnisgrößen ein ausgewähltes Lagemaß, welches sich mit der Fragestellung des Planungsproblems ändern kann, ermittelt (vgl. **Bild 6.6**). Aufbauend auf den charakteristischen Kennzahlen wird im nächsten Schritt entweder manuell durch den Anwender ein Montagesystem für eine detailliertere Auswertung ausgesucht oder dieses über Vorgabe von Gewichtungsfaktoren der einzelnen Kennzahlen rechnergestützt vorgeschlagen. Im Anschluss kann das ausgewählte Montagesystem detaillierter analysiert werden, um die Erfüllung der Anforderungen zu prüfen. Hierbei können die Mittelwerte der berechneten Kennzahlen, die Anlaufkurve sowie die Szenarien untersucht werden. Mit der Auswertung der gemittelten Kennzahlen (gemittelt über Szenario und über Perioden) wird ein allgemeiner Überblick gegeben. In Schritt fünf lassen sich die Anlaufkurven der unterschiedlichen Szenarien analysieren.

Die Szenario-Analyse ist in drei Unterschritte aufgeteilt. Für die Szenario-Analyse werden die x % extremen Szenarien der insgesamt n simulierten Szenarien untersucht, das heißt diejenigen Szenarien mit den extremen Ergebnissen im Betrachtungszeitraum. Voraussetzung einer derartigen Analyse ist, dass der Modellrahmen sowie die Eingangsgrößen derartige Ergebnisse überhaupt zulassen. Bei den extremen Ergebnissen können zwei Fälle betrachtet werden. Beim ersten Fall führen die extremen Ergebnisse dazu, dass sich für das Montagesystem bestmögliche Ergebnisse ergeben. Der zweite Fall beinhaltet die Ergebnisse, die

zu schlechten Montagesystemergebnissen führen. Im Rahmen der Arbeit sind die schlechten Ergebnisse von Interesse (als „schlechte Szenarien“ bezeichnet).

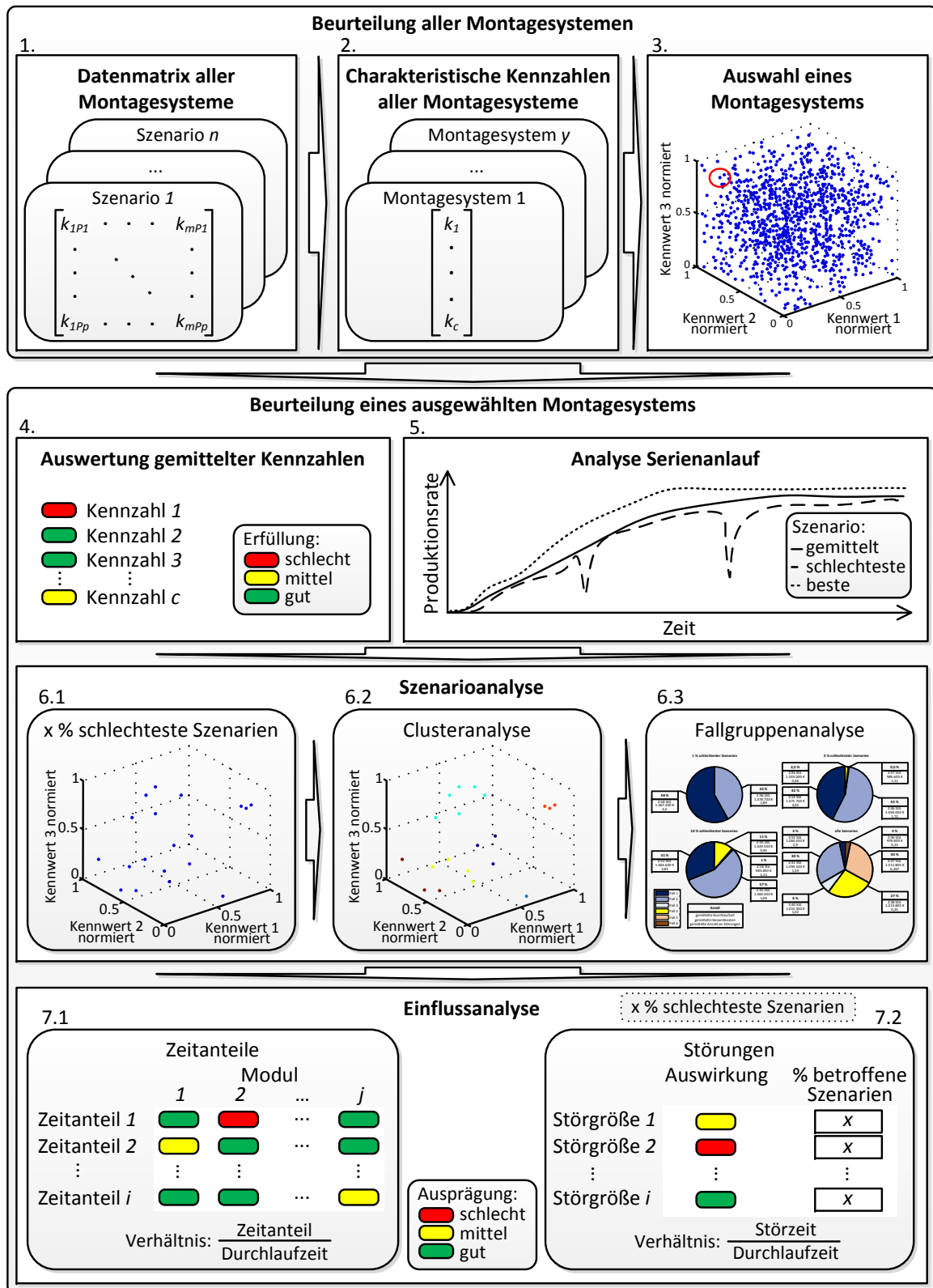


Bild 6.8: Vorgehensweise bei der Ergebnisauswertung

Mit schlechten Szenarien lässt sich nämlich überprüfen, ob das gewählte Montagesystem auch in allen ungünstigen Eventualitäten, die im Modell durch die vom Szenariogenerator erzeugten Annahmen abgebildet werden, den Anforderungen genügt. Die zur Charakterisierung verwendeten Ergebnisgrößen lassen sich individuell bestimmen.

Zur Ermittlung der schlechten Szenarien werden die zum gewählten Montagesystem gehörenden simulierten Szenarien nach gewichteten Kriterien sortiert. Bspw. könnten dieses die Durchlaufzeit, Life Cycle Cost, Störungszeit und Anzahl von Störungen sein. In der Regel würde dabei gelten: Je höher der gewichtete Wert, desto schlechter wird das Ergebnis der Simulation angesehen. Aus den in dieser Weise sortierten Szenarien werden die jeweils x % schlechtesten Szenarien für die weitere Analyse ausgewählt.

Die Ergebnisgrößen der schlechtesten Szenarien besitzen meist unterschiedliche Merkmalsausprägungen. Um die Daten für verschiedene Ausprägungen analysieren zu können, bietet sich eine Klassenbildung an (Schritt 6.2). Ein Verfahren dazu ist die Clusteranalyse. Dabei werden die Menge der Klassifikationsobjekte (Daten) aufgrund ihrer Ähnlichkeit in homogene Gruppen (bezeichnet als Klassen, Cluster und Typen) zusammengefasst (vgl. [Bac10, S. 15]). Die Objekte innerhalb einer Klasse besitzen eine ähnliche Struktur, unterscheiden sich aber wesentlich von Objekten anderer Klassen (vgl. [Han06, S. 383]). Zur Konstruktion von Clustern existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren, z.B. hierarchische, partitionierende und geographische Verfahren (vgl. [Bac10, S. 18 ff.], [Han10, S. 373 ff.]). Die Verfahren unterscheiden sich in der Einteilung und Zusammenfassung der Klassifikationsobjekte. Der Ablauf der Klassenbildung lässt sich in drei Schritten beschreiben: Berechnung der Distanzen zwischen den Variablen, Fusionierung der Klassen durch Algorithmen und Ermittlung der optimalen Klassenanzahl. Ein Hilfsmittel für die Bestimmung der Klassenanzahl (Höhe der Partitionierung) kann ein Dendrogramm darstellen, welches die hierarchische Zerlegung der Datenmenge und die Distanz zu anderen Klassen visualisiert (vgl. z.B. [Rey09, S. 130]).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden hierarchische Methoden für die Clusteranalyse verwendet. Im Allgemeinen liefern sie sehr kompakte Cluster und stellen stabile Verfahren dar. Es wird angestrebt, dass der Anwender zum einen unterschiedliche Verfahren und zum anderen die Klassenanzahl auswählen kann.

Sind die schlechtesten Szenarien so eingeteilt, dass die Ergebnisgrößen der einzelnen Szenarien innerhalb einer Klasse vergleichbar sind, so lassen sich die Ergebnisgrößen der Klassen auf einen Mittelwert reduzieren. Dies bewirkt eine Verringerung der Einzelfälle, sodass zur Analyse nur noch die Mittelwerte einzelner Klassen herangezogen werden müssen. Auf eine Betrachtung von Quantilen kann an dieser Stelle verzichtet werden, da die Abweichungen zwischen den Merkmalsausprägungen innerhalb einer Fallgruppe in der Regel gering sind. Ein Beispiel für die Klassenbildung ist in **Tabelle 6.3** dargestellt. Bei diesem Beispiel werden sechs Klassen und drei Klassifizierungskriterien (Durchlaufzeit, Life Cycle Cost und

Anzahl Störungen innerhalb einer Periode) verwendet. Bei der Einteilung der Szenarien ist darauf zu achten, dass die Ergebnisse innerhalb der Fallgruppen vergleichbar sind. Die im Rahmen dieses Beispiels verwendeten Kriterien zur Charakterisierung der Klassen könnten darüber hinaus um den Mittelwert, der zur Modellannahme geführt hat, ergänzt werden.

Tabelle 6.3: Beispielhafte Klasseneinteilung der schlechtesten Szenarien anhand von drei Kriterien

Fall	1	2	3	4	5	6
Durchlaufzeit	lang	lang/mittel	kurz/lang	mittel	kurz/mittel	kurz
Life Cycle Cost	hoch	mittel/hoch	hoch/gering	mittel	mittel/gering	gering
Anzahl Störungen	sehr viele	viele	viele	mittel	wenige	sehr wenige

Im letzten Schritt werden die unterschiedlichen Fallgruppen analysiert. **Bild 6.9** zeigt die Aufteilung der jeweils x % schlechtesten Szenarien zusammen mit den Durchschnittswerten von Durchlaufzeit, Life Cycle Cost und Anzahl an Störungen je Klasse eines fiktiven Beispiels mit der Einteilung aus **Tabelle 6.3**. Zur Klassenbildung wird hierbei eine hierarchische Methode verwendet.

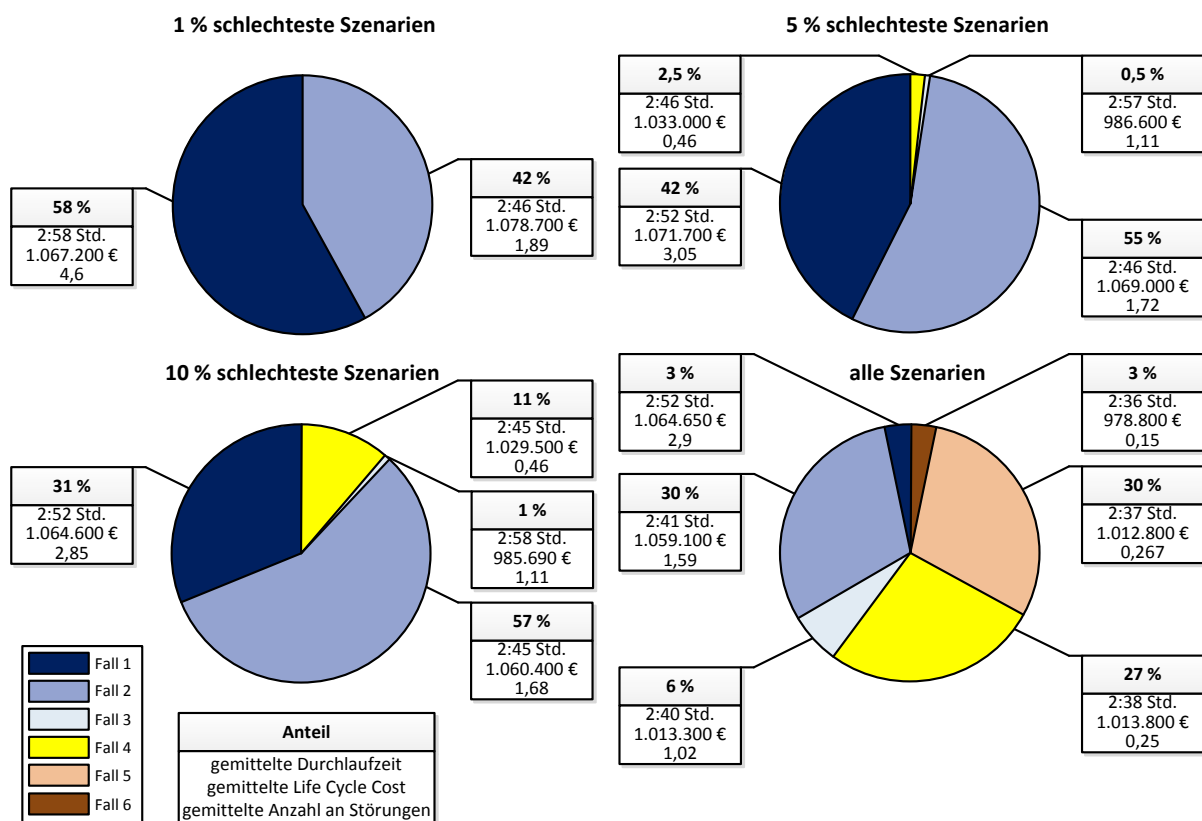


Bild 6.9: Anteile und Ergebnisse der Klassen eines fiktiven Beispiels (in Erweiterung zu [Wei12, S. 239])

Ersichtlich sind zwei Effekte: Erstens ändert sich mit der Anzahl der betrachteten Szenarien die Wahrscheinlichkeit, mit welcher die einzelnen Klassen vorkommen. So werden in diesem Beispiel die allerschlechtesten Szenarien fast ausschließlich den Klassen 1 und 2 zugeordnet. Szenarien der übrigen Klassen treten mit zunehmender Anzahl betrachteter schlechter Szenarien häufiger auf. Der zweite Aspekt betrifft die Merkmalsausprägungen. Die Mittelwerte, welche die zugehörigen Ausprägungen beschreiben, verbessern sich mit Zunahme der schlechten Szenarien.

Im siebten Schritt der Ergebnisauswertung kann eine Einflussanalyse durchgeführt werden. Diese bedeutet z.B. eine Analyse der einzelnen Modul-Zeitanteile sowie der Störungen. Hierbei wird untersucht, welche Einflussgrößen und Module zu schlechten Ergebnissen geführt haben. In der Regel bietet sich es also an, wie in Schritt sechs die x % schlechtesten Szenarien zu verwenden. In der Zeitanteil-Auswertung wird die Ausprägung für alle eingesetzten Montagemodule dargestellt. Die Ausprägung besteht aus dem Verhältnis zwischen dem jeweiligen Zeitanteil und der Durchlaufzeit. Ähnlich ist es bei den Störungen. Hier wird die Ausprägung aller Störgrößen als Verhältnis aus der jeweiligen Störzeit zur Durchlaufzeit dargestellt. Zudem wird angegeben, bei wie viel Prozent der schlechtesten Szenarien dieser Fall zutrifft.

Aus der detaillierten Analyse von Szenarien, Modul-Zeitanteilen und Störgrößen lassen sich einige wesentliche Kenngrößen ableiten. Mit Hilfe der Kennzahlen zu den schlechten Szenarien lässt sich überprüfen, ob das Montagesystem selbst in ungünstigen Fällen zu akzeptablen Ergebnissen führt. Darüber hinaus lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

- Kenngrößen für weitere Planungsmaßnahmen durch z.B. Verwendung des Worst Case,
- Definition von Randbedingungen für z.B. Lieferzeiten und Modulentwicklungen,
- vergleichende quantitative Betrachtungen für Varianten von Montagesystemen,
- Durchdringung von Prozessketten und Varianten für Montagesysteme sowie
- Sensitivitätsanalysen zur Identifikation wirkungsvoller Parameter und Handlungsfelder der Montage und zukünftiger Modulentwicklungen (z.B. Anforderungen hinsichtlich Optimierung der Prozesszeiten).

Kapitel 7

Entwicklung eines Simulationsbaukastens

Die Basis für die Planung und Beurteilung von Montagesystemen bilden die Informationen zu den Montageprozessen, den Modulen für Montagesysteme und den Bauteilen. Adäquate montage- und beurteilungsrelevante Daten sind eine grundlegende Voraussetzung. Diese Daten gilt es, geeignet zu sammeln und in einem Wissensspeicher abzulegen, um das in den vorherigen Kapiteln beschriebene Vorgehen realisieren zu können. Die zur Planung und Beurteilung erforderlichen Informationen sind in der Regel schwer zu erhalten. Sofern keine exakten Angaben zur Verfügung stehen, müssen diese mit Hilfe geeigneter Methoden ermittelt werden.

7.1 Anforderungen

Für die Umsetzung des Konzepts zur vollständigen Planung und multikriteriellen Beurteilung von Montagesystemen werden unterschiedliche Anforderungen an Aufbau sowie Inhalt des Datenmodells gestellt. Diese werden im Folgenden erläutert.

7.1.1 Allgemeines

Der Wissensspeicher beinhaltet parametrisierte technische Modullösungen in einer geeigneten Modellform. Der Aufbau eines Simulationsbaukastens wird durch Einflussgrößen aus dem Bereich der Simulations- und Montagetechnik getrieben. Aufbauend auf diesen Daten wird die komplette Planung und Beurteilung durchgeführt. Demzufolge lassen sich zwei Aspekte erkennen: Erstens existieren bei einem umfangreichen Baukasten vielfältigere Lösungen.

Zweitens bestimmt die Granularität und Genauigkeit der Eingangsdaten die Qualität der Simulationsergebnisse. Es gilt eine geeignete Granularität zu finden, um die relevanten Eigenschaften beschreiben zu können. Nachteil eines umfangreichen und feinen Baukastens ist jedoch die hohe Komplexität und der Umfang der handzuhabenden Daten. Hier gilt es, einen Kompromiss zu finden.

Simulationstechnik

Die in den vorherigen Abschnitten entwickelten Konzeptbausteine greifen während der Planung und Beurteilung dynamisch auf den Wissensspeicher zu, um auf diese Weise schnell und einfach Modelle aus bereits parametrisierten Einzellösungen zu erstellen. Damit der Zugriff reibungslos gelingt, sind eine einfache Eingabe, Erweiter- und Änderbarkeit der Informationen und Daten anzustreben. Zudem muss eine geeignete Schnittstelle zwischen den unterschiedlichen Konzeptbausteinen vorgesehen sein, die eine Datenübergabe ermöglicht.

Folgende Anforderungen muss der Simulationsbaukasten erfüllen (in Anlehnung an [Bad05, S. 35] mit eigener Erweiterung):

- **Schnelle Simulationsdurchführung:** In produzierenden Unternehmen erhöht sich die Planungshäufigkeit und die Planungszeiten. Daher benötigt der Planer möglichst schnell aussagefähige und verwertbare Simulationsergebnisse.
- **Abbildung relevanter Prozessschritte:** Das Simulationsmodell muss alle relevanten Montageschritte abbilden können. Hierfür können je nach Fragestellung unterschiedliche Detaillierungsgrade von Interesse sein. Der Detaillierungsgrad ist im günstigsten Fall direkt vom Anwender bestimmbar. So können individuelle Anforderungen an die Ergebnisqualität oder die Rechenintensität gegeneinander abgewogen werden.
- **Geringer Aufwand für die Eingabe, Modellerstellung und -änderung:** Für die Ermittlung einer optimalen Lösung muss eine einfache, möglichst standardisierte Eingabe der notwendigen Informationen sowie eine einfache Erstellung und Änderung der Modelle und Daten sichergestellt sein.
- **Genauere Abbildung von relevanten Zusammenhängen und Eigenschaften:** Die ausreichend genaue Abbildung von Systemeigenschaften sowie -zusammenhängen bildet die Voraussetzung für die Berechnung einer optimalen Lösung.
- **Aussagekraft der Simulationsergebnisse:** Für eine Gegenüberstellung und Beurteilung von Varianten sind aussagekräftige Simulationsergebnisse erforderlich.
- **Abbildung von Unsicherheiten:** Die Informationen zu technischen Systemen sind in der Regel lückenhaft. Unsicherheiten können in diesem Zusammenhang größere Auswirkungen auf die Ergebnisse besitzen. Vor diesem Hintergrund gilt es die Unsicherheiten geeignet im Wissensspeicher zu hinterlegen.

Montagetechnik

Bei der Montage von Flugzeugen werden eine Reihe unterschiedlicher Technologien eingesetzt, welche aus unterschiedlichen Prozessschritten bestehen. Zur Realisierung der Prozessschritte lassen sich in der Regel verschiedene Montagemodule mit individuellen Eigenschaften verwenden. Der Simulationsbaukasten muss geeignet aufgebaut sein, damit er alle relevanten Unterschiede und Eigenschaften abbilden kann. Hierzu gehören z.B. die Abbildung von unterschiedlichen Zeitanteilen sowie Kosten.

Daraus abgeleitet ergeben sich die nachfolgend aufgeführten Anforderungen, die es im Rahmen der Entwicklung eines Simulationsbaukastens zu berücksichtigen gilt (in Anlehnung an [Bad05, S. 35] mit eigener Erweiterung):

- Abbildung relevanter Montageprozesse: Für die Planung ist elementar, alle zur Montage notwendigen Prozesstechnologien und -schritte zu berücksichtigen.
- Abbildung aller Module für Montagesysteme: Für die Ermittlung und Beurteilung qualitativ hochwertiger Ergebnisse sind drei Aspekte erforderlich. Zunächst müssen alle Module ausreichend detailliert im Baukasten hinterlegbar sein. Zweitens gilt es, die zum Teil stark unterschiedlichen Prozesszeiten zu berücksichtigen. Nicht zuletzt müssen sich Eigenschaften (z.B. Eignung der Module) hinterlegen lassen.
- Berücksichtigung dynamischer und stochastischer Einflussgrößen: Einflussgrößen können eine große Bedeutung bei der Wahl eines Montagesystems besitzen. Darum gilt es, diese zu berücksichtigen, z.B. in Form von Abweichungen, Störungen und Lernkurven.

7.1.2 Daten und Annahmen

Die im Wissenspeicher abgelegten Informationen bzw. Daten sind aus unterschiedlichen Quellen zusammenzutragen. Dazu gehören neben den Herstellerangaben Untersuchungen, Experimente oder Statistiken. Die daraus gewonnenen Daten müssen sinnvoll strukturiert und zusammengestellt werden. Die für die Planung und Beurteilung von Montagesystemen relevanten Eigenschaften der Module, Bauteile und Prozesse müssen durch diese Informationen ausreichend widerspiegelt werden. Darüber hinaus gilt es, die Unsicherheiten der Angaben festzuhalten, bspw. potentielle Abweichungen zu vorgegebenen Prozesszeiten.

Den einzelnen Informationen können unterschiedliche Stufen der Genauigkeit zugeordnet werden, vgl. **Bild 7.1**. Der Genauigkeitsgrad beeinflusst maßgeblich die Planung und Beurteilung. Je genauer die Teilinformationen, desto genauer sind die Eingangsparameter des Modells und desto aussagekräftiger sind die Planung und Beurteilung. Die Genauigkeit wird in drei Hauptstufen eingeteilt (vgl. z.B. [Jon00a, S. 46]):

- Genaue Teilinformationen: Diese Stufe beschreibt genaue Teilinformationen. Die Teilinformationen bilden endgültige Fakten, die genau vorausgesagt werden können und

immer exakt eingehalten werden. Somit entfällt die zusätzliche Angabe eines Abweichungsintervalls.

- Ungenaue Teilinformationen mit Angabe einer möglichen Abweichung: Die zweite Stufe der Genauigkeit bildet den Übergang zwischen genauen und ungenauen Teilinformationen. Zunächst handelt es sich um eine ungenaue Information, da es nicht möglich oder nicht erwünscht ist, eine exakte Angabe zu machen. Zudem wird neben dieser ungenauen Information beabsichtigt oder unbeabsichtigt eine bestimmte Abweichung berücksichtigt.
- Ungenaue Teilinformationen ohne Angabe einer möglichen Abweichung: Bei dieser Stufe der Genauigkeit handelt es sich um eine ungenaue Teilinformation ohne Angabe einer Grenze, innerhalb derer es Abweichungen geben kann. Auf die Angabe der zusätzlichen Grenze wird verzichtet, weil dazu entweder keine Informationen vorliegen oder die ungenaue Angabe für die Betrachtung ausreicht.

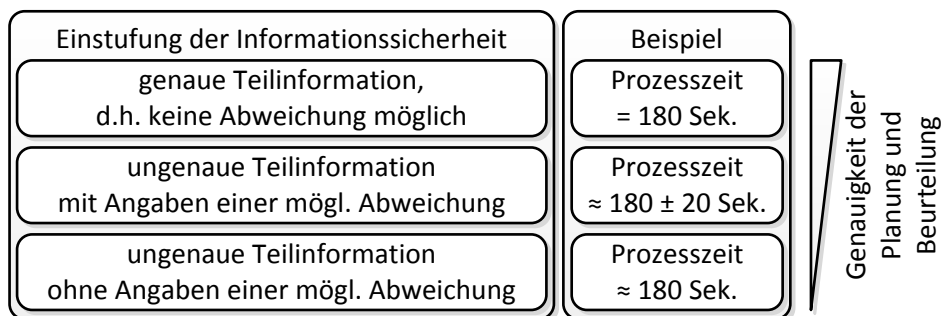


Bild 7.1: Stufen der Informationsgenauigkeit (in Anlehnung an [Jon00a, S. 46])

7.1.3 Planungseinflüsse

Neben den bereits beschriebenen Anforderungen gilt es, die relevanten Prämissen¹ der Planung, Einflüsse des Produkts sowie des Prozesses und der Ressourcen zu berücksichtigen **Bild 7.2**. Diese haben einen besonderen Einfluss auf die Planung von Montagesystemen. Zentraler Bestandteil bei der Planung sind die Montagetechnologien. Bestimmte Technologien eignen sich aufgrund der Bauteileigenschaften (z.B. Geometrie, Größe und Material) nicht für alle Montageaufgaben. Informationen dazu sind sowohl bei den Daten zu den Montageprozessen als auch bei den Daten zu den Bauteilen und Modulen bzw. Komponenten für Montagesysteme zu hinterlegen.

Darüber hinaus sind die Projektziele für die Planung von Bedeutung. Sie betreffen bspw. die Ausbringungsrate, Kosten für Investition, Energie, Personal sowie weitere laufende Kosten. Diese Art von Größen werden maßgeblich durch das Management beeinflusst. Im Rahmen

¹Prämisse stammt vom lateinischen praemissum, das so viel wie „das Vorausgeschickte“ bedeutet. In der Logik bedeutet es eine Voraussetzung oder Annahme.

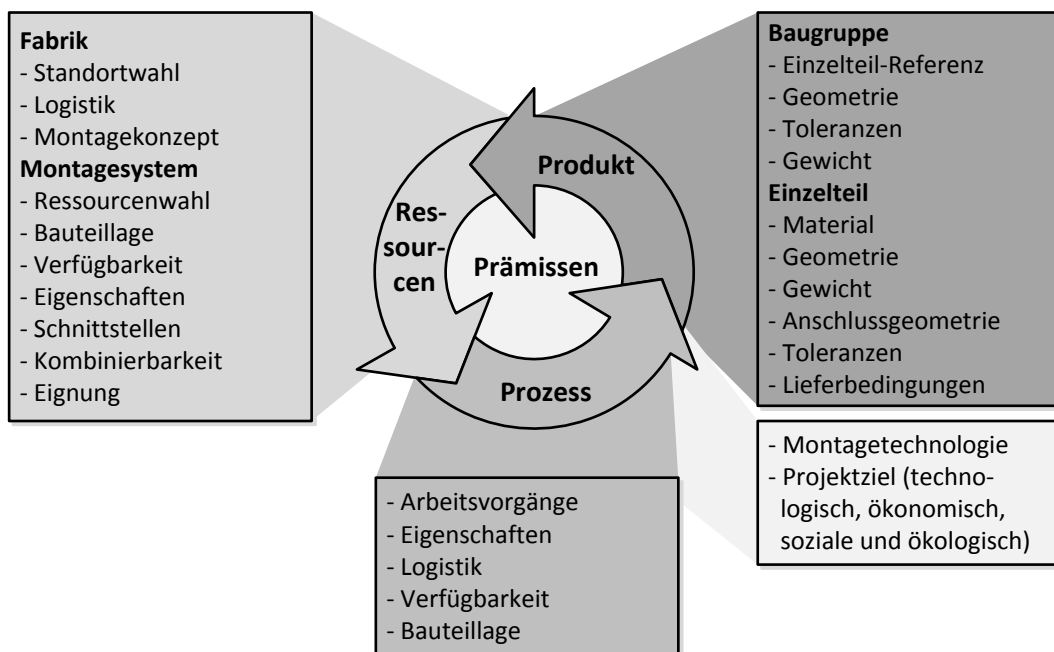


Bild 7.2: Einflüsse auf die Planung von Montagesystemen (in Anlehnung an [Glo07, S. 59 u. 92])

der Arbeit bleiben Materialpreise der Bauteile sowie Abschreibung und Verzinsung der Anlagen unberücksichtigt. Zusätzlich zu den Prämissen haben die Parameter des Produkts bzw. Erzeugnisses einen wichtigen Einfluss auf die Planung. In erster Linie spielen die Materialien sowie die Geometrie mit den Anschlussmaßen und das Gewicht eine entscheidende Rolle. Darüber hinaus wird die Planung durch die teilespezifischen Toleranzen beeinflusst, aber auch Aspekte wie Lieferbedingungen der Einzelteile müssen berücksichtigt werden.

Aufbauend auf dem Produkt und den Prämissen basiert die Planung von Prozessen und Ressourcen, die aufgrund ihrer Interaktion gemeinsam betrachtet werden müssen. Die Interaktion wird schon durch die Tatsache ersichtlich, dass für viele Bauteile bzw. Einzelteile individuelle Montageprozesse und/oder Ressourcen notwendig sind. Das Ziel an dieser Stelle ist es, die Montagesysteme mit Hilfe von definierten Montageprozessen und Ressourcen aufbauend auf den Prämissen und Produktparametern durchgängig digital zu planen. Der genaue Planungsablauf ist in Kapitel 6 detailliert dargestellt.

Damit ergeben sich die im Folgenden zusammengestellten Anforderungen an den Simulationsbaukasten:

- Bauteile und Module für Montagesysteme: Das Datenschema muss die Grundlage für eine Beschreibung von Bauteilen und von Modulen für Montagesysteme liefern. Das bedeutet, dass es eine Berücksichtigung aller notwendigen Daten, wie bspw. Schnittstellen, Eignungsgrade der Module hinsichtlich der Prozesse sowie Kosten- und Zeitinformationen, vorsieht.

- Montageprozesse und deren Beschreibung: Zusätzlich gilt es, eine Grundlage für die Beschreibung von Montageprozessen vorzuhalten. Dies beinhaltet nicht nur die Berücksichtigung der Art von Prozessen, sondern auch von notwendigen Informationen und Wissen.
- Verknüpfung zwischen den Bauteilen, Modulen und Montageprozessen: Entscheidend ist die Interaktion zwischen den Daten der Module für Montagesysteme, Bauteile und Montageprozesse. Ist diese gewährleistet, können Montagesysteme automatisiert ermittelt werden.

Der Simulationsbaukasten bildet die Schnittstelle zwischen fiktiven und bereits entwickelten (und eventuell getesteten) Modulen zur eigentlichen Planung und Beurteilung von Montagesystemen. Demzufolge stellt er die notwendigen Eingangsinformationen zur Verfügung.

Im folgenden Abschnitt wird zunächst auf das verwendete Datenmodell eingegangen. Anschließend werden der konkrete Aufbau und die Struktur des Wissensspeichers beschrieben.

7.2 Notation des Datenschemas und Datenmodells

Für den Aufbau des Datenmodells wird eine graphische Notation verwendet. In der Regel ist diese übersichtlicher und leichter verständlich sowie handzuhaben als eine textuelle Beschreibung. In der Literatur gibt es eine Reihe von unterschiedlichen Symbol-Notationen für Datenstrukturdiagramme. Ausgehend vom Entity-Relationship-Modell von Chen [Che76] wurden zahlreiche weitere objektorientierte Ansätze entwickelt, die jeweils zusätzliche Anforderungen berücksichtigen (vgl. z.B. [Boo91], [Coa91], [Rum91]). Das Entity-Relationship-Modell von Chen ist auf eine Beschreibung von relationalen Datenstrukturen² zugeschnitten.

Für das Datenschema des Datenmodells dieser Arbeit wird die Notation nach Rumbaugh (vgl. [Rum91, S. 29 ff.]) verwendet. Die dazugehörigen Sprachelemente für die verwendeten Fachbegriffe sind in **Bild 7.3** vorgestellt. Die wichtigsten verwendeten Fachbegriffe werden kurz erläutert. Durch eine objektorientierte Denkweise ergeben sich komplexe Datentypen (vgl. [Fel97, S. 94]), welche durch die Formulierung einer Klasse deklariert werden. Die Daten eines komplexen Datentyps werden als Instanz bezeichnet. Die Klasse legt fest, welche Attribute und Verhaltensmuster die Instanzen der Klasse aufweisen dürfen (vgl. z.B. [Rum91, S. 28]). Nach der Notation des Klassendiagramms gemäß Rumbaugh wird eine Klasse durch ein zweigeteiltes Rechteck dargestellt. In der oberen Hälfte wird der Klassenname genannt, in der unteren sind die Attribute deklariert.

²Eine relationale Datenbank lässt sich als eine Sammlung von Tabellen (den Relationen) vorstellen, in denen Datensätze abgespeichert sind (vgl. [Gas10, S. 216]).

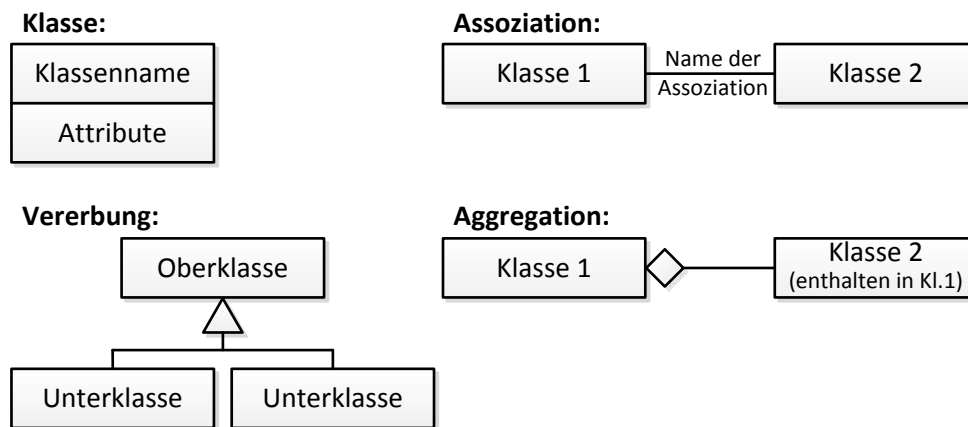


Bild 7.3: Symbole für Klassendiagramme nach Rumbaugh (vgl. [Rum91])

Eine Assoziation stellt eine allgemeine Beziehung zwischen zwei Klassen in Form einer ungerichteten Verbindung dar (vgl. z.B. [Jon00a, S. 76]). Kennlich gemacht wird sie im Diagramm durch eine Verbindungslinie zwischen zwei Klassen. An jeder Assoziation können Multiplizitäten, d.h. Zahlen oder Zahlenbereiche, angegeben werden. Dadurch wird die Anzahl der miteinander in Beziehung stehenden Objekte definiert. Gekennzeichnet werden die Multiplizitäten an beiden Enden der Assoziation. Die Zahlenwerte sagen aus, wie viele Objekte der Klasse mit einem Objekt der anderen Klasse in Beziehung stehen (vgl. z.B. [Boo98]).

Eine Aggregation ist eine strenge Form der Assoziation (vgl. z.B. [Rum91, S. 46]). Sie gibt an, dass eine Klasse in der verbundenen Klasse enthalten ist. Dargestellt wird dieses durch eine Raute an der Verbindungslinie auf der Seite der verbundenen Klasse.

Der Mechanismus der Vererbung beschreibt Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen verschiedenen Klassen (vgl. z.B. [Jon00a, S. 77]). Diese werden in sogenannten Oberklassen eingebracht, welche die Attribute an die sogenannten Unterklassen vererben. Im Klassendiagramm wird die Vererbung durch ein Dreieck gekennzeichnet.

Die somit eingeführte Notation des Klassendiagramms wird im folgendem Abschnitt zur Abbildung des Datenmodells verwendet.

7.3 Aufbau des Simulationsbaukastens

In diesem Abschnitt wird mit Hilfe der ausgewählten Modellierungsmethoden ein Simulationsbaukasten entwickelt, der sämtliche Informationen bzw. Daten speichert. Dieser Simulationsbaukasten dient als Wissensspeicher und bildet die Grundlage für die Planung und Beurteilung von Montagesystemen. Demzufolge muss er die übergeordneten Anforderungen (Kapitel 4) sowie den Anforderungen der anderen Konzeptbausteine bestmöglich erfüllen (vgl. Kapitel 5 bis 6).

Im Vordergrund der Entwicklung steht ein allgemeiner Ansatz, der sich nach Bedarf benutzerspezifisch anpassen und ergänzen lässt.

Für die Speicherung der Informationen werden unterschiedliche Klassen definiert. Dafür wird nicht nur die bereits von Feldmann ([Fel97, S. 91 ff.]) und Steinwasser [Ste97, S. 51] vorgenommene Unterteilung in die Hauptklassen „Produkt“, „Prozess“ und „Ressource“ vorgenommen, sondern auch eine Klassenerweiterung. Dadurch ergeben sich die folgenden Klassen (vgl. **Bild 7.4**): „Bauteil & Produkt“, „Montageprozess“ und „Ressource bzw. Modul für ein Montagesystem“. Darüber hinaus werden Beziehungen zwischen den Klassen und den Mengen der jeweiligen Klassen angelegt.

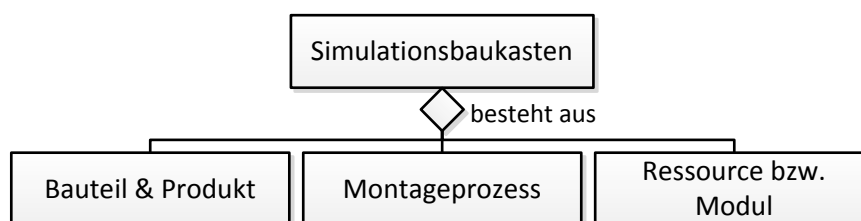


Bild 7.4: Hauptklassen des Simulationsbaukastens

Bauteil & Produkt

Die Klasse „Bauteil & Produkt“ beinhaltet Einzelteile und Baugruppen. Als Attribute sind die gestaltbeschreibende Form und Dimensionierung hinterlegt.

Die Informationen über das Produkt bilden die Schnittstelle zwischen der Konstruktion und der Montageplanung. Somit ergänzt die Schnittstelle die Ergebnisse der Konstruktion um Prozess- und Ressourceninformationen (vgl. z.B. [Jon00a, S. 80]). Es gilt, die Informationen von den Einzelteilen, den Baugruppen und dem Produkt als Eingangsinformationen in das Datenmodell der Montageplanung zu übertragen. Dafür werden die Bauteile b_i in einem Vektor-Array \vec{B}_B (siehe Gleichung 7.1) als q -dimensionale Menge hinterlegt.

$$\vec{B}_B = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_q \end{pmatrix} \quad \left\{ q : \text{Anzahl unterschiedlicher Einzelteile, Baugruppen und Produkte} \right.$$

(7.1)

Die zusätzlichen Informationen werden als Attribute in Form von Matrizen abgelegt. Die einzelnen Zeilen der Matrix stehen jeweils für ein Bauteil i . Die Informationen werden schematisch den Spalten der Matrix zugeordnet. Zu den Informationen zählen Bauteiltoleranzen, Geometrie (Länge, Breite und Höhe), Gewicht, Lieferzeit bzw. Abweichung inklusive Wahrscheinlichkeit einer Abweichung, Wahrscheinlichkeit eines Ausschussteils und Information über die Art des Bauteils (Eigenfertigung oder Zukaufteil). Die gewählten Attribute richten

sich nach den in den vorherigen Abschnitten entwickelten Bausteinen und können um weitere Aspekte ergänzt werden.

Dieses Datenmodell erlaubt die Erweiterung einzelner Bereiche durch jeden Ersteller mit gleichzeitiger Übertragung der gesammelten Daten an das Planungsverfahren. Darüber hinaus ist es ebenfalls möglich, eine weitere Unterteilung der Klassen vorzunehmen.

Montageprozess

In der Klasse „Montageprozess“ sind die möglichen Prozesse, die für die Implementierung des Planungsproblems zur Auswahl stehen, hinterlegt. Gespeichert ist diese s -dimensionale Menge der Prozesse o_i in einem Vektor-Array \vec{B}_O (siehe Gleichung 7.2). Weitere Informationen sind in dieser Klasse nicht abgelegt. Toleranzen, Montagezeiten etc. sind bei den jeweiligen Ressourcen bzw. Modulen für Montagesysteme (Ressourcen) als Attribute hinterlegt.

$$\vec{B}_O = \begin{pmatrix} o_1 \\ \vdots \\ o_s \end{pmatrix} \quad \left\{ \begin{array}{l} s : \text{Anzahl unterschiedlicher Prozesse} \end{array} \right. \quad (7.2)$$

Darüber hinaus sind bei dieser Klasse ebenfalls die Präzedenzbeziehungen der Montageprozesse als Attribut in einer Matrix \mathbf{P} hinterlegt (siehe Gleichung 7.3). Die Dimension beträgt $s \times s$ (s als Anzahl unterschiedlicher Montageprozesse), die Präzedenzbeziehung zwischen zwei Prozessen wird über den Wert Null oder Eins beschrieben (0 = kein anderer Prozess zuvor notwendig, 1 = Zeilen-Prozess vor Spalten-Prozess notwendig).

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} - & u_{o_1 o_2} & \cdots & u_{o_1 o_s} \\ u_{o_2 o_1} & - & \cdots & u_{o_2 o_s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{o_s o_1} & \cdots & \cdots & - \end{pmatrix} \quad \left\{ \begin{array}{l} u_{jk} : \text{Präzedenzbeziehung zwischen Prozess } j \text{ und } k \\ o_i : \text{Prozess } i \\ s : \text{Anzahl unterschiedlicher Prozesse} \end{array} \right. \quad (7.3)$$

Ressource bzw. Modul für ein Montagesystem

In der dritten Klasse werden die Ressourcen bzw. Module für Montagesysteme hinterlegt. Abgespeichert wird die w -elementige Menge dieser Klasse in dem Vektor-Array \vec{B}_M (siehe Gleichung 7.4).

$$\vec{B}_M = \begin{pmatrix} m_1 \\ \vdots \\ m_w \end{pmatrix} \quad \left\{ \begin{array}{l} w : \text{Anzahl unterschiedlicher Ressourcen/Module} \end{array} \right. \quad (7.4)$$

In dieser Klasse sind zahlreiche Attribute hinterlegt, die für die Planung und Beurteilung von Montagesystemen notwendig sind. Ohne diese Informationen kann das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept nicht umgesetzt werden. Die Attribute sind unterschiedlichen Gruppen zugeordnet, welche die Moduleigenschaften beschreiben: Zeit, Kosten, Emission/Ergonomie und Sonstiges. Die Attribute sind jeweils modulabhängige Größen. Im Folgenden werden die Attribute und deren Eigenschaften erläutert. Bei den meisten Attributan-gaben handelt es sich um Absolutwerte.

Die Gruppe „Zeit“ besteht aus insgesamt neun Attributen: Bearbeitungs-, Liege-, Rüst-, Transport-, Kontroll-, Installations- und Demontagezeit sowie Lernfaktoren für Bearbeitungs- und Rüstvorgänge. Diese Größen besitzen bei der Planung eine große Bedeutung, da sie einen signifikanten Einfluss auf die Leistungskriterien wie die Auslastung, Durchlaufzeit etc. haben (vgl. z.B. [Ohl06, S. 134]). Daher ist den Zeiten eine besondere Aufmerksamkeit zu schenken, um möglichst realitätsnahe Annahmen treffen zu können. Die Grundlage für die Prozesszeiten sollen Erfahrungswerte bzw. Herstellerangaben sein. Hierzu zählen unterschiedliche Zeiten (in einer Zeiteinheit) inklusive deren zeitlichen Abweichungen (nach oben und nach unten) und Anlauffaktoren. Die Anlauffaktoren beschreiben, wie viel zusätzlicher Zeitaufwand zu Beginn eines Serienanlaufs benötigt wird.

Die zweite Gruppe, „Kosten“, beinhaltet zwölf Attribute, die aus den Kostenanteilen hervorgehen. Zu den Kosten-Attributen (Einheit Euro) zählen die Investitionskosten, Personalkosten für die Installation (sie beschreiben u.a. die notwendige Ausbildung des Monteurs), fixe Installationskosten, laufende Kosten, Energiekosten im Leerlauf und im Betrieb, Rüstkosten, Wartungskosten, fixe Abbaukosten, Logistikkosten, Entsorgungskosten sowie Personalkosten für den Abbau. Diese Größen werden im Gegensatz zu den Attributen der Zeit als fest angenommen.

Die Gruppe drei, „Emission/Ergonomie“, beinhaltet notwendige Größen, um eine soziale, ökologische und ergonomische Beurteilung durchführen zu können. Insgesamt haben sich aus den Bewertungskennzahlen sechs notwendige Attribute ergeben. Dieses sind der Verschmutzungsgrad eines Moduls (Abstufung nach 5 = sehr schmutzig bis hin zu 1 = sehr sauber), die Lautstärke [dB], die Vibrationen im Betrieb [m/s^2], die Gefahr der Module (1 = geringe Gefahr bis hin zu 5 = hohe Gefahr), die spezifische Abfallmenge in der Produktion [kg/Std.] sowie der spezifische Schadstoffausstoß [g/Std.].

Die vierte und letzte Gruppe, „Sonstiges“, enthält 17 gemischte Attribute, welche den anderen Gruppen nicht eindeutig oder gar nicht zugeordnet werden können. Dazu zählen die Nutzungsdauer der Module [Jahre], der Automatisierungsgrad (0 = manuell sowie 1 = automatisiert), das benötigte Personal für die Installation, Betrieb, Instandhaltung und Abbau [Stk.], die Modul-Ausfallwahrscheinlichkeit [% pro Betriebsstunde], das Modulgewicht [kg], die

Modul-Traglast [kg], die Modul-Reichweite/-Distanz [m], die Information zur Längenskalierbarkeit/Verlängerbarkeit (1 = ja; 0 = nein), die Prozesstoleranz/Genauigkeit [mm], die Baugröße bzw. der Flächenbedarf [m²], die minimale und maximale Einsatztemperatur [°C], die Modulherkunft (1 = standardisiertes Modul; 0 = Spezialanfertigung), der Reifegrad der Module [%] sowie die maximale Prozesskraft [N] (diese Attribut wird für Fügeaufgaben benötigt).

Über diese Informationen hinaus sind die Attribute Verträglichkeit³ mit anderen Ressourcen sowie von Ressourcen mit Bauteilen und Notwendigkeit⁴ anderer Ressourcen angelegt.

Die Verträglichkeiten zwischen den Modulen für Montagesysteme sind in der Matrix V_{MM} gespeichert (siehe Gleichung 7.5). Die Dimension der Matrix hängt von der Anzahl w der betrachteten Module ab und ergibt sich zu $w \times w$. Die Matrixeinträge sind boolesch; die Verträglichkeit kann nur den Wert Null oder Eins (0 = Module j und k kombinierbar, 1 = Module j und k nicht kombinierbar) annehmen.

$$V_{MM} = \begin{pmatrix} v_{m_1 m_1} & \cdots & v_{m_1 m_w} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m_w m_1} & \cdots & v_{m_w m_w} \end{pmatrix} \begin{cases} v_{jk} & : \text{Verträglichkeit Modul } j \text{ mit Modul } k \\ w & : \text{Anzahl unterschiedlicher Module} \end{cases} \quad (7.5)$$

Ob ein bestimmtes Montagemodul für die Verwendung eines anderen Moduls notwendig ist, beschreiben die Notwendigkeitsbeziehungen. Die Notwendigkeiten der Module untereinander sind in der Matrix N hinlegt (siehe Gleichung 7.6). Die Dimension dieser Matrix ist also ebenfalls abhängig von der Anzahl w der unterschiedlichen Montagemodule und beträgt $w \times w$. Analog zur Verträglichkeitsmatrix sind die Matrixeinträge boolesch. Die Notwendigkeitsbeziehung wird über den Wert Null oder Eins (0 = Modul j unnötig für Modul k , 1 = Modul j notwendig für Modul k) ausgedrückt.

$$N = \begin{pmatrix} - & f_{m_1 m_2} & \cdots & f_{m_1 m_w} \\ f_{m_2 m_1} & - & \cdots & f_{m_2 m_w} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m_w m_1} & \cdots & \cdots & - \end{pmatrix} \begin{cases} f_{jk} & : \text{Notwendigkeitsbeziehung der Module } j \\ & \text{und } k \\ w & : \text{Anzahl der unterschiedlichen Module} \end{cases} \quad (7.6)$$

Beziehungs- und Verbindungsinformationen

Unter den Informationen über Beziehungen und Verbindungen wird das Zusammenwirken der Elemente aus den Klassen „Bauteil & Produkt“, „Montageprozess“ und „Ressource bzw. Modul“ verstanden. Bspw. spielen sie eine Rolle, wenn es darum geht, ob ein Prozess bzw. Mo-

³Das bedeutet, dass Module untereinander bzw. Module mit Bauteilen kombinierbar sind, um gemeinsam für eine Aufgabe in einem Montagesystem eingesetzt werden zu können.

⁴Das bedeutet, dass ein Modul notwendig ist, um ein anderes Modul einsetzen zu können.

dul für ein bestimmtes Bauteil (z.B. mit vergebenem Material und Anschlussmaßen) geeignet ist. Diese Informationen stellen daher einen wesentlichen Input für die Montageplanung da. Zwischen den Klassen werden sie durch eine Assoziation ausgedrückt. Sie repräsentiert sowohl produkt-, prozess- als auch modulspezifische Informationen. Die Assoziation beschreibt im Rahmen einer Schnittstellenbetrachtung die Verträglichkeiten zwischen den Modulen für Montagesysteme und den Bauteilen und zum anderen die Eignungsgrade⁵ der unterschiedlichen Module.

Die Verträglichkeiten zwischen den Modulen und Bauteilen sind in der Matrix V_{MB} hinterlegt (siehe Gleichung 7.7). Die Dimension der Matrix hängt von der Anzahl q möglicher Bauteile sowie w unterschiedlicher Module für Montagesysteme ab. Sie ergibt sich zu $w \times q$. Die weitere Notation entspricht der der Modul-Verträglichkeitsmatrix V_{MM} .

$$V_{MB} = \begin{pmatrix} v_{m_1 b_1} & \cdots & v_{m_1 b_q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m_w b_1} & \cdots & v_{m_w b_q} \end{pmatrix} \begin{cases} v_{jk} & : \text{Verträglichkeit zwischen Modul } j \text{ und Bauteil } k \\ w & : \text{Anzahl unterschiedlicher Module} \\ q & : \text{Anzahl unterschiedlicher Bauteile} \end{cases} \quad (7.7)$$

Gleichung 7.8 beschreibt die Matrix E der Eignungsgrade von Montagemodulen für bestimmte Montageprozesse (Dimension $w \times s$).

$$E = \begin{pmatrix} e_{m_1 o_1} & \cdots & e_{m_1 o_s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{m_w o_1} & \cdots & e_{m_w o_s} \end{pmatrix} \begin{cases} e_{jk} & : \text{Eignungsgrad der Kombination } j, k \\ w & : \text{Anzahl unterschiedlicher Module} \\ s & : \text{Anzahl unterschiedlicher Prozesse} \end{cases} \quad (7.8)$$

Abschließend ist in **Bild 7.5** eine Übersicht der Klassen, Assoziationen und Attribute inklusive der Schnittstellen dargestellt. Dieses ist die grundlegende Struktur des Datenmodells für den Simulationsbaukasten.

7.4 Datenverfügbarkeit

Für die Planung und Beurteilung von Montagesystemen nach dem PEAS-Konzept werden die im vergangenen Abschnitt dargestellten Eingangsgrößen benötigt. Informationen zu den Modulen etc. sind in objektive, für den Wissensspeicher geeignete Daten zu überführen. Aufgrund des umfangreichen Datenbedarfs (z.B. zu Kosten und Zeiten) ist ein methodisches Vorgehen zur Datenbeschaffung ratsam. Idealerweise sind die Modulentwickler sowie

⁵Der Eignungsgrad (0 = ungeeignet und 1 = geeignet) beschreibt, ob ein Modul bestimmte Montageprozesse ausführen kann.

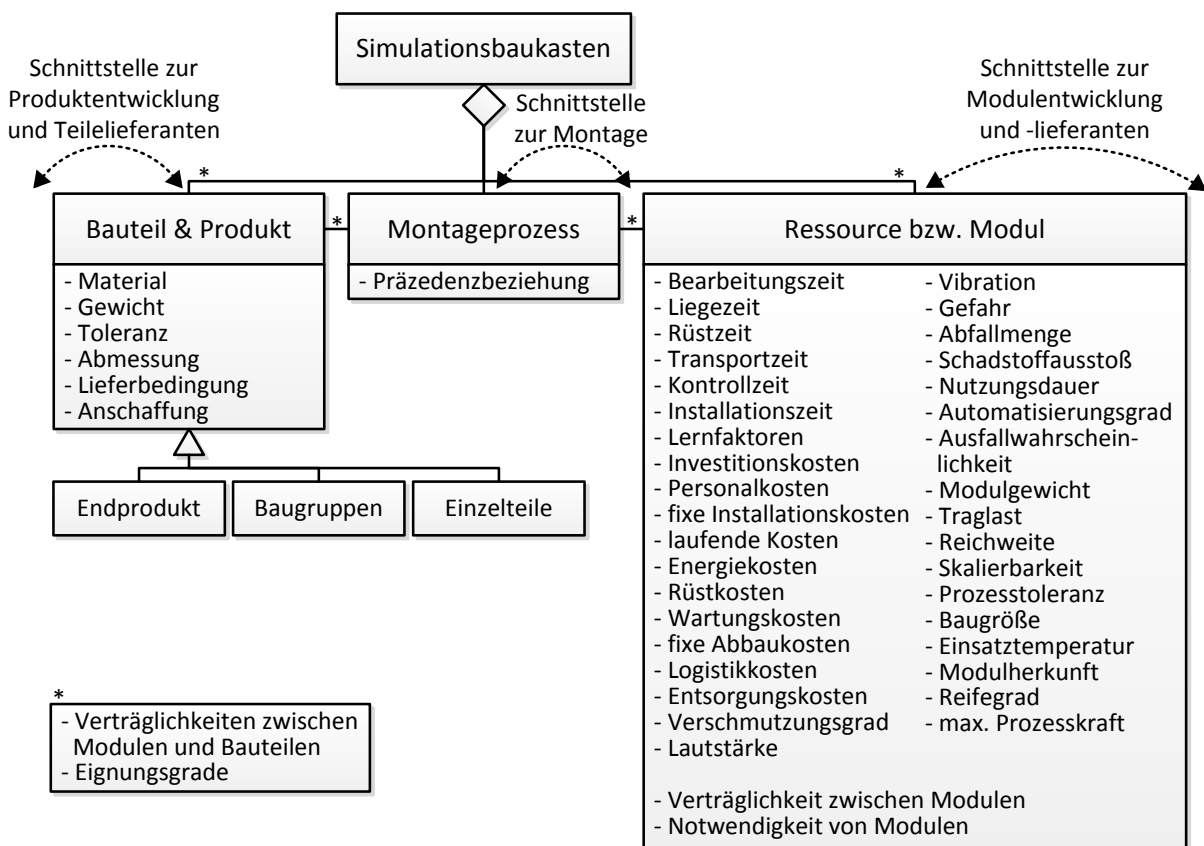


Bild 7.5: Übersicht des Baukasten-Modells

-produzenten mit einzubeziehen. Leistungsparameter können so direkt nach der Entwicklung bzw. durch Erfahrungen aus dem Betrieb bestimmt werden. Ein vielversprechender Ansatz zur Datengewinnung ist die Einbindung technischer, kognitiver Fähigkeiten in die Produktionssysteme.

Zu Beginn der Nutzung des neuen Ansatzes ist ein erhöhter Aufwand für den Aufbau des Wissensspeichers erforderlich. Mit zunehmender Nutzung wird der Aufwand geringer, da lediglich neue Module ergänzt bzw. Parameter angepasst werden müssen.

Festzuhalten bleibt, dass die Planungsqualität maßgeblich von der Datenqualität und -umfang abhängt. Je genauer die Daten im Wissensspeicher hinterlegt sind, desto qualitativ hochwertigere Ergebnisse können erreicht werden. Darüber hinaus ergibt sich eine höhere Lösungsvielfalt, desto umfangreicher der Baukasten ist.

Kapitel 8

Umsetzung des Konzepts in eine softwaretechnische Umgebung

Zum Nachweis der Funktionsfähigkeit des entwickelten Konzepts wird eine softwaretechnische Umgebung aufgebaut. Die Basis dieses Demonstrators bilden die drei Bausteine, die als Softwaremodule realisiert werden sollen. Zur Erprobung der Funktionalität des Konzepts werden jeweils die Kernfunktionen implementiert, um anschließend in Kapitel 9 die Funktion des Demonstrators anhand exemplarischer Montageaufgaben aus der Praxis aufzuzeigen.

Zunächst werden die Rahmenbedingungen der softwaretechnischen Umgebung festgelegt. Anschließend wird auf die Umsetzung der einzelnen Bausteine – Simulationsbaukasten, Systemverarbeitung und Beurteilung – eingegangen.

8.1 Rahmenbedingungen

Obwohl es sich bei der softwaretechnischen Umgebung um einen ersten Demonstrator handelt, soll dieser das entwickelte Konzept exemplarisch vollständig darstellen und verdeutlichen, wie es später in einer Standardsoftware Anwendung finden könnte. Neben der Realisierung der drei Bausteine gilt es zusätzlich, eine geeignete Oberfläche zu entwickeln, welche die Bedienung sowie die Eingabe der Randbedingungen erleichtert.

Die Bedienungsoberfläche stellt die Schnittstelle zwischen dem Anwender und dem Planungs- sowie Beurteilungswerkzeug dar. Dafür braucht es zweckmäßige Eingabefenster für die Festlegung der Montageaufgabe sowie der Parameter und zur Erstellung eines Simulationsbaukastens bis hin zur Ergebnisauswertung.

Der Algorithmus zur Berechnung der Varianten für Montagesysteme sowie des stochastischen Simulationsmodells zur Berechnung der Kennzahlen basiert auf der Verarbeitung von

umfangreichen Datenmengen, die im Wissensspeicher hinterlegt sind. Dieser muss so implementiert werden, dass eine einfache benutzerspezifische Erweiterung und Modifikation ermöglicht wird. Aufbauend auf den berechneten Lösungen für Varianten von Montagesystemen werden Kennwerte mit Hilfe eines stochastischen Simulationsmodells unter Berücksichtigung dynamischer Aspekte berechnet. Entscheidend ist es, eine geeignete Darstellung zur Visualisierung der Ergebnisse bereitzustellen, anhand derer geeignete bzw. optimale Lösungen identifiziert und weiter analysiert werden können.

8.2 Softwareeinsatz

Die komplette Planungs- und Beurteilungsumgebung wird in MATLAB (kommerzielle Software der Firma The MathWorks, Inc.) aufgebaut. Grundlage für die Systemverarbeitung und Beurteilung bildet der in Kapitel 7 entwickelte Simulationsbaukasten, der die Funktion des Wissensspeichers besitzt und ebenfalls in MATLAB umgesetzt wird. Die Verwendung einer einheitlichen Software für die komplette Planung und Beurteilung verhindert Datenkompatibilitätsprobleme. Die Daten im Wissensspeicher werden mit Hilfe einer objektorientierten Speicherstruktur abgebildet. Die zur Simulation der Montagesysteme benötigten Daten werden dynamisch aus dem Wissensspeicher herausgelesen. Des Weiteren eignet sich die ausgewählte Software zur Entwicklung einer Bedienoberfläche. Dabei können visuelle Schaltflächen, Eingabefelder, Pop-Up Menüs etc. in sogenannte GUI's (Graphical User Interface) integriert werden. Die Systemverarbeitung kann im Hintergrund der Bedienoberfläche ausgeführt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Ergebnisse über verschiedene grafische und textbasierte Ausgaben zur Verfügung zu stellen.

Aus den genannten Gründen ist MATLAB eine geeignete Software zum Aufbau eines Demonstrators. Im folgenden Abschnitt wird auf die Architektur und die Funktionalitäten der Kernbestandteile eingegangen.

8.3 Architektur und Funktionalität

Ausgangspunkt für die Erstellung des Demonstrators ist das entwickelte Konzept zur Planung und Beurteilung von Montagesystemen in der Luftfahrtindustrie, vgl. **Bild 4.4**. Die Umsetzung des Konzepts wird in drei Bausteinen aufgebaut. Zentraler Baustein stellt die Systemverarbeitung mit der Berechnung von Varianten für Montagesysteme sowie der Kennwertberechnung dar. Dafür ist u.a. ein stochastisches Modell, welches ebenfalls dynamische Aspekte

berücksichtigt, implementiert. Wie in **Bild 8.1** dargestellt, laufen dabei alle Daten aus dem Wissensspeicher sowie aus den benutzerspezifischen Angaben zusammen.

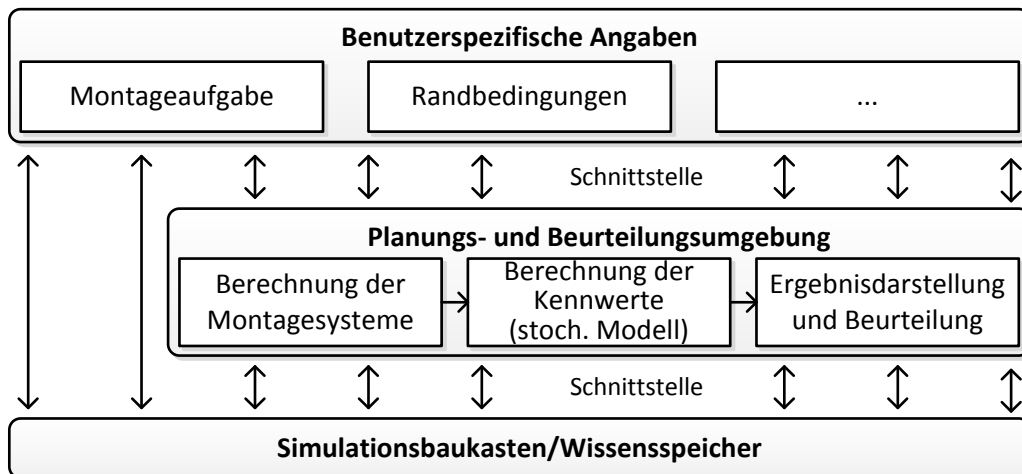


Bild 8.1: Schnittstellen der Planungs- und Beurteilungsumgebung

Nachfolgend werden die einzelnen Teilkomponenten der Umgebung genauer spezifiziert und vorgestellt.

8.3.1 Hauptprogramm des Demonstrators

Der Aufbau des Demonstrators ist modular. Die umgesetzten Planungs- und Beurteilungsschritte sind individuell und einzeln ausführbar. Das Verbindungsglied wird durch ein Hauptprogramm gebildet (siehe **Bild 8.2** links), welches die Ausführung einzelner Schritte bietet. Das Hauptprogramm lässt sich zum einen in MATLAB öffnen, zum anderen aber auch als Stand-Alone-Programm (.exe). Die zweite Variante ermöglicht die Nutzung des Demonstrators auch auf Rechnern ohne MATLAB.

Alle Bausteine des entwickelten Konzepts zur Planung und Beurteilung von Montagesystemen können im Hauptprogramm ausgeführt werden. Das Vorgehen dabei ist in **Bild 8.2** rechts als Ablaufdiagramm dargestellt. Ausgangsbasis des Gesamtprozesses ist der Simulationsbaukasten, der alle relevanten Informationen beinhalten muss. Ist kein geeigneter Baukasten vorhanden, muss einer neu erstellt oder ein bereits vorhandener angepasst werden. Sofern ein geeigneter Baukasten existiert, kann Schritt für Schritt die Berechnung der Varianten für Montagesysteme, die Kennwertberechnung sowie die Ergebnisdarstellung gestartet werden.

Auf die einzelnen Unterprogramme sowie Datenschnittstellen wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

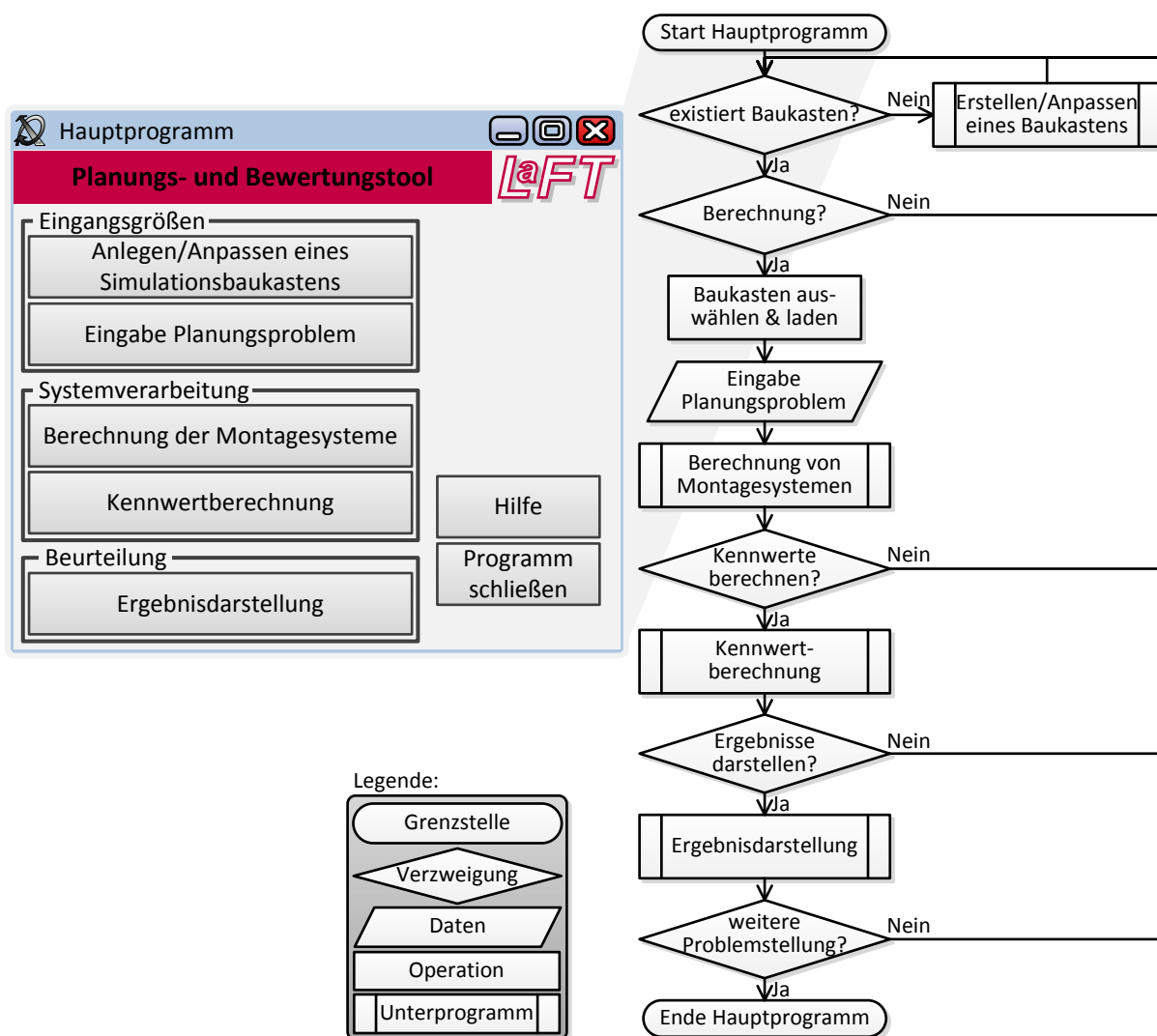


Bild 8.2: Hauptprogramm der Konzept-Umsetzung inklusive Ablaufdiagramm

8.3.2 Simulationsbaukasten als Datengrundlage

Der Wissensspeicher dient als Grundlage für den Gesamtprozess der Planung und Beurteilung. Realisierte Planungswerkzeuge verwenden bisher fest vorgegebene Funktionen, z.B. die MTM-Grundbewegungen (vgl. z.B. [Rei10]). Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein anderer Ansatz verfolgt: Die Funktionen können durch den Anwender beliebig erweitert bzw. angepasst werden. Aufbauend auf den Funktionen werden in nachfolgenden Schritten die notwendigen Informationen abgefragt bzw. implementiert. Dabei handelt es sich um einen neunstufigen Prozess. Die unterschiedlichen Informationen sind notwendig, um einen hohen Grad der Automatisierung zu erreichen.

Im ersten Schritt der Anlage bzw. der Bearbeitung eines Simulationsbaukastens (siehe **Bild 8.3** links anhand eines Ablaufdiagramms) gilt es, die zur Verfügung stehenden Montagepro-

zesse, -module und Bauteile zu definieren. Hier geht es zunächst nur um die Definition der Namen. Dabei handelt es sich um eine einfache Auflistung. Zur Eingabeerleichterung wurde hierfür eine Oberfläche, siehe **Bild 8.3** rechts, entwickelt. Die Anzahl der dort hinzufügbaren Objekte kann beliebig erweitert werden.

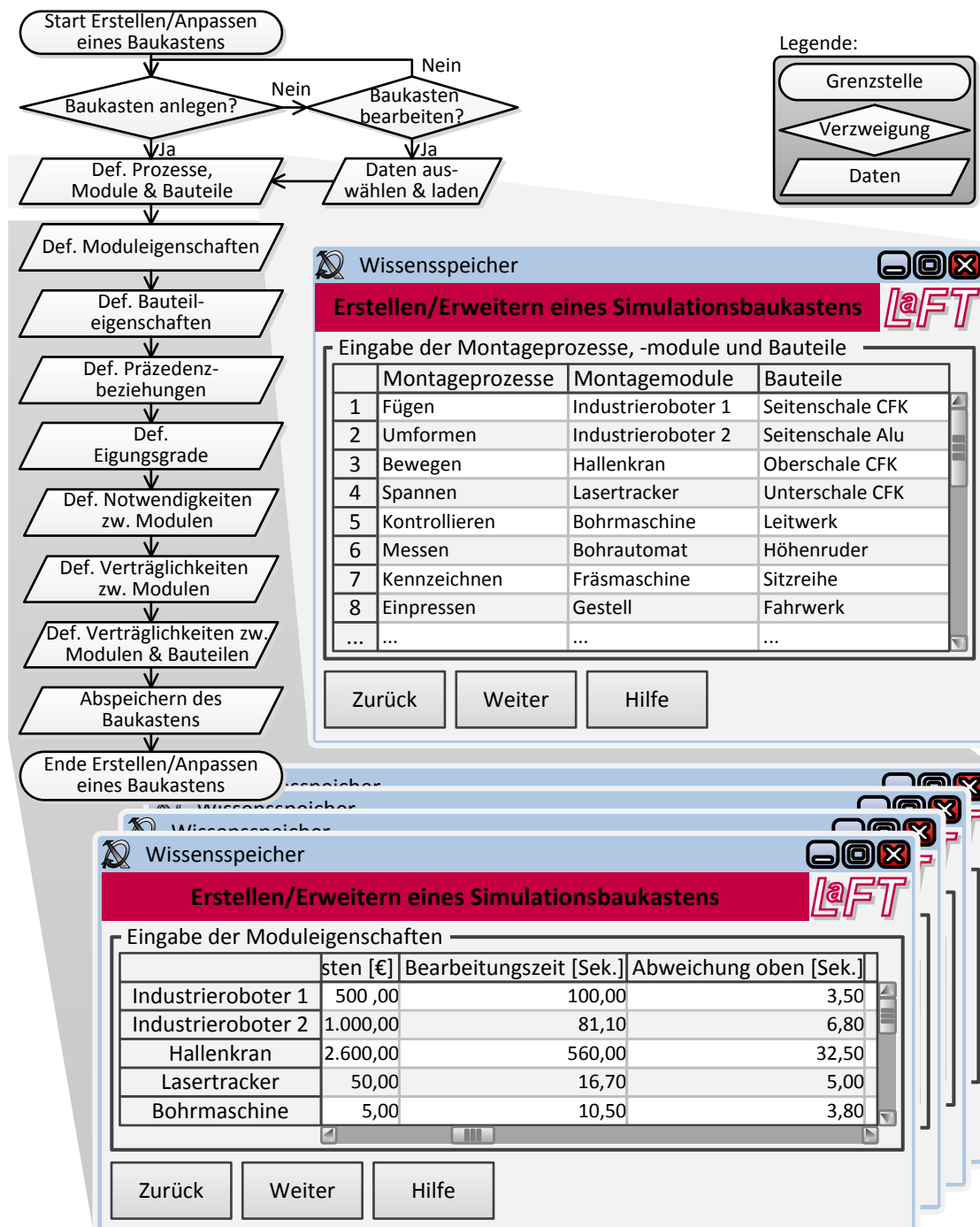


Bild 8.3: Ablaufdiagramm beim Erstellen eines Wissensspeichers sowie exemplarische Veranschaulichung

In den nächsten Schritten gilt es, die notwendigen Informationen zu den definierten Montageprozessen, -modulen und -bauteilen anzugeben. Hierzu wird der Anwender Schritt für Schritt aufgefordert (siehe Ablaufdiagramm). Zur Eingabe werden entwickelte Masken verwendet, siehe z.B. Eingabemaske für die Moduleigenschaften in **Bild 8.3** unten. Weitere Informationen zu den Daten können in **Kapitel 7** nachgelesen werden.

8.3.3 Eingabe Planungsproblem

Im Anschluss an eine Selektion des Simulationsbaukastens gilt es, das Planungsproblem zu definieren. Hierfür stehen die vorab festgelegten Montageprozesse und Bauteile aus dem Wissensspeicher zur Verfügung. Darüber hinaus sind weitere Parameter anzugeben. Dazu zählen Parameter, die direkt mit der Montageaufgabe in Verbindung stehen, wie die Anzahl der Wiederholungen, das Komplexitätsniveau des Montageschritts, die geforderte Genauigkeit, die Distanz/Wegstrecke im Fall einer Handhabung sowie die maximale geforderte Prozesskraft. Außerdem können weitere Parameter, welche die Umgebungseinflüsse beschreiben, implementiert werden. Das können bspw. Parameter wie die bei der Produktion herrschenden Temperaturen sein.

Ein Auszug der Eingabemaske für das Planungsproblem ist in **Bild 8.4** dargestellt.

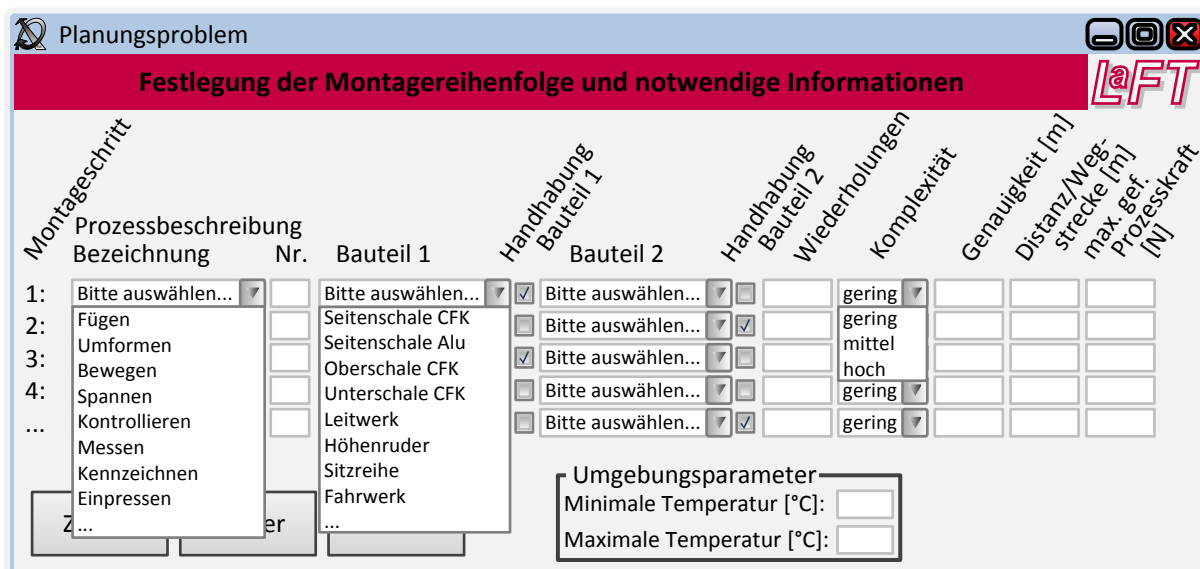


Bild 8.4: Eingabemaske zur Implementierung des Planungsproblems

Aufbauend auf dem Planungsproblem werden die Montagesysteme ermittelt.

8.3.4 Berechnung von Varianten für Montagesysteme

Für die Berechnung der Montagesysteme wird der in Abschnitt 6.3 entwickelte Algorithmus verwendet. Der Ablauf zur Berechnung der Varianten für Montagesysteme ist in **Bild 8.5** dargestellt. Im ersten Schritt muss ein implementiertes Planungsproblem selektiert werden. Verlinkt mit dem Planungsproblem ist der zur Lösung erforderliche Simulationsbaukasten. Dieser ist so implementiert, dass er simultan, ohne erweiterte Definition, für unterschiedliche Planungsprobleme betrachtet werden kann.

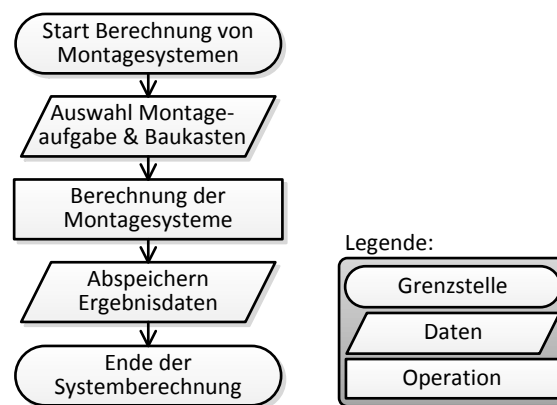


Bild 8.5: Ablaufdiagramm der Montagesystem-Berechnung

Der nächste Schritt greift die eigentliche Berechnung von Varianten für Montageschritte auf. Auf Basis des Wissensspeichers werden alle möglichen Kombinationen von Modulen ermittelt. Die Lösungen werden anschließend hinsichtlich ihrer Verträglichkeit und Eignung überprüft (vgl. Abschnitt 6.3). Für die Eignungsprüfung (vgl. Iterationszyklus 1 aus **Bild 6.2**) werden vier Kriterien verwendet, mit denen das Prüfungsvorgehen beispielhaft durchgeführt wird: Abgleich der Modul-Genauigkeit mit der Soll-Genauigkeit, die Distanz (Reichweite bzw. Längenskalierbarkeit), die Traglast der Module sowie der Temperaturbereich.

Im Anschluss an die automatisierte Berechnung der Varianten für Montagesysteme und deren Prüfung werden die Ergebnisdaten abgespeichert. Damit endet der Prozess der Systemberechnung.

8.3.5 Kennwertberechnung

Die Kennwertberechnung wird aufbauend auf den Ergebnisdaten der Montagesystem-Berechnung durchgeführt. Der Ablauf ist in **Bild 8.6** links dargestellt. Anwendung findet dabei das stochastische Simulationsmodell aus Abschnitt 6.4. Vor dem Start der Simulation gilt es neben der Selektion der berechneten Montagesysteme, des Montageproblems und des Simulationsbaukastens, weitere elementare Informationen zur Modellparametrisierung anzu-

geben. Mit Hilfe dieser Informationen, die in eine Eingabemaske angegeben werden müssen (siehe **Bild 8.6** rechts), wird die Parametrisierung des Modells automatisiert durchgeführt. Auf Grundlage der Daten über die bereits im vorangehenden Schritt berechneten Montagesysteme und der Modellparametrisierung erfolgt die Berechnung der Kennwerte (siehe Kennzahlensystem aus **Bild 5.2**). Die Kennwerte, welche szenario- und periodenbezogen berechnet werden, werden im Anschluss an die Berechnung abgespeichert, damit im Rahmen der Auswertung darauf zugegriffen werden kann.

Legende:

- Grenzstelle
- Daten
- Operation

Kennwertberechnung

Stochastisches Simulationsmodell – Parameterdefinition

Berücksichtigung von Schwankungen bei

- Bearbeitungszeiten
- Liegezeiten
- Rüstzeiten
- Ausfallzeiten
- Kontrollzeiten
- Lieferzeiten

Berücksichtigung von Lerneffekten bei

- Bearbeitungszeiten
- Rüstzeiten

Lernkurvenmodell

- Modell 1
- Modell 2

weitere Eingangsgrößen

- Arbeitszeit pro Monat [Std.]:
- Anlagenlaufzeit [Jahre]:
- Personalkosten Installation [€/Std.]:
- Personalkosten Wartung [€/Std.]:
- Pauschale laufende Kosten [€/Monat]:
- Pauschalkosten Wartung [€/Monat]:
- Pauschalkosten Installation [€/Monat]:
- Flächenkosten pro m² [€/Monat]:
- Personalkosten [€/Std.]:
- Pauschalkosten Abbau [€]:
- Personalkosten Abbau [€/Std.]:

Organisationsform

- Fließfertigung
- Werkstatt-/Gruppenprinzip

zu berücksichtigende Störungen

	Anzahl max. Störungen im Betrachtungszeitraum	Max. Verzögerung [Std.]
<input type="checkbox"/> Modulausfall	siehe Wissensspeicher	siehe Wissensspeicher
<input type="checkbox"/> Lieferverzug Bauteile	siehe Wissensspeicher	siehe Wissensspeicher
<input type="checkbox"/> fehlende oder falsche Dokumente	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Ausfall aufgrund eines Programmierfehlers	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> fehlende oder falsche Liefer-/Wiederbeschaffungszeit	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Mehrzeit durch schlechte Mitarbeiterführung/-motivation	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Mehrzeit aufgrund einer späteren Produktänderung	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Anpassmaßnahmen durch geänderte Richtlinien, etc.	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> sonstiger Ausfall (z.B. Versammlung, Stromausfall)	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Simulationsparameter

- Anzahl Simulationsdurchläufe:
- Betrachtungsintervalle pro Jahr:

Verteilungsfunktion

- Dreiecksverteilung
- Gauß-Verteilung

Auswahl Lagemaß

- arithmetisches Mittel
- geometrisches Mittel
- Median
- Alpha-Quantil [%]

Zielgröße: Produktionsmenge im Monat:

- konstante Stückzahl
- veränderte Stückzahl
- zufällige Stückzahl mit:
 - Stückzahl-Untergrenze pro Monat:
 - Stückzahl-Obergrenze pro Monat:

Kennwerte berechnen

Zurück Hilfe

Bild 8.6: Ablaufdiagramm und Eingabemaske zur Kennwertberechnung

8.3.6 Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisdarstellung gliedert sich in mehrere Schritte, siehe Struktogramm in **Bild 8.7** links, wobei jeder Schritt in einer eigenen Oberfläche umgesetzt wird. Zunächst werden die berechneten Kennwerte geladen.

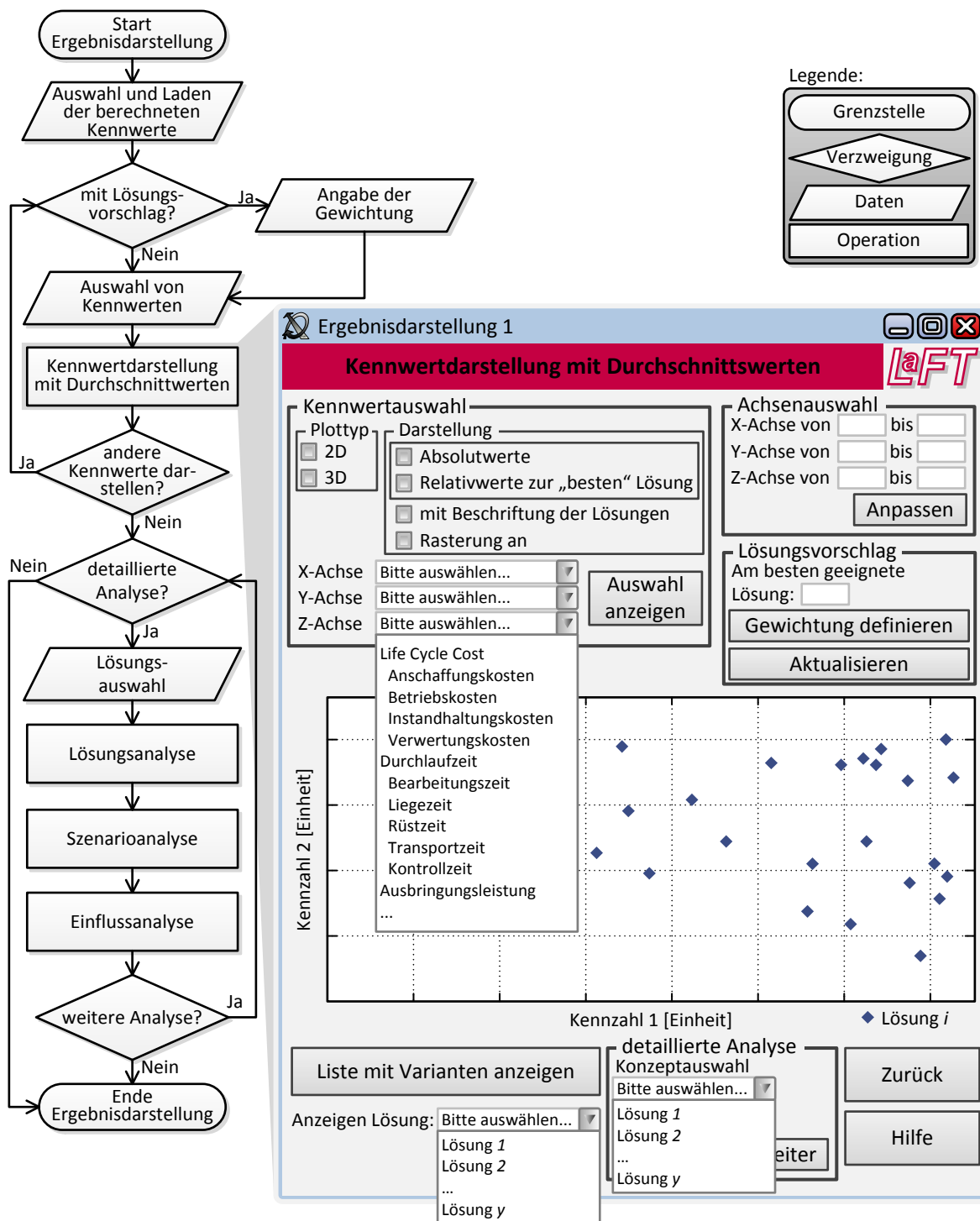


Bild 8.7: Ablaufdiagramm der Auswertung (links) und Ergebnisdarstellung 1 (rechts)

Falls im Zuge der Lösungsanalyse ein optimales Montagesystem vorgeschlagen werden soll, muss eine Gewichtung der Kennzahlen vorgegeben werden. Die Auswertung von Durchschnittskennwerten kann für alle berechneten Kennwerte erfolgen, siehe **Bild 8.7** rechts. Die Ergebnisse lassen sich über zwei oder drei selektierte Kennzahlen darstellen. Der Lösungsvorschlag wird schließlich im Diagramm gekennzeichnet.

Sofern eine detailliertere Analyse einer einzelnen Lösung erwünscht ist, kann eine Lösungsanalyse mit anschließender Szenario- und Einflussanalyse durchgeführt werden.

Über die Oberfläche der Lösungsanalyse (**Bild 8.8**) lassen sich mehrere Aspekte zur Untersuchung auswählen: Bewertung der einzelnen Kennzahlen des ausgewählten Montagesystems, Analyse der schlechtesten und besten Szenarien und eine Modulanalyse. Die Ausprägungen der einzelnen Kennzahlen des ausgewählten Montagesystems werden den Ergebnissen aller Varianten gegenübergestellt, um eine vergleichende Übersicht zu erhalten.

Die vereinfachte Szenarioauswertung bietet die Möglichkeit des Vergleichs der besten, schlechtesten und gemittelten Anlaufkurven. Daran lassen sich Unterschiede im z.B. Anlauf- und Serienverhalten sowie Störanfälligkeiten ableiten.

Die Modulanalyse deckt den Einfluss mehrerer parallel eingesetzter Module auf. Anhaltspunkte dafür sind die Durchlaufzeit und die Life Cycle Cost; auch an dieser Stelle kann der Kriterienkatalog vom Anwender ergänzt werden. Zur Visualisierung wird die durch höhere Modulanzahlen reduzierte Durchlaufzeit zum dadurch entstehenden Mehraufwand der Gesamtkosten abgetragen. Die zum Test hinzuzufügenden Module lassen sich frei im Drop-Menü auswählen.

Ausgehend von der Lösungsanalyse lassen sich eine Szenario- und Einflussanalyse durchführen. Für diese Detailanalysen werden die Simulationsergebnisse der generierten Szenarien aufbereitet und visualisiert, um Aussagen über spezielle Szenarien und Einflussgrößen zu erhalten. Damit soll die Eignung des Montagesystems hinsichtlich der gestellten Anforderungen überprüft werden. Die Visualisierung erfolgt in einem Auswertefenster, das in **Bild 8.9** dargestellt ist.

Für die Szenario- und Einflussanalyse sind, wie in Abschnitt 6.4.2.2 beschrieben, vor allem die Szenarien von Interesse, die zu extremen Ergebnissen führen. Mit dem Ziel der Überprüfung, ob das Montagesystem auch in allen ungünstigen Eventualitäten den gestellten Anforderungen genügt, sind dies die Ergebnisse, die aus schlechten Szenarien resultieren. Zur Identifikation schlechter Szenarien lassen sich individuelle Kennzahlen wie z.B. Life Cycle Cost, Durchlaufzeit, Stördauer und Anzahl Störungen selektieren. Zur Analyse der unterschiedlichen Szenarienausprägungen wird eine Clusteranalyse durchgeführt. Das Clusterverfahren kann in der Softwareumgebung frei aus einer Zusammenstellung ausgewählt werden. Die Klassenanzahl ist den individuellen Gegebenheiten nach geeignet zu wählen.

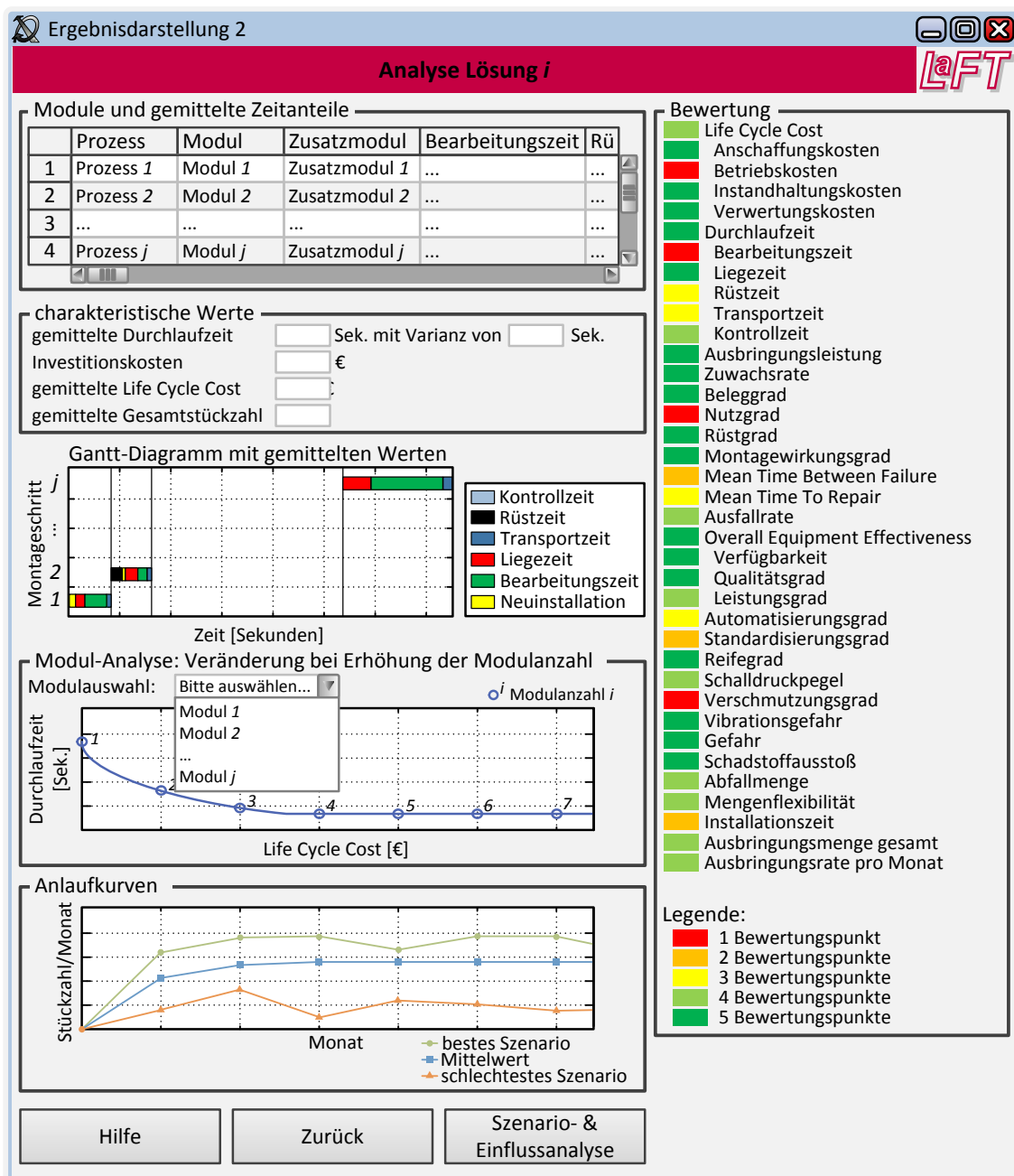


Bild 8.8: Programmoberfläche der Lösungsanalyse

Im Rahmen der softwaretechnischen Umsetzung werden für die Analyse der Szenarioausprägung die 1 %, 5 % und 10 % schlechtesten Szenarien herangezogen. Zusätzlich sind alle Szenarien dargestellt. Die Darstellung der Szenarioausprägung erfolgt jeweils nach der festgelegten Anzahl an Klassen. Anhand der Klassenstärke lässt sich deren Eintrittswahrscheinlichkeit festhalten. Berechnet werden pro Klasse charakteristische Kennwerte für die gemittelte Durchlaufzeit, gemittelte Life Cycle Cost und gemittelte Anzahl Störungen pro Ausführung. Damit lassen sich die verschiedenen Klassen charakterisieren.

Darüber hinaus lassen sich in dem Auswertungsfenster aus **Bild 8.9** die Einflussgrößen, die zu den 1 %, 5 % bzw. 10 % schlechtesten Ergebnissen geführt haben, analysieren. Betrachtet werden können die diversen Zeitanteile jedes eingesetzten Moduls und die Störungen. Die jeweilige Ausprägung wird im Hinblick auf die Durchlaufzeit farblich visualisiert. Bei den Störungen wird zusätzlich angegeben, wie viel Prozent der Szenarien jeweils betroffen sind. Schließlich können noch die Anlaufkurven der schlechtesten Szenarien über die gesamte Betriebsdauer angezeigt und analysiert werden.

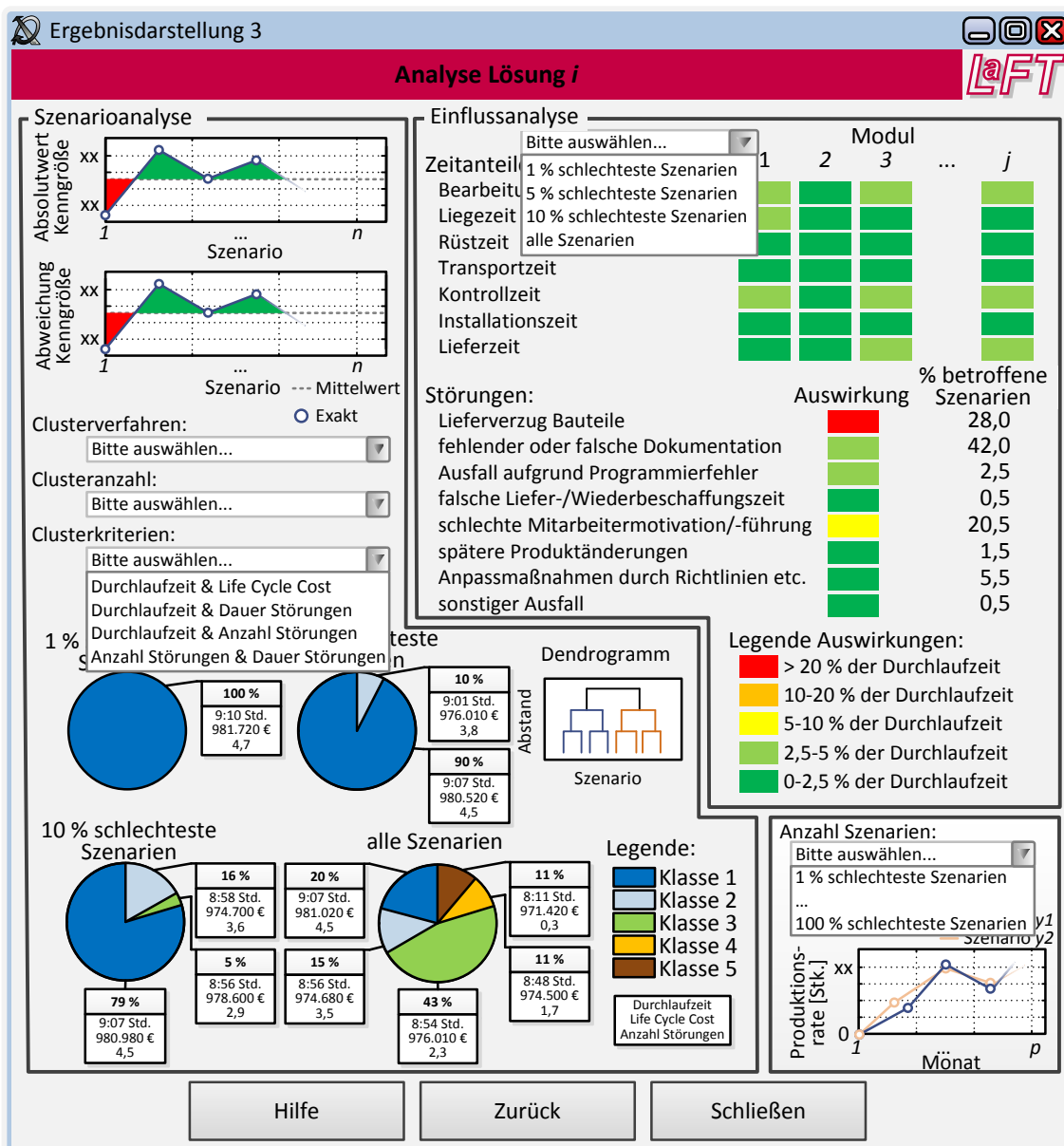


Bild 8.9: Programmoberfläche zur Szenario- und Einflussanalyse

Kapitel 9

Erprobung des Werkzeugs

Die Validierung des Konzepts wird mit Hilfe des Demonstrators an zwei Praxisbeispielen durchgeführt. Bevor die Montageaufgaben vorgestellt werden und die Validierung daran durchgeführt wird, werden die Validierungsziele formuliert und das experimentelle Umfeld festgelegt.

9.1 Validierungsziele

Validierungsziele sind die Grundlage für einen systematischen Eignungstest des Konzepts. Die Ableitung der Validierungsziele erfolgt entlang der ursprünglichen Zielsetzung, vgl. Abschnitt 4.1.1. Primäre Validierungsziele und Nachweismöglichkeiten sind:

1. Funktionsnachweis des Konzepts und der softwaretechnischen Umsetzung anhand von beispielhaften Prozessketten.
2. Nachweis der Qualität ermittelter Montagesysteme durch einen Vergleich mit konventionellen Planungsergebnissen.
3. Aussagegültigkeit des Lösungsvorschlags durch einen Vergleich mit Simulationsergebnissen und einer realen Umgebung.
4. Kennwertrichtigkeit durch einen Vergleich von ausgewählten berechneten Kennwerten mit extern bestimmten Größen oder Werten aus der realen Umsetzung (z.B. aus Serienproduktion, Laborversuchen und Betriebsversuchen).
5. Streuung und Interpretation der mit Unsicherheiten behafteten Kennwerte (z.B. Durchlaufzeit) durch Analyse der Ergebnisdaten.

In den nächsten Abschnitten wird überprüft, inwiefern diese fünf Ziele mit dem Konzept erreicht werden.

9.2 Experimentelles Umfeld

Die Validierung des entwickelten Konzepts erfolgt anhand vorhandener Dokumentationen und Expertenwissen aus Interviews, einer entwickelten Softwareumgebung sowie realer und fiktiver Module für Montagesysteme. Reale Montagemodule liegen bislang nicht für alle Montageprozesse vor. Die Informationen zu Prozessen, Modulen und Bauteilen, wie z.B. Montagezeiten und Kostenanteile, basieren insbesondere auf Abschätzungen, Erfahrungswerte aus dem Stand der Technik sowie auf Rückwärtsbestimmungen aus bekannten Informationen.

9.3 Beispielhafte Montageaufgaben

Für die Erprobung und Untersuchung des entwickelten Konzepts werden zwei unterschiedliche Montageaufgaben aus der Strukturmontage von Flugzeugen ausgewählt und im Folgenden vorgestellt.

9.3.1 Montageaufgabe 1: Strukturmontage im Flugzeugbau

Bei der Auslegung von Montagelinien für Flugzeuigrümpfe handelt es sich prinzipiell um eine komplexe Aufgabe. Das liegt an der Vielzahl von Randbedingungen, die hierbei Berücksichtigung finden müssen (vgl. [Wie05, S. 230]). Die erste Montageaufgabe behandelt aufgrund der Bedeutung die Strukturmontage. Dazu wird in der vorliegenden Arbeit die Montage des Tonnenelements, der sogenannten Sektion, betrachtet. Die Tonne besteht aus einem Fußbodenteil und unterschiedlich vielen Schalenteilen (vgl. [Mue13, S. 343 f.], [Wie05, S. 230 ff.]). Die Anzahl der Schalenkomponenten variiert bei den klassischen Bauweisen zwischen zwei und vier (vgl. [Mue13, S. 343 f.], [Mül11, S. 454], [Wie05, S. 230]). Im Rahmen dieses Validierungsbeispiels wird eine Zweierschalenteilung verwendet, siehe **Bild 9.1** rechts.

Die Montage der Sektion untergliedert sich in mehrere Schritte. Für das Beispiel wird eine vereinfachte Montagereihenfolge, bestehend aus den in **Bild 9.1** links dargestellten sieben Schritten, betrachtet. Im ersten Schritt werden die notwendigen Komponenten eingetaktet, wozu sie gehandhabt und gegriffen werden müssen. Im Anschluss an das Eintakten gilt es, die Komponenten unter Verwendung der Funktionen Handhabung und Messen zueinander zu positionieren. Nach Abschluss der Positionierung der Schalenteile und des Fußbodenrosts zueinander wird der Bohrvorgang für die Nietlöcher gestartet. In diesem Prozessschritt wird in der Regel das Vor- und Aufbohren unterschieden. Zur Vereinfachung werden hier beide Schritte zusammen als ein Schritt betrachtet. Nach dem Auftragen des Dichtmittels kann der eigentliche Nietprozess durchgeführt werden. Für die Überprüfung der Struktur-Maßhaltigkeit

gilt es, die Form unter Einsatz eines geeigneten Messverfahrens zu kontrollieren. Sofern die geforderten Toleranzen eingehalten werden, wird die gefertigte Sektion im letzten Schritt ausgetaktet. Die Funktionen Handhaben und Greifen für das Ein- und Austakten der Einzelteile sowie des Endprodukts müssen in Addition zur Prozesskette betrachtet werden.

Im Folgenden geht es darum, Lösungsansätze für die aufgezeigte Strukturmontage zu entwickeln und eine optimale Lösung zu identifizieren. Dazu wird das entwickelte PEAS-Konzept eingesetzt.

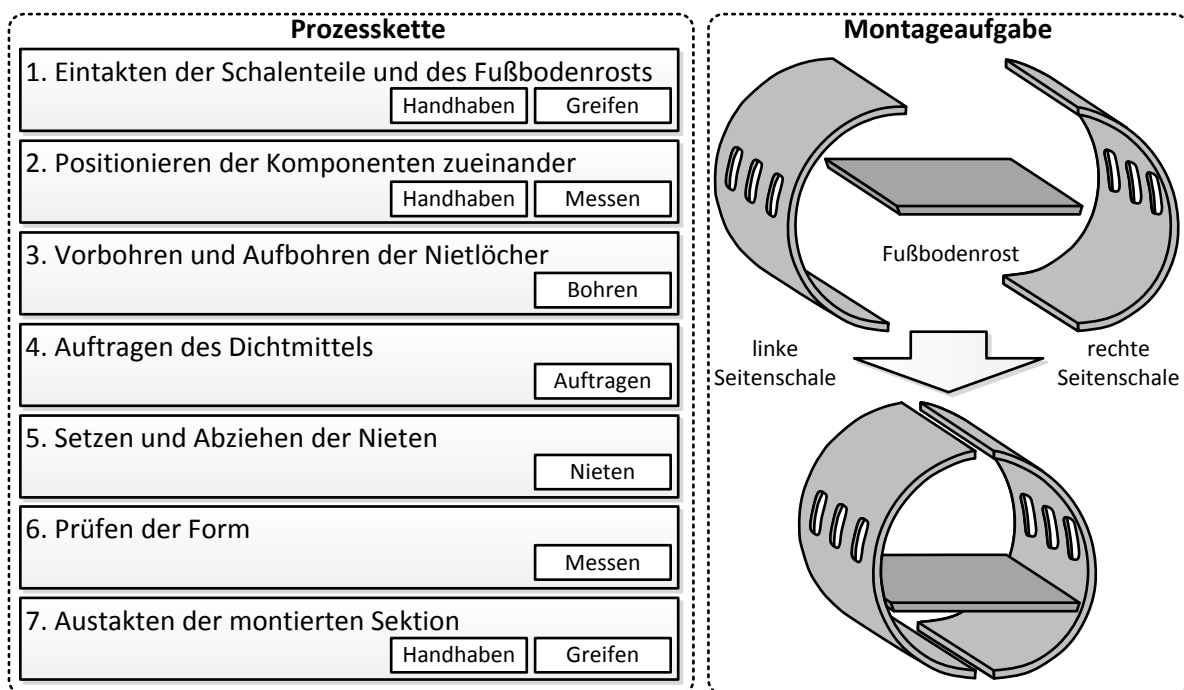


Bild 9.1: Vereinfachte Prozesskette der Strukturmontage

Erstellen eines Simulationsbaukastens

Der Simulationsbaukasten beinhaltet alle notwendigen Prozesse, Bauteile und Module für Montagesysteme. Die Prozesse und Bauteile lassen sich aus der Montagereihenfolge und den Montageprozessen ableiten. Bei den Modulen handelt es sich um reale Module aus dem Stand der Technik sowie um fiktive Module. Ein Auszug an möglichen Modulen für die Prozessschritte Handhaben und Greifen ist in **Bild 9.2** dargestellt. Die Module besitzen individuelle Eigenschaften, z.B. unterscheiden sich die Industrieroboter hinsichtlich der Reichweite und der Traglast.

Die für die Datenbasis notwendigen Informationen zu den Modulen, wie z.B. Zeitanteile, Kosten und Gewicht, wurden aus Dokumenten, Experteninterviews sowie Erfahrungsberichten entnommen. Die Art der Datenanforderung richtet sich nach dem aufgebauten Wissensspeicher (siehe Kapitel 7).

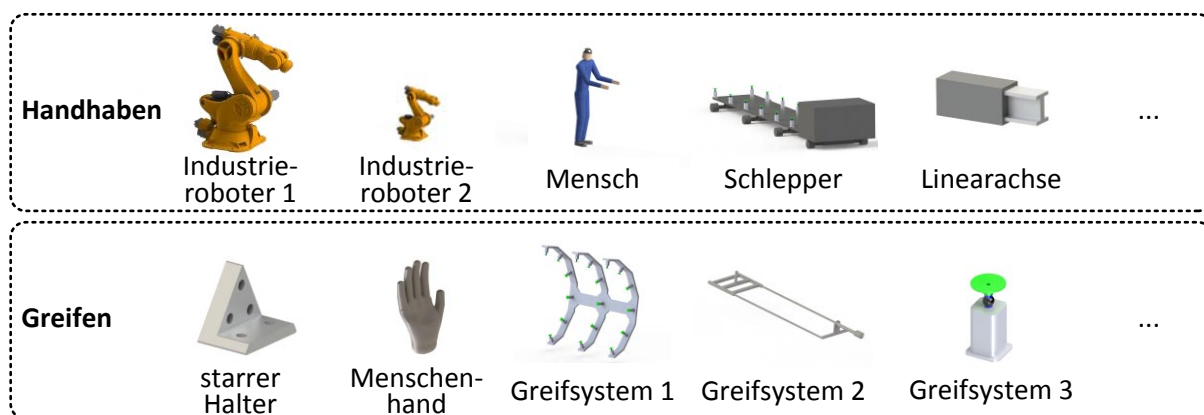


Bild 9.2: Auszug an Modulen für die Funktionen Handhaben und Greifen

Implementierung des Planungsproblems

Die Definition des Planungsproblems, bestehend aus der Montageaufgabe inklusive der dazugehörigen Randbedingungen, orientiert sich am Montageablauf sowie an den gestellten Randbedingungen jedes einzelnen Montageschritts. Die Eingangsparameter werden nach **Tabelle A.1** im Anhang A definiert; dabei handelt es sich nicht um reale, sondern um geschätzte Werte. Für die Eingabe in die Softwareumgebung stehen Eingabemasken zur Verfügung (vgl. **Bild 8.4**). Die Montagesequenz lässt sich aus den in der Datenbasis definierten Prozessen und Bauteilen bestimmen.

Für die Planung wird vorgegeben, dass es sich bei der Organisationsform um das Baustellenprinzip handeln soll. Dieses wirkt sich auf die Algorithmen zur Berechnung der Kennzahlen aus.

Verarbeitung

Die Systemverarbeitung zur Berechnung der Varianten für Montagesysteme und der Kennwerte (vgl. Abschnitte 6.3 und 6.4) greift das definierte Planungsproblem auf. Darauf aufbauend werden die möglichen Montagesysteme vollständig (Berechnung aller mit dem Baukasten möglichen Systemlösungen) nach dem beschriebenen Vorgehen aus **Bild 6.2** mit den Konformitätskriterien aus Abschnitt 8.3.4 ermittelt. Verwendung finden dabei alle im Wissenspeicher hinterlegten Module für Montagesysteme, soweit sie für die Prozesse geeignet sind. Für die Konformitätsprüfung werden die technischen Randbedingungen des Planungsproblems mit den Modulrandbedingungen abgeglichen.

Das Vorgehen für die Berechnung soll anhand des ersten Schritts, dem Eintakten des Fußbodenrosts (Aufgaben Handhaben und Greifen) verdeutlicht werden. Für die Handhabungsaufgabe lassen sich die Module „Schlepper“ und „Hallenkran“ einsetzen. Module wie der „Mensch“ und „Industrieroboter“ scheiden aufgrund des Gewichts des Fußbodenrosts bzw. der Reichweite und Mobilität aus. Als Schnittstelle zwischen Montagesystem und Fußboden-

rost stellen sich nach der Prüfung des Gewichts die Module „starre Halter“, „Greifsystem 1“ und „Greifsystem 2“ zunächst als geeignet heraus. Das Greifsystem 1 scheidet allerdings aufgrund einer Unverträglichkeit zwischen Bauteil und Modul aus (ergibt sich aus der Verträglichkeitsmatrix V_{MB}). Für den Einsatz der beiden übrigen Module sind noch weitere Module erforderlich (Ermittlung mit Hilfe der Notwendigkeitsbeziehungen, siehe N). Bei der Variante mit den starren Haltern zählen hierzu eine Halterung sowie zwei Handhabungsgeräte. Für den Einsatz des Greifsystems 1 sind zwei Handhabungsgeräte erforderlich.

Im Anschluss an die Ermittlung von möglichen Module für die einzelnen Montageschritte (zusammengefasst in der Realisierungsmatrix R) sowie der Überprüfung der Modulverträglichkeit (Matrix V_{MM}) und der Modul-Bauteil-Verträglichkeit (V_{MB}) erfolgt die Berechnung der Varianten für Montagesysteme mit Hilfe der Kombinatorik, siehe Auszug in **Bild 9.3**. Hierdurch ergeben sich mehr als 100 Varianten. Die Lösungen unterscheiden sich vor allem in der Wahl der Handhabungstechnik und dem Messmittel.

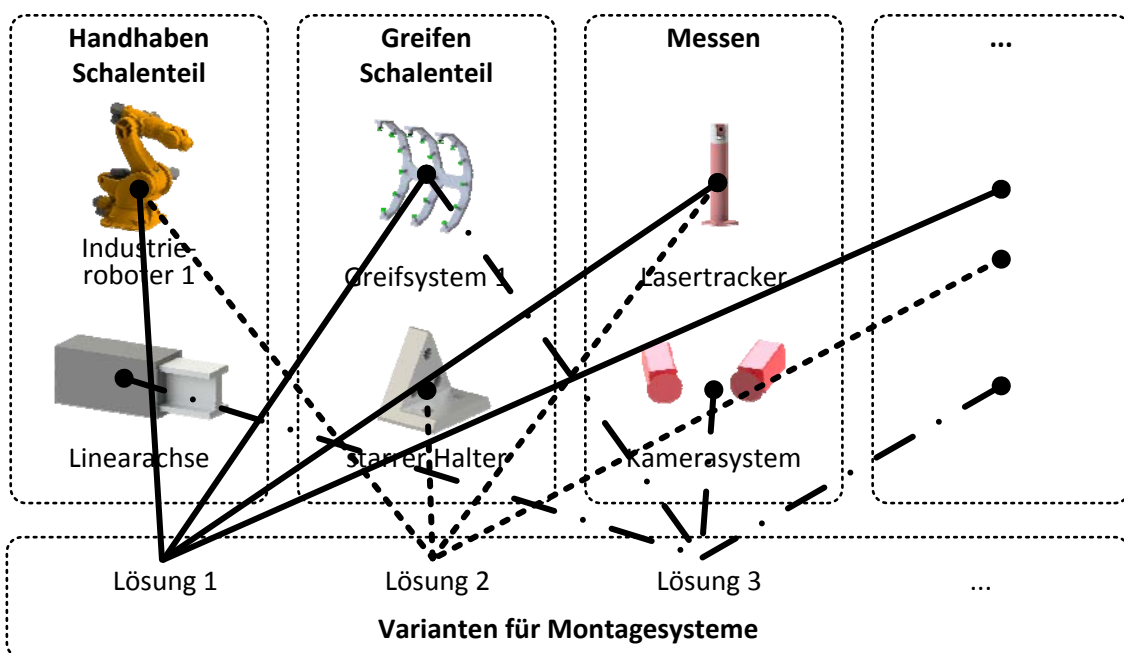


Bild 9.3: Auszug der Realisierungsmöglichkeiten und der Lösungen

Um eine Beurteilung zu ermöglichen, wird im nächsten Planungsschritt die Bewertungsgrundlage berechnet. Hierfür wird das multikriterielle Kennzahlensystem aus Abschnitt 5.3 verwendet. Die Kennzahlen werden unter Einsatz des stochastischen Simulationsmodells (vgl. Vorgehen in **Bild 6.3**) mit realistischer Modellparametrisierung berechnet. Die Anzahl der Simulationsdurchläufe, also definitionsgemäß die Anzahl der betrachteten Szenarien, beträgt 10.000. Sie ist so gewählt, dass die Verteilung der Simulationsergebnisse stabil ist. Für die Berechnung des Lagemaßes wird ein 0,9-Quantil verwendet, um bereits beim Vergleich der Varianten ein erhöhtes Gewicht auf schlechte Szenarien zu legen. Die charakteristischen

Kennzahlen lassen zwar noch keine detaillierte Analyse zu. Jedoch lassen sie ein annähernd pessimistisches Szenario erwarten.

Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisdarstellung erfolgt in drei Schritten (vgl. Vorgehen in Abschnitt 8.3.6). Die Entscheidung, welche Variante am besten ist, hängt bei dieser Montageaufgabe stark von der Gewichtung der Kennzahlen ab. Verwendet wird im Beispiel eine einheitliche Gewichtung, das bedeutet, dass alle Kennzahlen als gleich bedeutend angesehen werden.

Als die im Mittel am besten geeignete Lösung ergibt sich die in **Bild 9.4** dargestellte Variante. Dargestellt sind die wesentlichen Einzelkomponenten mit der Zuordnung zu den Prozessen sowie der Zusammenbau. Die Handhabung erfolgt mittels standardisierter Industrieroboter. Zur Aufnahme der Schalenteile und des Fußbodenrosts werden jeweils ein eigener Endeffektor montiert. Um die Industrieroboter für die Handhabung des Fußbodenrosts einsetzen zu können, ist eine Hilfskonstruktion in Form eines Portals notwendig. Das Vermessen der Attribute (Messmerkmale) wird durch einen Lasertracker vorgenommen. Die Prozesse „Bohren“, „Nieten“ und „Dichtmittel applizieren“ werden durch Automaten übernommen. Das Ein- und Austakten der Komponenten wird mit Hilfe eines speziellen Schleppers durchgeführt, auf dem eine Vorrichtung montiert ist.

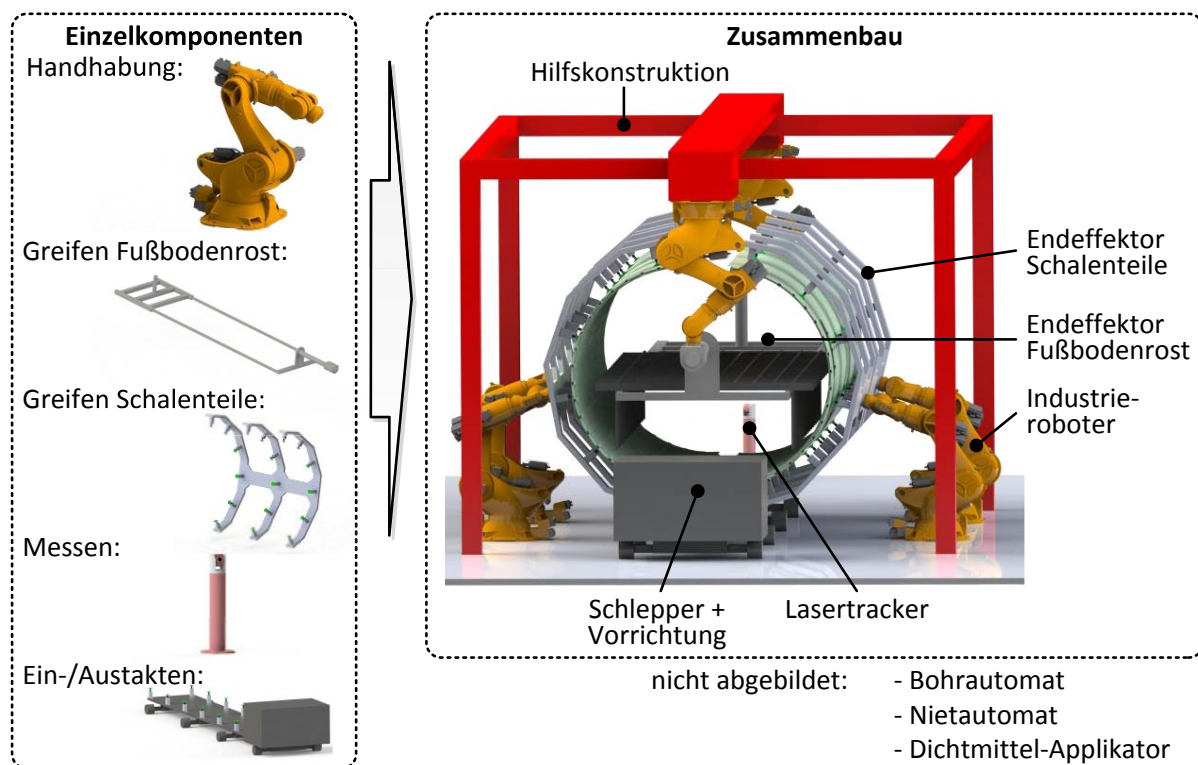
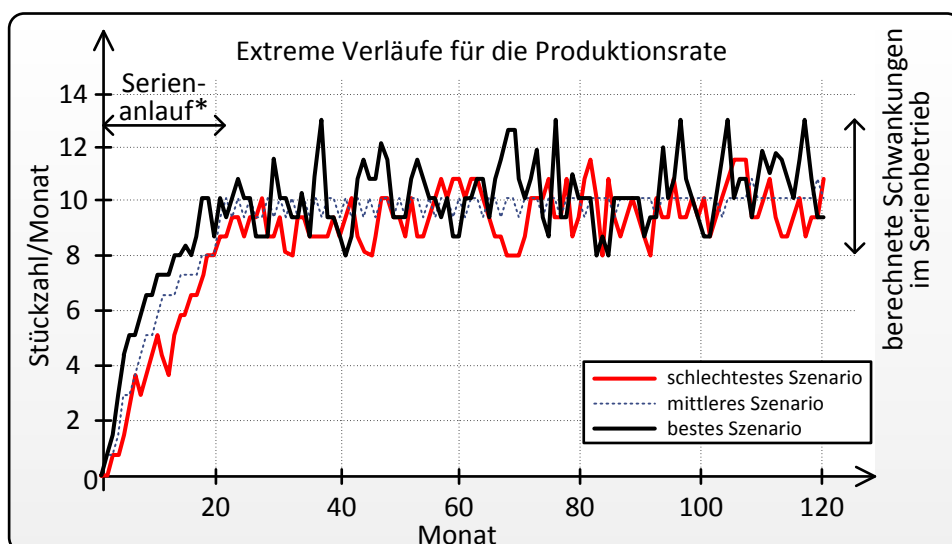


Bild 9.4: Teillösungen und Gesamtaufbau des Bauplatzes

Die Durchlaufzeiten der dargestellten Lösung schwanken zwischen 12:19 Std. und 20:02 Std., die mittlere Durchlaufzeit beträgt 16:19 Std. Mit Hilfe einer Analyse der Simulationsergebnisse lassen sich Einflussgrößen und Szenarien identifizieren, die zu schlechten Ergebnissen führen.

Einen ersten Aufschluss kann ein sogenanntes Gantt-Diagramm liefern. Aufgrund eines erhöhten Rüstaufwands beanspruchen die Prozessschritte Positionieren, Bohren, Nieten und Applizieren die meiste Zeit. Dieses deutet darauf hin, dass diese Technologien verbesserungswürdig sind. Die Modulanalyse zeigt auf, dass durch eine parallele Anordnung der Module für das Bohren, Nieten und Applizieren die Gesamtzeit reduziert werden kann. Insofern eine höhere Kapazität erforderlich ist, wären die zusätzlichen Investitionskosten an dieser Stelle gerechtfertigt.

Abgesehen von diesen Optimierungsüberlegungen erfüllt das Montagesystem – bereits ohne parallele Modulanordnung – die im Planungsproblem geforderte Stückzahl. Die beiden extremen Verläufe der Produktionsrate (jeweils für das beste und schlechteste Szenario) sowie der über alle Szenarien gemittelte Verlauf der Produktionsrate sind in **Bild 9.5** dargestellt. Die Graphen zu den verschiedenen Szenarien unterscheiden sich in der Anlaufform sowie in der Schwankung der Produktionsrate. Beim besten Szenario ist der Serienanlauf deutlich eher beendet als bei den gemittelten Szenarien bzw. schlechten Szenario (siehe ca. 20. Monat). Der Stückzahlunterschied im Serienbetrieb beträgt bei den berechneten Szenarien bis zu fünf Stück pro Monat. Gemittelt über alle Szenarien ergeben sich im Serienbetrieb 9,8 Einheiten pro Monat.



* Länge abhängig vom Szenario

Bild 9.5: Extreme Anlaufkurven für favorisierte Lösung

Für die Szenarioanalyse werden wie im **Bild 6.8** dargestellt die 1 %, 5 % und 10 % schlechtesten Szenarien ermittelt. Die Auswertung der Szenarien erfolgt mit Hilfe einer Clusteranalyse.

An dieser Stelle ist es wichtig, das geeignete Verfahren auszuwählen und eine geeignete Anzahl an Klassen zu definieren. Diese beiden Schritte werden für das Validierungsbeispiel exemplarisch aufgezeigt.

Die in der Literatur vorgestellten Clusterverfahren unterscheiden sich im Algorithmus, der verwendet wird, um die Daten zu Klassen zusammenzufassen (vgl. z.B. [Bac10], [Han10]). Verdeutlicht werden soll dies an den Ergebnissen dieses Validierungsbeispiels für die Kennwerte Durchlaufzeit und Life Cycle Cost (nach denen auch klassifiziert wird). Die Daten der betrachteten 10.000 Szenarien sind in **Bild 9.6 links** dargestellt. Für die Clusterung werden zwei standardisierte Methoden, die zu den agglomerativen hierarchischen Verfahren gehören, verwendet: die Berechnung nach „centroid“ (Schwerpunkt Abstand) und die nach „ward“ (innerer quadratischer Abstand) (vgl. z.B. [Bac10], [Han10]). Die Unterschiede dieser Methoden sind in **Bild 9.6 rechts** für den Fall von jeweils sechs Klassen zu erkennen. Es ergeben sich unterschiedliche Klasseneinteilungen und somit auch jeweils unterschiedliche charakteristische Kennzahlen sowie eine unterschiedliche Varianz innerhalb der Klassen. Für die folgende Auswertung wird eine homogene Klassenverteilung bevorzugt, die aufgrund einer geringeren Varianz innerhalb der Klassen besser durch die Methode „centroid“ erfüllt wird.

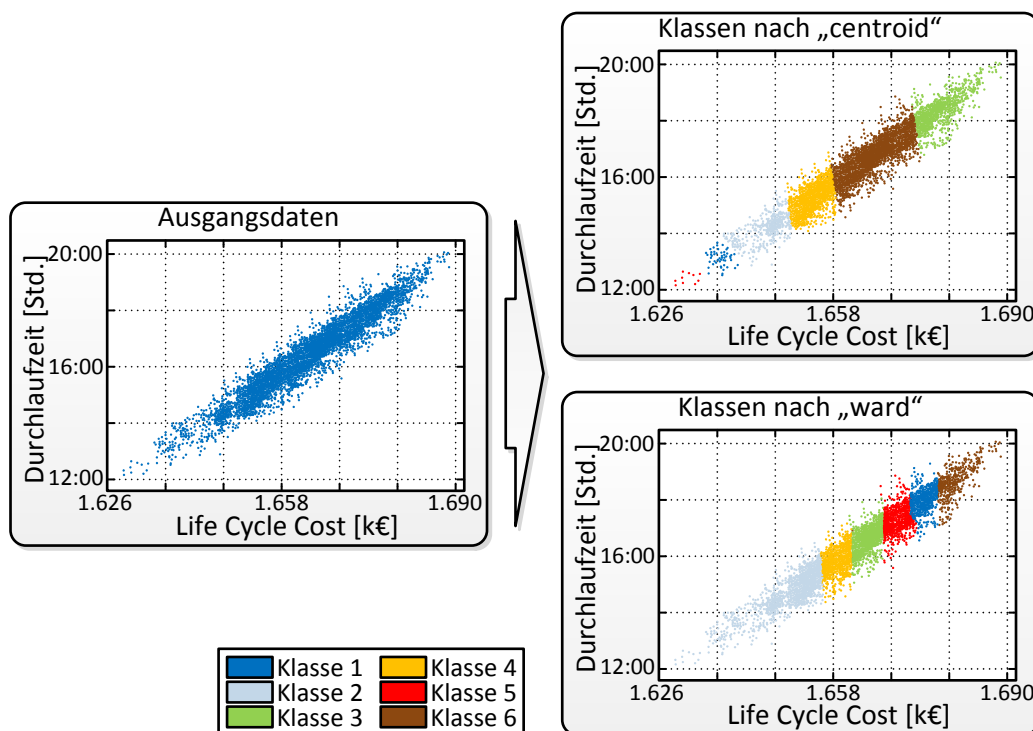


Bild 9.6: Wahl eines Clusterverfahrens

Die Klassenanzahl lässt sich mit Hilfe der Varianz in den einzelnen Klassen oder visuell mit Hilfe des Dendrogramms ermitteln. Das sich bei der Clusteranalyse nach der „centroid“-Methode ergebene Dendrogramm ist in **Bild 9.7** dargestellt. Das Dendrogramm beschreibt

den Abstand zwischen den Klassen (vgl. z.B. [Han02a, S. 365 f.]). Die dargestellten laufenden Nummern können unterschiedlich viele Szenarien beinhalten. Zur Ermittlung der Klassenanzahl empfiehlt es sich, die Stellen von großen Sprüngen anzuschauen, um möglichst homogene Klassen zu erhalten. Folglich sind auch dort die Anzahl unterschiedlicher Klassen zu ermitteln. Je höher die Klassenanzahl gewählt wird, desto genauer ist die Beschreibung der Klassenkennwerte und desto komplexer ist die Analyse. Folglich gilt es, ein geeignetes Mittelmaß zu ermitteln.

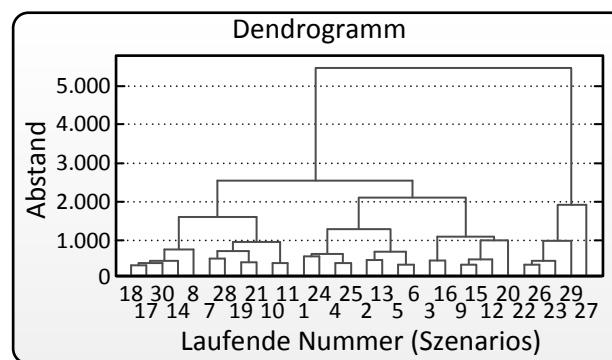


Bild 9.7: Dendrogramm zur Bestimmung der Klassenanzahl

Die Auswirkung der unterschiedlichen Wahl der Klassenanzahl soll am Beispiel von drei und sechs Klassen verdeutlicht werden. Hierfür wird die Klassifizierung aller Ergebnisse nach der „centroid“-Methode durchgeführt (siehe **Bild 9.6** rechts oben). Für die Szenarioanalyse werden unterschiedlich viele Szenarien der schlechten Szenarien verwendet. Die Auswertung der Ergebnisse für drei bzw. sechs Fallgruppen ist in **Bild 9.8** dargestellt. Bei Betrachtung der 100 und 500 schlechtesten Szenarien ergeben sich bei beiden Varianten kaum Unterschiede. Die Unterschiede nehmen jedoch mit zunehmender Anzahl an schlechten Szenarien zu. Die Analyse mit sechs Fallgruppen erlaubt in diesem Beispiel eine feinere Analyse der Ergebnisse, besonders dann, wenn eine hohe Anzahl an Szenarien bei der Berechnung charakteristischer Kennwerte einbezogen werden soll.

Mit Hilfe solch einer Szenarioanalyse können z.B. Zeiten für weitere Planungsmaßnahmen bestimmt sowie Risiken abgeleitet werden.

Ein weiterer Blick im Rahmen der Szenarioanalyse sollte auf die Eingangsparameter, die zu schlechten Ergebnissen führen, gelegt werden. Dazu ist keine vorangestellte Clusteranalyse erforderlich. Die Szenarioanalyse bzgl. Eingangsparametern ermöglicht einen Rückschluss darauf, welche Zeitanteile bei welchen Modulen und welche Störungen einen großen Einfluss auf Durchlaufzeiten haben. Eine erste grobe Abschätzung hierzu kann bereits das Gantt-Diagramm liefern. Im Rahmen einer detaillierteren Analyse lassen sich darüber hinaus weitere Informationen gewinnen.

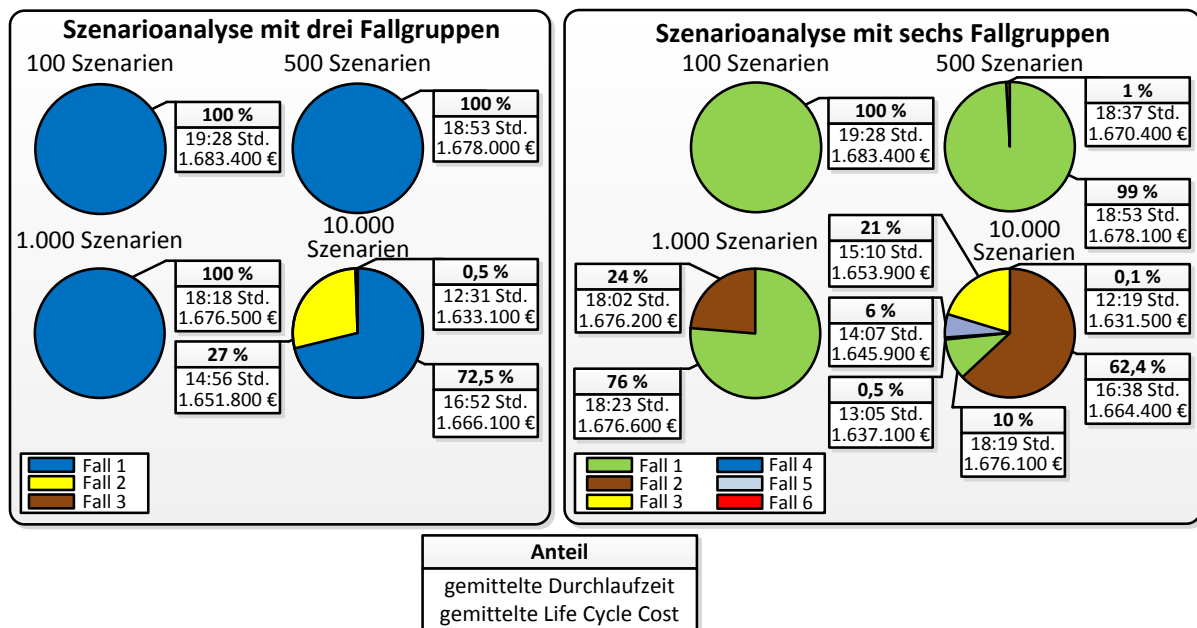


Bild 9.8: Ergebnisse der Szenarioanalyse

Bei der Analyse der Störungen ist zu erwähnen, dass vor allem der Lieferverzug von Bauteilen eine große Auswirkung auf die Durchlaufzeit besitzt. Ein Lieferverzug ist bei der Simulation bei über 50 % der Szenarien aufgetreten. Die darüber hinaus implementierten Störgrößen treten jeweils bei ungefähr 6 % der Szenarien auf, besitzen mit unter 2,5 % Durchlaufzeitverlängerung jedoch nur eine geringe Auswirkung.

Die Parameteranalyse erlaubt zum einen Rückschluss darauf, welche Montageschritte bzw. Montagemodule und Technologien es vornehmlich zu verbessern gilt. Zum anderen erlaubt sie zu analysieren, welche weiteren Störgrößen zu schlechten Ergebnissen geführt haben.

Vergleich mit konventionellen Planungsvorgehen und Simulationsmodell

Die Validierungsergebnisse der Montageaufgabe wurden mit den Ergebnissen eines konventionellen Planungsvorgehens verglichen. Dieses Vorgehen bestand aus den vier wesentlichen Schritten Montageaufgabe definieren, elementare Prozessschritte ableiten, Lösungsprinzipien ermitteln und Systemvarianten bestimmen. Die Lösungsprinzipien wurden mit Hilfe eines Benchmarks ermittelt. Unter Anwendung der Kreativitätstechnik „morphologischer Kasten“ wurden darauf aufbauend Lösungsvarianten bestimmt. Die Varianten für Montagesysteme wurden hierbei mit Hilfe einer Abhängigkeitsprüfung, die durch Experten durchgeführt wurde, untersucht. Die drei am meist versprechenden Varianten wurden anschließend für die Beurteilung herangezogen. Die Beurteilung der Teil- und Gesamtlösungen erfordert bei diesem Vorgehen ein umfassendes Expertenwissen in den Problemdomänen. Bei einer manuellen Bewertung können Abhängigkeiten nicht so genau abgeschätzt oder gar übersehen

werden. Des Weiteren ist die Ergebnisabsicherung aufgrund einer beschränkten Möglichkeit der Berücksichtigung von dynamischen (z.B. Lerneffekte) und stochastischen Aspekten (z.B. Zufälligkeiten) geringer. Gezeigt hat sich, dass die durch das Simulationsmodell vorgeschlagenen Lösungsprinzipien zu den Prinzipien der besten drei Lösungen des konventionellen Planungsvorgehens zählen. Folglich stellt der durch das Simulationsmodell vorgeschlagene Favorit eine Kombination der verwendeten Prinzipien aus den Systemlösungen mit dem konventionellen Vorgehen dar. Die Gründe hierfür sind vielfältig, vgl. Gegenüberstellung in **Tabelle 9.1**. Hervorzuheben sind drei wesentliche Aspekte:

- Lösungsvielfalt: Mit dem neuen Vorgehen wurde eine größere Lösungsvielfalt im Rahmen der Beurteilung berücksichtigt, ohne bereits zu früheren Planungsphasen einzelne Varianten auszuschließen.
- Planungsvorgehen: Das PEAS-Konzept ermöglicht eine vollautomatisiert Berechnung von Lösungsvorschlägen und Kennwerten auf Basis eines Wissensspeichers (objektive Ergebnisse). Im Vergleich dazu führt die manuelle Durchführung beim konventionellen Vorgehen häufig zu subjektiven Ergebnissen, da die Bewertung und Entscheidung u.a. vom involvierten Personenkreis, von Vorkenntnissen und von der Verfassung abhängen.
- Kennzahlberechnung: Durch den neuen Ansatz werden stochastische und dynamische Aspekte bei der Kennzahlberechnung einbezogen. Durch Berücksichtigung eines Zeitraums und stochastischer Größen ist eine breite Absicherung möglich, die aufgrund der komplexen Zusammenhänge manuell in der Regel nicht möglich ist.

Tabelle 9.1: Vergleich der neuen Vorgehensweise mit der konventionellen Vorgehensweise

Parameter/Größe	neu	konventionell
Lösungsvielfalt	über 100 Varianten	drei Varianten
Durchführung	automatisiert	manuell
Datenbasis	Wissensspeicher	Erfahrungswissen
Zeitbezug	Betrachtung mehrerer Perioden (dynamisch)	einperiodige Betrachtung (statisch)
Szenarien	Berücksichtigung zufälliger Szenarien in vorgegebenen Bereichen (stochastisch)	Verwendung von Erwartungswerten (deterministisch)

Der berechnete Lösungsvorschlag wurde als Simulationsmodell in einer kommerziell erhältlichen Software aufgebaut, um Funktionsweise, Konfiguration, Umsetzung sowie zeitbezogene Kennzahlen zu validieren. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Validierung dargestellt. In einem ersten Schritt wurde ein CAD-Modell aufgebaut. Die Realisierung der Teilfunktionen sowie der Gesamtaufbau ist in **Bild 9.4** dargestellt. Mit diesem Modell wurde untersucht,

ob zum einen die einzelnen Komponenten wirklich kombinierbar sind (Verträglichkeit) und zum anderen, ob die Ausführung der Montageaufgabe möglich ist (Kollisionsfreiheit und Erreichbarkeit). Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass für dieses Beispiel der Aufbau für dieses Beispiel wie berechnet möglich ist; dies ist stets im Einzelfall zu prüfen.

Für eine feinere Analyse wurde das CAD-Modell in ein Simulationsmodell im Process Designer und Process Simulate von Siemens Tecnomatix übertragen und der Montageablauf modelliert. Hiermit sollten vor allem die Kollisionsfreiheit, die Erreichbarkeit und die berechneten Prozesszeiten überprüft werden. In dem verwendeten Simulationsprogramm lassen sich die Bewegungen durch die Parameter Beschleunigung, Weglänge und Geschwindigkeit beschreiben. Damit ist eine genauere Modellierung möglich als in dem Modell der vorliegenden Arbeit, da hier feste Zeiten für definierte Wege/Distanzen verwendet werden. Dennoch hat sich gezeigt, dass die Abweichungen der mittleren Prozesszeiten ohne Störungen bei den Berechnungen mit dem neuen Konzept bei unter 6 % liegen. Folglich ergeben sich im Vergleich zur Simulation mit der PLM-Umgebung von Tecnomatix pessimistischere Prozesszeiten, die auf zwei Aspekte zurückzuführen sind: ungenauere Angaben der Elementarzeiten und gröbere Abschätzungen der Bewegung und Tätigkeiten. Insgesamt sind die Abweichungen jedoch gering und akzeptabel. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass das berechnete System die notwendigen Bewegungen für Logistik, Handhabung und Positionierung kollisionsfrei ausführen kann (sofern einzelne Schritte nacheinander ausgeführt werden).

Vergleich mit Ergebnissen bei deterministischen Annahmen

Die Planungs- und Beurteilungsergebnisse für deterministische und stochastische Annahmen unterscheiden sich bei diesem Validierungsbeispiel deutlich. Bei dem deterministischen Ansatz ergibt sich eine andere favorisierte Variante für das Montagesystem. Das ist auf zum Teil deutliche Unterschiede der berechneten Kennzahlen zurückzuführen. Bspw. ergibt sich bei der Variante aus **Bild 9.4** bei ausschließlicher Verwendung von Erwartungswerten eine Durchlaufzeit von 15:55 Std. Die Durchlaufzeit ist somit aufgrund der asymmetrischen Verteilungsfunktionen der Zeitanteile um 0:24 Std. geringer als wenn Wahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden. Folglich führt der deterministische Ansatz zu optimistischeren Ergebnissen.

9.3.2 Montageaufgabe 2: Formgebung von Schalenteilen

Wie bereits innerhalb der ersten Montageaufgabe beschrieben, werden bei der Strukturmontage Komponenten zueinander positioniert. Der Formschluss zwischen den nicht komplett eigensteifen Komponenten kann nur gewährleistet werden, wenn die Schalenformen aufeinander abgestimmt ist. Zur Herstellung der notwendigen Schalenform ist der Prozess der

Formgebung erforderlich (vgl. [Wei13, S. 28 ff.]), welcher in der zweiten Montageaufgabe betrachtet wird, um hierfür einen Laboraufbau zu planen.

Die beschriebene Planungsaufgabe zur Formung eines CFK-Schalenteils mit den Dimensionen 120 x 180 cm gliedert sich in drei Schritte (vgl. [Wei13, S. 28 ff.]). Im ersten Schritt wird das Schalenteil eingetaktet, wofür die Funktionen Handhaben und Greifen erforderlich sind. Anschließend werden die Referenzmerkmale des Schalenteils eingemessen. Über einen Soll/Ist-Abgleich werden die Formabweichungen inklusive der nötigen Parameterkorrekturen berechnet und entsprechend korrigiert (Funktion Bewegen). Der letzte Schritt wird dabei so lange iterativ ausgeführt, bis eine akzeptable Best-Fit-Genauigkeit erreicht wurde.

Erstellen eines Simulationsbaukastens

Der Simulationsbaukasten für das zweite Beispiel ist wie bereits beim ersten Validierungsbeispiel beschrieben, aufgebaut. Auf eine ausführliche Darstellung wird verzichtet.

Implementierung des Planungsproblems

Die Montagereihenfolge ergibt sich aus der Aufgabe. Die genauen Parameter sind in Anhang A **Tabelle A.2** zusammengefasst.

Verarbeitung

Der Simulationsablauf wurde unter Verwendung einer realitätsnahen Parametrisierung durchgeführt. Für die Montageaufgabe ergeben sich auf Basis des verwendeten Wissensspeichers mehr als 50 verschiedene Montagesysteme (Vorgehen analog zum ersten Validierungsbeispiel). Die ermittelten Varianten unterscheiden sich im verwendeten Messmittel, in der Schnittstelle zwischen Bauteil und Montagetechnik sowie hinsichtlich der Aktuatorik für die Formgebung.

Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisdarstellung erfolgt auf gleiche Weise wie beim ersten Validierungsbeispiel. Verwendet wird an dieser Stelle wiederum eine einheitliche Gewichtung der Kennzahlen. Die optimale Lösung wird in **Bild 9.9** wiedergegeben. Der Aufbau besteht aus einem Industrieroboter zur Handhabung, aus Elektrozylindern zur Formgebung der Schalenteile, aus Saugnäpfen für die Schnittstelle zwischen Schalenteil und Elektrozylinder sowie aus einem Lasertracker zur Messung der Referenzmerkmale. Zusätzlich ist ein Endeffektor-Rahmen erforderlich, an dem die Elektrozylinder montiert sind.

Zu erwähnen bleibt, dass diese Lösung auch zu den besten Varianten mit dem konventionellen Planungsvorgehen (detaillierte Vorgehensweise siehe erstes Validierungsbeispiel) zählt.

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Werkzeug ist jedoch eine Absicherung mit einem deutlich umfangreicheren Kennzahlensystem möglich.

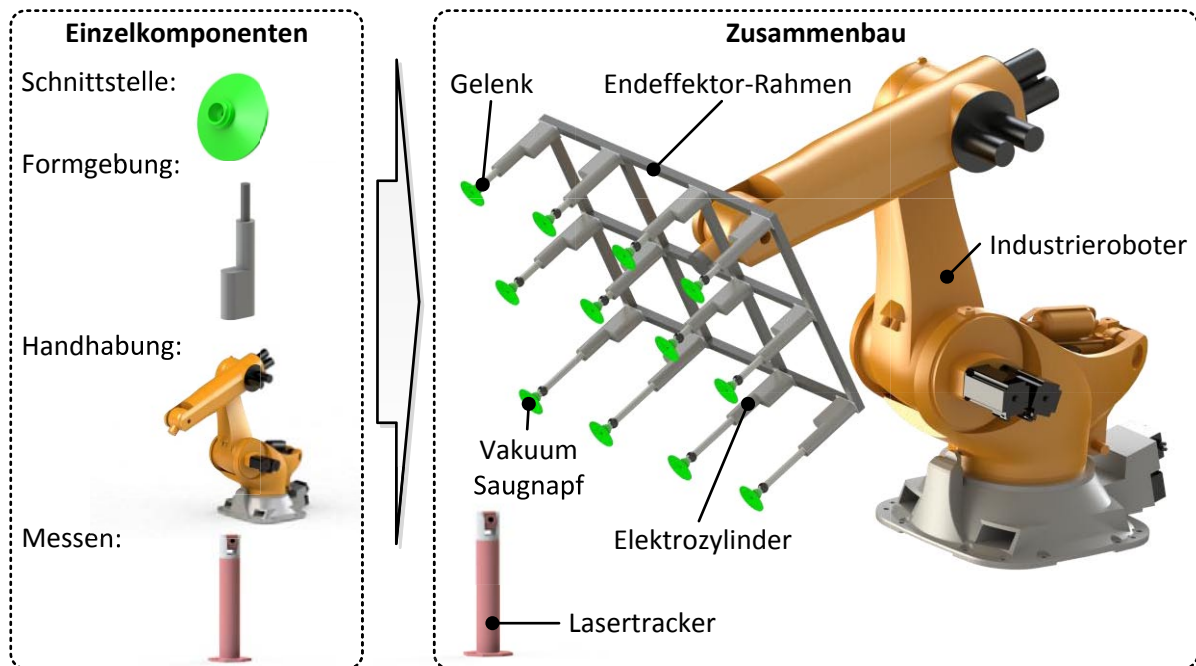


Bild 9.9: Komponenten und Aufbau einer Applikation zur Formgebung von Schalenteilen (vgl. [Wei13])

Im Folgenden wird kurz auf die wesentlichen Simulationsergebnisse eingegangen. Die berechnete mittlere Durchlaufzeit für die Formgebung beträgt 20:39 Min. Die Durchlaufzeiten schwanken je nach Szenario zwischen 9:35 Min. und 36:32 Min. Der größte Zeitanteil sowie die größte zeitliche Schwankung sind auf den Prozessschritt der Merkmalsvermessung bzw. die dafür notwendige Rüstzeit zurückzuführen. Die implementierten Störgrößen haben bei der gewählten Parametrisierung geringe Einflüsse auf die Durchlaufzeiten.

Die Modulanalyse zeigt auf, dass eine Parallelisierung von Lasertrackern für die Merkmalsvermessung eine zeitliche Optimierung erzielen würde. Diese Mehrinvestitionen sind allerdings nur bei einer hohen Auslastung wirtschaftlich.

Die im Planungsproblem geforderte Produktionsrate kann durch die berechnete Lösung zu jedem Zeitpunkt erfüllt werden. Dennoch empfiehlt es sich zur Erzielung einer vollständigen und multikriteriellen Betrachtung, in weiteren Planungsschritten eine übergeordnete Betrachtung einer kompletten Montage durchzuführen, bei welcher der Montageschritt der Formgebung einen Teilprozess darstellen würde.

Die Clusteranalyse beruht wie beim ersten Validierungsbeispiel auf den Kennwerten Durchlaufzeit und Life Cycle Cost. Die 10.000 simulierten Szenarien lassen sich mit Hilfe des agglomerativen hierarchischen Verfahrens nach dem inneren quadratischen Abstand („ward“) vier Klassen zuordnen. Vier Klassen haben sich bei diesem Planungsproblem nach Analyse des

Dendrogramms als geeignet herausgestellt. Die Ergebnisse der Clusteranalyse sind in **Bild 9.10** zusammengefasst. Die Kostenunterschiede zwischen den Fallgruppen entstehen vor allem durch Reparaturarbeiten (z.B. Beschaffung neuer Komponenten).

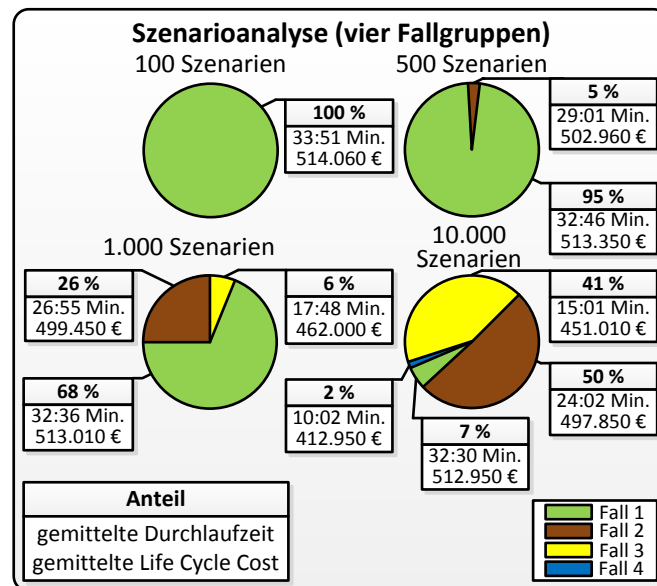


Bild 9.10: Ergebnisse der Szenarioanalyse

Vergleich mit Laborapplikation

Für die beschriebene Fragestellung wurde eine Laborapplikation aufgebaut, siehe **Bild 9.11** und vgl. [Wei13]. Im Vergleich zu dem berechneten Lösungsvorschlag sind in den aufgebauten Demonstrator weitere Komponenten integriert, die für die Ausführung relevant sind (z.B. Leistungsversorgung und Steuerung). Zwar wäre es auch möglich, diese Komponenten mit der softwaretechnischen Umsetzung sowie dem Konzept zu ermitteln, darauf wurde aber bewusst verzichtet, da die Konzentration auf den primär notwendigen Komponenten lag. Primär bezieht sich in diesem Fall auf die Komponenten, welche die Funktionen ausführen.

Anhand eines derartigen Aufbaus wurde bereits die Funktionsweise getestet und nachgewiesen (vgl. [Wei13, S. 27 ff.]). Zum einen konnte mit der Applikation nachgewiesen werden, dass die Module problemlos kombinierbar sind und dass der Lösungsvorschlag geeignet ist, die Aufgabe mit den gestellten Anforderungen (z.B. Toleranzen) auszuführen. Zum anderen konnten die realen und berechneten Zeiten verglichen werden. Die Abweichungen lassen sich einerseits auf die für den Wissensspeicher getroffenen Annahmen und Vereinfachungen bei der Definition der Montageaufgabe sowie andererseits auf den nicht komplett robusten und ausgereiften Prozessablauf zurückführen.

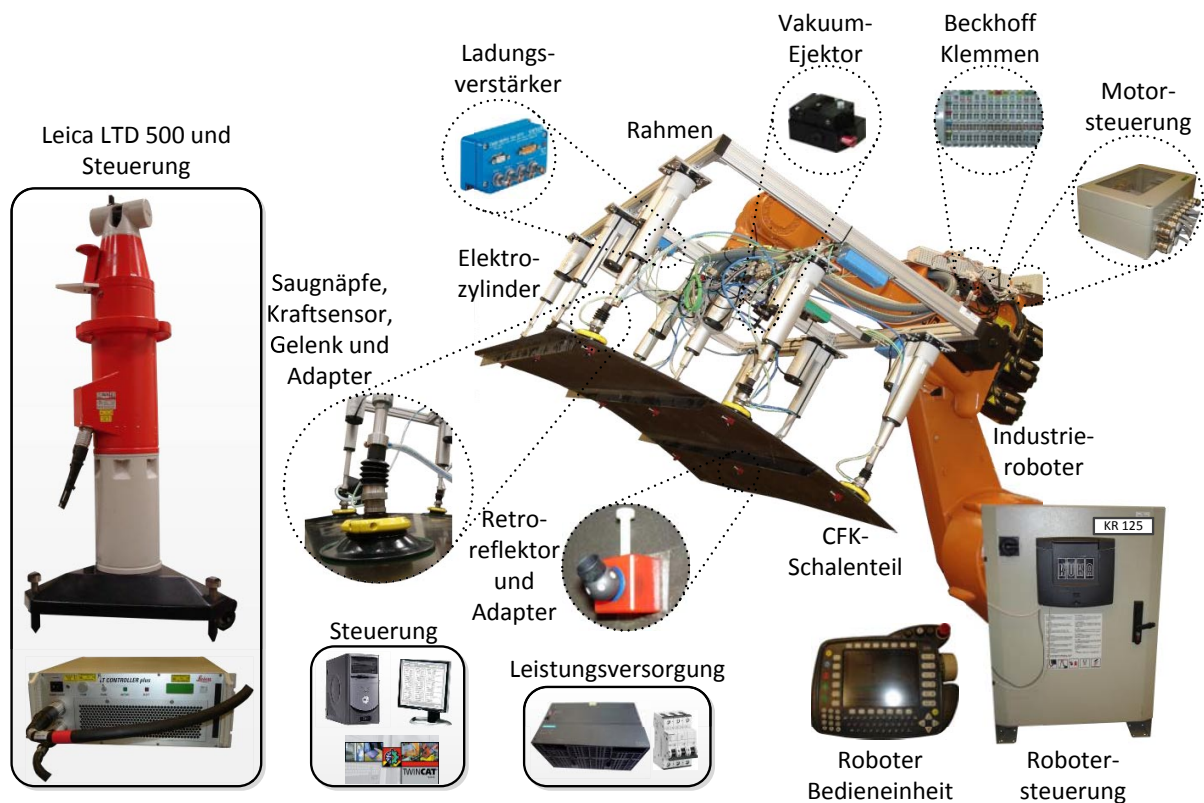


Bild 9.11: Aufbau der Laborapplikation zur Formgebung von Schalenteilen (vgl. [Wei13, S. 30])

9.4 Validierungsergebnisse

Im Folgenden wird die Zielerreichung der fünf definierten Validierungsziele zusammengefasst, die sich aus der Betrachtung der exemplarischen Fragestellungen ergibt.

Funktionsnachweis des Konzepts und der softwaretechnischen Umsetzung

Für die betrachteten Fragestellungen wurden Lösungsvarianten inklusive Kennzahlen für unterschiedliche Szenarien unter Anwendung der entwickelten Software, die auf Basis des PEAS-Konzepts aufgebaut wurde, berechnet. Die Lösungsvorschläge wurden zur Validierung zusätzlich in einem externen Simulationsmodell bzw. in einer Laborapplikation aufgebaut. Die Simulationen und die Testläufe haben gezeigt, dass die berechneten Montagesysteme für die Aufgaben geeignet sind. Die berechneten Kennzahlen wurden mit extern ermittelten Kennzahlen verglichen und wiesen Abweichungen von maximal 10 % auf. Diese Abweichungen können durch bessere Annahmen im Wissensspeicher, eine feinere Modellierung der Prozessschritte und durch einen Lesson learned verringert werden.

Nachweis der Qualität ermittelter Montagesysteme

Die mit dem Konzept ermittelten Lösungsvorschläge werden durch das umfangreiche Kennzahlensystem und die Szenarien breiter abgesichert als bei klassischen Ansätzen.

Die vorgeschlagenen Lösungen für Montagesysteme orientieren sich an den vorgegebenen Prozessschritten und Modulen für Montagesysteme. Je feiner die Granularität gewählt ist, desto feiner sind auch die Lösungsvorschläge. Die Qualität wird somit von den Eingangsgrößen vorgegeben und betrifft die Hauptkomponenten des Montagesystems. Zusätzliche Komponenten wie z.B. Adapter für Schnittstellen und Schrauben müssen entweder durch den Planer erkannt werden oder bei den entsprechenden Komponenten in Form von Notwendigkeiten (Matrix der Notwendigkeit **N**) hinzugefügt werden.

Im Vergleich zum konventionellen Vorgehen ergeben sich somit Lösungsvorschläge mit den Basiskomponenten, jedoch keine Stückliste aller Einzelteile. Dennoch reicht die Qualität für die Erfüllung der im Rahmen dieser Arbeit definierten Ziele.

Aussagegültigkeit der Lösungsvorschläge

Die Aussagegültigkeit der Lösungsvorschläge wurde anhand von Vergleichen zu konventionellen Planungsergebnissen sowie durch ein Simulationsmodell sowie einen Aufbau einer Laborapplikation nachgewiesen. Zudem wurden die berechneten Ergebnisse für Montagesysteme mit den Ergebnissen eines konventionellen Planungsvorgehens verglichen.

Kennwertrichtigkeit

Die Kennwertrichtigkeit wurde mit Hilfe von Ergebnissen anderer Simulationen (aus anderen Programmen) sowie durch Messergebnisse der Laborapplikation überprüft. Gezeigt haben sich geringfügige Abweichungen, die sich vor allem durch Annahmen, Vereinfachungen und aufgrund eines geringeren Reifegrads der Laborapplikation ergeben haben.

Streuung und Interpretation der mit Unsicherheiten behafteten Kennwerte

In der Regel sind die Eingangsparameter, die bei der Planung von Produktionssystemen verwendet werden, mit Unsicherheiten behaftet. Um Aussagen über charakteristische Kennzahlen zu ermöglichen, ist eine Szenarioanalyse geeignet. Die charakteristischen Kennzahlen unterliegen Schwankungen und können z.B. pessimistisch oder optimistisch sein. Die über die unterschiedlichen, generierten Szenarien berechneten Kennwerte unterliegen folglich Streuungen (die in diesem Fall gewünscht sind). Das ermöglicht eine gute Abschätzung der Auswirkungen von Einflussgrößen und eine Risikoanalyse. Die Visualisierung der Ergebnisse erleichtert in der Software eine einfache, anschauliche Analyse. Aussagen sind mit Hilfe charakteristischer Werte möglich.

Kapitel 10

Bewertung des PEAS-Konzepts und der softwaretechnischen Umsetzung

Abschließend soll das entwickelte Konzept zur Planung und Beurteilung von Montagesystemen sowie dessen softwaretechnische Umsetzung beurteilt werden. Hierdurch sollen zum einen die Erreichung der Zielsetzung überprüft werden und zum anderen die Potentiale und Risiken der neuen Vorgehensweise aufgezeigt werden.

10.1 Überprüfung der Zielsetzung

Im Rahmen der Validierung hat sich gezeigt, dass das PEAS-Konzept und dessen erste softwaretechnische Umsetzung geeignet sind, um die Planung und Beurteilung von Varianten für Montagesysteme zu unterstützen. Dabei sind die routineartigen Planungs- und Bewertungsschritte weitestgehend automatisiert abgebildet. Die Planung erfolgt auf Basis eines systematisch und umfassend aufgebauten Wissensspeichers unter Berücksichtigung von stochastischen und dynamischen Aspekten. Dies erlaubt während des gesamten Prozesses eine detaillierte Sichtweise auf die Montageaufgabe. Für die Beurteilung, die mit Hilfe eines multikriteriellen Kennzahlensystems unter Verwendung unterschiedlicher Szenarien durchgeführt wird, werden die berechneten Systemlösungen herangezogen und miteinander verglichen. Eine integrierte Szenario- und Einflussanalyse ermöglicht u.a. die Identifizierung von Schwachstellen und geeigneten Betriebsparametern.

Die softwaretechnische Umgebung stellt für den Anwender eine hilfreiche Oberfläche dar. Sie ermöglicht die Eingabe der Informationen in den Wissensspeicher, die Eingabe der Simulationsparameter sowie eine Ausgabe der Simulationsergebnisse. Die Menüführung leitet den

Anwender durch den Planungsprozess. Es ist möglich, parallel unterschiedliche Baukästen anzulegen, Planungsprobleme vorzugeben sowie berechnete Lösungen zu analysieren.

Das erstmalige Anlegen eines Wissensspeichers ist aufwendig. Eine Erweiterung des Speichers ist nachträglich jederzeit möglich. Mit fortlaufender Verwendung der Software verringert sich der Anpassungsaufwand für neue Fragestellungen. Sofern es vom Anwender gewünscht ist, könnte ebenfalls eine externe Datenbank in das Simulationswerkzeug integriert werden. Für die Erstellung eines Wissensspeichers wird neben den Daten zu den Bauteilen und Prozessen Datenmaterial in Form von Modulen inklusive der Leistungsdaten benötigt. Eine dafür notwendige Standardisierung und Modularisierung der Produktionssysteme sowie Offenlegung von Modul-Leistungsdaten (Eigenschaften etc.) ist in der Industrie noch nicht weit verbreitet. Die Einbindung technischer, kognitiver Fähigkeiten in die Fabriken/Produktionssysteme (vgl. z.B. [Spa13]) kann zukünftig bei der Datengewinnung ein Ansatz darstellen.

Die Umgebung sowie das Konzept bieten aktuell keine Schnittstelle zu anderen Softwareprogrammen. Dennoch können die Lösungen so ausgegeben werden, sodass sie grundsätzlich in andere Anwendungen überführt werden können.

Das aktuelle PEAS-Konzept ist auf die speziellen Anforderungen der Luftfahrtindustrie, insbesondere auf die Montage von Großbauteilen, ausgelegt. Für derartige Fragestellungen ist die Tauglichkeit durch die beispielhaften Montageaufgaben im Kapitel 9 nachgewiesen. Das Konzept beruht auf sehr allgemeinen Strukturen, sodass es auch bei Montageaufgaben mit anderen Schwerpunkten Einsatz finden kann. Dazu ist eine Anpassung der implementierten Algorithmen (z.B. hinsichtlich der Prüfkriterien und Parameter des Planungsproblems) sowie der relevanten Daten im Wissensspeicher erforderlich.

Zusammenfassen lässt sich, dass die in Abschnitt 4.1.1 definierten Ziele durch das Konzept und der softwaretechnischen Umgebung abgedeckt sind.

10.2 Potentiale und Risiken

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept sowie die softwaretechnische Umsetzung sollen den Planungsprozess von Montagesystemen, speziell in der Luftfahrtindustrie, unterstützen. Der neue Ansatz weist im Vergleich zum konventionellen Vorgehen einige Änderungen auf, die im Folgenden auszugsweise dargestellt werden.

Die Planung von Varianten für Montagesysteme erfolgt in der vorliegenden Arbeit Bottom-up auf Basis von Modulen für Montagesysteme. Befähiger hierfür sind die Modularisierung und Standardisierung von Montagesystemen, die den Aufbau eines Baukastensystems ermög-

lichen. Dieses Vorgehen induziert zunächst einen erhöhten Aufwand, da ein Baukastensystem aufzubauen ist und Standards einzuhalten sind. Später können hierdurch aber u.a. die Entwicklungszeiten durch vorentwickelte Module verkürzt werden, Kosten durch Gleichteile eingespart werden, die Robustheit durch getestete Module gesteigert werden und Modulparameter durch Modultests sowie durch den Einsatz der Module in der Praxis gewonnen werden.

Die Erstellung des als Wissensspeicher verwendeten Baukastensystems ist nicht nur aufwendig, sondern geht mit dem Problem der Datenverfügbarkeit einher. Sind erst einmal Daten verfügbar, so gilt, dass die Qualität der Daten mit Nutzung und Abgleich der Daten aus dem Speicher mit realen Daten (aus der Produktion oder aus Modultests) die Qualität der Daten gesteigert werden kann. Die Anpassung der im Speicher abgelegten Informationen ist jederzeit durch den Anwender möglich. Darüber hinaus stellt der Wissensspeicher allen in der Planung involvierten Mitarbeitern die gleichen Informationen zur Verfügung.

Im Rahmen der Planung von Varianten für Montagesysteme werden die Informationen aus dem Wissensspeicher aufgegriffen, um daraus mit Hilfe der Kombinatorik alle möglichen Systemlösungen zu berechnen. Vorteil dieses Vorgehens ist, dass nicht bereits frühzeitig Varianten ausgeschlossen werden, sondern alle denkbaren sowie weniger naheliegende Varianten in die Betrachtung einfließen. Der Nachteil äußert sich in einer längeren Rechenzeit, die im Rahmen dieser Arbeit jedoch trotz Verwendung eines Standard-Computers vernachlässigbar gering war.

Das implementierte Kennzahlensystem ermöglicht eine breite und umfassende Absicherung der Varianten im Rahmen der Beurteilung. Die Kennzahlen werden auf Grundlage unterschiedlicher Grundgesamtheiten bestehend aus zufälligen Szenarien berechnet. Dadurch können im Rahmen der Auswertung Aussagen über Zufälligkeiten und Unsicherheiten, z.B. Abweichungen von geplanten Zeiten sowie Eintrittszeitpunkten und Auswirkungen von Störungen, durch Berücksichtigung stochastischer und nichtlinearer Effekte getroffen werden. Darüber hinaus werden dynamische Aspekte wie Lerneffekte berücksichtigt. Im Vergleich zu statischen bzw. deterministischen Verfahren, die nur Szenarien mit dem Erwartungswert für einen Zeitpunkt betrachten (die oft zu optimistisch sind), wird auf diese Weise die Bandbreite von optimistischen über erwartungsgemäßen bis hin zu pessimistischen Szenarien sowie das Zeitverhalten berücksichtigt. Mit der Verwendung stochastischer Simulationsmodelle geht einher, dass umfangreichere Informationen sowie eine feinere Modellierung erforderlich sind. Darüber hinaus gestaltet sich die Auswertung komplexer, da es sich im Vergleich zu statischen und deterministischen Simulationsmodellen um ein ausführlicheres Datenmaterial handelt. Im Rahmen des neuen Konzepts wird die Auswertung automatisiert durchgeführt. Wesentliche Ergebnisse werden auf charakteristische Größen reduziert und stehen dem Planer zur Verfügung.

Das entwickelte Konzept und somit auch die softwaretechnische Umsetzung lassen sich neben der Planung und Beurteilung von Montagesystemen für weitere Aufgaben bzw. zu unterschiedlichen Phasen des Zyklus einsetzen. Einige Einsatzfelder sind in **Bild 10.1** dargestellt. Eine aufgezeigte Möglichkeit zur Nutzung des Ansatzes ist die Durchdringung und Analyse von Prozessketten. U.a. lassen sich hieraus wirkungsvolle Parameter der Produktion ableiten. Darüber hinaus kann mit Hilfe des Ansatzes die Machbarkeit von Montagesystem-Varianten sowie von Produkten bereits zu frühen Planungsphasen abgeschätzt werden und ggf. eine Nachkalkulation durchgeführt werden. Während der Entwicklung von Montagesystemen, dem Aufbau sowie der Inbetriebnahme der Einrichtungen und der Produktion lassen sich mit Hilfe des entwickelten Werkzeugs Optimierungsbedarf (z.B. Anpassung der Betriebsparameter und Austausch von Montagemodulen) sowie Vorgabewerte (z.B. Zeiten) ermitteln. Nicht zuletzt können aus den Simulationsergebnissen Entwicklungspotentiale und Anforderungen an die Lieferanten abgeleitet werden.

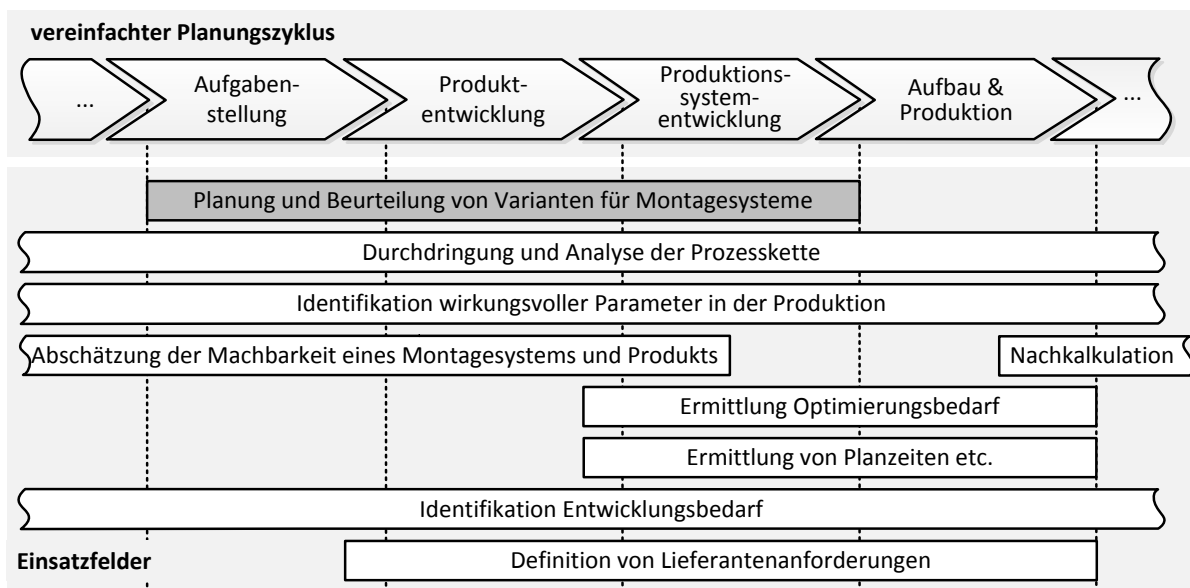


Bild 10.1: Weitere Einsatzfelder des PEAS-Konzepts sowie seiner softwaretechnischen Umsetzung

Kapitel 11

Zusammenfassung und Ausblick

11.1 Zusammenfassung

Unternehmen sind getrieben durch u.a. den Kunden und den Wettbewerb stetig neuen Herausforderungen ausgesetzt. Produktionssysteme müssen auf die spezifischen Anforderungen abgestimmt sein. Die Entwicklung entsprechender Systeme stellt eine komplexe Aufgabe dar, die durch eine Vielzahl unternehmensinterner und -externer Einflussgrößen beeinflusst wird. Bei der Planung von Montagesystemen handelt es sich um einen vielschichtigen und mit Unsicherheiten behafteten Prozess, welcher zukünftig häufiger und schneller durchzuführen ist. Diesen Planungsprozess gilt es durch adäquate Methoden und Werkzeuge zu unterstützen.

Zur Unterstützung der Aktivitäten im Bereich der Planung und Beurteilung von Produktionssystemen existieren im Stand der Technik und Forschung unterschiedliche Ansätze. Diese Ansätze berücksichtigen Teilaspekte der gegenwärtigen Montagesystemplanung und -beurteilung, erscheinen vor dem Hintergrund der in dieser Arbeit gesteckten Ziele aber nicht als ausreichend. Schwachstellen dieser Ansätze sind insbesondere die Entwicklung von Montagesystemen nach dem Top-down-Ansatz, eine uneinheitliche Planungs- und Beurteilungsgrundlage, eine mangelnde Berücksichtigung von stochastischen und dynamischen Aspekten sowie eine geringe Automatisierung routinemäßiger Schritte. Ein weiteres Charakteristikum dieser Ansätze ist, dass die Betrachtung von Montagesystemen im Rahmen der Grobplanung erfolgt. Da zu so frühen Entwicklungsphasen oftmals keine fundierten Informationen vorliegen, ist stets eine grobe Bewertung, die in der Regel mit deterministischen Annahmen und ausgewählten statisch berechneten Kennwerten durchgeführt wird, möglich. Inhalt der anschließenden Feinplanung ist bei all den Ansätzen lediglich noch die Ausarbeitung einer favorisierten Systemlösung.

Aufbauend auf dem hergeleiteten Handlungsbedarf (vgl. Abschnitt 3.6) wurde das PEAS-Konzept (Planning and Evaluating Assembly Systems-Konzept) zur wissensbasierten Planung und Beurteilung von Montagesystemen entwickelt (Vorgehen siehe **Bild 11.1**). Die Nutzung von identifizierten Befähigern erfolgt mit dem Ziel, die Planungszeiten zu verkürzen, die Planungskosten zu verringern sowie die Absicherung zu erhöhen. Das Konzept soll keine grundlegend neue Methode zur Planung von Montagesystemen darstellen, sondern vielmehr als ergänzendes Hilfsmittel dienen. Der Ansatz ist durch die folgenden wesentlichen Aspekte gekennzeichnet:

- Verwendung eines Wissensspeichers als Planungs- und Beurteilungsgrundlage,
- Entwicklung von Varianten für Montagesysteme auf Basis vorentwickelter Module,
- Betrachtung aller auf Basis des Wissensspeichers möglichen Varianten einschließlich ihrer Beurteilung,
- Planungsabsicherung durch integriertes stochastisches Simulationsmodell zur Berücksichtigung von Unsicherheiten,
- Berücksichtigung anlaufspezifischer sowie serienspezifischer Effekte und
- Automatisierung von routinemäßigen Tätigkeiten.

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte PEAS-Konzept, das aus den drei Bausteinen Wissensspeicher, Systemverarbeitung und Beurteilung besteht, ist auf luftfahrt-spezifische Anforderungen ausgerichtet. Als Planungsgrundlage des neuen Ansatzes dient der Baustein „Wissensspeicher“, der die notwendigen Informationen zu den Montagemodulen, den Montageprozessen sowie zu den Bauteilen enthält. Mit Hilfe der „Systemverarbeitung“ werden für ein vorgegebenes Planungsproblem zum einen unter Anwendung eines kombinatorischen Ansatzes alle auf Basis des Wissensspeichers möglichen Varianten für Montagesysteme berechnet. Zum anderen werden mit einem stochastischen Simulationsmodell technische, ökonomische, soziale und ökologische Kennwerte unter Berücksichtigung dynamischer Größen wie z.B. Eintrittszeitpunkt und Auswirkung von zeitlichen Schwankungen und Störungen berechnet. Im Baustein „Beurteilung“ werden die Ergebnisse für den Anwender aufbereitet und in Kennfeldern dargestellt. Diese Vorgehensweise erlaubt im nächsten Schritt eine detaillierte Szenario- und Einflussanalyse.

Das entwickelte PEAS-Konzept wurde als modulare Planungsumgebung in MATLAB implementiert. Die Schnittstelle zum Anwender stellen Bedienoberflächen dar, die sowohl für die Eingabe der Randbedingungen als auch für die Darstellung der Ergebnisse genutzt werden.

Die Validierung des entwickelten Konzepts sowie der softwaretechnischen Umsetzung liefert erste Erkenntnisse über das Anwendungsfeld; das Werkzeug lässt sich für erste überschlägige Analysen bis hin zu detaillierten Szenario- und Einflussanalysen einsetzen. Die Leistungsfähigkeit wurde anhand von zwei exemplarischen Montageaufgaben aus dem Bereich der Strukturmontage nachgewiesen. Hierfür wurden die Ergebnisse aus Teilbereichen

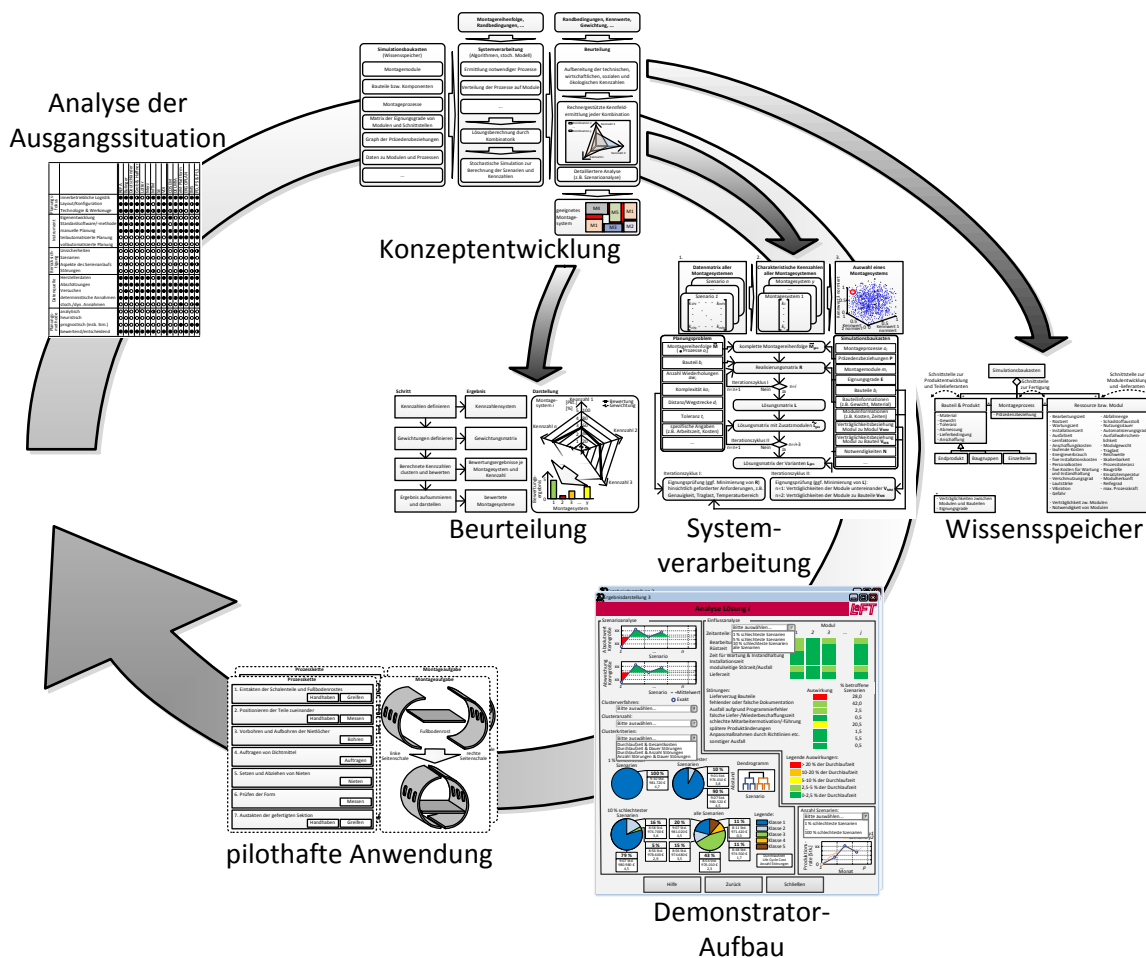


Bild 11.1: Zusammenfassung des Vorgehens im Rahmen der PEAS-Entwicklung

mit Ergebnissen aus Simulationsstudien, Laborapplikationen und dem konventionellen Planungsvorgehen verglichen.

Zusammenfassen lässt sich, dass das entwickelte Konzept sowie die dazugehörige softwaretechnische Umsetzung einen Lösungsweg darstellen, um den aufgezeigten Handlungsbedarf zu verringern. Das System kann neben der Planung und Beurteilung von Montagesystemen für weitere Aufgaben angewendet werden. Bspw. lässt es sich in frühen Entwicklungsphasen zur Gewinnung erster Erkenntnisse, aber auch zur Überprüfung der Betriebsparameter sowie zur Ermittlung von Vorgabezeiten einsetzen.

11.2 Ausblick

Im Rahmen der Entwicklung des PEAS-Konzepts sowie der Realisierung eines dazugehörigen Demonstrators konnte weiterer Entwicklungsbedarf identifiziert werden, welcher unterschiedliche Bereiche adressiert. Hierzu zählen u.a.:

- Weiterentwicklung und Erweiterung des Konzepts,
- Implementierung in den Entwicklungsprozess sowie
- Ermittlung fundierter Daten für den Wissensspeicher.

Das PEAS-Konzept stellt eine Möglichkeit zur Unterstützung von Planungsprozessen dar. Um den Einsatzbereich dieses Konzepts sowie der softwaretechnischen Umsetzung zu verbreitern, bietet sich eine Erweiterung der branchenspezifischen Anforderungen, Ziele und Kriterien an. Darüber hinaus ist eine Funktionserweiterung denkbar. Ein Beispiel hierfür ist die Integration in ein 3D-CAD-Programm, um damit einen automatisierten Aufbau und eine Visualisierung der Lösungen zu ermöglichen.

Bislang wurde der Einsatz des neuen Ansatzes theoretisch anhand exemplarischer Montageaufgaben getestet und mit Ergebnissen der konventionellen Vorgehensweise verglichen. Als nächster Schritt ist die Integration in den industriellen Entwicklungsprozess anzustreben. Hierfür ist eine Weiterentwicklung der softwaretechnischen Umsetzung erforderlich, damit der Ansatz großflächig und zuverlässig eingesetzt werden kann.

Zum Aufbau eines Wissensspeichers müssen Informationen zu den Prozessen, Modulen und Bauteilen vorhanden sein bzw. sich abschätzen lassen. Für eine hohe Qualität der Daten sind hierbei die Modulhersteller sowie die in Betrieb befindlichen Produktionssysteme einzubeziehen. Darüber hinaus müssen die Erkenntnisse aus dem Planungsprozess in den Wissensspeicher eingepflegt werden. Ein viel versprechender Ansatz zur Gewinnung von Informationen über Module und Systeme bietet die Einbindung technischer, kognitiver Fähigkeiten in die Fabriken/Produktionssysteme. Des Weiteren sind die Modularisierung und Standardisierung von Produktionssystemen voranzutreiben, um den Umfang an möglichen Modulen zu vergrößern.

Literaturverzeichnis

- [Abe05] Abernethy, R. B.: *The new Weibull Handbook – Reliability and Statistical Analysis for Predicting Life, Safety, Survivability, Risk, Cost and Warranty Claims*. North Palm Beach, 4. Auflage, 2005.
- [Abe12] Abele, E.; Schrems, S.; Schraml, P.: *Energieeffizienz in der Fertigungsplanung – Frühzeitige Abschätzung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen in der Mittel- und Großserienfertigung*. In: wt Werkstattstechnik online 102 (2012) Nr. 1/2, S. 38-42. Internet: www.werkstattstechnik.de, Düsseldorf, Springer-VDI-Verlag, 2012.
- [AWF68] AWF: *Handbuch der Arbeitsvorbereitung, Teil 1: Arbeitsplanung*. Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung (AWF) e.V. / Rationalisierungskuratorium der Deutschen Wirtschaft (RKW) e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1968.
- [BAA08] BAA: *Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit 2008: Unfallverhütungsbericht Arbeit*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 1. Auflage, Dortmund, 2008.
- [Bac10] Bacher, J.; Pöge, A.; Wenzig, K.: *Clusteranalyse – Anwendungsorientierte Einführung in Klassifikationsverfahren*. 3. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2010.
- [Bad05] Bader, U.: *Simulationsbaukasten für die Halbleiter- und Flachbildschirmfertigung – Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Planung, Auslegung und Optimierung automatisierter Materialflusssysteme*. Dissertation, IPA-IAO Forschung und Praxis, Nr. 431, Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 2005.
- [Bar96] Barringer, P. H.; Weber, D. P.: *Life Cycle Cost Tutorial*. Fifth International Conference on Process Plant Reliability, Houston (TX)/USA, 2.-4. Oktober 1996, (<http://www.barringer1.com/pdf/lcctutorial.pdf>, 27.07.2011), 1996.

- [Büc07] Büchter, A.; Henn, H.-W.: *Elementare Stochastik – Eine Einführung in die Mathematik der Daten und des Zufalls*. Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Bec12] Becker, H. P.: *Investition und Finanzierung – Grundlagen der betrieblichen Finanzwirtschaft*. 5. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [Bei97] Beichelt, F.: *Stochastische Prozesse für Ingenieure*. B.G. Teubner-Verlag, Stuttgart, 1997.
- [Beu05] Beumelburg, K.: *Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation*. Dissertation, IPA-IAO-Forschung und -Praxis, Nr. 413, Jost-Ketter Verlag, Heimsheim, 2005.
- [Bie95] Biemans, W. G.: *Internal and External Networks in Product Development: A Case for Integrations*. In: M. Bruce, W. G. Biemans (Hrsg.): *Product Development, Meeting the Challenge of the Design-Marketing Interface*. Wiley, Chichester, S. 137-159, 1995.
- [Bis07] Bischoff, R.: *Anlaufmanagement – Schnittstelle zwischen Produkt und Serie*. Dissertation, Konstanzer Managementschriften, Konstanz, 2007.
- [Blo04] Bloech, J.; Bogaschewsky, R.; Götze, U.; Roland, F.: *Einführung in die Produktion*. 5., überarbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2004.
- [BMF84] BMFT: *Einsatzmöglichkeiten von flexibel automatisierten Montagesystemen in der industriellen Produktion*. Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), VDI-Verlag, Düsseldorf, 1984.
- [Boo91] Booch, G.: *Object Oriented Design with Applications*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1991.
- [Boo98] Booch, G.; Rumbaugh, J.; Jacobson, I.: *UML: The Unified Language user guide*. Reading, USA: Addison-Wesley, 1998.
- [Bos07] Bossmann, M.: *Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung*. Dissertation, Universität des Saarlands Saarbrücken, Schriftenreihe Produktionstechnik, Herausgeber H. Bley und C. Weber, Band 38, 2007.
- [Bra12] Bracht, U.; Arnhold, D.: *Produktionsprozessplanung auf Basis unscharfer Bedarfsprognosen – Robuste Produktionsplanung bei unsicheren und variantenreichen Produktausprägungen*. In: *wt Werkstattstechnik online 102 (2012) Nr. 4*, S. 246-252. Internet: www.werkstattstechnik.de, Düsseldorf, Springer-VDI-Verlag, 2012.

- [Bri10] Britzke, B.: *MTM in einer globalisierten Wirtschaft – Arbeitsprozesse systematisch gestalten und optimieren*. Mi-Wirtschaftsbuch, FinanzBuch-Verlag, München, 2010.
- [Bru10] Bruns, H.: *Organisation des Anlaufmanagements*. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik TU Braunschweig, Vulkan Verlag, Essen, 2010.
- [Bul86] Bullinger, H.-J.; Ammer, D.; Dungs, K.; Seidel, U.; Weller, B.: *Systematische Montageplanung: Handbuch für die Praxis*. Hanser-Verlag, München, 1986.
- [CAS99] CAS: *DFA Handbook*. Casualty Actuarial Society, www.casact.org, 1999.
- [Che76] Chen, P.: *The Entity Relationship Model: Towards an unified view of data*. ACM Transactions on Database-Systems 1 (1976), S. 9-36, 1976.
- [Cis05] Cisek, R.: *Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen*. Dissertation, Forschungsberichte iwB, Band 191, München, Herbert Utz Verlag, 2005.
- [Ciu04] Ciupek, M.: *Beitrag zur simulationsgestützten Planung von Demontagefabriken für Elektro- und Elektronikaltgeräte*. Dissertation, Berlin, Online-Ressource, <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dd01/478044208.pdf>, 2004.
- [Coa91] Coad, R.; Yourdon, E.: *Object Oriented Design*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1991.
- [Coe07] Coenenberg, A. G.; Fischer, T. M.; Günther, T.: *Kostenrechnung und Kostenanalyse*. 6. Auflage, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2007.
- [Cra44] Crawford, J. R.: *Statistical accounting procedures in aircraft production*. In: Aero Digest, 44, S. 88 ff., 1944.
- [Dan01] Dangelmaier, W.: *Fertigungsplanung – Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung*. 2. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, 2001.
- [Dan08] Daniel, K.: *Managementprozesse und Performance – Ein Konzept zur reifegradbezogenen Verbesserung des Managementhandelns*. Dissertation, Gabler Edition Wissenschaft, Wiesbaden, Bamberg, 2008.
- [Dan09] Dangelmaier, W.: *Theorie der Produktionsplanung und -steuerung – Im Sommer keine Kirschpralinen?* Berlin, Springer, 2009.

- [Deu89] Deuschländer, A.: *Integrierte rechnergestützte Montageplanung*. Dissertation, TU Berlin, Reihe Produktionstechnik Berlin Band 72, München, Wien, Carl Hanser Verlag, 1989.
- [DIN86] DIN: *VDI-Richtlinie 8593: Fertigungsverfahren Fügen – Kleben; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Beuth, Berlin, 1986.
- [DIN90] DIN: *DIN 40041: Zuverlässigkeit*. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 1990.
- [DIN02] DIN: *DIN 61703: Mathematische Ausdrücke für Begriffe der Funktionsfähigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft*. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 2002.
- [DIN03] DIN: *DIN EN ISO 17666: Raumfahrtssysteme – Risikomanagement*. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN05] *DIN EN 60300-3-3: Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-3: Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten*. Beuth Verlag, Berlin 2005, 2005.
- [DOD11] DOD: *Technology Readiness Assessment (TRA) – Guidance*. Hrsg.: United States Department of Defense, prepared by the Assistant Secretary of Defense for Research and Engineering (ASD(R&E)), Department of Defense, Washington, 2011.
- [Dom93] Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S.: *Produktionsplanung – Ablauforganisatorische Aspekte*. Springer, Berlin, 1993.
- [Dom02] Domschke, W.; Drexl, A.: *Einführung in Operations Research*. Online-Ressource, 6. überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer, Berlin, 2002.
- [Eis11] Eisele, C.; Schrems, S.; Abele, E.: *Energy-Efficient Machine Tools through Simulation in the Design Process*. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Edit.): *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Braunschweig, Germany, 02.05.-04.05.2011. Heidelberg, Springer-Verlag, 2011.
- [Eng09a] Engelmann, J.: *Methoden und Werkzeuge zur Gestaltung energieeffizienter Fabriken*. Dissertation, Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme, Heft 71, Chemnitz, 2009.
- [Eng09b] Engmann, K.: *Technologie des Flugzeuges*. 5., neu bearbeitete Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg, 2009.

- [Erl10] Erlach, K.: *Wertstromdesign – Der Weg zur schlanken Fabrik*. VDI-Buch, 2., bearbeitete und erweiterte Auflage, 2010.
- [Eva00] Evans, M.; Hastings, N.; Peacock, B.: *Triangular Distribution*. Kapitel 40 in: *Statistical Distributions*, 3. Auflage, New York, Wiley, S. 187-188, 2000.
- [Eve96] Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): *Produktion und Management (Betriebshütte)*. Teil 2, 7., neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1996.
- [Eve97] Eversheim, W.: *Organisation in der Produktionstechnik – Arbeitsvorbereitung*. 3. Band, Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [Eve02] Evers, K.: *Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage*. Dissertation, Hannover, Univ.-Verlag, 2002.
- [Eym11] Eymann, T.: *Tagungsband zum Doctoral Consortium der WI 2011; Proceedings of the Doctoral Consortium of the Wirtschaftsinformatik 2011*. Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, Univ. Bayreuth, Bayreuth, 2011.
- [Fel92] Feldmann, K.; (Hrsg.), I. Bey: *Montageplanung in CIM*. Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [Fel97] Feldmann, C.: *Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung*. Dissertation, Springer-Verlag, 1997.
- [Fit06] Fitzek, D.: *Anlaufmanagement in Netzwerken: Grundlagen, Erfolgsfaktoren und Gestaltungsempfehlungen für die Automobilindustrie*. Dissertation, Haupt Verlag, Bern, 2006.
- [För99] Förster, T.: *Entwicklung einer Methode zur Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsbereichen für die variantenreiche Serienfertigung*. Dissertation, Universität Magdeburg, 1999.
- [Gas10] Gast, H.; Leugers, A.; Leugers-Scherzberg, A. H.: *Optimierung historischer Forschung durch Datenbanken: Die exemplarische Datenbank Missionsschulen 1887-1940": Die exemplarische Datenbank Missionsschulen 1887-1940"*. Klinkhardt Forschung, Bad Heilbrunn, 2010.
- [Gau09] Gausemeier, J.; Plass, C.; Wenzelmann, C.: *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*. Hanser-Verlag, München, Wien, 2009.

- [Gla01] Gladen, W.: *Kennzahlen- und Berichtssysteme: Grundlagen zum Performance Measurement*. Wiesbaden, Gabler-Lehrbuch, 1. Auflage, 2001.
- [Glo07] Glossner, M.: *Integrierte Planungsmethodik für die Presswerkneuplanung in der Automobilindustrie*. Dissertation, universitätsverlag karlsruhe, Band 1 – 2007, Karlsruhe, 2007.
- [Gro84] Grob, R.; Haffner, H.: *Planungsleitlinien Arbeitsstrukturierung*. Siemens AG, Berlin, 1984.
- [Gru02] Grunwald, S.: *Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung*. Dissertation, TU München, Herbert Utz Verlag, München, 2002.
- [Gru06] Grundig, C.-G.: *Fabrikplanung: Planungssystematik – Methoden – Anwendungen*. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2006.
- [Hab74] Haberfellner, R.: *Die Unternehmung als dynamisches System – Der Prozesscharakter der Unternehmungsaktivitäten*. Dissertation, Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 1974.
- [Hab08] Habel, U.: *Virtuelle Inbetriebnahme und Optimierung von Anlagen & Maschinen – Welche frühzeitigen Möglichkeiten gibt es bereits vor Aufbau und Installation der Anlagen, Dassault Systems – Delmia GmbH*. In: Tagungsband zum Fraunhofer IPA Workshop F 172 – Effiziente Planung und Entwicklung von Automatisierungslösungen, Technologien - Methoden - Anwendungen, 18. Nov. 2008, Stuttgart, 2008.
- [Hal02] Hall, K.: *Ganzheitliche Technologiebewertung – Ein Modell zur Bewertung unterschiedlicher Produktionstechnologien*. Dissertation, Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, Schriftenreihe Wirtschaftswissenschaft: techno-ökonomische Forschung und Praxis, 2002.
- [Han02a] Handel, A.: *Multivariate Analysemethoden – Theorie und Praxis multivariater Verfahren unter besonderer Berücksichtigung von S-PLUS*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 2002.
- [Han02b] Handrich, W.: *Flexible, flurfreie Materialflusstechnik für dynamische Produktionsstrukturen*. Dissertation, Utz Verlag, München, 2002.
- [Han06] Han, J.; Kamber, M.: *Data Mining: Concepts and Techniques*. Morgan Kaufmann, 2006.

- [Han10] Handl, A.: *Multivariate Analysemethoden – Theorie und Praxis multivariater Verfahren unter besonderer Berücksichtigung von S-PLUS*. 2. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, 2010.
- [Har82] Hartung, J.; Elpelt, B.; Klösener, K.-H.: *Statistik – Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, Universität Dortmund, 1982.
- [Har90] Hartberger, H.: *Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme*. Dissertation, TU München, Springer Verlag, Berlin, 1990.
- [Har95] Hartung, J.; Elpelt, B.; Klösener, K.-H.: *Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. 10. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, 1995.
- [Heg03] Hegenscheidt, M.: *Kennliniengestützte Leistungsprognose verketteter Produktionssysteme*. Dissertation, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003.
- [Hei10] Heins, M.: *Anlauffähigkeit von Montagesystemen*. Dissertation, PZH Produktionstechnische Zentrum GmbH, Band 01/2010, Garbsen, 2010.
- [Hel10] Helbing, K. W.: *Handbuch Fabrikprojektierung*. Springer Verlag, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, Rostock, 2010.
- [Hes93] Hesse, S.: *Montagemaschinen*. Vogel-Verlag, Würzburg, 1993.
- [Jen07] Jensen, S.: *Eine Methodik zur teilautomatisierten Generierung von Simulationsmodellen aus Produktionsdatensystemen am Beispiel einer Job Shop Fertigung*. Dissertation, Universität Kassel, 2007.
- [Jon60] de Jong, J. R.: *Fertigkeit, Stückzahl und benötigte Zeit*. 2., überarbeitete Auflage, REFA-Nachrichten, Sonderheft, Darmstadt, 1960.
- [Jon00a] Jonas, C.: *Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen*. Dissertation, Technische Universität München, Herbert Utz Verlag, 2000.
- [Jon00b] Jondral, F.; Wiesler, A.: *Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und stochastischer Prozesse für Ingenieure*. B. G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, 2000.
- [Kai99] Kaiser, T.: *Methodik zur Bestimmung der Verfügbarkeit von verteilten anwendungsorientierten Diensten*. Dissertation, TU München, Herbert Utz Verlag, Wissenschaft, 1999.

- [Kam12] Kampker, A.; Osebold, R.; Trautz, M.; Burggräf, P.; Krunke, M.; Meckelnborg, A.; Leufgens, I.; Rogel, D.: *Innovative Fabriken interdisziplinär planen*. In: wt Werkstattstechnik online 102 (2012) Nr. 4, S. 186-192. Internet: www.werkstattstechnik.de, Düsseldorf, Springer-VDI-Verlag, 2012.
- [Kar12] Karl, F.; Reinhart, G.; Zäh, M. F.: *Rekonfigurationsfähigkeit von Betriebsmitteln – Kennzahlen zur Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit von Montagebetriebsmitteln*. In: wt Werkstattstechnik online 102 (2012) Nr. 4, S. 228-233. Internet: www.werkstattstechnik.de, Düsseldorf, Springer-VDI-Verlag, 2012.
- [Kie07] Kiefer, J.: *Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau*. Dissertation, Universität des Saarlands Saarbrücken, Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 43, Herausgeber: H. Bley und C. Weber, 2007.
- [Kie09] Kiener, S.; Maier-Scheubeck, N.; Obermaier, R.; Weiß, M.: *Produktionsmanagement – Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung*. 9. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2009.
- [Kis01] Kistner, K.-P.; Steven, M.: *Produktionsplanung*. Physica-Verlag, Essen, 2001.
- [Kle07] Kletti, J.: *Konzeption und Einführung von MES-Systemen – Zielorientierte Einführungsstrategie mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, Fallbeispielen und Checklisten*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Kle11a] Klemke, T.; Mersmann, T.; Wagner, C.; Goßmann, D.; Nyhuis, P.: *Bewertung und Gestaltung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen – Wandlungsmonitoring, -analyse und -taxonomie als anwenderfreundliche Hilfsmittel in Produktionsunternehmen*. In: ZWF (Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb), Jahrg. 106 (2011) Nr. 12, Carl Hanser Verlag München, S. 922-927, 2011.
- [Kle11b] Kletti, J.; Schumacher, J.: *Die perfekte Produktion – Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT)*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [Koh10] Kohn, W.; Öztürk, R.: *Statistik für Ökonomen – Datenanalyse mit R und SPSS*. Springer-Verlag, Heidelberg, 2010.
- [Kon03] Konold, P.; Reger, H.: *Praxis der Montagetechnik – Produktdesign, Planung, Systemgestaltung*. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg, Wiesbaden, 2003.
- [Kos95] Kosturiak, J.; Gregor, M.: *Simulation von Produktionssystemen*. Springer Verlag, Wien, 1995.

- [Krö07] Kröll, M.: *Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung*. Dissertation, Universität Stuttgart, IPA-ISO Forschung und Praxis, Nr. 468, Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 2007.
- [Kra00] Kratzsch, S.: *Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen*. Dissertation, Vulkan-Verlag, Essen, Universität Braunschweig, 2000.
- [Kra02] Kramer, O.: *Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe*. Dissertation, Herbert Utz Verlag GmbH, Forschungsberichte IWB, Band 173, München, 2002.
- [Kre11] Krebs, M.; Großmann, D.; Erohin, O.; Bertsch, S.; Deuse, J.; Nyhuis, P.: *Standardisierung im wandlungsfähigen Produktionssystem – Einfluss der Prozess- und Ressourcenstandardisierung auf die Wandlungsfähigkeit*. In: ZWF (Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb), Jahrg. 106 (2011) Nr. 12, Carl Hanser Verlag München, S. 912-917, 2011.
- [Laa05] Laarmann, A.: *Lerneffekte in der Produktion*. Dissertation, Universität Bochum, DUV Gabler Edition Wissenschaft, 2005.
- [Lai03] Laick, T.: *Hochlaufmanagement – Sicherer Produktionshochlauf durch zielorientierte Gestaltung und Lenkung des Produktionsprozesssystems*. Dissertation, in: Warnecke, G. (Hrsg.): FBK Produktionstechnische Berichte, Band 47, Kaiserslautern, 2003.
- [Lan11] Lanza, G.; Moser, R.; Ruhrmann, S.; Peter, K.: *Systematisch zum wandlungsfähigen globalen Wertschöpfungsnetzwerk – Ein Ansatz zur Ist-Analyse für die gezielte Integration wandlungsfähiger Strukturen*. In: wt Werkstattstechnik online 101 (2011) Nr. 4, S. 206-209. Internet: www.werkstattstechnik.de, Düsseldorf, Springer-VDI-Verlag, 2011.
- [Las06] Laskowski, K.: *Life Cycle Cost-Betrachtungen von Hochspannungsschaltanlagen – Vergleichende Beurteilung konventioneller Anlagenkonzepte und aktueller Hybridlösungen*. Dissertation, Universität Darmstadt, 2006.
- [Löd08] Lödding, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung*. 2., erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [Ler09] Lerch, R.; Sessler, G. M.; Wolf, D.: *Technische Akustik – Grundlagen und Anwendungen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Lie81] Liebau, H.-D.: *Die Lernkurven-Methode*. REFA-Verband, Darmstadt, 1981.

- [Lie95] Liebl, F.: *Simulation: problemorientierte Einführung*. 2. Auflage, Oldenbourg, München, 1995.
- [Lie01] Liedtke, C.; Rohn, H.: *Können KMU zukunftsfähiger wirtschaften?* In: Umweltwirtschaftforum (UWF), 9. Jahrgang (2001), Heft 1, S. 20-26, 2001.
- [Lof02] Loferer, M.: *Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen*. Dissertation, iwv Forschungsberichte, München, Herbert Utz Verlag, Oldenbourg, 2002.
- [Lot92] Lotter, B.: *Wirtschaftliche Montage*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992.
- [Lot06] Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: *Montage in der industriellen Produktion – Ein Handbuch für die Praxis*. Springer-Verlag, Oberderdingen, Garbsen, 2006.
- [Man95] Mankins, J. C.: *Technology Readiness Levels*. Advances Concepts Office, Office of Space Access and Technology NASA, Santa Maria, 1995.
- [Mat89] Mattan, F.; Mehl, H.: *Diskrete Simulation – Prinzipien und Probleme der Effizienzsteigerung durch Parallelisierung*. Informatik Spektrum 12/1989, S. 198 ff., 1989.
- [Meh94] Mehl, H.: *Methoden verteilter Simulation*. Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1994.
- [Mei12] Meier, H.; Schröder, S.; Velkova, J.; Schneider, A.: *Modularisierung als Gestaltungswerkzeug für wandlungsfähige Produktionssysteme*. In: wt Werkstattstechnik online 102 (2012) Nr. 4, S. 181-185. Internet: www.werkstattstechnik.de, Düsseldorf, Springer-VDI-Verlag, 2012.
- [Mer87] Merz, K.-P.: *Entwicklung einer Methode zur Planung der Struktur automatisierter Montagesysteme*. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1987.
- [Mer06] Merker, G.; Schwarz, C.; Stiesch, G.; Otto, F.: *Verbrennungsmotoren – Simulation der Verbrennung und Schadstoffbindung*. 3. Auflage, Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006.
- [Mül07] Müller, S.: *Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen*. Dissertation, TU München, 2007.
- [Möl08] Möller, N.: *Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme*. Dissertation, Herbert Utz Verlag, München, 2008.
- [Mül11] Müller, R.; Esser, M.; Janßen, M.; Vette, M.; Corves, B.; Hüsing, M.; Riedel, M.: *Reconfigurable handling system*. In: Production Engineering (2011), Heft 6, S. 453-461, Heidelberg, Springer-Verlag, 2011.

- [Mos07] Mostert, C. H.: *Fabrik-Umfeld Simulationsmodell zur kennzahlbasierten Bewertung von Produktionsstrategien*. Dissertation, kassel university press GmbH, Kassel, 2007.
- [Mot08] Motus, D.: *Referenzmodell für die Montageplanung in der Automobilindustrie*. Dissertation, Band 86, Universität Magdeburg, Herbert Utz Verlag, München, 2008.
- [MTM07] MTM: *MTM Grundverfahren, Lehrgangsunterlagen Teil 1 und 2*. Hrsg.: Deutsche MTM-Vereinigung e.V., 2007.
- [Mue13] Mueller, R.; Vette, M.: *Handling of Large Components for Aircraft Assembly Using an Adaptable Network of Different Kinematic Units*. SAE Int. J. Aerosp. 6(1): 2013, doi:10.4271/2013-01-2334, 2013.
- [Nak95] Nakajima, S.: *Management der Produktionseinrichtung*. Campus Verlag GmbH, Frankfurt am Main, 1995.
- [Neb07] Nebl, T.: *Produktionswirtschaft*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 6. Auflage, 2007.
- [Neu12] Neu, B.: *Anlauforientierte Technologieplanung zur Auswahl von Fertigungstechnologien*. Dissertation, Apprimus Verlag, Aachen, 2012.
- [Nie07] Niemann, J.: *Eine Methodik zum dynamischen Life Cycle Controlling von Produktionssystemen*. Dissertation, IPA-IAO-Forschung und Praxis, Nr. 459, Jost-Jetter, Heimsheim, 2007.
- [Noc90] Noche, B.: *Simulation in Produktion und Materialfluss*. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1990.
- [Noc91] Noche, B.; Wenzel, S.: *Marktspiegel Simulationstechnik in Produktion und Logistik*. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1991.
- [Ohl06] Ohlendorf, M.: *Simulationsgestützte Planung und Bewertung von Demontagesystemen*. Dissertation, Vulkan Verlag, TU Braunschweig, Essen, 2006.
- [OSD11] OSD: *Manufacturing Readiness Level (MRL) Deskbook*. Hrsg.: OSD Manufacturing Technology Program (prepared), The Joint Service/Industry MRL Working Group (collaboration), Version 2.0, http://www.dodmrl.com/MRL_Deskbook_V2.pdf, 2011.
- [Oss08] Ossadnik, W.: *Kosten- und Leistungsrechnung*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Osnabrück, 2008.

- [Pag91] Page, B.: *Diskrete Simulation: eine Einführung mit Modula-II*. Springer-Verlag, Berlin, 1991.
- [Pah07] Pahl, G.; Beitz, W.: *Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung*. 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [Par92] Park, H. S.: *Rechnerbasierte Montageplanung in der Mittelserienfertigung*. Dissertation, VDI-Verlag, Düsseldorf, VDI-Fortschrittsberichte Reihe 2 256, 1992.
- [Paw07] Pawellek, G.: *Produktionslogistik – Planung - Steuerung - Controlling*. Hanser-Verlag, München, Hamburg, 2007.
- [Per00] Perlewitz, H.: *Planung und marktorientierter Betrieb von Demontagefabriken*. Dissertation, TU Berlin, Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, 2000.
- [Pic06] Picker, C.: *Prospektive Zeitbestimmung für nicht wertschöpfende Montagetätigkeiten*. Dissertation, Universität Dortmund, Shaker Verlag, 2006.
- [Ras98] Rasch, A. A.: *Erfolgspotential Instandhaltung – Theoretische Untersuchung und Entwurf eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements*. Dissertation, Duisburger Betriebswirtschaftliche Schriften, Erich Schmidt Verlag, 1998.
- [REF71] REFA: *Methodenlehre der Planung und Steuerung - Teil 2: Planung*. Hrsg.: REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V., Carl Hanser-Verlag, München, 1971.
- [REF87] REFA: *Methodenlehre der Betriebsorganisation – Arbeitspädagogik*. Hrsg.: REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V., Carl Hanser-Verlag, München, 1987.
- [REF93] REFA: *Methodenlehre der Betriebsorganisation: Lexikon der Betriebsorganisation*. Hrsg.: REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V., Carl Hanser-Verlag, München, 1993.
- [REF97] REFA: *Methodenlehre der Betriebsorganisation: Datenermittlung*. Hrsg.: REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V., Carl Hanser-Verlag, München, 1997.
- [Rei91] Reibnitz, U.: *Szenario-Technik. Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung*. Gabler-Verlag, Wiesbaden, 1991.

- [Rei10] Reichenbach, M.: *Entwicklung einer Planungsumgebung für Montageaufgaben in der wandlungsfähigen Fabrik, dargestellt am Beispiel des impedanzgeregelten Leichtbauroboters*. Dissertation, Shaker Verlag, Mittweida, 2010.
- [Rei11] Reichl, F.: *Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung*. Dissertation, Herbert Utz Verlag GmbH, Forschungsberichte IWB, Band 252, München, 2011.
- [Rey09] Reymann, D.: *Wettbewerbsanalysen für kleine und mittlere Unternehmen (KMUs) – Theoretische Grundlagen und praktische Anwendung am Beispiel gartenbaulicher Betriebe*. Detlev Reymann, Geisenheim, 2009.
- [Rüh10] Rühl, J.: *Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung – Stochastische Simulation von Produktionssystemen während der Produktentwicklungsphase*. Dissertation, Shaker Verlag, Gießen, 2010.
- [Rog98] Roggatz, A.: *Entscheidungsunterstützung für die frühen Phasen der integrierten Produkt- und Prozessgestaltung*. Band 98/25, Berichte aus der Produktionstechnik, Shaker-Verlag, Aachen, 1998.
- [Rot99] Rotzoll, A.: *Erfahrungsgestützte Optimierung der Produktionsleistung – Systematische Aufdeckung und Ausschöpfung von Verbesserungspotentialen mittels Interdependenzbenchmarking*. Hannover, Fortschritt-Bericht VDI Reihe 16, Nr. 106, Düsseldorf: VDI Verlag, 1999.
- [Rum91] Rumbaugh, J.: *Object Oriented Modelling and Design*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall International, 1991.
- [Sae92] SAE: *ARP 4293: Life-Cycle-Cost – Techniques and Applications*. 1992.
- [Sal03] Saliger, E.: *Betriebswirtschaftliche Entscheidungstheorie*. 5. Auflage, Oldenbourg-Verlag, München, 2003.
- [San04] Sandt, J.: *Management mit Kennzahlen und Kennzahlensystemen – Bestandsaufnahme, Determinanten und Erfolgsauswirkungen*. Deutscher Universitäts-Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2004.
- [Sar93] Saritz, B.: *Entwicklung einer Methodik zur Parallelisierung von Planungsabläufen*. Dissertation, Shaker-Verlag, Aachen, 1993.
- [Sch92a] Schmidt, M.: *Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme*. Dissertation, Springer, iwv Forschungsberichte 41, Berlin, 1992.

- [Sch92b] Schuster, G.: *Rechnergestütztes Planungssystem für die flexible automatisierte Montage*. iwv-Forschungsberichte, Band 55, Springer Verlag, Berlin, 1992.
- [Sch94] Scharf, P.; Großberndt, H.: *Die automatisierte Montage mit Schrauben – Anforderungen, alternative Fügeverfahren, Wirtschaftlichkeit*. expert verlag, 2. völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Renningen-Malmsheim, 1994.
- [Sch96] Schuh, G.: *Strategisches Produktionsmanagement*. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): *Betriebshütte – Produktion und Management*, 7. Auflage, Berlin, Springer, 1996.
- [Sch04] Scharnbacher, K.: *Statistik im Betrieb – Lehrbuch mit praktischen Beispielen*. Gabler-Verlag, 14. Auflage, Wiesbaden, 2004.
- [Sch05] Schuh, G.; Klocke, F.; Brecher, C.; Schmitt, R.: *Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik*. In: VDI-Z 147 Nr. 5, S. 48-51, 2005.
- [Sch06] Schuh, G. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung – Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. 3., völlig neu bearbeitete Auflage, Berlin, Springer, 2006.
- [Sch08] Schoner, P.: *Operative Produktionsplanung in der verfahrenstechnischen Industrie*. Dissertation, kassel university press GmbH, Kassel, 2008.
- [Sch09] Schweiger, S. (Hrsg.): *Lebenszykluskosten optimieren – Paradigmenwechsel für Anbieter und Nutzer von Investitionsgütern*. 1. Auflage, Wiesbaden, Gabler-Verlag, 2009.
- [Sch11a] Schmidt, M.: *Modellierung logistischer Prozesse der Montage*. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Eschwege, 2011.
- [Sch11b] Schuh, G.; Klappert, S. (Hrsg.): *Technologiemanagement – Handbuch Produktion und Management 2*. 2. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, Aachen, 2011.
- [Sch12] Schulze, C. P.; Reinema, C.; Nyhuis, P.: *Planung der Struktur einer Fabrik als sozio-technisches System*. In: wt Werkstattstechnik online 102 (2012) Nr. 4, S. 211-216. Internet: www.werkstattstechnik.de, Düsseldorf, Springer-VDI-Verlag, 2012.
- [Sim05] Simon, W.: *GABALs großer Methodenkoffer – Managementtechniken*. GABAL Verlag GmbH, Offenburg, 2005.
- [Spa13] Spath, D.; Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Krause, T.; Schlund, S.: *Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0*. Studie, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Fraunhofer Verlag, 2013.

- [Spe98] Spengler, T.; Hähre, S.; Sieverdingbeck, A.; Rentz, O.: *Stoffflussbasierte Umweltkostenrechnung zur Bewertung industrieller Kreislaufwirtschaftskonzepte*. Zeitschrift für Betriebswirtschaftslehre 68 (2), S. 147-174, 1998.
- [Spu86] Spur, G.; Stöferle, T.: *Handbuch der Fertigungstechnik – Fügen, Handhaben, Montieren*. Band 5, Carl Hanser, München, 1986.
- [SR10] Scholz-Reiter, B.; Krohne, F.: *Ramp-Up Excellence – Ein skalierbares Anlaufmanagementprozessmodell für Elektronik Zulieferer*. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben 15072 N der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V., Mitgliedsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e.V., BI-BA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH, 2010.
- [Ste97] Steinwasser, P.: *Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozessplanung*. Dissertation, Universität Nürnberg, Meisenbach, Bamberg, 1997.
- [Sto12] Stoll, J.; Özden, E.; Jondral, A.; Furmans, K.; Lanza, G.: *Hybride Modellierung zur Auslegung und Leistungsmessung in Produktionssystemen*. In: wt Werkstattstechnik online 102 (2012) Nr. 4, S. 217-221. Internet: www.werkstattstechnik.de, Düsseldorf, Springer-VDI-Verlag, 2012.
- [Sul10] Sullivan, M.: *DOD Can Achieve Better Outcomes by Standardizing the Way Manufacturing Risks Are Managed – Best Practices*. Report to congressional requesters, United States Government Accountability Office, GAO – Accountability, Integrity, Reliability, Washington, www.gao.gov, 2010.
- [Sys06] Syska, A.: *Produktionsmanagement – Das A - Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute*. 1. Auflage, Wiesbaden, Gabler-Verlag, 2006.
- [Tem91] Tempelmeier, G.: *Simulation mit SIMAN – Ein praktischer Leitfaden zur Modellentwicklung und Programmierung*. Physica Verlag, Heidelberg, 1991.
- [Tön91] Tönshoff, H. K.; Park, H. S.: *Wissensbasierte Generierung von Montagevorgangsfolgen*. VDI-Z 133 (1991) 4, S. 48-54, 1991.
- [VDI78] VDI: *VDI-Richtlinie 2815: Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung: Einführung, Grundlagen*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1978.
- [VDI82] VDI: *VDI-Richtlinie 2222: Konstruktionsmethodik, Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1982.

- [VDI90] VDI: *VDI-Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990.
- [VDI93] VDI: *VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
- [VDI98] VDI: *VDI-Richtlinie 4001-2: Allgemeine Hinweise zum VDI-Handbuch Technische Zuverlässigkeit*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
- [VDI00a] VDI: *VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen*. Beuth, Berlin, 2000.
- [VDI00b] VDI: *VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen (Entwurf)*. Beuth, Berlin, 2000.
- [VDI00c] VDI: *VDI-Richtlinie 3780: Technikbewertung – Begriffe und Grundlagen*. Beuth-Verlag, Berlin, 2000.
- [Voi05] Voigt, K.-I.; Thiel, M.: *Fast Ramp-Up – Handlungs- und Forschungsfeld für Innovations- und Produktionsmanagement*. In: Wildemann, H. (Hrsg.): *Synchronisation von Produktentwicklung und Produktionsprozess: Produktreife - Produktneuanläufe - Produktionsauslauf*, TCW, München, S. 9-39, 2005.
- [Wag12] Wagner, U.; Oehme, D.; Clauß, M.; Riedel, R.; Müller, E.: *Kooperative Planung und Realisierung von Produktionssystemen – Unterstützung der Kommunikation und Kollaboration durch Sozial-Media-Anwendungen*. In: *wt Werkstattstechnik online* 102 (2012) Nr. 4, S. 193-199. Internet: www.werkstattstechnik.de, Düsseldorf, Springer-VDI-Verlag, 2012.
- [Wan98] Wangenheim, S.: *Planung und Steuerung des Serienanlaufs komplexer Produkte – Dargestellt am Beispiel der Automobilindustrie*. Dissertation, Peter Lang, Frankfurt am Main, 1998.
- [War95] Warnecke, H.-J.: *Der Produktionsbetrieb 2 – Produktion, Produktionssicherung*. 3. Auflage, Berlin, Springer, 1995.
- [War96] Warnecke, H. J.; Bullinger, H.-J.; Hichert, R.; Voegele, A.: *Kostenrechnung für Ingenieure*. 5. Auflage, Hanser-Verlag, München, 1996.
- [Web98] Weber, H.: *Konzept eines Modells zur Produktentwicklung*. Dissertation, TU Berlin, 1998.

- [Web12] Weber, W.; Kabst, R.: *Einführung in die Betriebswirtschaftslehre*. 8., aktualisierte und überarbeitete Auflage, Gabler-Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [Wei06] Weinzierl, J.: *Produktreifegrad-Management in unternehmensübergreifenden Entwicklungsnetzwerken*. Dissertation, Verlag Praxiswesens, Dortmund, 2006.
- [Wei11a] Weidner, R.; Clausing, N.; Hameister, H.; Wulfsberg, J.: *Integrativer Ansatz zur Produktionstechnik und -planung in der Luftfahrtindustrie*. In: ZWF (Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb), Jahrg. 106 (2011) Nr. 10, Carl Hanser Verlag München, S. 701-705, 2011.
- [Wei11b] Weidner, R.; Wulfsberg, J.: *Montagesysteme unter Berücksichtigung dynamischer Größen - Ein Konzept zur Planung und Bewertung*. In: ZWF (Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb), Jahrg. 106 (2011) Nr. 11, Carl Hanser Verlag München, S. 844-849, 2011.
- [Wei12] Weidner, R.; Wulfsberg, J.: *Planung und Beurteilung von Montagesystemen – Stochastisches Simulationsmodell zur Entscheidungsunterstützung*. In: wt Werkstattstechnik online 102 (2012) Nr. 4, S. 234-239. Internet: www.werkstattstechnik.de, Düsseldorf, Springer-VDI-Verlag, 2012.
- [Wei13] Weidner, R.; Schwake, K.; Wulfsberg, J.: *Hochgenaue Montage von Strukturbauteilen – Ein intelligentes Konzept für die Luftfahrtindustrie*. In: ZWF (Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb), Jahrg. 108 (2013) Nr. 1-2, Carl Hanser Verlag München, S. 27-31, 2013.
- [Wes05] Westkämper, E.: *Einführung in die Organisation der Produktion*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Stuttgart, 2005.
- [Wöh02] Wöhe, G.; Döring, U.: *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 21. Auflage, Verlag Vahlen, München, 2002.
- [Whe10] Wheeler, D.; Ulsh, M.: *Manufacturing Readiness Assessment for Fuel Cell Stacks and Systems for the Back-up Power and Material Handling Equipment Emerging Markets*. Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, Cole Boulevard, Golden, Colorado, <http://www.osti.gov/bridge>, 2010.
- [Wie02] Wiendahl, H.-P.: *Wandlungsfähigkeit – Schlüsselbegriff der zukünftigen Fabrik*. In: wt Werkstattstechnik online 92 (2002) Nr. 4, S. 122-127. Internet: www.werkstattstechnik.de, Düsseldorf, Springer-VDI-Verlag, 2002.

- [Wie05] Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Breitenbach, F.: *Planung modularer Fabriken – Vorgehen und Beispiele aus der Praxis*. HANSER-Verlag, Karlsruhe, 2005.
- [Wie10] Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 7., aktualisierte Auflage, HANSER-Verlag, Karlsruhe, 2010.
- [Wil04] Wilde, H.: *Plan- und Prozesskostenrechnung*. Managementwissen für Studium und Praxis, Oldenbourg, München, 2004.
- [Wit94] Witte, T.; Claus, T.; Helling, H.: *Simulation von Produktionssystemen mit SLAM – Eine praxisorientierte Einführung*. Addison-Wesley Verlag, München, 1994.
- [Wol04] Wollnack, J.; Stepanek, P.: *Formkorrektur und Lageführung für eine flexible und automatisierte Großbauteilmontage*. In: wt Werkstattstechnik online 94 (2004) Nr. 9, S. 414-421, Internet: www.werkstattstechnik.de, Düsseldorf, Springer-VDI-Verlag, 2004.
- [Wri36] Wright, T. P.: *Factors Affecting the Costs of Airplanes*. In: Journal of the Aeronautical Sciences, Heft 3, Nr. 2, S. 122-128, 1936.
- [Wul12] Wulf, S.: *Bewertung des Einflusses von Produkt- und Technologieveränderungen auf die Fabrik*. Dissertation, PZH Produktionstechnische Zentrum GmbH, Band 02/2011, Garbsen, 2012.
- [Zen06] Zenner, C.: *Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung*. Dissertation, Saarbrücken, Band 37, 2006.
- [Zeu98] Zeugträger, K.: *Anlaufmanagement für Großanlagen*. Dissertation, VDI Verlag, Düsseldorf, 1998.
- [Zol11] Zoléko, J.-F. D. P.: *Reifegradbasierte Planung eines organisatorischen Regelwerks in einer Produktion*. Dissertation, IFA, Hannover, Band 03/11, 2011.
- [Zwi05] Zwiesler, H.-J.: *Asset-Liability-Management – Die Versicherung auf dem Weg von der Planungsrechnung zum Risikomanagement*. In: Versicherungen im Umbruch – Werte schaffen, Risiken managen, Kunden gewinnen. Springer, Berlin, Heidelberg, Part 4, S. 117-131, 2005.

Anhang A

Montageaufgaben

In **Tabelle A.1** und **A.2** sind die Montageaufgaben für die Validierungsbeispiele – Strukturmontage und Formgebung von Strukturbauteilen – dargestellt.

Tabelle A.1: Eingabe für Montageaufgabe 1

Nr. Beschreibung	Aufgabe	Parameter						
		Bauteil 1	Bauteil 2	Handhabung	Anzahl	Komplexität	Genauigkeit	Distanz
1 Eintakten FB	Handhaben	FB	-	Ja	1	gering	1 m	10 m
	Greifen	FB	-	Ja	1	gering	0,001 m	-
2 Eintakten LS	Handhaben	LS	-	Ja	1	gering	1 m	10 m
	Greifen	LS	-	Ja	1	gering	0,001 m	-
3 Eintakten RS	Handhaben	RS	-	Ja	1	gering	1 m	10 m
	Greifen	RS	-	Ja	1	gering	0,001 m	-
4 Positionieren FB + LS	Handhaben	FB	LS	Ja	1	hoch	0,001 m	1 m
	Messen	FB	LS	Nein	20	mittel	0,0001 m	-
5 Positionieren mit RS	Handhaben	FB & LS	RS	Ja	1	hoch	0,001 m	1 m
	Messen	FB & LS	RS	Nein	20	mittel	0,0001 m	-
6 Bohren der Nietlöcher	Bohren	Tonne	-	Nein	1.000	gering	0,003 m	-
7 Dichtmittel applizieren	Auftragen	Tonne	-	Nein	1.000	gering	0,01 m	-
8 Vernieten	Nieten	Tonne	-	Nein	1.000	gering	0,004 m	-
9 Form Prüfen	Messen	Tonne	-	Nein	1	hoch	0,0001 m	-
10 Austakten Tonne	Handhaben	Tonne	-	Ja	1	gering	0,1 m	10 m
	Greifen	Tonne	-	Ja	1	gering	0,001 m	-

Abkürzungen:

FB: Fußbodenrost

LS: linke Seitenschale

RS: rechte Seitenschale

Tabelle A.2: Eingabe für Montageaufgabe 2

Nr.	Beschreibung	Aufgabe	Bauteil	Handhabung	Anzahl	Parameter			
						Komplexität	Genauigkeit	Distanz	Prozesskraft
1	Eintakten Schalenteil	Handhaben	LST	Ja	1	gering	0,5 m	2 m	-
		Greifen	LST	Ja	1	gering	0,001 m	-	-
2	Vermessen Schalenform	Messen	LST	Nein	90 (*)	hoch	0,0001 m	-	-
3	Formkorrektur	Handhaben	LST	Ja	90 (*)	mittel	0,0001 m	0,01 m (**)	1.000 N

Abkürzungen: LST: Labor-Schalenteil

(*) Der Parameter "Anzahl" beträgt eigentlich Neun, da es sich um neun Merkmale handelt. Aus Erfahrung wurde jedoch angenommen, dass für die Formgebung zehn Iterationszyklen notwendig sind, um die Toleranzen durch eine Formgebung zu einem Best-Fit auszugleichen.

(**) Mittlere Korrekturwerte, ermittelt aus Laborversuchen.

