



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

DRESDEN
concept



Fakultät Maschinenwesen Institut für Naturstofftechnik

Professur für Verarbeitungsmaschinen / Verarbeitungstechnik

Diplomarbeit

Untersuchung des Systems Verarbeitungsanlage mit Methoden der Systemtheorie und Formulierung wesentlicher Randbedingungen für Neuentwicklungen

Peter Lochmann

Geboren am: 07.02.1995

Matrikelnummer: 3950346

Tag der Einreichung:

06. Oktober 2019

Betreuer der TU Dresden

Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Max Britzke

Betreuender Hochschullehrer

Prof. Dr.-Ing. Jens-Peter Majschak

Kurzreferat

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung des Systems Verarbeitungsanlage mit Methoden der Systemtheorie und die Formulierung wesentlicher Randbedingungen für die Neuentwicklung solcher Anlagen. Ausgangspunkt ist die Feststellung, dass sich die Konsumgüterproduktion in einem Umbruch befindet, der neue Anforderungen an Verarbeitungsanlagen stellt.

Zunächst untersucht die Arbeit die aktuelle Situation der Konsumgüterindustrie und beschreibt grundlegende Produktionsformen. In einer exemplarischen Analyse werden die Forderungen der Nahrungsmittelindustrie und die Defizite des Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinenbaus herausgearbeitet und daraus eine grundlegende Problemstellung der Konsumgüterproduktion formuliert. Im Stand der Wissenschaft und Technik werden anschließend bekannte Konzepte des Maschinen- und Anlagenbaus vorgestellt, die Lösungen für diese Probleme bieten, und etablierte Systemmodelle für Verarbeitungsanlagen beschrieben. Ein allgemeines Lastenheft führt schließlich die Anforderungen an Verarbeitungsanlagen zusammen.

Es folgt eine Einführung in die Systemtheorie, die zunächst die Ziele, Methoden und Grenzen des systemtheoretischen Ansatzes umreißt. Daran schließt eine Betrachtung des Aufbaus und der Eigenschaften von Systemen an, die sich insbesondere mit den Aspekten Funktion, Struktur und Hierarchie sowie Varietät, Variabilität, Flexibilität, Stabilität und Komplexität befasst. Das Systemverhalten wird unter der Annahme offener Systeme behandelt. In diesem Zusammenhang werden die Begriffe Fließgleichgewicht, Äquifunktionalität und dynamische Strukturauffassung eingeführt.

Auf dieser Grundlage baut die anschließende Erarbeitung eines systemtheoretischen Ansatzes für Verarbeitungsanlagen auf. Zunächst werden die Zielsetzung und formale Probleme der Modellbildung besprochen und daraus ein Modellansatz entwickelt. Dieser Modellansatz wird im Folgenden ausgearbeitet und umfasst Funktions-, Struktur- und Hierarchiemodelle für die Verarbeitungsaufgaben und -funktionen, Wirkpaarungen sowie Verarbeitungsanlagen. Ausgehend von einer Darstellung der Verarbeitungsanlage als offenes System werden die Begriffe Varietät, Variabilität, Flexibilität, Stabilität und Komplexität für Verarbeitungsanlagen definiert.

Dieses Systemmodell für Verarbeitungsanlagen dient anschließend als Basis für eine systemtheoretische Untersuchung des Standes der Technik des Verpackungsmaschinenbaus und der Anforderungen der Konsumgüterindustrie. Aus den Ergebnissen wird eine systemtheoretische Fragestellung formuliert, die die Grundlage für die Festlegung von Randbedingungen für die Neuentwicklung von Verarbeitungsanlagen bildet. Die anschließend abgeleiteten Gestaltungsprinzipie umfassen die Modularisierung, Miniaturisierung und Parallelisierung. Als technologische Mittel zur Umsetzung dieser Prinzipie werden Plug&Produce-Module, Plattformbauweise, adaptive Wirkpaarungen und die flexible Anlagenverkettung aufgeführt.

Das entwickelte Lösungskonzept wird zum Schluss einer einfachen, ökonomischen Bewertung unterzogen. Zusammenfassung und Ausblick schließen die Arbeit ab.

Die Modelle und Thesen der Arbeit werden exemplarisch anhand einer Verpackungsanlage für Schokoladenprodukte veranschaulicht.

Abstract

The object of the presented diploma thesis is the analysis of the system of manufacturing plants based on methods of system theory and the formulation of basic conditions for new developments of such plants. It is motivated by the diagnosis that the manufacturing industry stands at a point of fundamental change which requests plants of different characteristics as they usually have so far.

Starting with an analysis of the current situation of consumer goods industry the thesis points out different kinds of industrial manufacturing. As an representative example it compiles the demands of food industry as well as the backlog of food processing and wrapping machines engineering. It deduces general problems of consumer goods industry from and presents established concepts which may solve them. Further on it gives a résumé of the state of the art of system models for manufacturing plants and frames a requirement specification.

An introduction into system theory first mentions goals, methodes and boundaries of the systemic approach. Following an examination of the composition and characteristics of systems deals with function, structure and hierarchy as well as variety, variability, flexibility, stability and complexity. Assuming the concept of open systems the thesis goes into the terms steady state equilibrium, equifunctionality and dynamic structures.

These general considerations on system theory form the basis for a new systemic approach for manufacturing plants. After discussing the proposed goals and the formal problems of modelling the thesis develops functional, structural and hierarchical system models for manufacturing plants. Basing on the open system concept it defines the terms variety, variability, flexibility, stability and complexity in the context of manufacturing plants. Following the thesis transfers the state of the art of manufacturing systems engineering and the requirement specification into the context of the system model of manufacturing plants which later is the basis of the formulation of a conceptual question in terms of system theory. Deducing from this conceptual question the thesis presents three design principles: Modularisation, miniaturisation and parallelisation. Plug&produce-modules, platform architecture, adaptive devices and flexible plant layouts are specified as instruments for realising the design principals.

A simple economic analysis finally assesses the outlined concept. Conclusion and outlook are completing the thesis. All models and theses are illustrated by a wrapping plant for chocolate candies.

Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	III
Formelzeichen	VII
Abkürzungen	XI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielstellung und Lösungsansatz	2
1.3 Aufbau der Arbeit	2
2 Die aktuelle Situation der Konsumgüterproduktion	5
2.1 Einführung – Produktionsformen der Konsumgüterproduktion	5
2.2 Die Situation der Nahrungsmittelindustrie	7
2.2.1 Marktstruktur	7
2.2.2 Forderungen der Verbraucher	7
2.3 Die Situation des Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinenbaus	9
2.4 Problemstellungen für die Konsumgüterproduktion	10
3 Stand der Wissenschaft und Technik	12
3.1 Lösungskonzepte des Maschinen- und Anlagenbaus	12
3.1.1 Einführung – Etablierte und neue Konzepte	12
3.1.2 Baukastensysteme und Modularisierung	12
3.1.3 Adaptive und selbstoptimierende Prozessregelung	14
3.1.4 Miniaturisierte Produktionssysteme	15
3.1.5 Parallele und vernetzte Stoffströme	16
3.2 Systembeschreibungen für Verarbeitungsanlagen	17
3.2.1 Einführung – Verarbeitungstechnik als Querschnittsdisziplin	17
3.2.2 Verarbeitungssystem als Blackbox	18
3.2.3 Funktionsstruktur von Verarbeitungssystemen	19
3.2.4 Die Wirkpaarung	20
3.2.5 Das Innermaschinelle Verfahren	21
3.2.6 Zuverlässigkeitsmodell für Verarbeitungsanlagen	22
4 Präzisierung der Aufgabenstellung	24
4.1 Allgemeines Lastenheft	24
4.2 Präzisierte Aufgabenstellung	25
4.3 Anwendungsbeispiel der Untersuchungen	26
5 Grundzüge des systemtheoretischen Ansatzes	27
5.1 Systemtheorie als Universalwissenschaft	27

5.2	Modellbildung mit Hilfe systemtheoretischer Methoden	27
5.3	Der Systembegriff	28
6	Aufbau und Eigenschaften von Systemen	30
6.1	Systemaufbau und Modelle	30
6.1.1	Funktion	30
6.1.2	Struktur	31
6.1.3	Hierarchie	32
6.2	Das Konzept des offenen Systems	33
6.2.1	Offene und geschlossene Systeme	33
6.2.2	Fließgleichgewicht und Äquifinalität	34
6.2.3	Dynamische Strukturauffassung	35
6.3	Systemeigenschaften	36
6.3.1	Varietät	36
6.3.2	Stabilität	36
6.3.3	Komplexität	38
7	Systemmodelle für Verarbeitungsanlagen	42
7.1	Systemtheoretischer Ansatz für Verarbeitungsanlagen	42
7.1.1	Einführung neuer Begriffsdefinitionen	42
7.1.2	Ziel der Modellbildung	43
7.1.3	Formale Probleme der Modellbildung	44
7.1.4	Modellansatz	45
7.2	Systemmodelle für Verarbeitungsanlagen	46
7.2.1	Funktionsmodell	46
7.2.2	Ablaufstruktur des Aufgaben- und Funktionssystems	51
7.2.3	Aufbaustruktur der Wirkpaarung – Wirkpaarungsmodell	53
7.2.4	Aufbaustruktur des verarbeitungstechnischen Systems	55
7.2.5	Hierarchische Ordnung von Verarbeitungsanlagen	57
7.3	Verarbeitungsanlagen als offene Systeme	61
7.3.1	Gründe für ein offenes Systemkonzept	61
7.3.2	Gleichgewicht und Systemziel von Verarbeitungsanlagen	61
7.3.3	Dynamische Auffassung des Systems Verarbeitungsanlage	62
7.4	Systemverhalten von Verarbeitungsanlagen	63
7.4.1	Variabilität und Flexibilität von Verarbeitungsanlagen	63
7.4.2	Stabilität von Verarbeitungsprozessen	65
7.4.3	Komplexität von Verarbeitungsanlagen	66
8	Systemtheoretische Untersuchung des Standes der Technik des Verarbeitungs-	
	maschinenbaus	71
9	Vorschläge zur Neugestaltung von Verarbeitungsanlagen	73
9.1	Systemtheoretische Untersuchung des allgemeinen Lastenheftes	73
9.1.1	Systemtheoretische Interpretation der Anforderungen	73
9.1.2	Resultierende systemtheoretische Fragestellung	75
9.2	Randbedingungen für die Neuentwicklung von Verarbeitungsanlagen	76
9.2.1	Vorüberlegungen	76
9.2.2	Grundkonzept	77
9.3	Gestaltungsprinzipie – Modularisierung, Miniaturisierung, Parallelisierung	78
9.4	Technologische Mittel zur Umsetzung	80
9.4.1	Plug&Produce-Module und Plattformbauweise	80

9.4.2	Adaptive Wirkpaarungen	81
9.4.3	Flexible Verkettung	82
9.4.4	Exemplarischer Vorschlag für das Anwendungsbeispiel	84
9.5	Allgemeines Pflichtenheft	85
10	Bewertung des Lösungskonzeptes	86
10.1	Ökonomische Bewertung	86
10.1.1	Die Produktion in der Ökonomie	86
10.1.2	Arbeit	86
10.1.3	Rohstoffe und Zwischenprodukte	87
10.1.4	Betriebsmittel	88
10.2	Bewertung im Bezug auf die Situation der Konsumgüterproduktion	90
11	Fazit	91
11.1	Zusammenfassung	91
11.2	Ausblick	93
	Eidesstattliche Erklärung	i
	Thesen	ii
	Literaturverzeichnis	iii
	Tabellenverzeichnis	viii
	Abbildungsverzeichnis	x
	Anhang	xiv

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A_E		Ausgangsgröße des Funktionsbereiches Energie
a		Regelgröße
$a(t)$		Systemantwort
$a_m(t)$		Multistabile Systemantwort
A_S		Ausgangsgröße des Funktionsbereiches Signal
$a_s(t)$		Stabile Systemantwort
A_{St}		Ausgangsgröße des Funktionsbereiches Stoff (Verarbeitungsgut)
$a_u(t)$		Ultrastabile Systemantwort
d		Regeldifferenz
e		Entwicklung eines Systems
E		Energieaustausch
E_E		Eingangsgröße des Funktionsbereiches Energie
E_S		Eingangsgröße des Funktionsbereiches Signal
E_{St}		Eingangsgröße des Funktionsbereiches Stoff (Verarbeitungsgut)
$F(x)$		Funktion in Abhängigkeit von x
F_i		Menge der Funktionen eines Systems
$f_{i,j}$		j -te Funktion des i -ten Elementes eines Systems
F_{XY}		Menge der Übertragungsfunktionen, Ergebnisfunktionen
F_{XZ}		Menge der Überföhrungsfunktionen
F_{ZY}		Menge der Markierungsfunktionen
H_{St}		Austausch von Hilfsstoffen
K	[]	Komplexität
$K_{A,RB}$	[]	Komplexität der von außen wirkenden Einflüsse bzw. der Verarbeitungsaufgabe und Randbedingungen
$K_{EMC1,PV}$	[]	Komplexität der Verpackungsmaschine EMC1 bzgl. der Produktvarianten
$K_{MCC,PV}$	[]	Komplexität der Verpackungsmaschine MCC bzgl. der Produktvarianten
K_S	[]	Komplexität eines Systems
K_{TVA}	[]	Komplexität der Teilaufgabe Verpacken
$K_{TVA,PV}$	[]	Komplexität der Teilaufgabe Verpacken bzgl. der Produktvarianten
K_U	[]	Komplexität der Umwelteinflüsse
K_{VM}	[]	Komplexität einer Verpackungsmaschine
K_{VT}	[]	Verarbeitungstechnische Komplexität
K_{VTE}	[]	Komplexität eines verarbeitungstechnischen Elementes
$K_{VTE,O}$	[]	Operationale Komplexität eines verarbeitungstechnischen Elementes

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$K_{VT,N}$	[]	Nomologische, verarbeitungstechnische Komplexität
$K_{VT,O}$	[]	Operationale, verarbeitungstechnische Komplexität
K_{VTS}	[]	Komplexität eines verarbeitungstechnischen Systems
$K_{VTS,N}$	[]	Nomologische Komplexität eines verarbeitungstechnischen Systems
$K_{VTS,O}$	[]	Operationale Komplexität eines verarbeitungstechnischen Systems
M	[]	Fassungsvermögen eines Speichers
N		Nebenwirkungen
n_K	[]	Anzahl der unabhängigen Komponente eines Systems
n_e	[]	Anzahl der Elemente eines Systems
n_r	[]	Anzahl der Relationen eines Systems
n_{VL}	[]	Anzahl der parallelen Verarbeitungslinien
$Q_{rmin} \dots Q_{rmax}$	[1/min]	Einstellbereich der rechnerischen Ausbringung
Q_r	[1/min]	Rechnerische Ausbringung
$Q_{r,VA}$	[1/min]	Rechnerische Ausbringung einer Verarbeitungsanlage
$Q_{r,VMo}$	[1/min]	Rechnerische Ausbringung eines Verarbeitungsmoduls
Q_t	[1/min]	Tatsächliche Ausbringung
s		Störgröße
S		Signalaustausch
$s(t)$		Störungsfunktion
t	[s]	Zeit
t_A	[min]	Ausfallzeit
t_B	[min]	Betriebszeit
t_q	[min]	Qualitätszeit
t_S	[min]	Stillstandszeit
u		Bedingungen (Regelkreis)
U		Umstände
v		Stellgröße
V	[]	Verfügbarkeit
$V_{A,RB}$	[]	Varietät der von außen wirkenden Einflüsse bzw. der Verarbeitungsaufgabe und Randbedingungen
$V_{GVA,PV}$	[]	Varietät der Produktvarianten laut Gesamtverarbeitungsaufgabe
V_K	[]	Varietät einer Komponente eines Systems
$V_{M,VA}$	[]	Mengenverfügbarkeit einer Verarbeitungsanlagen
$V_{M,VL}$	[]	Mengenverfügbarkeit einer Verarbeitungslinie
V_S	[]	Varietät eines Systems
V_U	[]	Varietät der Umwelteinflüsse
V_V	[]	Varietät der Verhaltensweisen eines Systems
$V_{VA,PV}$	[]	Varietät der Produktvarianten der Verpackungsanlage
V_{VTE}	[]	Varietät eines verarbeitungstechnischen Elements
V_{VTS}	[]	Varietät eines verarbeitungstechnischen Systems
V_{GI}, V_{GII}		Verarbeitungsgut im Zustand z_I bzw. z_{II}
\dot{V}_{VG}	[1/min]	Verarbeitungsgutstrom

Zeichen	Einheit	Bedeutung
W_{VA}		Wirkgrößen der Verarbeitungsanlage
w		Führungsgröße
w_z		Übergeordnete Zielgröße
X		Menge der Eingangsgröße
X_E		Eingangsgröße im Funktionsbereich Energie
$X_{E,VGS}$		Rückwirkungsgröße auf das verarbeitungstechnische System im Funktionsbereich Energie
$X_{E,VTS}$		Einwirkungsgröße vom verarbeitungstechnischen System im Funktionsbereich Energie
X_{HSt}		Eingangsgröße im Funktionsbereich Hilfsstoff
$X_{HSt,VGS}$		Rückwirkungsgröße auf das verarbeitungstechnische System im Funktionsbereich Hilfsstoff
$X_{HSt,VTS}$		Einwirkungsgröße vom verarbeitungstechnischen System im Funktionsbereich Hilfsstoff
X_i		Menge der Eingangsgröße des i -te Elementes eines Systems
$x_{i,j}$		j -te Eingangsgröße des i -ten Elementes eines Systems
X_S		Eingangsgröße im Funktionsbereich Signal
$X_{S,VGS}$		Rückwirkungsgröße auf das verarbeitungstechnische System im Funktionsbereich Signal
$X_{S,VTS}$		Einwirkungsgröße vom verarbeitungstechnischen System im Funktionsbereich Signal
X_U		Umwelteinflüsse
Y		Menge der Ausgangsgrößen
Y_E		Ausgangsgröße im Funktionsbereich Energie
$Y_{E,VGS}$		Einwirkungsgröße vom verarbeitungstechnischen System im Funktionsbereich Energie
$Y_{E,VTS}$		Rückwirkungsgröße auf das verarbeitungstechnische System im Funktionsbereich Energie
Y_{HSt}		Ausgangsgröße im Funktionsbereich Hilfsstoff
$Y_{HSt,VGS}$		Einwirkungsgröße vom verarbeitungstechnischen System im Funktionsbereich Hilfsstoff
$Y_{HSt,VTS}$		Rückwirkungsgröße auf das verarbeitungstechnische System im Funktionsbereich Hilfsstoff
Y_i		Menge der Ausgangsgröße des i -te Elementes eines Systems
$y_{i,j}$		j -te Ausgangsgröße des i -ten Elementes eines Systems
Y_N		Nebenwirkungen
Y_S		Ausgangsgröße im Funktionsbereich Signal
$Y_{S,VGS}$		Einwirkungsgröße vom verarbeitungstechnischen System im Funktionsbereich Signal
$Y_{S,VTS}$		Rückwirkungsgröße auf das verarbeitungstechnische System im Funktionsbereich Signal
Z		Menge der Zustandsgröße
$z(t)$		Zeitabhängige Zustandsgröße
Z_{AO}		Zustand des Arbeitsorgans
Z_{EBS}		Zustand des Energiebereitstellungssystems
Z_{HBS}		Zustand des Hilfsstoffaufbereitungssystem

Zeichen	Einheit	Bedeutung
Z_i		Menge der Zustandsgrößen des i -te Elementes eines Systems
$z_{i,j}$		j -te Zustandsgröße des i -ten Elementes eines Systems
$Z_{PM,B,i}$		i -ter Zustand des Packmittels für Buncheinschlag
$Z_{PM,D,i}$		i -ter Zustand des Packmittels für Doppeldreheinschlag
$Z_{PM,i}$		i -ter Zustand des Packmittels
Z_{SHS}		Zustand des Stütz- und Hüllsystems
$Z_{SP,B,i}$		i -ter Zustand des Schokoladenproduktes für Buncheinschlag
$Z_{SP,D,i}$		i -ter Zustand des Schokoladenproduktes für Doppeldreheinschlag
$Z_{SP,i}$		i -ter Zustand des Schokoladenproduktes
Z_{SS}		Zustand des Steuerungssystems
ΔZ_{VG}		Zustandsänderung des Verarbeitungsgutes
$\Delta Z_{VG,Ist}$		Beabsichtigte Zustandsänderung des Verarbeitungsgutes, Verarbeitungsaufgabe
$\Delta Z_{VG,Ist}$		Tatsächliche Zustandsänderung des Verarbeitungsgutes, Verarbeitungsfunktion
Z_{VTS}		Zustand des verarbeitungstechnischen Systems
$Z_{VG,X}$		Zustand vor der Verarbeitung
$Z_{VG,X,Ist}$		Tatsächlicher Zustand vor der Verarbeitung
$Z_{VG,X,Soll}$		Geforderter Zustand vor der Verarbeitung
$Z_{VG,Y}$		Zustand nach der Verarbeitung
$Z_{VG,Y,Ist}$		Tatsächlicher Zustand nach der Verarbeitung, Verarbeitungsergebnis
$Z_{VG,Y,Soll}$		Geforderter Zustand nach der Verarbeitung, Verarbeitungsziel
Z_{VS}		Zustand des Verarbeitungssystems
Z_{WP}		Zustand der Wirkpaarung
z_I, z_{II}		Zustandsvektor des Zustands I bzw. II eines Verarbeitungsgutes

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
Abb.	Abbildung
AO	Arbeitsorgan
AOG	Arbeitsorgangruppe
AP	Ausschussprodukt
AS	Aufgabenssystem
BE	Buncheinschlag
bzgl.	bezüglich
CTS-300	Abgabestation
DDE	Doppeldreheinschlag
d.h.	das heißt
e_i	i -tes Element eines Systems
EBS	Energiebereitstellungssystem
EMC ₁	Verpackungsmaschine für Buncheinschlag
engl.	englisch
EVA	Elementarverarbeitungsaufgabe
EVF	Elementarverarbeitungsfunktion
FG	Führungsgröße
FS	Funktionssystem
ggf.	gegebenenfalls
ggü.	gegenüber
GGW	Gleichgewicht
GVA	Gesamtverarbeitungsaufgabe
GVF	Gesamtverarbeitungsfunktion
HBS	Hilfsstoffaufbereitungssystem
i.d.R.	in der Regel
Ist	Ist-Wert
Kap.	Kapitel
MB	Modellbildung
MCC	Verpackungsmaschine für Doppeldreheinschlag
MD	Metalldetektor
PG	Prozessgrößen
PM	Packmittel
Pos.	Position
RB	Randbedingungen des zu regelnden Prozesses
r_i	i -te Relation eines Systems

Abkürzung	Bedeutung
S	System
S ⁺	Übersystem
S ⁻	Subsystem
SB	Speicherband
SHS	Stütz- und Hüllsystem
Soll	Sollwert
SP	Schokoladenprodukt
SS	Steuerungssystem
Stk.	Stück
Tab.	Tabelle
TVA	Teilverarbeitungsaufgabe
TVF	Teilverarbeitungsfunktion
U	Umwelt
u.Ä.	und Ähnliche
u.a.	unter anderem
u.A.	und Andere
VA	Verarbeitungsanlage
VG	Verarbeitungsgut
vgl.	vergleiche
VGS	Zustandssystem Verarbeitungsgut
VM	Verarbeitungsmaschine
VS	Verarbeitungssystem
VSP	Verpacktes Schokoladenprodukt
VTE	Verarbeitungstechnisches Element
VTG	Verarbeitungstechnische Gruppe
VTS	Verarbeitungstechnisches System
W	Reale Gesamtheit
WPG	Wirkpaarungsgruppe
WP	Wirkpaarung
WS	Wirksystem
ZG	Zielgröße

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Anspruchsvolle Konsumenten und personalisierte Produkte Die Märkte für Bedarfs- und Konsumgüter befinden sich gegenwärtig im Umbruch. Die Verbraucher blicken zunehmend skeptisch auf industriell hergestellte Massengüter [1] und verlangen nachhaltige sowie regionale Produkte hoher Qualität [2]. Nahrungsmittel sollen gesundheitlichen, moralischen und ökologischen Aspekten wie Lebensmittelsicherheit, Herkunft und Tierwohlsein genügen [1]. Kosmetika sollen genau den individuellen Bedürfnissen des einzelnen Anwenders entsprechen und nach Möglichkeit nur natürliche Inhaltsstoffe enthalten [3]. Arzneimittel müssen spezifisch an den Patienten angepasst werden, nachdem durch den medizinischen Fortschritt personalisierte Therapien angeboten werden können [4]. Diese Entwicklungen stellen völlig veränderte Randbedingungen an die verarbeitende Industrie.

Neue Herausforderungen in der Konsumgüterproduktion Hohe Qualität, maximale Ausbringung und niedrige Produktkosten bestimmten bisher die Verarbeitung von Konsumgütern. Der Ausstoß großer Mengen, lange Produktzyklen und zentralisierte Produktion waren lange Zeit das Mittel der Wahl zur Bedienung des Güterbedarfs [5]. Die oben beschriebenen Entwicklungen hin zu Individualisierung und Regionalisierung fordern nun kleine Losgrößen, kürzere Marktzyklen der Produkte und kurze Wege zwischen Erzeuger und Konsument [2] bei weiterhin hohem Qualitätsstandard [5]. Diese grundlegende Umstellung der Produktionsweise verlangt angepasste Anlagenkonzepte.

Verarbeitungsanlagen für ein veränderliches Produktionsumfeld Die Entwicklung der Verarbeitungstechnik konzentrierte sich bislang auf die Maximierung der Ausbringung [6]. Ungünstige Verarbeitungseigenschaften der Güter und ungleichförmige Bewegungsabläufe auf Grund komplexer Verarbeitungsaufgaben [7] führten in Verbindung mit den geforderten, hohen Arbeitsgeschwindigkeiten zu Hochleistungsmaschinen mit aufwändiger Mechanik und komplizierten Funktions-, Antriebs- und Steuerungsstrukturen [5]. Die inzwischen veränderten Randbedingungen der Massenbedarfsgüterproduktion fordern allerdings Verarbeitungsanlagen, die einen häufigen Produktwechsel wirtschaftlich umsetzen können. Die existierenden Anlagenkonzepte ermöglichen i.d.R. nur eine sehr eingeschränkte Produktvielfalt und benötigen zeitintensive Umrüstvorgänge [5]. Die Folge sind Betriebszustände fern des optimalen Betriebspunktes der Anlagen sowie lange Stillstandszeiten [8] und damit eine schlechte Auslastung der Produktionsmittel.

Bekannte Probleme und systematischer Ansatz Der Maschinen- und Anlagenbau hat dieses Problem erkannt und begegnet ihm mit Konzepten wie Modularisierung, Miniaturisierung, Parallelisierung [5, 9, 10]. Die Umsetzung bewegt sich auf vielen Teilgebieten noch im Stadium der Forschung [5] und betrachtet hauptsächlich einzelne Teilprobleme. Eine grundlegende, systematische Untersuchung der Thematik für Verarbeitungsanlagen wurde aber bislang noch nicht unternommen und ist Inhalt dieser Arbeit.

1.2 Zielstellung und Lösungsansatz

Ein grundlegendes Problem Unabhängig davon, ob es sich um eine Verpackungsmaschine für Süßwaren, eine pharmazeutische Arzneimittelmaschine oder eine Montagelinie für Kopfhörer handelt, lauten die Forderungen stets kleine Losgrößen, kurze Produktzyklen und große Produktvielfalt. Diese Beobachtung zeigt, dass ein grundlegendes Problem vorliegt [5, 11]. Es bietet sich daher an und erscheint notwendig, einem Grundgedanken der Verarbeitungstechnik [6, 12] zu folgen und die Thematik losgelöst von der speziellen Anwendungen nach allgemeinen Gesetzmäßigkeiten zu untersuchen und systematisch aufzuarbeiten.

Zielstellung der Arbeit Diese Diplomarbeit verfolgt das Ziel, das System Verarbeitungsanlage umfassend aus der Sicht der Systemtheorie zu analysieren und wesentliche Randbedingungen eines Anlagenkonzeptes zu formulieren, das den veränderten Forderungen der Massenbedarfsgüterproduktion gerecht wird.

Lösungsansatz Leitender Gedanke (Abb. 1.1) ist es, das System Verarbeitungsanlage von spezifischen Anwendungen zu abstrahieren und auf dieser allgemeinen Ebene sowohl das eingangs dargestellte Problem als auch mögliche Lösungen zu beschreiben. Dazu bedient sich die Arbeit der Methoden der Allgemeinen Systemtheorie, die eine Beschreibung und den Vergleich eigentlich wesensfremder Systeme in einheitlicher Sprache ermöglichen [13]. Auf diese Weise können auch Erkenntnisse aus Fachgebieten genutzt werden, die der Verarbeitungstechnik fremd sind. Die in der abstrakten Betrachtung gewonnenen Ansätze werden anschließend für das System Verarbeitungsanlage konkret ausformuliert.

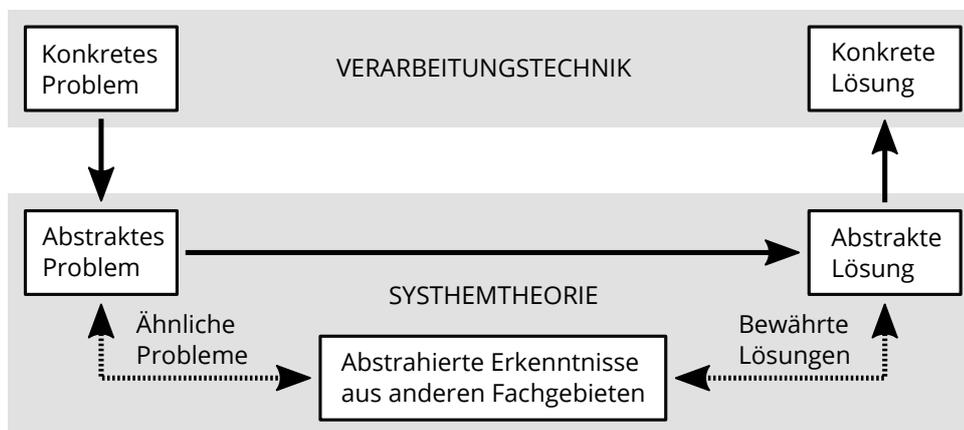


Abb. 1.1: Abstraktion des Problems und Vergleich mit ähnlichen Problemen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Grundlage des methodischen Ansatzes Die Produktentwicklung kennt eine Vielzahl methodischer Vorgehensweisen, um auf systematischem Wege Lösungen für technische Probleme zu finden. Sie gehen auf die in Abb. 1.2 dargestellten, prinzipiellen Arbeitsschritten zur Analyse und Synthese von Systemen zurück, die hier als Grundlage dienen sollen. Diesem Ablauf folgt diese Arbeit, wobei sie zwei methodische Schleifen zieht. Die folgenden drei Abschnitte beschreiben das Vorgehen detailliert. Der Vollständigkeit halber

sei erwähnt, dass dem hier abgebildeten Schema zwei weitere Schritte folgen: Die Systementscheidung zur Festlegung des endgültigen Lösungskonzeptes und die Systemausführungsplanung. Beide Schritte liegen außerhalb der Aufgabenstellung dieser Arbeit, die lediglich ein Lösungskonzept erarbeiten soll, und werden deshalb hier nicht behandelt.

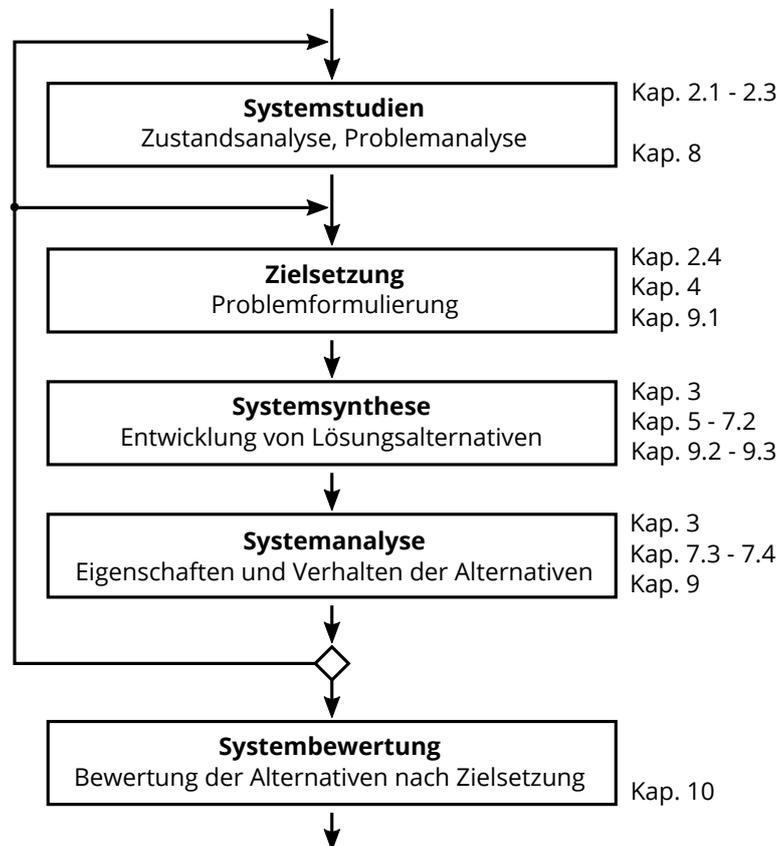


Abb. 1.2: Arbeitsschritte zu Analyse und Synthese von Systemen. In Anlehnung an [14].

Analyse der Konsumgüterproduktion, Stand der Wissenschaft und Technik, Lastenheft

Die Arbeit beginnt in Kap. 2 mit einer Untersuchung der aktuellen Situation der Konsumgüterproduktion. Exemplarisch betrachtet sie die Forderungen, die Konsumenten an die Nahrungsmittelindustrie stellen, und die Lösungen, die der Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinenbau hierfür anbietet. Aus den Ergebnissen formuliert sie eine konkrete Problemstellung für die Konsumgüterproduktion. Kap. 3 zeigt Lösungen auf, die der Maschinenbau im Allgemeinen und der Verarbeitungsmaschinenbau im Speziellen bereits gefunden hat und stellt deren Eigenschaften dar. Am Beginn einer neuen Schleife im Vorgehensschema formuliert Kap. 4 anschließend in Form eines allgemeinen Lastenheftes die Anforderungen an Verarbeitungsanlagen und setzt damit das Ziel der folgenden systemtheoretischen Untersuchungen.

Systemmodelle für Verarbeitungsanlagen Die systemtheoretische Untersuchung hat zum Ziel eine allgemeingültige Darstellung für Verarbeitungsanlagen zu finden, mit der ihre Eigenschaften und ihr Verhalten beschrieben werden können. Dazu führen Kap. 5 und Kap. 6 zunächst in die Grundlagen des systemtheoretischen Ansatzes ein und geben eine Übersicht über den formalen Rahmen sowie die Aussagen der Allgemeinen Systemtheorie. In Kap. 7 wird anhand dieser allgemeinen Betrachtungen ein Systemmodell für Ver-

beitungsanlagen erarbeitet. Aus diesem Modell werden Aussagen zu ihren Eigenschaften und ihrem Verhalten abgeleitet. Es dient der letzten Arbeitsschleife als Grundlage.

Vorschläge zur Neugestaltung von Verarbeitungsanlagen, Pflichtenheft Die letzte Arbeitsschleife beginnt in Kap. 8 mit einer systemtheoretischen Analyse der Problemstellung der Konsumgüterproduktion und macht Angaben zu den Ursachen der Probleme. Kap. 9.1 folgt mit einer systemtheoretischen Betrachtung des allgemeinen Lastenheftes und formuliert damit eine Zielstellung, die mit Hilfe des vorher aufgestellten Systemmodells gelöst werden kann. Kap. 9.2 und Kap. 9.5 erarbeiten eine Lösung, die sich an den geforderten Eigenschaften und Verhaltensweisen orientiert. Kap. 10 schließt die Arbeit mit einer betriebswirtschaftlichen Bewertung des Lösungskonzeptes ab.

2 Die aktuelle Situation der Konsumgüterproduktion

2.1 Einführung – Produktionsformen der Konsumgüterproduktion

Entwicklungsgang der Güterproduktion Die Entwicklung von der handwerklichen Manufaktur zur industriellen Massenfertigung kann in vier aufeinanderfolgende Stufen unterteilt werden [15, 16]. Abb. 2.1 stellt diese Entwicklungsschritte mit den wesentlichen Merkmalen Produktart, Absatzmärkte und Fertigungsweise dar.

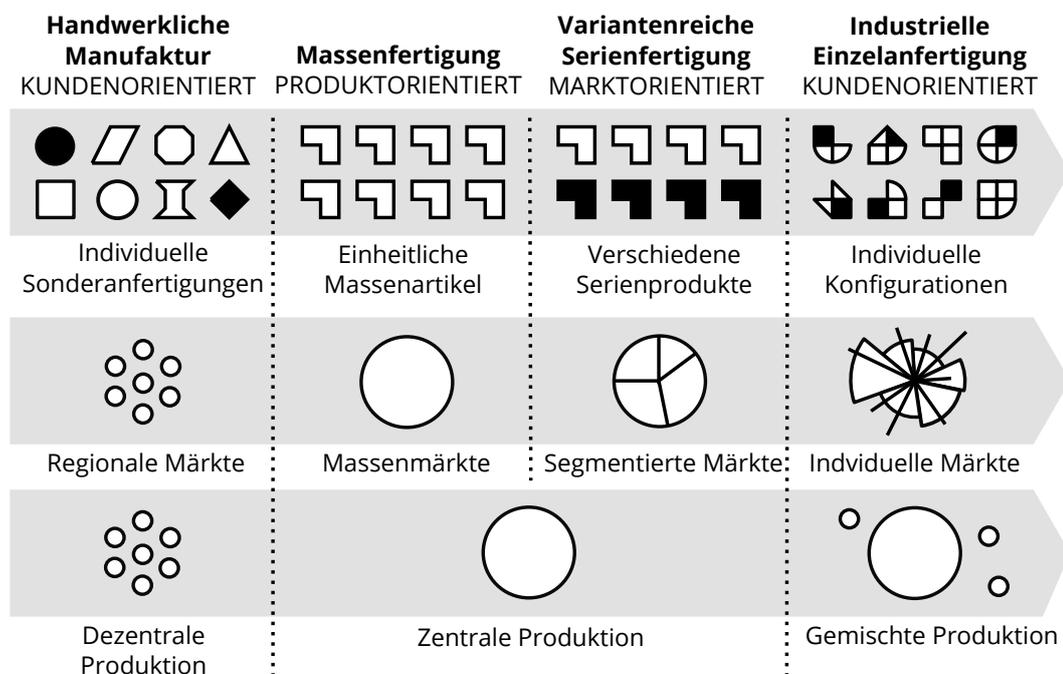


Abb. 2.1: Entwicklung der Güterproduktion. Produktarten, Absatzmärkte und Produktionsweisen. Unter Verwendung von [15, 16, 17].

Als Ursache für den Übergang von der handwerklichen zur industriellen Fertigung gilt das Bevölkerungswachstum [18]. Infolgedessen konzentriert sich die Güterproduktion zunächst auf die Herstellung großer Mengen des selben Produktes zur Deckung des steigenden Grundbedarfes. Die Fertigung ist produktorientiert. Im weiteren Verlauf kommt es zur Erweiterung des Produktsortimentes und zur Bildung von Varianten, die den Markt zielgerichteter bedienen können. Der Kunde kann zwischen Varianten wählen, die auf Lager produziert werden. Die Fertigung ist marktorientiert. Mit der Deckung der Grundbedürfnisse wächst die Nachfrage nach personalisierten Produkten [15]. In der bisher letzten Phase geht die Produktion schließlich mit individuell angepassten Produkten auf die Wünsche jedes einzelnen Kunden ein. Das speziell konfigurierte Produkt wird als Einzelstück auf seine Nachfrage hin hergestellt. Die Fertigung ist kundenorientiert.

Parallele Existenz der Produktionsweisen Das vorgestellte Entwicklungsschema der Güterproduktion kann als typisch angesehen werden [15], verläuft allerdings in den verschiedenen Wirtschaftszweigen und -regionen keineswegs parallel [18]. Diese Arbeit nimmt eine grobe Unterscheidung der Konsumgüter in Massenbedarfsgüter und Bedarfs- bzw. Luxusgüter sowie der Wirtschaftsregionen in Entwicklungsländer und Industrieländer vor. Tab. 2.1 zeigt die Unterscheidung der Konsumgüter und Tab. 2.2 die Unterscheidung nach Wirtschaftsregionen.

Tab. 2.1: Unterscheidung der Konsumgüter. Definition, Beispiele und Produktionsweise. Unter Verwendung von [15, 18].

	Massenbedarfsgüter	Bedarfs- und Luxusgüter
Definition	Güter des Grundbedarfs, identische Massengüter	Güter des Zusatzbedarfes, Varianten in großer Stückzahl
Beispiele	Butter, Küchenrolle, USB-Datenträger	Kaviar, Staubsauger, Smart-Watch
Vorherrschende Produktionsweise	Massenfertigung	Serienfertigung
Entwicklungsziel der Produktion	Serienfertigung	Einzelanfertigung

Tab. 2.2: Güterproduktion in den Industrie- und Entwicklungsländern. Merkmale, Marktstrukturen und Produktionsformen. Unter Verwendung von [15, 19, 20].

	Entwicklungsländer	Industrieländer
Prägendes Merkmal	Schnelles Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum	Stagnation der Bevölkerung, langsames Wirtschaftswachstum
Marktstruktur	Fragmentiert und lokal	Konzentriert und international
Entwicklungsstufe der Produktion	Handwerkliche Manufaktur	Massenproduktion, Serienproduktion
Entwicklungsziel der Produktion	Massenproduktion	Serienproduktion, Einzelproduktion

Fazit – Heterogene Verfassung der Konsumgüterindustrie Die vorangegangenen Betrachtungen zeigen, dass die verschiedenen Produktionsarten nebeneinander existieren. Die Güterindustrie teilt sich in unterschiedliche Geschäftsmodelle auf, wie der Hochleistungsproduktion von Grundbedarfsgütern, der Serienproduktion von Nischenartikeln oder der personalisierten Herstellung von Luxusprodukten [21]. Außerdem fordern die aufstrebenden Entwicklungsländer andere Produktionssysteme als die Industrieländer, bspw. Verarbeitungsanlagen im unteren und mittleren Preissegment oder Gebrauchtanlagen [22]. Der Konsumgütermarkt und damit auch der Markt für Verarbeitungsanlagen wird zunehmend inhomogener.

Eingrenzung der folgenden Untersuchungen Die allgemeinen Betrachtungen zur Konsumgüterproduktion werden nun an einer konkreten Marktanalyse vertieft. Mit Blick auf den Rahmen dieser Arbeit und auf Grund der teilweise schlechten Informationslage, beschränkt sich diese Analyse auf die Nahrungsmittelindustrie in den Industrieländern und

den deutschen Verarbeitungsmaschinenbau für Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen. Innerhalb dieser Eingrenzung ist dennoch ein repräsentatives Bild der Konsumgüterindustrie und des Verarbeitungsmaschinenbaus möglich, weil die deutschen Unternehmen des Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinenbaus 22% des Welthandelsanteils bestreiten [22], ihr Hauptabsatzmarkt mit 76,4% in den Industrieländern [23] liegt und dort ca. 30% der Konsumgüterproduktion auf den Bereich Nahrungsmittel entfallen [24].

2.2 Die Situation der Nahrungsmittelindustrie

2.2.1 Marktstruktur

Marktmacht Großhandel Der europäische Lebensmittelmarkt ist von der beherrschenden Stellung der Handelsunternehmen als Vermittler zwischen Produzenten und Konsumenten gekennzeichnet. Abb. 2.2 zeigt diese Struktur, die einer Sanduhr ähnlich ist. Nach wie vor gelangt die Mehrheit der Lebensmittel über den Einzelhandel zum Kunden. Wenige Handelsunternehmen stehen in Europa einer großen Zahl verarbeitender Unternehmen gegenüber und dominieren den Markt. In Deutschland konzentriert sich 75% des Lebensmitteleinzelhandels auf fünf Großunternehmen. Die Verhandlungsposition der Hersteller ist dadurch schlecht und steigende Produktionskosten können nicht umgelegt werden [2, 20].

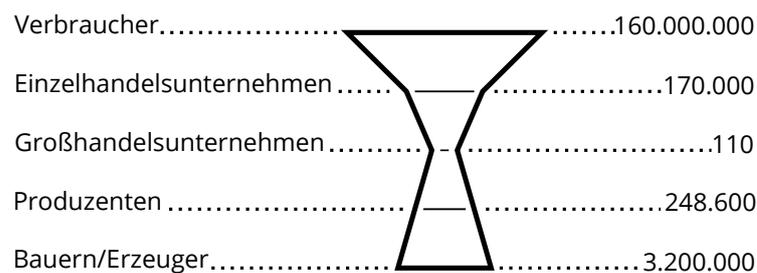


Abb. 2.2: Struktur des Nahrungsmittelmarktes. Marktteilnehmer und Anzahl der Unternehmen. Nach [20].

Mittelständische Massenproduktion Die Lebensmittelproduktion in Europa stützt sich wesentlich auf die Massenfertigung und ist in Deutschland sehr von mittelständischen Unternehmen geprägt [25]. Zunehmend etablieren sich aber kleine Lebensmittelhersteller in Nischen- und Saisonmärkten [20]. Auf Grund des hohen Kostendrucks produzieren die Nahrungsmittelhersteller meist im Mehrschichtsystem und sind auf zuverlässige Produktionsanlagen angewiesen [22].

2.2.2 Forderungen der Verbraucher

Veränderte Konsumentenwünsche – Schnell, gut und besonders Wachsender Wohlstand, höherer Bildungsgrad und zunehmende Verstädterung in den Industrieländern haben die Bedürfnisse und Wünsche der Verbraucher in den letzten Jahren stark verändert [5, 24, 15]. Diese Entwicklung gliedert sich in drei wesentliche Aspekte:

- Zeit: Verbraucher verwenden weniger Zeit für die Zubereitung der Mahlzeiten.
- Qualität: Wachsendes Bewusstsein für die Qualität der Nahrungsmittel.
- Individualität: Größere Wertschätzung besonderer und individueller Produkte.

Portioniert, vorbereitet, zentral – Der Zeitaspekt Der stetig zunehmende Anteil an Ein- und Zweipersonenhaushalten [24] lässt die Nachfrage nach Produkten in unterschiedlichen und insbesondere kleinen Packungsgrößen ansteigen [22]. Durch die steigende Berufstätigkeit [24] und dem damit einhergehenden schnelllebigen Alltag bleibt weniger Zeit für die Zubereitung von Mahlzeiten [2]. Die Verbraucher verlangen Fertiggerichte und vorbereitete Produkte, wie bspw. gewaschener, geschnittener und gemischter Salat [1]. Die Urbanisierung der Bevölkerung führt zu einer größeren Distanz zwischen Absatzmärkten und Erzeugermärkten. Der Absatz konzentriert sich in den Städten, weil die Verbraucher zeitsparend und zentral in der Nähe ihres Wohnortes einkaufen gehen [26] (siehe Abb. 2.3). Die Folge sind längere Verteilungswege und komplexere Lieferketten [27].

Frisch, sicher, nachhaltig – Der Qualitätsaspekt Die Qualitätsforderungen der Kunden beziehen sich im Wesentlichen auf Frische, Lebensmittelsicherheit und nachhaltige Herstellung. Kurze Verarbeitungszeiten und der Verzicht auf Konservierungsmethoden und -mittel gelten als Garant für Frische [1]. Die Kennzeichnung der Inhaltsstoffe und Nährwerte [1, 28] zertifizieren die Lebensmittelsicherheit. Tierwohl, biologischer Anbau und der Verzicht auf Gentechnik stehen für Nachhaltigkeit [1, 28]. Abb. 2.4 gibt einen Überblick über Kundenforderungen beim Lebensmitteleinkauf. Grundsätzlich geben die Konsumenten an, für eine hohe Qualität auch höhere Preise bezahlen zu wollen [2]. Allerdings unterscheidet sich diese Haltung vom tatsächliche Kaufverhalten [1].

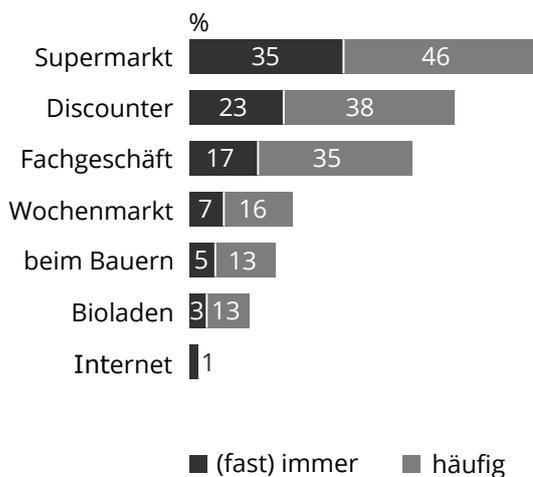


Abb. 2.3: Bevorzugte Einkaufsorte und Händler für den Lebensmitteleinkauf. Nach [28].

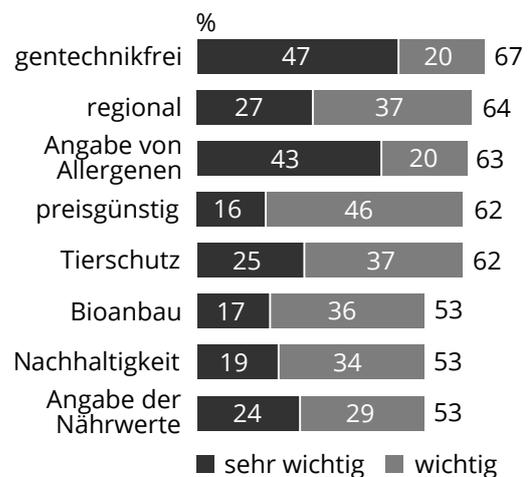


Abb. 2.4: Wichtigkeit bestimmter Qualitätsmerkmale beim Lebensmitteleinkauf. Nach [28].

Regional, gesund, neu – Der Individualitätsaspekt Vielseitige Ernährung hat für einen großen Teil der Verbraucher einen hohen Stellenwert. Insbesondere regionale Produkte, eine gesunde und ausgewogene Ernährung sowie neue und exotische Lebensmittel sind gefragt [2, 5]. Die Kunden fordern Produkte aus der unmittelbaren Umgebung des Absatzmarktes und glutenfreie, laktosefreie, vegane u.ä. gesunde Nahrungsmittel [2, 29]. Sie äußern großes Interesse gegenüber innovativen Rezepturen, Lebensmitteln aus anderen Kulturkreisen und ökologischen Alternativen, wie Protein aus Insekten [2, 30]. Ungeachtet dieser offenen Einstellung gegenüber neuen Produkten verhalten sich die meisten Verbraucher beim Kauf neuer Lebensmittel dennoch zurückhaltend bis ablehnend [31], sodass sich 70 - 80% der neuen Artikel am Markt nicht etablieren können [1].

Fazit – Auswirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion Die vorangegangene Betrachtung des Lebensmittelmarktes zeigt, dass die Produktionsweise zunehmend von einer reinen zu einer variantenreichen Massenproduktion übergeht. Tab. 2.3 fasst die Forderungen und das Kaufverhalten der Verbraucher zusammen und führt sie gemeinsam mit den Auswirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion auf.

Tab. 2.3: Kaufverhalten und Forderungen der Verbraucher und ihre Auswirkung auf die Nahrungsmittelproduktion.

Aspekt	Forderungen und Kaufverhalten	Auswirkung auf die Produktion
Zeit	Verschiedene Packungsgrößen, vorbereitete und Fertigprodukte	Vergrößerung der Variantenvielfalt, Verkleinerung der Losgrößen
	Größere Entfernung zwischen Produzent und Konsument	Schonende Verarbeitung für lange Haltbarkeit
Qualität	Frische Produkte	Kurze Verarbeitungsdauer von Erzeugung bis Verkauf
	Sicherheit und Nachhaltigkeit	Dokumentation der Herkunft, Herstellung und Inhaltsstoffe.
Individualität	Saisonal unterschiedliche Mengen der regionalen Erzeugnisse	Schwankende Produktionsmengen
	Viele und teilweise kurzlebige, neue Produkte	Schneller Wechsel der Produkte, kurze Produktzyklen

2.3 Die Situation des Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinenbaus

Die Branchenstruktur – Mittelständische Exportmeister Der deutsche Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinenbau ist mittelständisch geprägt. Die Unternehmen stellen ihre Maschinen und Anlagen überwiegend in Deutschland her. 87% der Maschinen und Anlagen gehen in den Export, wobei die USA, China und Russland die wichtigsten Einzelabnehmer sind [22]. Abb. 2.5 schlüsselt die Anteile der Exportregionen auf. Deutsche Unternehmen stellen 22% des Welthandelsvolumen für Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen (siehe Abb. 2.6) [22], erhalten aber zunehmend Konkurrenz aus China [21].

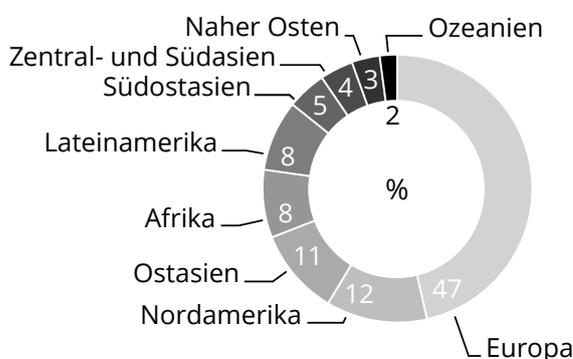


Abb. 2.5: Exportregionen deutscher Hersteller von Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen. Nach [22].

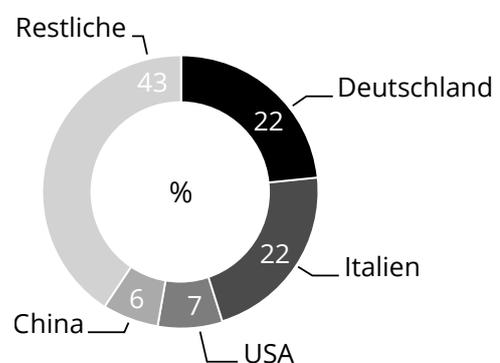


Abb. 2.6: Anteil am Welthandelsvolumen von Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen. Nach [22].

Das Geschäftsmodell – Individuelle Komplettlösungen für das Premiumsegment Die meisten Unternehmen der Branche sind hochspezialisiert und erwirtschaften 92% ihres Umsatzes im Kerngeschäft. Sie bieten Komplettlösungen an, die zu 66% dem Premiumsegment zuzuordnen sind und individuell auf den Kunden zugeschnitten werden. 85% der Unternehmen gelten als Innovationsführer in ihrem Segment. Eine große Rolle spielt das Aftersales- und Service-Geschäft, das im Schnitt mehr als 20% des Umsatzes ausmacht. Der internationale Erfolg des deutschen Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinenbaus gründet sich wesentlich auf den hohen Spezialisierungsgrad, das verfahrenstechnische Fachwissen und den guten Service der Unternehmen [22].

Die Produkte – Komplizierte Hochleistungsmaschinen Lange Zeit war das vorderste Ziel der Entwicklung die Steigerung der Produktivität der Anlagen, sodass die Verarbeitungstechnik zu einem großen Teil auf eine möglichst große Ausbringung optimiert ist [32]. Hochleistungsmaschinen, die auf eine bestimmte Aufgabe spezialisiert sind und zu einem großen Teil auf mechanische Bewegungsführung aufbauen, dominieren das Portfolio vieler Unternehmen [22]. Komplizierte, zentrale Getriebe garantieren dabei auch bei hoher Arbeitsgeschwindigkeit und dynamischer Beanspruchung durch Zwanglauf die Synchronizität und Bahnführung. Diese Lösungen sind allerdings nur in beschränktem Umfang anpassungsfähig [5]. Es handelt sich i.d.R. um geschlossenen Systeme, die auf den Kunden individuell angepasst sind. In den meisten Fällen geht damit ein geringer Standardisierungsgrad der Produktstruktur und der Entwicklungsprozesse einher [22].

2.4 Problemstellungen für die Konsumgüterproduktion

Verluste für die Produzenten Die vorangegangenen Kapitel schildern die Marktbedingungen der Konsumgüterproduktion als heterogenes und unbeständiges Umfeld. Demgegenüber stehen überwiegend spezialisierte und unveränderliche Verarbeitungsanlagen, auf die sich die Produktion stützt. Durch diesen Umstand entstehen den Produzenten teils erhebliche Verluste [8]. Tab. 2.4 stellt die Randbedingungen der Produktion den Eigenschaften der zur Verfügung stehenden Verarbeitungsanlagen gegenüber und listet die daraus resultierenden Folgen für die Produktion auf.

Tab. 2.4: Marktbedingungen und Eigenschaften der Verarbeitungsanlagen, Folgen. Unter Verwendung von [8].

Marktbedingungen der Produktion	Eigenschaften der Verarbeitungsanlagen	Verlustverursachende Folgen
Schwankende Produktionsmengen, Verkleinerung der Losgrößen, kurze Herstellungsdauern	Hohe Ausbringungen mit kleinem Einstellbereich, aufwändige Umrüstvorgänge, störungsanfällige Anlaufphasen	Falsche Produktionskapazität: Schlechte Auslastung der Anlagen, Betrieb an unwirtschaftlichen Betriebspunkten, lange Stillstandszeiten
Schneller Produktwechsel, kurze Produktzyklen	Enge Spezialisierung auf bestimmte Verarbeitungsaufgaben	Fehlkonfigurationen der Anlagen, falsche Ausstattung: Qualitätsminderung der Verarbeitung
Vergrößerung der Variantenvielfalt, schonende Verarbeitung, Dokumentationspflicht	Überwiegend mechanische Prozesslösungen, geringe Formatvariabilität, beschränkte Prozessdatenerfassung	Mangelhafte Anpassungsfähigkeit: Einschränkung der Variantenvielfalt, Anfälligkeit gegenüber Veränderungen der Prozessbedingungen

Nachteil für den Verarbeitungsmaschinenbau Die beschriebenen Umstände der Konsumgüterindustrie führen zu einer zunehmend heterogenen Nachfrage und einer Zersplitterung des Marktes für Verarbeitungsanlagen. Der Verarbeitungsmaschinenbau kann bislang nur eingeschränkt auf diese Veränderungen reagieren und erfährt dadurch einen Nachteil bei der Bedienung der Wünsche der Konsumgüterindustrie. Die Ursachen sind in Tab. 2.5 aufgeführt.

Tab. 2.5: Nachteile für den Verarbeitungsmaschinenbau und dessen Ursachen.

Nachfrage der Konsumgüterindustrie	Angebot des Verarbeitungsmaschinenbaus	Nachteil
Unterschiedliche Preissegmente, Wachstum im mittleren Segment	Überwiegen Maschinen und Anlagen im Premiumsegment mit umfangreicher Ausstattung	Ungenügende preisliche Skalierbarkeit
Unterschiedliche Produktionsweisen	Überwiegend für Massenproduktion, begrenzt für Variantenproduktion	Ungenügende Integrationsfähigkeit in unterschiedliche Produktionsweisen
Gebrauchte Anlagen, Erweiterungen und Umbauten bestehender Anlagen	Geschlossene, weitgehend unveränderliche Anlagensysteme	Ungenügende technologische Integrationsfähigkeit in bestehende Systeme
Unterschiedlichste technische Lösungen gefordert	Großteils Sondermaschinenbau, geringer Standardisierungsgrad	Ungenügende Integrationsfähigkeit in standardisierte Entwicklungsprozesse

Fazit – Prinzipielle Defizite Die aufgeführten Probleme lassen sich in vier prinzipiellen Defiziten zusammenfassen, die das Produktportfolio des Verarbeitungsmaschinenbaus derzeit zeigt:

- Mangelnde Skalierbarkeit der Produktionskapazität und technischen Ausstattung.
- Ungenügende Konfigurierbarkeit der Anlagen für unterschiedliche Aufgaben.
- Unzureichende Anpassungsfähigkeit der Prozesse gegenüber veränderlicher Produktionsbedingungen.
- Schlechte Integrationsfähigkeit in bestehende Systeme und Prozesse.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

3.1 Lösungskonzepte des Maschinen- und Anlagenbaus

3.1.1 Einführung – Etablierte und neue Konzepte

Herausforderungen für den Verarbeitungsmaschinenbau Die prinzipiellen Defizite aus dem Fazit der Marktanalyse führen zu drei wesentlichen Aufgaben, denen sich der Verarbeitungsmaschinenbau gegenüber sieht [22]:

- Anpassungsfähige Lösungen: Variable Maschinen- und Anlagen für schnell wechselnde Verarbeitungsaufgaben und Konsumgüter.
- Individualisiertes und standardisiertes Portfolio: Breites, passgenaues Angebot bei geringer interner Vielfalt und Verschiedenheit der Produkte.
- Kosteneffizienz: Trotz niedriger Stückzahlen Lösungen auf niedrigem Preisniveau.

Etablierte und neue Konzepte Der Verarbeitungsmaschinenbau wie der Maschinen- und Anlagenbau im Allgemeinen stehen vor ähnlichen Herausforderungen. Aus verschiedenen Fachgebieten sind unter dem Sammelbegriff Wandelbarkeit [5, 33] u.a. die nachstehenden Konzepte hervorgegangen, die in den folgenden Kapiteln vorgestellt werden:

- Baukastensysteme und Modularisierung
- Adaptive Prozessregelung
- Miniaturisierte Produktionssysteme
- Parallele und vernetzte Stoffströme

3.1.2 Baukastensysteme und Modularisierung

Das zugrundeliegende Konzept – Normung und Kombination Ein Baukastensystem stellt verschiedene, zusammengesetzte Gegenstände aus einem Vorrat an Elementen her. Dieser Vorgang, der eine große Anzahl unterschiedlicher Baukastenprodukte aus einer kleinen, konstanten Zahl verschiedener Bausteine bildet, heißt Kombination oder Konfiguration. Die Zerlegung einer Anzahl bestehender, unterschiedlicher Varianten in möglichst wenige, verschiedene Bausteine wird Normung oder Modularisierung genannt [34]. Abb. 3.1 zeigt diesen Zusammenhang schematisch.



Abb. 3.1: Baukastenkonzept. Normung und Kombination.

Ziele und Vorteile der Baukastenbauweise – Wiederholung und Bewährtes Abstrakt formuliert zielt ein Baukastensystem darauf ab, eine große Menge verschiedenartiger Dinge systematisch zu beherrschen [34]. Praktisch geht es darum, ähnliche Produkte aus wenigen, standardisierten Baugruppen aufzubauen. Die mehrfache Verwendung von Bausteinen spart Zeit in der Auftragsabwicklung und Kosten durch höhere Fertigungsstückzahlen. Die Anwendung bewährter Lösungen vereinfacht die Kalkulation und steigert die Produktqualität. Die Baukastenbauweise ermöglicht eine große Produktvielfalt bei geringeren Kosten als Sonderkonstruktionen für jeden Anwendungsfall [35].

Grenzen des Baukastenprinzips Ein Baukastensystem bedeutet gegenüber einer Einzelkonstruktion immer eine Einschränkung auf weniger Lösungsvarianten [14]. Der Versuch, die Anzahl der möglichen Baukastenprodukte zu erhöhen, führt zu einer umfangreicheren Baukastenstruktur, einer größeren Vielfalt der Bausteine und einem steigenden Entwicklungsaufwand. Je umfassender die Modularisierung durchgeführt wird, desto stärker ist die konstruktive Gestaltung von den Rahmenbedingungen des Baukastens abhängig [35]. Funktionelle Forderungen müssen sich infolgedessen den Standards des Baukastens unterordnen, worunter einzelne Qualitätsmerkmale leiden können. Die Grenze des Baukastenprinzips ist an der Stelle erreicht, an der die weitere Modularisierung zu funktionellen Mängeln der Bauteile und wirtschaftlichen Einbußen führt [14]. Einen möglichen Ausweg bieten lokale Baukästen, die einen Baukasten in Unterbaukästen aufteilen. Auf diese Weise sinkt die Vielfalt der Bausteine und Baukastenprodukte je Baukasten [35].

Zwei spezielle Baukastenkonzepte – Plattformbauweise und Plug&Produce Baukastensysteme haben das grundsätzliche Problem, dass alle denkbaren und zukünftigen Produktvarianten in der Entwicklung berücksichtigt werden müssen. Die Plattformbauweise umgeht dieses Problem, indem es ein Produkt in eine ausführungsneutrale Produktplattform und in produktspezifische, nicht normierte Anbauten aufteilt. Die Produktplattform bildet die Gemeinsamkeiten einer Produktfamilie ab und ist bei allen Produkten identisch. Die einzelnen Produkte erhalten ihre spezifischen Eigenschaften durch die Anbauelemente, die für den speziellen Anwendungsfall gesondert entwickelt werden [14]. Abb. 3.2 stellt die Unterschiede zwischen Baukasten- und Plattformbauweise heraus.



Abb. 3.2: Baukasten- und Plattformsystem. a) Baukastensystem mit standardisierten Bausteinen, b) Plattformsystem mit standardisierter Plattform und individuell angepassten Anbauteilen.

Plug&Produce bezeichnet ein Baukastenkonzept für Produktionsanlagen. Der Baukasten besteht aus modularen Prozessbausteinen, die ihre Funktion im Produktionsablauf selbstständig ausführen und ohne Störung des Anlagenbetriebs eingebunden, entfernt und ausgetauscht werden können [36]. Das Konzept ist an das Plug&Play-Prinzip der Softwaretechnologie angelehnt und ermöglicht die schnelle Rekonfiguration der Anlagenstruktur ohne Stillstand der Produktion [9, 37].

3.1.3 Adaptive und selbstoptimierende Prozessregelung

Ausgangslage und Konzept – Anpassung der Regelungsverfahren Schwankende Eigenschaften der Verarbeitungsgüter und veränderliche Randbedingungen des Verarbeitungsprozesses zeichnen das Prozessumfeld von Verarbeitungsanlagen aus. In jedem Fall muss eine Verarbeitungsanlage aber Produkte konstanter Qualität herstellen [6], was einer auf dieses Ziel hin ausgerichteten Regelung bedarf. Adaptive und selbstoptimierende Prozessregelungen sind in der Lage ihre Regelungsverfahren derart anzupassen, dass sie diese schwankende Randbedingungen berücksichtigen [38]. Der folgende Abschnitt gibt anhand des vereinfachten Regelkreises in Abb. 3.3 eine kurze Einführung in die grundlegenden Prinzipie der Regelung.

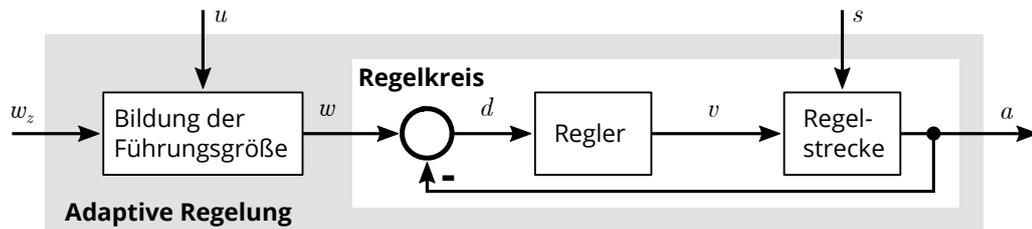


Abb. 3.3: Adaptive Prozessregelung als vereinfachter Regelkreis. w_z Übergeordnete Zielgröße, u Bedingungen, w Führungsgröße, d Regeldifferenz, v Stellgröße, s Störgröße, a Regelgröße der zu regelnden Prozessgröße. In Anlehnung an [39, 38].

Grundlagen der Regelung – Der Regelkreis Abb. 3.3 zeigt einen einfachen Regelkreis, der Grundlage der Regelungstechnik ist. Ein zeitveränderliches System, die Regelstrecke, hat eine von außen beeinflussbare Stellgröße v und eine messbare Regelgröße a . Außerdem wirkt eine nicht beeinflussbare Störgröße s auf die Regelstrecke ein. Sie verursacht die Regeldifferenz d zwischen der Regelgröße und der Führungsgröße w . Diese regelungstechnische Führungsgröße ist von den Bedingungen u abhängig und wird aus einer übergeordneten, technisch relevanten Zielgröße w_z gebildet. Das Regelungsziel ist, die Regelgröße auf die vorgegebene Führungsgröße einzustellen [39, 40].

Adaptivität und Selbstoptimierung Der Unterschied zwischen konventioneller, adaptiver und selbstoptimierender Regelung liegt in der Bildung der Führungsgröße. Abb. 3.4 stellt diesen Unterschied in einer schematischen Darstellung gegenüber.

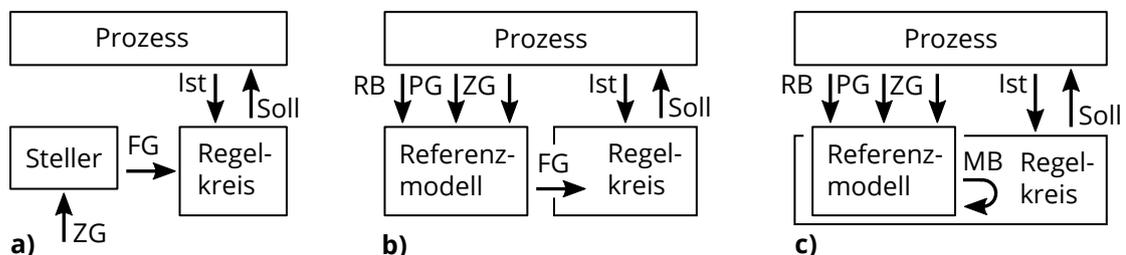


Abb. 3.4: Schematische Darstellung der Regelungsarten: a) Konventionelle Regelung, b) adaptive Regelung, c) selbstoptimierende Regelung; ZG Zielgröße, FG Führungsgröße, Ist Ist-Wert der Regelgröße, Soll Soll-Wert der Regelgröße, RB Randbedingungen des Prozesses, PG Prozessgrößen, MB Modellbildung.

In einer konventionellen Regelung liegt der Bildung der Führungsgröße ein starrer Zusammenhang zugrunde. Ändern sich die Randbedingungen u , kann die Regelung das Regelziel u.U. nicht mehr erfüllen. Eine adaptive Regelung verfügt über ein festes Referenzmodell, das abhängig von den vorherrschenden Randbedingungen die Führungsgröße bestimmt. Sie bezieht die Führungsgröße in die mittelfristige Regelung ein. Selbstoptimierende Regelungen sind außerdem in der Lage, das Referenzmodell zu verändern und damit auf Veränderungen der Randbedingungen zu reagieren. Sie binden das Referenzmodell in die langfristige Regelung ein [38, 39, 40].

Anpassungsfähige Wirkpaarungen und vorausschauende Instandhaltung Verarbeitungsanlagen haben die Aufgabe, aus Rohstoffen schwankender Qualität Produkte konstanter Qualität herzustellen und sind damit ein breites Anwendungsfeld für adaptive und selbstoptimierende Prozessregelung. Voraussetzung sind Wirkpaarungen, die durch verstellbare Formateile, veränderliche Bewegungsbahnen, schaltbare Wirkzonen u.Ä. anpassungsfähig sind. In diesem Fall dienen die Qualitätsmerkmale des Produktes als Regelungsziel. Eine Prozessregelung erfasst sie über geeignete Sensoren, wertet sie mittels Material-, Prozess- und Produktmodellen aus und leitet daraus Reaktionen ab [5, 41].

Ein weiteres Anwendungsgebiet adaptiver und selbstoptimierender Prozessregelung ist die vorausschauende Instandhaltung (engl. predictive maintenance). Sie hat zum Ziel, das Risiko eines Produktionsausfalls zu verringern, indem sie den Zustand eines Produktionssystems erfasst und den Produktionsprozess an diese Bedingungen anpasst. Solche Prozessregelungen werten Merkmale wie Bauteilmüdung, Abnutzung u.Ä. aus und leiten daraus Prognosen über durchzuführende Wartungsarbeiten her [42, 43].

3.1.4 Miniaturisierte Produktionssysteme

Ausgangslage und Konzept – Orientierung am Notwendigen Ausgangspunkt ist die Beobachtung, dass in der Fertigungstechnik in vielen Fällen zwischen Werkstückgröße und Maschinengröße ein Missverhältnis herrscht. Die Produktionssysteme sind zu groß, ineffizient und unflexibel. Die Miniaturisierung versucht deshalb Produktionssysteme zu verkleinern und an die Anforderungen der Prozesse anzupassen [32, 44]. Eine systematische Betrachtung des Themas fehlt bisher, sodass hier nur ein Überblick über einige anwendungsspezifische Veröffentlichungen gegeben werden kann.

Ziele der Miniaturisierung Treibende Kraft in der Entwicklung miniaturisierter Konzepte ist bislang die Mikromontage und -bearbeitung [45] sowie die Verfahrenstechnik [46]. Die Miniaturisierung verfolgt dabei hauptsächlich die in Tab. 3.1 aufgeführten Ziele.

Tab. 3.1: Ziele der Miniaturisierung und beispielhafte Umsetzungen.

Ziel	Maßnahme und Umsetzungsbeispiel
Bearbeitung komplexer Werkstücke	Einsatz kompakter Werkzeuge [44]
Senkung des Aufwandes zur Konditionierung des Umfeldes	Verkleinerung des zu konditionierenden Arbeitsraumes [47]
Höhere Energieeffizienz	Geringere, bewegte Massen [44]
Geringerer Wartungsaufwand	Einfacherer Aufbau der Fertigungssysteme [48]
Größere Flexibilität	Modulare Struktur [48]
Höhere Prozesssicherheit	Kontrollierte Prozessführung kleiner Mengen [46]

Prinzip der Miniaturisierung Im Rahmen der Miniaturisierung von Produktionssystemen kommen verschiedene Methoden und Verfahren zur Anwendung, die in Tab. 3.2 zusammengefasst sind.

Tab. 3.2: Prinzipie der Miniaturisierung.

Hohe Funktionsdichte	Kompakte Werkzeuge, kleine Arbeitsräume, Funktionsintegration [44]
Alternative Wirkprinzipie	Kinematik: Piezo-Effekte, Bimetall-Effekte, Elektromagnetische-Effekte u.A. [49] Verfahrenstechnik: Kontinuierliche Prozessführung, Nutzung der Energie der Produkte für den Prozess [46]
Geringe Produktionskapazitäten	Anpassungsfähige, modulare Anlagen, Steigerung der Produktivität durch Vervielfachung [50]

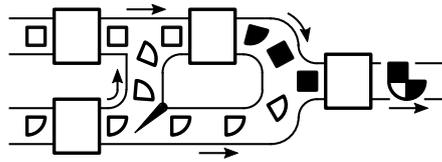
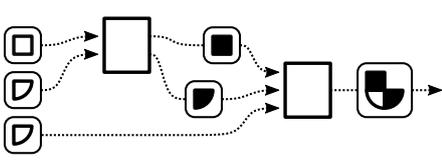
3.1.5 Parallele und vernetzte Stoffströme

Ausgangslage und Konzept – Verzweigung und Vervielfachung Die Reihenverkettung von Verarbeitungsmaschinen oder -modulen birgt zwei entscheidende Nachteile [51]:

- Stillstand der gesamten Anlage bei Stillstand eines Gliedes der Reihe bspw. durch Störung oder Umrüsten.
- Variation der Produktionskapazität nur durch die Leistungsanpassung der einzelnen Glieder der Reihe möglich.

Die Abkehr von seriellen Strukturen und die Hinwendung zu verzweigten und vervielfachten Stoffströmen versucht dieses Problem zu lösen [5]. Tab. 3.3 zeigt zwei mögliche Konzepte: Parallelisierung und Verzweigung.

Tab. 3.3: Alternative Strukturen für Stoffströme in Anlagen. Unter Verwendung von [5].

	Parallele Stoffströme	Frei vernetzte Stoffströme
		
Strukturmerkmale	Verzweigte Verarbeitungslinie: Produkte durchlaufen auf individuellem Weg nur die benötigten Verarbeitungsschritte, starre Verkettung mit Weichen.	Netzwerk von Verarbeitungsstationen: Individueller Transport der Produkte zu den Stationen, keine mechanische Verbindung der einzelnen Stationen, bahnungebundene Transporteinheiten.
Nutzen	Anpassung der Verarbeitungsmodule bei laufendem Betrieb. Rekonfiguration der Anlagenstruktur nur bei unterbrochenem Stoffstrom.	Anpassung der Verarbeitungsmodule und Rekonfiguration der Anlagenstruktur bei laufendem Betrieb.

Ziel – Reduzierung der Stillstandszeiten und skalierbare Anlagenkapazität Verzweigte Anlagenstrukturen zielen darauf ab, die Anzahl der Umrüstvorgänge und die Wirkung von Störungen einzelner Verarbeitungstationen auf die gesamte Anlage zu verringern. Viele Umrüstvorgänge entfallen, wenn Produkte die Verarbeitungstationen auf verschiedenen Wegen individuell ansteuern können. Die Stillstandszeit der gesamten Anlage verkürzt sich, wenn Produkte den Verarbeitungstationen, die außer Betrieb sind, durch alternative Wege ausweichen können [5].

Eine Anlage ist skalierbar, wenn sie ihre technischen und ökonomischen Eigenschaften behält, während ihre Produktionskapazität geändert wird [52, 53]. Eine parallele und verzweigte Anlagenstruktur ermöglicht, Anlagen zu erweitern und zu verkleinern ohne in die Funktion ihrer einzelnen Elemente einzugreifen. Auf diese Weise wird die Skalierung ökonomisch kalkulierbar.

3.2 Systembeschreibungen für Verarbeitungsanlagen

3.2.1 Einführung – Verarbeitungstechnik als Querschnittsdisziplin

Der konstituierende Gedanke der Verarbeitungstechnik Die Verarbeitungstechnik fasst stoffverarbeitende Maschinensysteme der Konsumgüterindustrie zusammen. Sie geht dabei von der Feststellung aus, dass diese Maschinen und Anlagen zwar äußerlich sehr unterschiedliche Aufgaben erfüllen, sich in den zugrundeliegenden technischen Prinzipien jedoch ähnlich sind [12].

Im weiteren Sinne bezeichnet die Verarbeitungstechnik damit die ingenieurwissenschaftliche Disziplin, die sich mit der industriellen Verarbeitung von Konsumgütern befasst. Verarbeitungsanlagen und Verarbeitungsmaschinen als technische Mittel zur Umsetzung dieser Verarbeitungsprozesse stehen hier im Fokus [6]. Im engeren Sinne behandelt die Verarbeitungstechnik die prinzipiellen technischen Verfahren und Vorgänge, die für eine zielgerichtete Veränderung dieser Güter notwendig sind. Die einzelnen Zustandsänderungen während der Verarbeitung sind in diesem Fall interessant [54].

Systemmodelle als Grundlage der wissenschaftlichen Betrachtung Eine solche verallgemeinernde Herangehensweise fordert, die Vielzahl der Spezialanwendungen unter einheitlichen Gesichtspunkten betrachten und vergleichen zu können und damit einer wissenschaftlichen Betrachtungsweise zugänglich zu machen [6]. Die Verarbeitungstechnik hat aus diesem Grund mit teils explizitem Bezug auf systemtheoretische Methoden [54, 55, 56] im Laufe der Zeit folgende Systemmodelle entwickelt:

- Die Betrachtung des Verarbeitungssystems als Blackbox: Funktionsbeschreibung.
- Die Funktionsstruktur: Vermittlung der prinzipiellen Zusammenhänge der Teilsysteme eines Verarbeitungssystems.
- Die Wirkpaarung: Beschreibung der stoffverändernden Wirkungsweisen.
- Das Innermaschinelle Verfahren: Darstellung des Verarbeitungsablaufes.
- Das Zuverlässigkeitsmodell für Verarbeitungsanlagen: Analyse und Abschätzung des Betriebsverhaltens.

Diese Modelle, ihr Zweck und Aufbau werden in den folgenden Kapiteln kurz vorgestellt.

3.2.2 Verarbeitungssystem als Blackbox

Zweck des Modells – Beschreibung der Funktion eines Verarbeitungssystems Das Modell in Abb. 3.5 ist die auf Verarbeitungssysteme angepasste Darstellung eines technischen Systems als Blackbox [6]. Es beschreibt die Funktion des Systems allein auf Grund seiner Ein- und Ausgänge ohne den inneren Aufbau und die Wirkungsweise zu berücksichtigen [7].



Abb. 3.5: Funktionsmodell eines Verarbeitungssystems. E_{St} Eingangsgröße Stoff (Verarbeitungsgut), A_{St} Ausgangsgröße Stoff (Produkt), E_E Eingangsgröße Energie, E_S Eingangsgröße Signal, U Umstände, N Nebenwirkungen. Nach [6, 57].

Funktion und Verarbeitungsaufgabe Die Funktion eines Verarbeitungssystems ist bestimmt durch die Verarbeitungsaufgabe und geht aus der verarbeitungstechnischen Aufgabenstellung hervor [6, 56]. Die Verarbeitungsaufgabe bezeichnet die Überführung der stofflichen Eingangsgröße E_{St} in die Ausgangsgröße A_{St} [57] und beschreibt damit die Gesamtfunktion des Verarbeitungssystems ohne ihren inneren Aufbau vorwegzunehmen [58]. E_{St} sind die Verarbeitungsgüter, die dem Verarbeitungssystem zugeführt werden, und A_{St} die Produkte, die als Ergebnis der Verarbeitung entstehen. Die Zuführung von Energie E_E zur Deckung des Energiebedarfes und von Signalen E_S zur Steuerung und Regelung ist für die Durchführung der Funktion notwendig. Die Umstände U , wie Temperatur oder Feuchtigkeit, sind Größen, die auf die Funktionserfüllung einwirken. Die Nebenwirkungen N , wie Lärm oder Schwingungen, sind Größen, die die unbeabsichtigte Wirkung auf die Umwelt beschreiben [57].

Abweichende Definitionen von Verarbeitungsaufgabe und Verarbeitungsfunktion In einigen Quellen werden die Begriffe Verarbeitungsaufgabe und Verarbeitungsfunktion gleichbedeutend als Bezeichnung für die gewünschte Zustandsänderung am Verarbeitungsgut verstanden [59, 6]. An anderer Stelle wird zwischen der Verarbeitungsfunktion als vollzogene Zustandsänderung und der Verarbeitungsaufgabe als geforderte Zustandsänderung unterschieden [6].

Betrachtungseinheiten des Modells Verarbeitungssysteme können je nach Festlegung der Systemgrenzen Verarbeitungsanlagen, -maschinen, -module oder als kleinste Einheit einzelne Wirkpaare sein und durch das Modell gleichermaßen beschrieben werden. Module und Wirkpaare erfüllen lediglich Teilfunktionen und das Ergebnis der Verarbeitung ist in diesem Fall lediglich ein Zwischenprodukt [6, 56]. Tab. 3.4 führt die verschiedenen Verarbeitungssysteme auf, wobei die Unterscheidung nicht immer eindeutig ist [5].

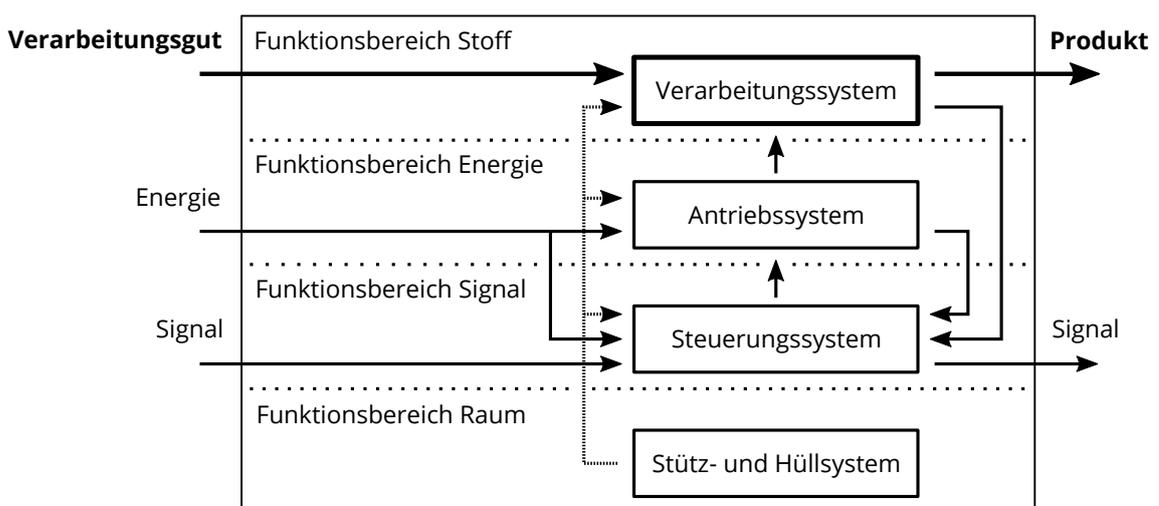
Tab. 3.4: Betrachtungseinheiten für Verarbeitungssysteme. Unter Verwendung von [6, 57, 56].

	Struktur	Stoffausgang	Betriebsart
Verarbeitungsanlage	Verkettete Verarbeitungsmaschinen	Produkt	autark
Verarbeitungs- maschine	Bauliche Einheit von Modulen oder Wirkpaaren	Produkt oder Zwischenprodukt	autark
Verarbeitungsmodul Funktionsgruppe	Bauliche Einheit von Wirkpaaren	Zwischenprodukt	teilweise autark
Wirkpaar	Kleinste verarbeitungs-technische Einheit	Zwischenprodukt	nicht autark

3.2.3 Funktionsstruktur von Verarbeitungssystemen

Zweck des Modells – Darstellung des Zusammenwirkens der Funktionselemente Die Funktionsstruktur stellt qualitativ das Zusammenwirken der Funktionselemente eines Verarbeitungssystems dar [6]. Es zerlegt ein Verarbeitungssystem in verschiedene Funktionsbereiche, Teilsysteme und Teilfunktionen, die einzeln beschreibbar sind. Dieses Vorgehen erlaubt es, bei Kenntnis des Verhaltens der einzelnen Elemente Rückschlüsse auf das Verhalten des gesamten Systems zu ziehen. Das Modell dient hauptsächlich Analyse-zwecken [60].

Funktionsschema – Die allgemeine Funktionsstruktur von Verarbeitungssystemen In den meisten Verarbeitungssystemen treten wiederkehrende Funktionsgruppen auf, so dass sich eine allgemeine Funktionsstruktur etabliert hat. Sie wird als Funktionsschema bezeichnet und ist in Abb. 3.6 dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass der Begriff Verarbeitungssystem in diesem Schema eine andere, engere Bedeutung erhält als bisher. Je nach untersuchtem Aspekt kann die Funktionsstruktur eines Verarbeitungssystems anders ausfallen [57, 61].

**Abb. 3.6:** Allgemeines Funktionsschema von Verarbeitungssystemen. Nach [61].

Funktionsbereiche, Teilsysteme und Teilfunktionen Das Funktionsschema in Abb. 3.6 unterteilt die Gesamtfunktion eines Verarbeitungssystems in vier Teilfunktionen. Diese Teilfunktionen werden innerhalb ihres Funktionsbereiches von je einem Teilsystem umgesetzt [6]. Tab. 3.5 führt die entsprechenden Zuordnungen auf.

Tab. 3.5: Zuordnung der Funktionsbereiche, Teilsysteme und Teilfunktionen. Nach [6].

Funktionsbereich	Teilsystem	Teilfunktion
Stoff	Verarbeitungssystem	Durchführung der Stoffverarbeitung und des Stoffflusses
Energie	Antriebssystem, Energiebereitstellungssystem	Bereitstellung der Energie für das Verarbeitungssystem in erforderlicher Art, Form und Menge
Signal	Steuerungssystem	Gewinnung und Verarbeitung von Signalen zur Steuerung des Verarbeitungssystems; Einwirkung auf das Antriebssystem, Information des Anlagenführers
Raum	Stütz- und Hüllsystem	Sicherung der räumlichen Zuordnung der Elemente der Teilsysteme; Stützung, Führung, Lagerung, Umhüllung

3.2.4 Die Wirkpaarung

Zweck des Modells – Bewertung und Optimierung von Verarbeitungsvorgängen Ein Verarbeitungssystem kann entlang des Verarbeitungsablaufes in Funktionseinheiten unterteilt werden, deren kleinstes Element die in Abb. 3.7 dargestellte Wirkpaarung ist [54]. Sie ist das verarbeitungstechnische Teilsystem, das eine nicht weiter teilbare Funktion im Stofffluss selbständig durchführt [58]. Dieses Modell stellt abstrahiert die Wirkzusammenhänge zwischen Verarbeitungsgut und technischer Ausrüstung dar. Es dient dem Zweck der Systematisierung, des Vergleichs und der zielgerichteten Optimierung verarbeitungstechnischer Vorgänge.

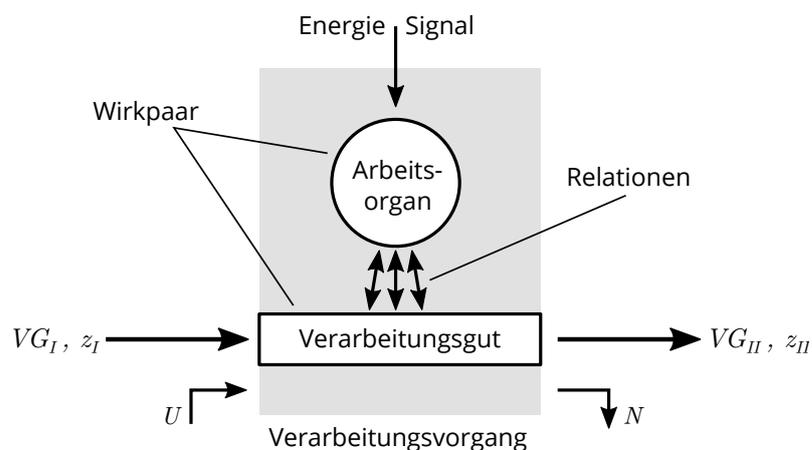


Abb. 3.7: Modell einer Wirkpaarung: VG_I Verarbeitungsgut im Zustand z_I , VG_{II} Verarbeitungsgut im Zustand z_{II} , U Umstände, N Nebenwirkungen. Nach [7].

Elemente und Aufbau der Wirkpaarung Eine Wirkpaarung besteht aus den beiden Elementen Verarbeitungsgut VG und Arbeitsorgan AO sowie den Relationen zwischen ihnen. Das Arbeitsorgan wirkt durch gezielten Energieeintrag auf das Verarbeitungsgut ein und ändert seinen Zustand. Gemeinsam bilden sie das Wirkpaar. Die Relationen beschreiben die dabei auftretenden Wechselwirkungen. Die Wirkstelle bezeichnet den Ort der unmittelbaren Wechselwirkung, an dem das Zusammenwirken von Verarbeitungsgut und Arbeitsorgan erfolgt. Die quantitative Formulierung der zeitlichen, räumlichen und energetischen Zusammenhänge zwischen den Einwirkung des Arbeitsorgans und der Zustandsänderung heißt Verarbeitungsvorgang und wird von den Eigenschaften des Arbeitsorgans, des Verarbeitungsgutes und der Umwelt beeinflusst. Letztere werden Einflussgrößen des Verarbeitungsvorgangs genannt [58, 6]. Dieser Begriff ist von der Verarbeitungsaufgabe zu unterscheiden, die die beabsichtigte Zustandsänderung des Verarbeitungsgutes beschreibt [59]. Als Wirkprinzip werden die speziell ausgelegten physikalischen, chemischen oder biologischen Grundgesetze bezeichnet, die im Verarbeitungsvorgang die geforderte Wirkung hervorrufen [57, 62].

Funktion und Verhalten der Wirkpaarung Die Hauptfunktion der Wirkpaarung ist die Überführung des Verarbeitungsgutes VG_I im Zustand I in das Verarbeitungsgut VG_{II} im Zustand II , wobei sie von den Umständen U beeinflusst wird und Nebenwirkungen N hervorruft [58]. Damit kennzeichnet die Übergangsfunktion

$$VG_I + U \longrightarrow VG_{II} + N \quad (3.1)$$

das Verhalten einer Wirkpaarung [63]. Die Zustände I und II können als Zustandsvektoren $z_I = (z_{I,1} \ z_{I,2} \ \dots \ z_{I,n})^\top$ und $z_{II} = (z_{II,1} \ z_{II,2} \ \dots \ z_{II,n})^\top$ aufgefasst werden [58]. Die Transformation

$$VG_{II} = f(VG_I): z_I \longrightarrow z_{II} \quad (3.2)$$

beschreibt dann den Vollzug der Verarbeitungsfunktion [63]. Die Verarbeitungsaufgabe legt diese Transformation fest. Sie bestimmt eine eindeutige Zahl von Endzuständen, in die der Anfangszustand überführt wird, und gibt die Komponenten der Zustandsvektoren vor, die dabei geändert werden [58].

3.2.5 Das Innermaschinelle Verfahren

Zweck des Modells – Synthese der Verarbeitungsabläufe Das Innermaschinelle Verfahren ist die spezielle Funktionsstruktur des Teilsystems Verarbeitungssystem innerhalb des Funktionsschemas und bildet die Teilfunktionen zur Erfüllung der Verarbeitungsaufgabe in geordneter Abfolge ab. Es beeinflusst die Gesamtstruktur von Verarbeitungsmaschinen und -anlagen wesentlich und nimmt damit eine herausragende Stellung im Entwicklungsprozess ein, an dessen Anfang es steht. Als Entwicklungsmethode dient es vorrangig zum lösungsneutralen Entwurf der Verarbeitungsablaufes, ohne die konstruktive Ausführung vorwegzunehmen [7, 58].

Aufbau und Abstraktionsstufen Das Modell des Innermaschinellen Verfahrens besteht aus verknüpften Elementen. Diese Elemente sind je nach Abstraktionsstufe entweder abstrakte Vorganggruppen oder konkrete Wirkpaarungen. Damit enthält das Modell verschiedene Aussagen. Ersterer Fall beschreibt die Abfolge der Teilfunktionen als geordnete Folge von Zustandsänderungen, letzterer die angewendeten technischen Mittel als zeitliche und strukturelle Ordnung der Wirkpaarungen [6, 7, 58].

Grundlegende Funktionsstrukturen Das Verhalten des Verarbeitungssystems hängt sowohl von den Elementen, den Wirkpaarungen, als auch von deren Verknüpfung, dem Innermaschinellen Verfahren, ab [58]. Tab. 3.6 führt die Verknüpfungsarten und ihre Charakteristiken auf.

Tab. 3.6: Grundlegende Funktionsstrukturen des Innermaschinellen Verfahrens. VG Verarbeitungsgut, WP Wirkpaarung. Unter Verwendung von [54].

Parallelschaltung gleicher Wirkpaarungen	Parallelschaltung verschiedener Wirkpaarungen	Reihenschaltung gleicher Wirkpaarungen	Reihenschaltung verschiedener Wirkpaarungen
Erhöhung des Ausstoßes ohne Vergrößerung der Beanspruchung des Verarbeitungsgutes	Nutzung von Nebenfunktionen, Verringerung der Anzahl der Arbeitsorgane und Antriebe	Verlängerung der Einwirkzeit	Auflösung eines komplexen Vorganges in Teilvorgänge

3.2.6 Zuverlässigkeitsmodell für Verarbeitungsanlagen

Zweck des Modells – Abschätzung der Systemzuverlässigkeit Das Betriebsverhalten einer Verarbeitungsanlage wird einerseits von dem Verhalten der Maschinen, aus der sie besteht, und andererseits von der Verkettungsstruktur, dem Anlagenlayout, beeinflusst. Die Systemzuverlässigkeit einer Anlage ist darin ein bedeutendes Qualitätsmerkmal und hängt maßgeblich von Festlegungen ab, die schon in der Projektierungsphase getroffen werden. Das Zuverlässigkeitsmodell dient dazu, diese Kenngröße früh abschätzen zu können und in die Optimierung des Anlagenlayouts einfließen zu lassen [51].

Ein stochastisches Modell – Zeitgliederung und Verfügbarkeit Dem Zuverlässigkeitsmodell liegen nicht einzelne Ereignisse des Anlagenbetriebs sondern Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Betriebszustände zugrunde. Dieses Vorgehen wird auch in andere Bereichen des Maschinen- und Anlagenbaus angewendet und ist in verschiedenen Standards dokumentiert [64, 65]. Grundlage dieser stochastischen Betrachtung ist die Aufgliederung der Arbeitszeit in Betriebszeit und Qualitätszeit [56, 51]:

- Betriebszeit t_B : Für die Produktion eingeplante Zeit, ausgenommen geplanter Stillstandszeiten z.B. für Wartung und Rüstung.
- Qualitätszeit t_q : Zeit, in der qualitätsgerechte Produkte hergestellt werden.

Die wichtigste Zuverlässigkeitskenngröße ist die Verfügbarkeit V . Sie bildet die reale Produktionskapazität eines Verarbeitungssystems ab und ist als Wahrscheinlichkeit definiert, ein Verarbeitungssystem zu einem bestimmten Zeitpunkt in Funktion vorzufinden [51]. Im einfachsten Fall einer einzelnen Maschine ergibt sich die Verfügbarkeit mit

$$V = \frac{Q_t}{Q_r} = \frac{t_q}{t_B} \quad (3.3)$$

aus der tatsächlichen Ausbringung Q_t infolge des realen Ausfallverhaltens und der rechnerischen Ausbringung Q_r bei störungsfreiem Betrieb oder den Zeitanteilen der Arbeitszeit [55]. Für Anlagen ist die Berechnung der Verfügbarkeit aufwändig und ab einer bestimmten Zahl verketteter Maschinen analytisch nicht mehr durchführbar [51].

Elemente des Modells – Maschinen und Speicher Das Zuverlässigkeitsmodell unterscheidet zwischen Maschinen mit konstanter und variabler Ausbringung sowie Speichern (siehe Abb. 3.8). Es betrachtet ausschließlich Elemente des Stoffflusses, die ein Ausfallverhalten zeigen. Verkettungselemente werden in diesem Sinne als störungsfrei angesehen und nicht berücksichtigt. Maschinen und Speicher sind durch die stochastische Größe Verfügbarkeit beschrieben [55].

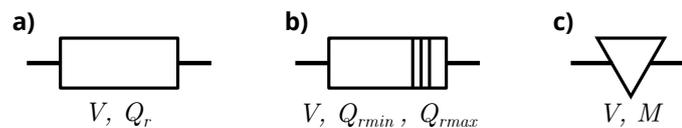


Abb. 3.8: Strukturelemente des Zuverlässigkeitsmodells. Nach [55]. a) Maschine mit konstanter Ausbringung Q_r , b) Maschine mit variabler Ausbringung im Stellbereich $Q_{rmin} \dots Q_{rmax}$, c) Speicher mit Fassungsvermögen M , V Verfügbarkeit.

Verhalten verketteter Elemente Die Verkettung von Verarbeitungsmaschinen zu Anlagen bewirkt, dass Maschinen innerhalb einer Anlage ein anderes Verhalten zeigen als im separaten Betrieb. So ergibt sich die Qualitätszeit t_q eines isoliert betrachteten Elements allein aus seiner Betriebszeit t_B und seiner Ausfallzeit t_A :

$$t_q = t_B - t_A \quad (3.4)$$

Wohingegen die Qualitätszeit eines Elements im Verbund mit anderen zusätzlich von der Stillstandszeit t_S aufgrund des Ausfalls anderer Elemente abhängt [51]:

$$t_q = t_B - (t_A + t_S) \quad (3.5)$$

Das Betriebsverhalten einer Anlage ist demzufolge von seiner Verkettungsstruktur abhängig. Tab. 3.7 zeigt die vier prinzipiellen Strukturen und ihre Eigenschaften. In der Praxis sind Mischformen üblich [51].

Tab. 3.7: Prinzipielle Verkettungsarten von Elementen und ihre Eigenschaften. Q_r Rechnerische Ausbringung der gesamten Struktur, $Q_{r,i}$ rechnerische Ausbringung eines Elements, V_M Mengenverfügbarkeit der gesamten Struktur, $V_{M,i}$ Mengenverfügbarkeit eines Elementes. Unter Verwendung von [55].

Reihenschaltung ohne Speicher	Reihenschaltung mit Speicher	Parallelschaltung ohne Reserve	Parallelschaltung mit Reserve
Sofortiger Stillstand der Anlage bei Ausfall eines Elements	Zeitverzögerter Stillstand bei Ausfall eines Elements	Verminderte Ausbringung bei Ausfall eines Elements	Ausgleich eines ausgefallenen Elements durch ein anderes
$Q_r = Q_{r,i}$	$V_M < V_{M,i}$	$Q_r = \sum Q_{r,i}$	$V_M = V_{M,i}$

4 Präzisierung der Aufgabenstellung

4.1 Allgemeines Lastenheft

Das Ergebnis der Marktuntersuchung in Kap. 2 ist eine Liste mit Defiziten der aktuell verfügbaren Anlagensysteme für Verarbeitungsprozesse. Auf Grundlage dieser Liste können Ziele für die Neugestaltung von Verarbeitungsanlagen formuliert werden, die sich unter den Aspekten Skalierbarkeit, Rekonfigurierbarkeit, Anpassungsfähigkeit und Integrationsfähigkeit gliedern. Im Rahmen eines Lastenheftes stellt Tab. 4.1 entlang dieser Gestaltungsziele allgemeine Anforderungen für Verarbeitungsanlagen auf.

Tab. 4.1: Grundlegende Anforderungen an Verarbeitungssysteme, allgemeines Lastenheft.

Aspekt	Anforderung
Skalierbare Anlagensysteme	Unterschiedliche Anlagenkapazitäten: Verschiedene Stufen der Nennausbringung auf Basis eines Anlagensystems
	Verschiedene Preissegmente: Verschiedene Stufen der technischen Ausstattung und Anlagenfunktion
Rekonfigurierbare Anlagenstrukturen	Anpassung an neue Produkte und Prozesse: Austauschbare Ausrüstung, erweiterbare Funktion
Anpassungsfähige Technologie	Variable Produktivität der Anlage bei konstanter Verarbeitungsqualität: Einstellbares Optimum der Nennausbringung
	Große Variantenvielfalt der verarbeitbaren Produkte
	Stabile Prozesse unter veränderlichen Produktionsbedingungen
Integrierbare Anlagenkonzepte	Verwendung für verschiedene Produktionsweisen: Massenproduktion, Variantenfertigung und individuelle Fertigung
	Einbindung in bestehende Anlagen
	Effiziente Anlagenentwicklung bei großer Variantenvielfalt: Standardisierung der Entwicklungsprozesse

4.2 Präzisierte Aufgabenstellung

Ziel der Diplomarbeit Es ist eine Empfehlung für die Gestaltung von Verarbeitungsanlagen zu erstellen. Sie soll Richtlinien für die Struktur ihres Layouts sowie für die Leistung, Funktion, Abgrenzung und Kombination ihrer verarbeitungstechnischen Komponenten geben. Das Konzept muss den Randbedingungen der Konsumgüterproduktion genügen und Lösungen für die drei unterschiedlichen Produktionsweisen

- Massenfertigung produktorientierter Massengüter,
- Serienfertigung marktorientierter Varianten und
- industrielle Einzelanfertigung kundenorientierter Konfigurationen

ermöglichen. Insbesondere sind dafür die grundlegenden Anforderungen aus dem allgemeinen Lastenheft (siehe Tab. 4.1) nach

- Skalierbarkeit,
- Rekonfigurierbarkeit,
- Anpassungsfähigkeit und
- Integrationsfähigkeit

zu erfüllen. Die Ergebnisse sind an einem konkreten Anwendungsbeispiel aus der Praxis zu untersuchen.

Präzisierung der Teilaufgaben Es ist eine umfassende Betrachtung des Systems Verarbeitungsanlage aus der Sichtweise der Systemtheorie durchzuführen und daraus Gestaltungsprinzipien für Verarbeitungsanlagen herzuleiten. Dazu sollen folgende Schritte bearbeitet werden:

1. Zunächst müssen die Methoden der Systemtheorie, ihre Beschreibungsmittel für die Funktion, Struktur, Eigenschaften und das Verhalten von Systemen in einer Literaturrecherche erarbeitet werden.
2. Die allgemeinen, systemtheoretischen Erkenntnisse sind anschließend auf das System Verarbeitungsanlage zu übertragen und mit den bekannten Systemmodellen der Verarbeitungstechnik abzugleichen. Gegebenenfalls sind Anpassungen an den Modellen vorzunehmen oder neue Modelle zu entwickeln. Die Modelle müssen an einem Anwendungsbeispiel geprüft und veranschaulicht werden.
3. Der aktuelle Stand des Verarbeitungsmaschinenbaus und die Forderungen der Konsumgüterproduktion aus dem allgemeinen Lastenheft sind mit Hilfe der erarbeiteten Systemmodelle zu untersuchen und zu vergleichen. Aus den Ergebnissen ist daraufhin ein allgemeines Pflichtenheft mit Gestaltungsprinzipien für ein Anlagenkonzept zu erstellen. Ein exemplarisches Lösungskonzept für das Anwendungsbeispiel ist zu erstellen.
4. In einer ökonomischen Analyse sind die Gestaltungsprinzipie mit wirtschaftlichen Kennzahlen in Verbindung zu bringen und ihr Einfluss auf diese Kennzahlen abzuschätzen.
5. Das Fazit fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf weiterführende Forschungsfragen und Entwicklungsaufgaben.

4.3 Anwendungsbeispiel der Untersuchungen

Dokumentation der Anlage und Untersuchungsschwerpunkt Diese Arbeit verwendet als Anwendungsbeispiel eine Verpackungsanlage der Theegarten-Pactec GmbH & Co. KG. Dazu stehen eine Layoutzeichnung der Anlage sowie Angebotsunterlagen zur Verfügung, die Angaben über die Verarbeitungsaufgabe der Anlage, die Funktion der einzelnen Komponenten und zur Anlagenverfügbarkeit enthalten. Alle Unterlagen befinden sich auf der Daten-CD, die dieser Arbeit beigelegt ist. Auf Grundlage dieser Dokumente sind Untersuchungen auf Anlagenebene möglich, nicht jedoch die Analyse der einzelnen Maschinen.

Verarbeitungsfunktion der Verpackungsanlage Die Verpackungsanlage verpackt 8 verschiedene Sorten Schokoladenprodukte unterschiedlicher Zusammensetzung, Abmessungen und Gewichte. Die Produkte werden in Gruppen von 8 bis 10 Reihen und 15 bis 22 Produkte pro Reihe zugeführt. Die Ausbringung der vorgelagerten Anlagen beträgt 11 bis 14 Gruppen pro Minute. 5 Produktvarianten erhalten einen Doppeldrehschlag, 3 einen Buncheinschlag. Die Anlage vereinzelt die Produkte, prüft sie auf metallische Verunreinigungen, schleust verunreinigte Produkte aus und verpackt die Qualitätsprodukte. Abb. 4.1 zeigt eine Produktvariante und seine Anordnung am Eingang der Anlage.

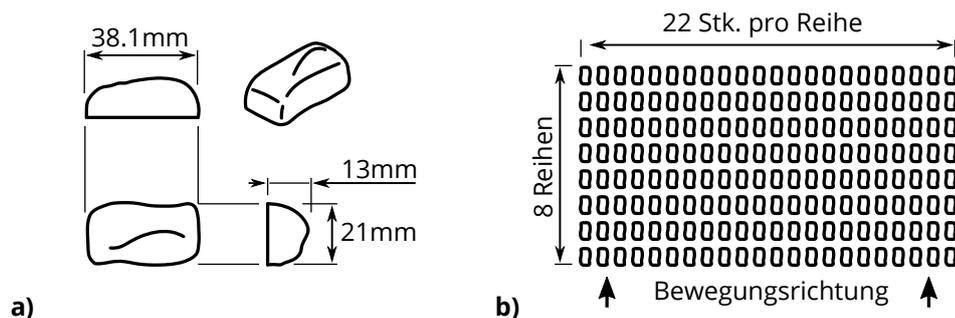


Abb. 4.1: Schematische Darstellung der Produktvariante A der Angebotsdokumentation. a) Geometrie des Schokoladenproduktes. b) Gruppierung der Schokoladenprodukte.

Layout und Betriebsweise der Verpackungsanlage Das Anlagenlayout (siehe Abb. 4.2) besteht aus vier parallelen Produktionssträngen, die in je einer Abgabestation CTS-300 von der Hauptlinie abzweigen. Drei Stränge teilen sich wiederum in je zwei Zweige auf. Der erste Zweig enthält eine Verpackungsmaschine für Doppeldrehschlag MCC und der zweite eine Verpackungsmaschine für Buncheinschlag EMC₁. Ein Strang zweigt sich nicht auf und verfügt lediglich über ein Verpackungsmaschine MCC. Nur die Verpackungszweige der selben Einschlagart sind gleichzeitig in Betrieb. Die anderen Zweige stehen währenddessen still. Es besteht die Möglichkeit die Anlage um zwei Zweige zu erweitern.

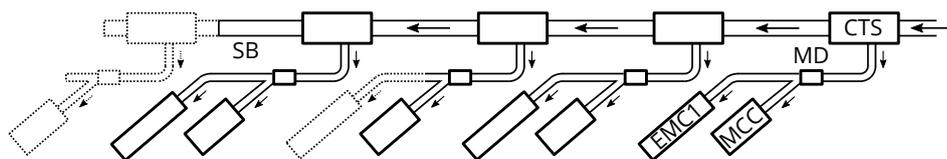


Abb. 4.2: Schematische Darstellung des Layouts der Verpackungsanlage der Angebotsdokumentation. CTS Abgabestation CTS-300, MD Station für Metalldetektion, MCC Verpackungsmaschine für Doppeldrehschlag, EMC₁ Verpackungsmaschine für Buncheinschlag, SB Speicherband. Optionale Ausbaustufen sind gepunktet dargestellt.

5 Grundzüge des systemtheoretischen Ansatzes

5.1 Systemtheorie als Universalwissenschaft

Ziel systemtheoretischer Betrachtungen Das systemtheoretische Denken geht von der Annahme aus, dass sich die Wirklichkeit nicht durch einzelne, spezialisierte Ansätze beschreiben lässt. Es sieht Analogien und Ähnlichkeiten sowohl in den unterschiedlichen Phänomenen der Wirklichkeit als auch in den wissenschaftlichen Disziplinen, die sich mit ihnen befassen [66]. Die Systemtheorie bemüht sich daher um die vergleichende Untersuchung von Systemen und um die Formulierung von allgemeinen Prinzipien, die für Systeme grundsätzlich gelten. Sie hat darin zwei Hauptaufgaben: Die Analyse der einzelnen Teile eines Systems und die Analyse der Organisationsgesetze, nach denen diese zusammengesetzt sind [18, 67].

Interdisziplinärer Ansatz Ausgehend von den Überlegungen des Mathematikers WIENER [68] und des Biologen VON BERTALANFFY [13, 67] entstanden ab den 1940er Jahren Abhandlungen zur Theorie von Systemen. Sie entstammen den unterschiedlichsten Fachgebieten und ordnen sich um zwei Schwerpunkte [18, 69]:

- Allgemeine Systemtheorie: Untersuchung der Beziehung zwischen den Teilen eines Systems und seiner Umwelt.
- Kybernetik: Analyse des Verhalten von Systemen.

Die vorliegende Arbeit verzichtet auf eine Darstellung der unterschiedlichen, theoretischen Strömungen und weist nur an zentralen Stellen explizit auf einzelne Autoren hin.

5.2 Modellbildung mit Hilfe systemtheoretischer Methoden

Bildung von Systemmodellen Für die Beschreibung beliebiger Teile der Wirklichkeit, so auch für die Analyse und Synthese technischer Systeme, können Modelle aufgestellt werden [18]. Abb. 5.1 zeigt die Komponenten einer solchen Modellbildung. Hierbei sind zwei Eigenschaften jeder systemtheoretischen Betrachtung unbedingt zu beachten [70, 71]:

- Ein Systemmodell bildet immer nur einen Ausschnitt der Wirklichkeit ab.
- Ein Systemmodell ist immer von der Absicht der Person abhängig, die es aufstellt.

In diesem Rahmen dient die Systemtheorie als formales Werkzeug, das mit Hilfe spezifischer Theorien der jeweiligen Problemstellung interpretiert wird. Das formale Modell beruht dabei auf den grundlegenden Gesetzen, mit denen sich die Allgemeine Systemtheorie und die Kybernetik befasst [71]. Die spezifischen Theorien umfassen in dieser Arbeit die Erkenntnisse aus der Verarbeitungstechnik und des Maschinenbaus, die im Stand der Wissenschaft und Technik angedeutet wurden.

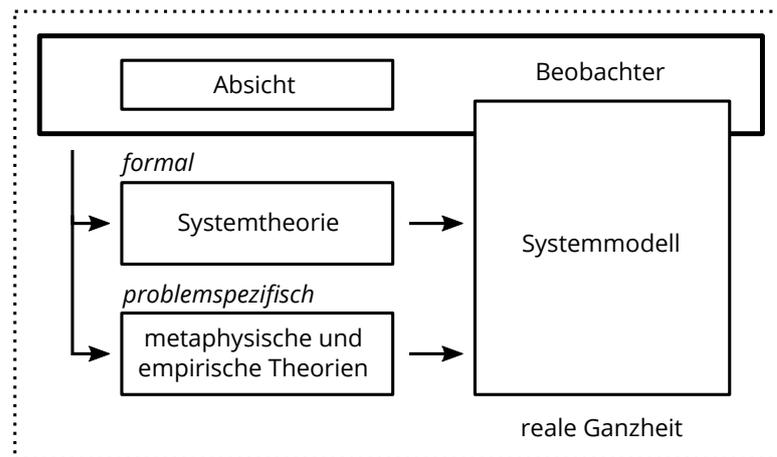


Abb. 5.1: Komponenten der systemtheoretischen Modellbildung. Nach [71].

Notwendige Vereinfachung der Modelle und Einschränkung der Aussagequalität Die Begrenztheit des wissenschaftlich Erfassbaren führt notwendigerweise zu einer vereinfachten Abbildung des beobachteten Systems und damit zu Abweichungen von der Wirklichkeit [72]. Damit entsteht bei jeder Modellbildung ein Konflikt zwischen der Einfachheit des Systemmodells und der Güte seiner Aussage [70]. Darüber hinaus beeinflusst die Zweckorientierung einer Untersuchung die Aussagequalität schon vor der Erstellung des Systemmodells. Sie definiert die Problemstellung durch verfälschende Zielvorgaben und Schwerpunktsetzung und mindert damit die Aussagequalität eines Modells [73]. Exemplarisch kann dieser Zusammenhang an dem in Kap. 3.2.6 vorgestellte Modell für das Betriebsverhalten von Verarbeitungsanlagen gezeigt werden. Das Modell beschränkt die Problemstellung auf den Einfluss der Verkettungsstruktur auf das Betriebsverhalten der Anlage und bezieht das Verhalten der einzelnen Verarbeitungsmaschinen nicht ein. Darüber hinaus reduziert es das Betriebsverhalten auf die Zuverlässigkeitsgröße Verfügbarkeit, die zudem in einer statistischen Näherung ermittelt wird.

5.3 Der Systembegriff

Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile Für das Verständnis eines Untersuchungsgegenstandes genügt es nicht, ihn in seine Einzelteile zu zerlegen, und von der Beschaffenheit der Einzelteile auf das Ganze zu schließen [70]. Vielmehr zeigen ein Objekt und seine Teile in Isolation ein anderes Verhalten als im Zusammenhang und müssen deshalb gemeinsam betrachtet werden [67, 71]. Dieser Gedanke liegt dem Begriff System zugrunde.

Definition und zentrale Begriffe Der Systembegriff ist auf beliebige Bereiche der Wirklichkeit anwendbar, auf konkrete, materielle Systeme, bspw. Straßennetze oder Tierzellen, ebenso wie auf abstrakte, ideelle Systeme, bspw. Arbeitsabläufe oder Zielvereinbarungen [18, 70]. Ein System definiert sich wie folgt [67, 74, 71]:

- Ein System S ist ein Ganzes.
- Es besteht aus Teilen, den Elementen e .
- Seine Teile stehen durch die Relationen r in Beziehung zueinander.

Ein System erscheint dadurch als Ganzes, dass es sich von seiner Umwelt U abgrenzt [70] und ein Ziel verfolgt oder einem Zweck dient, also eine Funktion hat [74, 75]. Es unterscheidet sich von einer Menge von Objekten, indem seine Elemente in einer geordneten Beziehung zueinander stehen (siehe Abb. 5.2), also eine Struktur bilden [18, 75]. Ein Element kann selbst als System betrachtet werden und ein System wiederum kann Element eines anderen Systems sein, wodurch eine Hierarchie entsteht [69, 76].

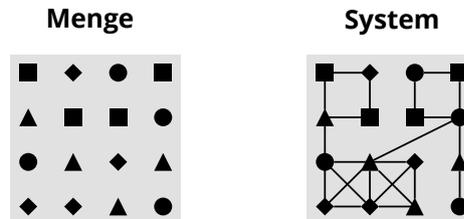


Abb. 5.2: Menge: Ansammlung von Objekten. System: Anzahl von Elemente, die zueinander in Beziehung stehen.

Minimalannahmen der Systemtheorie Der Systembegriff lässt sich entlang der eingeführten, zentralen Begriffe auf drei fundamentale Annahmen zurückführen [71]:

- Ein System hat eine äußere Charakteristik: Seine Funktion.
- Ein System hat eine innere Ordnung: Seine Struktur.
- Ein System kann in den Zusammenhang eines weitreichenderen Gefüges gebracht werden: Sein Platz in der Hierarchie.

Diese Minimalannahmen bilden im folgenden Kapitel den Ausgangspunkt für die Betrachtung des Aufbaus und des Verhaltens von Systemen.

6 Aufbau und Eigenschaften von Systemen

6.1 Systemaufbau und Modelle

6.1.1 Funktion

Zweck eines Funktionsmodells – Definition der Funktion Das Funktionsmodell dient als Ausgangspunkt der meisten systemtheoretischen Untersuchungen. Es definiert die Funktion eines Systems ohne seinen inneren Aufbau zu berücksichtigen. Die Form reicht von verbalen Formulierungen, die den Zweck eines Systems erklären, bis zu mathematischen Gleichungen, die den Zusammenhang zwischen seinen Merkmalen festlegen [71].

Aufbau des Modells – Attribute und Funktionen Ein System besitzt im allgemeinen Fall (siehe Abb. 6.1) eine Menge X der Eingangsgrößen, durch die die Umwelt auf das System einwirkt, eine Menge Y der Ausgangsgrößen, durch die das System auf die Umwelt wirkt und eine Menge Z innerer Parameter oder Zustandsgrößen. Diese Größen werden als Merkmale oder Attribute eines Systems bezeichnet. Die Funktionen der Menge F stellen die Beziehung zwischen den Attributen her [71, 70]. Es werden drei Arten von Funktionen unterschieden [71, 77]:

- Übertragungs- oder Ergebnisfunktionen F_{XY} : Umwandlung einer Eingangs- in eine Ausgangsgröße.
- Überföhrungsfunktionen F_{XZ} : Eintrag einer Eingangs- in eine Zustandsgröße.
- Markierungsfunktionen F_{ZY} : Abbildung einer Zustands- auf einer Ausgangsgröße.

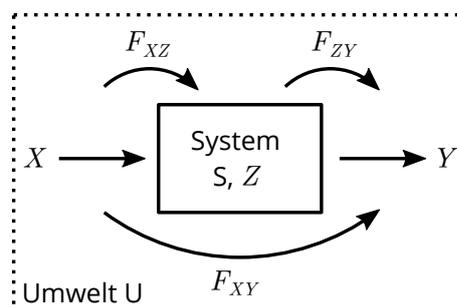


Abb. 6.1: Allgemeines Funktionsmodell: X Eingangsgrößen, Y Ausgangsgrößen, Z Zustandsgrößen, F_{XY} Übertragungsfunktion, F_{XZ} Überföhrungsfunktion, F_{ZY} Markierungsfunktion. In Anlehnung an [71, 70].

Zustand und Verhalten Die Ausprägung aller Merkmale zu einem bestimmten Zeitpunkt bezeichnen den Zustand eines Systems und damit dessen Verfassung zu diesem Zeitpunkt. Das Verhalten eines Systems bezeichnet die möglichen Reaktionen, die es gegenüber Einflüssen aus der Umwelt zeigen kann [69, 77].

6.1.2 Struktur

Zweck eines Strukturmodells – Beschreibung des Beziehungsgefüges Der bereits erwähnte Grundsatz, dass zum Verständnis eines Systems die Kenntnis seiner Einzelteile allein nicht ausreicht, erfordert ein Modell, das ihr Zusammenwirken beschreibt. Zur Beschreibung der Systemelemente wurde im vorangegangenen Kapitel schon das Funktionsmodell vorgestellt. Die Aufgabe des strukturellen Systemmodells besteht nun darin, das Beziehungsgefüge zwischen diesen Elementen abzubilden [71, 13].

Aufbau des Modells – Elemente und Relationen Das strukturelle Systemmodell baut auf Elementen auf, deren innerer Aufbau nicht berücksichtigt wird, und auf Relationen, die die Eingänge und Ausgänge der Elemente verknüpfen. Die Relationen bilden die Struktur eines Systems. Formal besteht ein System damit aus

- einer Anzahl n_e an Elementen e_i , mit $i = 1 \dots n_e$, und
- einer Anzahl n_r an Relationen r_i , mit $i = 1 \dots n_r$.

Jedes Element e_i ist dabei durch die Mengen X_i , Y_i und Z_i seiner Attribute sowie die Menge F_i seiner Funktionen definiert. Jede Relation weist einer Eingangsgröße x_{ij} eine Ausgangsgröße y_{ij} zu [72, 71]. Abb. 6.2 zeigt ein exemplarisches Strukturmodell.

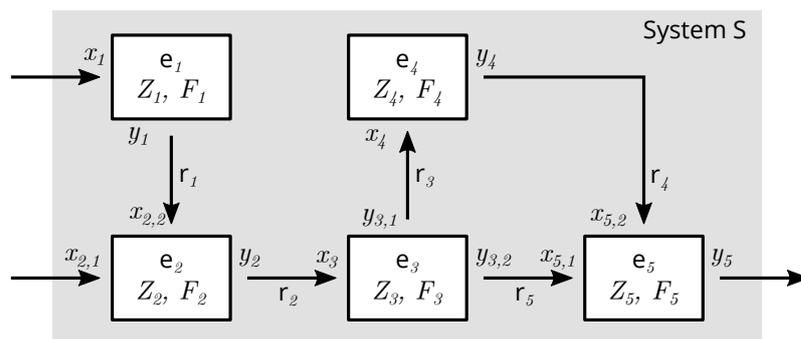


Abb. 6.2: Strukturmodell eines System S: e_i Elemente, r_i Relationen, Z_i Zustandsgrößen des Elements e_i , $x_{i,j}$ j -te Eingangsgröße des Elements e_i , $y_{i,j}$ j -te Ausgangsgröße des Elements e_i , F_i Funktionen des Elements e_i . Unter Verwendung von [72, 70].

Aufbaustruktur und Ablaufstruktur Relationen lassen sich hinsichtlich zwei verschiedener Sichtweisen interpretieren. Eine Relation kann einen sachlichen Zusammenhang zwischen zwei Elementen ausdrücken oder eine zeitliche Anordnung. Diese Deutungsmöglichkeiten führen zu zwei unterschiedlichen Strukturmodellen, die unbedingt unterschieden werden müssen [78, 70]:

- Die Aufbaustruktur stellt sachliche Zusammenhänge, Abhängigkeiten, statische Beziehungen und Wirkungseinflüsse dar.
- Die Ablaufstruktur zeigt zeitliche Anordnungen, Prozesse oder logische Abfolgen.

Funktionsbestimmtheit und Äquifunktionalität Die Abhängigkeit der Eigenschaften eines Systems von dem Beziehungsgefüge seiner Elemente, führt zum Grundsatz der Funktionsbestimmtheit. Demnach bestimmt die Struktur eines Systems seine Funktion und eine Veränderung der Struktur verursacht eine Änderung der Funktion. Allerdings kann

umgekehrt von der Funktion eines Systems nicht auf seine innere Struktur geschlossen werden. Dieses als Äquifunktionalität bezeichnete Gesetz besagt, dass unterschiedliche Strukturen ein und dieselbe Funktion hervorrufen können [71].

6.1.3 Hierarchie

Zweck eines Hierarchiemodells – Darstellung des Stufenbaus eines Systems Systeme weisen eine Art Stufenbau auf. Systeme enthalten demnach untergeordnete Teilsysteme und sind selbst Teil übergeordneter Systeme, also in Ebenen angeordnet [13, 79]. So zeigt das System aus Abb. 6.2 bereits zwei Stufen. Dem System S sind die Elemente e_1 bis e_5 untergeordnet, die wiederum mit Hilfe von Funktionsmodellen als Systeme betrachtet werden. Diese Rangfolge wird Hierarchie genannt [76, 79]. Das Hierarchiemodell hat als Aufgabe die Beschreibung dieser Ordnung.

Aufbau des Modells – Zugehörigkeit und Abhängigkeit Eine Hierarchie ist eine Folge stufenförmig angeordneter Teilsysteme [79] und hat zwei Bedeutungen:

- Die Hierarchie als Zugehörigkeit eines kleineren Systems zu einem größeren System, definiert ein System als Bestandteil eines anderen [71].
- Die Hierarchie als Abhängigkeit eines rangniedrigeren Systems von einem ranghöheren System, zeigt die Unterordnung eines Systems unter ein anderes [76].

Die Abhängigkeit wirkt in beide Richtungen der Hierarchie. So kann ein übergeordnetes System zwar über ein untergeordnetes bestimmen, allerdings bedingt die Leistung und das Verhalten des untergeordneten System das übergeordnete [76]. Abb. 6.3 zeigt exemplarisch die Zugehörigkeiten und die Abhängigkeiten eines Systems und seiner Teilsysteme.

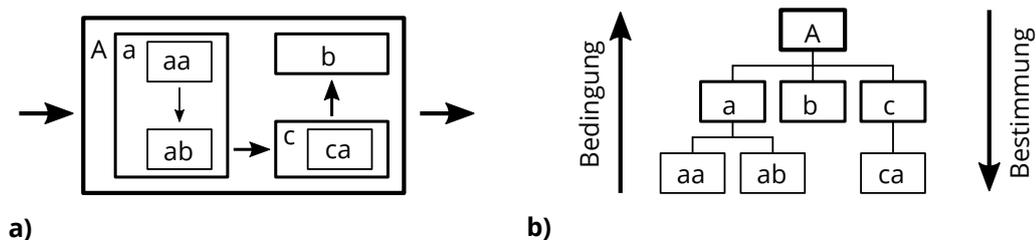


Abb. 6.3: Beispielhaftes Hierarchiemodell. Unter Verwendung von [71, 76]. a) Darstellung der Zugehörigkeiten als Mengenschaubild. b) Darstellung der Abhängigkeiten als Hierarchiebaum.

Formale Bezeichnung der Hierarchiestufen Ausgehend von einem System S in einer beliebigen Hierarchiestufe, bezeichnet ein Subsystem S^- ein untergeordnetes Teilsystem des Systems S. Das Übersystem S^+ bezeichnet das übergeordnete System, dessen Teil das System S ist. Das nicht mehr weiter unterteilte, kleinste Subsystem ist das Element e. Das Übersystem S^+ ist Teil der Umwelt U. Sie beschreibt alle Phänomene, die nicht dem System S^+ zugehören. W ist die reale Gesamtheit, von der alle anderen Systeme einen Ausschnitt darstellen [71, 72]. Abb. 6.4 verdeutlicht diese formale Rangfolge.

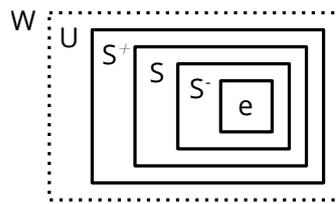


Abb. 6.4: Stufenbau der Subsysteme: W reale Gesamtheit, U Umwelt, S^+ Übersystem, S System, S^- Subsystem, e Element. In Anlehnung an [71].

Hierarchie als Stufenbau der Abstraktion Bewegt sich der Beobachter in der Hierarchie eines Systemmodells abwärts, so erhält er tiefgreifende Erklärungen der Einzelheiten. Steigt er in der Hierarchie auf, gewinnt er ein weitgreifendes Verständnis der Bedeutung des Systems und seiner Zusammenhänge [76, 71]. Daraus folgt, dass ein System in höheren Hierarchieebenen zunehmend abstrakter wird und in niedrigeren konkreter.

Hierarchiebildung durch Verdichtung von Relationen Die Hierarchie eines Systems hat ihre Ursache in seiner Struktur, genauer in der ungleichmäßigen Verteilung der Relationen und der unterschiedlich starken Wechselwirkung zwischen den Systemteilen. Systemteile, die über viele gegenseitige Relationen verfügen und stark wechselwirken, bilden Gruppen und zeigen nach außen ein geschlossenes Verhalten. Sie treten als Subsysteme in Erscheinung. Zwischen den Teilen eines Subsystems wirken intensivere Beziehungen als zwischen den Teilen verschiedener Subsysteme [72, 79]. Hierarchiebildung ist also eine lokale Verdichtung von Relationen. Abb. 6.5 veranschaulicht diesen Zusammenhang.

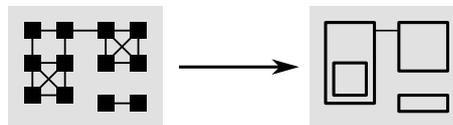


Abb. 6.5: Hierarchiebildung durch ungleichmäßige Konzentration von Relationen. Stark voneinander abhängige Elemente bilden gegenüber anderen Subsysteme.

6.2 Das Konzept des offenen Systems

6.2.1 Offene und geschlossene Systeme

Offenes Systemkonzept und Bedeutung für die Systemtheorie Die Systemtheorie unterscheidet zwischen offenen und geschlossenen Systemen. Das offene Systemkonzept geht auf VON BERTALANFFY zurück und baut auf der Annahme auf, dass ein System mit seiner Umwelt in Wechselwirkung steht [67]. Systeme dieser Art zeigen einen kontinuierlichen Zu- und Abfluss von Bestandteilen über ihre Systemgrenzen hinweg sowie einen stetigen Auf- und Abbau ihrer Komponenten [13]. Demgegenüber steht die Sichtweise der geschlossenen Systeme, auf der sich auch weite Bereiche der klassischen Physik gründen. Systeme dieser Art treten nicht in Wechselwirkung mit ihrer Umwelt. Ein vollkommen geschlossenes System wäre letztendlich aber nicht beobachtbar, sodass alle Systeme als mehr oder weniger offen gelten müssen [18].

Schwerpunkt dieser Arbeit Wesentliche Aussagen der Kybernetik und der Allgemeinen Systemtheorie beruhen auf dem offenen Systemkonzept. Regelungsvorgänge, Selbstor-

ganisation, stabile Gleichgewichtszustände und mehr lassen sich nur mit Hilfe offener Systeme erklären. Aus diesem Grund befasst sich diese Arbeit im Folgenden ausschließlich mit dem offenen Systemkonzept und nutzt das geschlossene Konzept an einzelnen Stellen lediglich als Gegenüberstellung. Anhang A.1 gibt eine Übersicht der Unterscheidungsmerkmale der beiden Systemkonzepte.

6.2.2 Fließgleichgewicht und Äquifinalität

Stationärer Zustand – Statisches und Fließgleichgewicht Der stationäre Zustand, bei dem die Merkmalsgrößen eines Systems zeitlich konstant sind [18], hat in geschlossenen und offenen Systemen eine unterschiedliche Bedeutung. Geschlossene Systeme weisen im stationären Zustand ein statisches Gleichgewicht (engl. stationary state) auf, das durch die zeitliche Unveränderlichkeit der Zustandsgrößen

$$\frac{dZ}{dt} = 0 \quad (6.1)$$

gekennzeichnet ist [80]. Hingegen ist der stationäre Zustand eines offenen Systems das Fließgleichgewicht (engl. steady state), das sich durch den gleichen Betrag des Zu- und Abflusses

$$Y - X = 0 \quad (6.2)$$

an den Grenzen des Systems auszeichnet [13]. Das Fließgleichgewicht ist zentraler Bezugspunkt bei der Untersuchung des Verhaltens offener Systeme.

Zielorientierung offener Systeme – Äquifinalität Das Verhalten geschlossener Systeme beruht auf einer direkten Zuweisung zwischen einer Ursache und ihrer Wirkung. Das Ergebnis einer Zustandsänderung hängt infolge dieses deterministischen Zusammenhangs allein von seinem Ausgangszustand ab [70]. Offene Systeme zeigen zielorientiertes Verhalten und streben aus beliebigen Zuständen einem Ziel zu. Das Ergebnis der Zustandsänderung ist in einer Zielvorgabe festgelegt, meist ein Gleichgewichtszustand. Das Verhalten zum Erreichen des Ziels hängt von Zu- und Abfluss, Auf- und Abbau sowie den Systembedingungen ab. Ein offenes System kann somit auf unterschiedlichen Wegen das gleiche Ziel erreichen. Diese Eigenschaft des Verhaltens wird als Äquifinalität bezeichnet [67, 18]. Abb. 6.6 stellt die Verhaltensweisen von geschlossenen und offenen Systemen gegenüber.

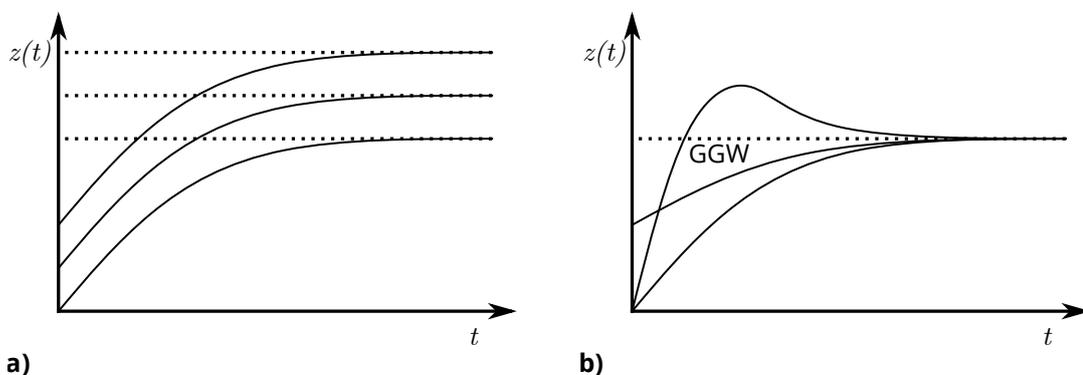


Abb. 6.6: Grundlegende Verhaltensweise geschlossener und offener Systeme. a) Determinierter Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung in geschlossenen Systemen. b) Zielorientierung und Äquifinalität in offenen Systemen. $z(t)$ Zustandsgröße, t Zeit. In Anlehnung an [13].

6.2.3 Dynamische Strukturauffassung

Struktur als Momentaufnahme Mit dem kontinuierlichen Zu- und Abfluss sowie Auf- und Abbau in offenen Systemen geht auch eine stetige Strukturänderung einher. Die Struktur ist demnach keineswegs als stationäres Gebilde, sondern als Momentaufnahme der Verfassung eines Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt zu verstehen [67, 81]. Struktur und Zustand beschreiben damit den selben Sachverhalt, im ersten Fall in Bezug auf den inneren Aufbau eines Systems und im zweiten in Bezug auf dessen äußere Charakteristik.

Der Zusammenhang zwischen Struktur, Funktion und Entwicklung Vor diesem Hintergrund erscheinen die Begriffe Zustand, Struktur, Funktion und Verhalten eines Systems lediglich als eine Frage der Beobachtungsdauer. Zu einem bestimmten Zeitpunkt definiert der Zustand die äußere Erscheinung, die Struktur den inneren Aufbau und die Funktion die momentane Aufgabe des Systems [13, 67]. Über einen längeren Zeitraum hinweg unterliegen Zustand, Struktur und Funktion einer Veränderung, die Entwicklung (engl. evolution) oder Anpassung (engl. adaption) genannt wird [13, 79, 81]. Im üblichen Sprachgebrauch wird unter Funktion allerdings weniger die momentane Aufgabe, als vielmehr das Verhalten über einen kurzen Zeitraum, verstanden [81]. Außerdem wird der Begriff Verhalten sowohl in der Bedeutung der Funktion [67, 77] als auch in der Bedeutung als Entwicklung [69, 72] verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Verhalten als Gesamtheit von momentaner Funktion und langfristiger Entwicklung verstanden. Abb. 6.7 stellt schematisch den Zusammenhang zwischen Zustand, Struktur, Funktion und Entwicklung dar, wobei hier zur besseren Veranschaulichung eine stufenförmige Veränderung des Zustandes, der Struktur und der Funktion gezeigt wird.

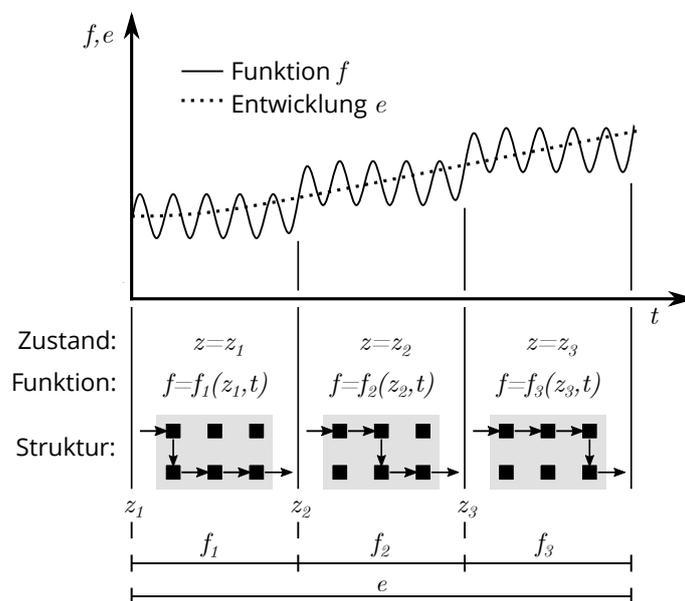


Abb. 6.7: Zusammenhang zwischen Struktur, Funktion und Entwicklung, schematische Darstellung: Der temporäre Zustand z_j bestimmt die Funktion f_j . Die zeitliche Änderung der Struktur und Funktion beschreibt die Entwicklung e .

6.3 Systemeigenschaften

6.3.1 Varietät

Varietät als Vielfalt eines Objektes Varietät bedeutet Vielfalt und kann auf beliebige Untersuchungsgegenstände bezogen werden. So bezeichnet die Varietät V_S eines Systems die Anzahl der Zustände, die es einnehmen kann. V_V beschreibt die Anzahl der unterschiedlichen Verhaltensweisen dieses Systems und V_U die Anzahl der verschiedenen Umwelteinflüsse, die von außen auf das System einwirken [75, 80].

Das Gesetz der erforderlichen Varietät Die Struktur bzw. der Zustand eines Systems bestimmt seine Funktion und sein Verhalten gegenüber Einflüssen aus der Umwelt. Dieses bereits erläuterte Gesetz der Funktionsbestimmtheit drückt sich auch in einer grundsätzlichen Abhängigkeit zwischen der Varietät V_S eines Systems, der Varietät V_V seiner Verhaltensweisen und der Varietät V_U der einwirkenden Einflüsse der Umwelt aus. Das von ASHBY aufgestellte Gesetz der erforderlichen Varietät (engl. law of requisite variety) formuliert diesen Zusammenhang [80]:

$$V_V \geq \frac{V_U}{V_S}. \quad (6.3)$$

Nach diesem Gesetz kann die Varietät des Verhaltens nur durch Varietät des Systems verringert werden. Das Gesetz der erforderlichen Varietät ist damit grundlegend für jede Form der Regelung, ob in technischen oder natürlichen Systemen [70, 80].

Freiheitsgrad und Redundanz eines Systems Der Freiheitsgrad eines Systems beschreibt die Anzahl n_K der unabhängigen Komponenten mit einer bestimmten Varietät V_K , die notwendig ist um die Varietät des Systems V_S abzubilden. Redundanz liegt vor, wenn die tatsächliche Anzahl der Zustände, die das System einnimmt, kleiner als die Anzahl der Zustände ist, die auf Grund der Komponenten und deren Varietät möglich wäre [80].

Variabilität und Flexibilität Die Varietät V_S eines Systems kann auf zwei verschiedene Systemeigenschaften zurückgeführt werden: Die Variabilität der Funktion und die Flexibilität der Struktur. Funktionsvariabilität bedeutet, dass die Elemente eines Systems selbst ihren Zustand ändern können und damit als Ergebnis den Zustand des gesamten Systems verändern. Strukturflexibilität bedeutet, dass ein System die Relationen zwischen den Elementen ändern kann und dadurch seinen Zustand verändert, während der Zustand der Elemente selbst unveränderlich bleibt [70]. Anzumerken ist, dass Variabilität und Flexibilität auch eine Frage der Betrachtungsebene sind. So gründet die Funktionsvariabilität einer hierarchisch übergeordneten Ebene auf der Strukturflexibilität der darunterliegenden Ebene. Diese Kette lässt sich bis zum kleinsten betrachteten Element der Systemhierarchie fortsetzen, das als letztes Teilsystem nicht mehr strukturell aufgelöst wird und somit Funktionsvariabilität zeigt [67].

6.3.2 Stabilität

Stabilität als Eigenschaft des Verhaltens gegenüber Störungen Der Begriff Stabilität ist in Verbindung mit offenen Systemen unter zwei Voraussetzungen zu verstehen. Erstens hat ein offenes System zum Ziel, einen stationären Zustand zu erreichen oder aufrecht zu erhalten. Dieser Zustand drückt sich in der Varietät V_V des Verhaltens mit

$$V_V = 1 \quad (6.4)$$

aus und wird stabil genannt [80]. Er entspricht in offenen System dem Fließgleichgewicht. Zweitens wirkt die Umwelt auf das System ein und lenkt es aus dem stationären Zustand aus. Diese Umwelteinflüsse heißen Störungen. Stabilität ist nun die Eigenschaft eines Systems, unter Einfluss von Störungen sein Gleichgewicht beizubehalten oder nach einer Auslenkung wieder dahin zurückzukehren, d.h. sein Systemziel zu erfüllen [70, 77].

Ultrastabilität und Multistabilität Ein System ist umso stabiler, je größer die Varietät der Störungen sein kann, die es in der Lage ist zu bewältigen [70]. Nach dem Gesetz der erforderlichen Varietät gilt im Stabilitätsfall folgende Bedingung zwischen der Varietät V_U der Störungen und V_S des Systems:

$$V_S \geq V_U \quad (6.5)$$

Damit ist die Stabilität eine direkte Folge aus der Varietät V_S eines Systems. Je größer sie ist, desto umfangreicher können die Störungen sein, die das System bewältigen kann. Abhängig von der Varietät der Störung, können drei Stufen der Stabilität von Systemen unterschieden werden:

- Einfache Stabilität bezeichnet die Stabilität gegenüber einer Störung.
- Ultrastabilität bezeichnet die Stabilität gegenüber einer bestimmten Klasse von Störungen. Ultrastabile Systeme weisen eine starre Struktur von Subsystemen auf und sind damit nur funktionsvariabel. Sie können damit im Rahmen der Variabilität ihrer Subsysteme auf eine Klasse von Störungen reagieren, aber nicht darüber hinaus [70, 77]. Diese Fähigkeit wird Adaption und die entsprechende Systemeigenschaft Adaptivität genannt [40, 76].
- Multistabilität bezeichnet die Stabilität gegenüber einer Vielfalt von Störungsarten und im Idealfall gegenüber allen Störungen. Multistabile Systeme verfügen über eine veränderliche Struktur von Subsystemen und sind damit auch strukturflexibel. Durch die Bildung neuer Relationen zwischen den Subsystemen können sie gegenüber einer größeren Zahl von Störungen stabil sein. Diese Fähigkeit heißt Selbstorganisation oder Selbstoptimierung [40, 76].

Abb. 6.8 zeigt anhand einer einfachen Störungsfunktion und der zugehörigen Systemantwort schematisch den Unterschied der Stabilitätsformen. Als Beispiel der technischen Umsetzung stabiler Systeme sei auf Kap. 3.1.3 verwiesen. Dort erzielt die konventionelle Regelung einfache Stabilität, die adaptive Regelung Ultrastabilität und die selbstoptimierende Regelung Multistabilität.

Einfluss der Struktur auf die Stabilität Störungen wirken auf einzelne Elemente eines Systems. Das System als Gesamtes wird auf dem Weg seiner Relationen indirekt beeinflusst. Je stärker ein Element im System mit den anderen Bestandteilen wechselwirkt, desto größer ist der Einfluss der Störung auf das Gesamtsystem. Systeme, deren Elemente gleichmäßig miteinander verknüpft sind und die keine Hierarchie aufweisen, sind weniger stabil als Systeme, deren Elemente ungleichmäßig miteinander verbunden sind und eine hierarchische Struktur besitzen. In hierarchischen Systemen bleibt der Einfluss beim Ausfall eines Elementes hauptsächlich auf das betreffende Subsystem beschränkt, weil sie über die Grenzen des Subsystems hinaus weniger wechselwirken [77, 79].

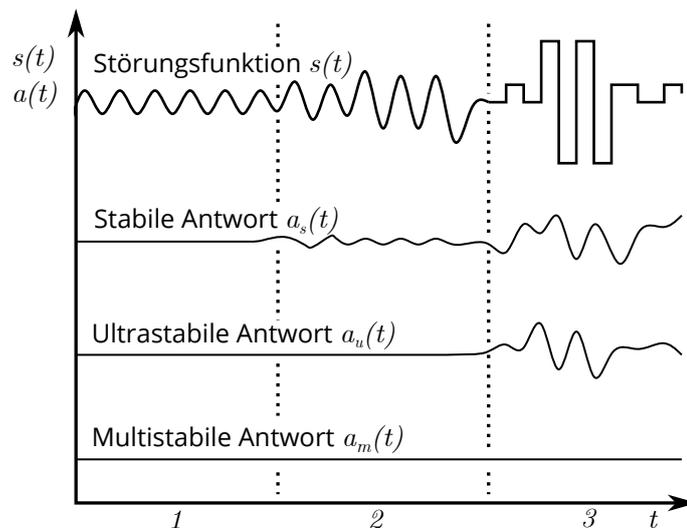


Abb. 6.8: Schematische Gegenüberstellung von Stabilität, Ultrastabilität und Multistabilität. Störungsfunktion $s(t)$ im Abschnitt 1 sinusförmig, im Abschnitt 2 mit abweichender Amplitude und Wellenlänge und im Abschnitt 3 Wechsel der Störungsklasse zu einer Rechteckfunktion.

6.3.3 Komplexität

Die zentrale Stellung eines unscharf definierten Begriffes Über die Bedeutung des Begriffes Komplexität finden sich in der Literatur nur Andeutungen. Komplexe Systeme seien unübersichtlich, chaotisch und stochastisch [72], zusammenhängend und vielumfassend [70], nicht durchschaubar [77], kompliziert und irregulär [18] oder heterogen [82]. Komplexität wird als Ursache oder Folge etlicher Sachverhaltes genannt und steht in vielen systemtheoretischen Untersuchungen an zentraler Stelle. Eine theoretische Klärung des Begriffes scheint nicht möglich zu sein [83]. Zwei Aussagen stehen jedoch hinter allen Deutungen:

- Komplexität ist ein Gradbegriff und kann nur im Vergleich von Systemen verwendet werden [82].
- Komplexität misst die Verfassung eines Systems als Gleichzeitigkeit von Vielfalt und Einheit [77, 83].

Damit ist die Komplexität ein Maß dafür, wie sehr ein Untersuchungsgegenstand der Definition eines Systems (siehe Kap. 5.3) entspricht. Über diese abstrakte Andeutung hinaus nützt der Versuch, sich dem Begriff von verschiedenen Seiten zu nähern und dadurch eine Vorstellung von den Erscheinungsformen der Komplexität zu erhalten. Die folgenden Abschnitte unternehmen eine solche Annäherung unter den drei grundsätzlichen Gesichtspunkten eines Systems: Funktion, Struktur und Hierarchie.

Funktionelle Komplexität Das äußere Verhalten und die zeitliche Entwicklung der Merkmale eines Systems geben Auskunft über die funktionelle Komplexität. Es treten zwei Aspekte auf, die zur Beurteilung dieser Form der Komplexität beitragen [82]:

- Die nomologische Komplexität betrifft die Qualität des Verhaltens und die Regeln, denen es folgt. Sie steigt mit der Zufälligkeit und Verschiedenheit des Verhaltens (siehe Abb. 6.9 a)).

- Die operationale Komplexität betrifft die Quantität des Verhaltens und seinen tatsächlichen Verlauf. Sie steigt mit der Anzahl der auftretenden Zustände pro Zeiteinheit und der Länge des betrachteten Zeitraums (siehe Abb. 6.9 b)).

Die Komplexität hängt nach dieser Definition direkt mit der Varietät zusammen. Die Varietät beschreibt die Anzahl der möglichen Zustände, die ein System einnehmen kann. Die Komplexität ergänzt einen zeitlichen Bezug und erfasst zusätzlich die Ablaufregeln nach denen diese Zustände nacheinander auftreten sowie den zeitlichen Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Zuständen. Damit lässt sich auch der Begriff der Redundanz auf die Komplexität übertragen. So ist ein System auch dann redundant, wenn es zwar alle durch seine Varietät vorgesehenen Zustände ausschöpft, aber der zeitliche Abstand zwischen den verschiedenen Zuständen größer ist, als es die Komplexität des Systems ermöglicht [80, 82].

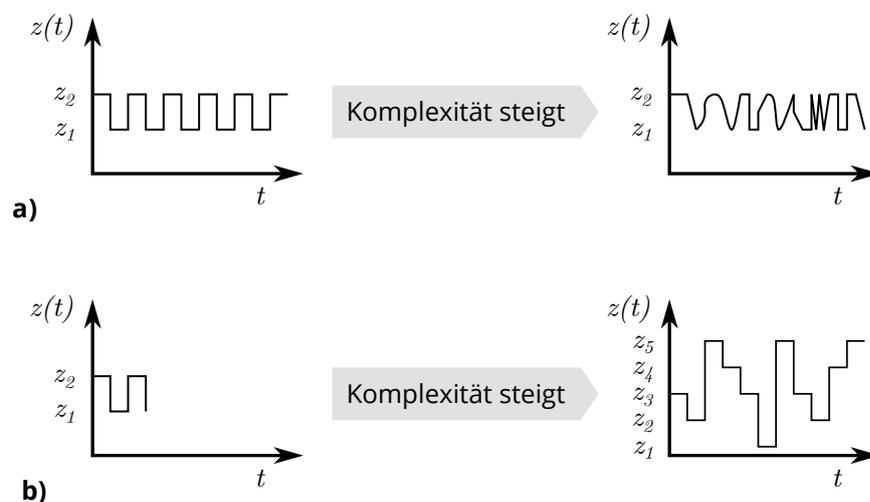


Abb. 6.9: Funktionelle Komplexität. a) Nomologische Komplexität: Die Regeln des Verhaltens betreffend. b) Operationale Komplexität: Die Anzahl der eingenommenen Zustände betreffend. $z(t)$ Zustandsgröße, z_j j-ter Zustand, t Zeit.

Strukturelle Komplexität Komplexität drückt sich in der Struktur eines Systems durch die Anzahl und Art der Elemente und Relationen aus. Wächst die Anzahl und Vielfalt der Elemente und Relationen, steigt die strukturelle Komplexität [70, 82], wie Abb. 6.10 veranschaulicht. Zwischen der Anzahl der Elemente n_e , der Anzahl der Relationen n_r und der Anzahl ihrer Arten, ausgedrückt in der Anzahl ihrer Zustände V_S , besteht nach [77] folgender Zusammenhang zur Komplexität K :

$$K \sim n_e, n_r, V_S. \quad (6.6)$$

Die drei Faktoren sind allerdings nicht additiv oder multiplikativ, sodass ein System nicht zwangsläufig genauso komplex ist wie ein anderes, falls die Summe oder das Produkt dieser Faktoren übereinstimmt [84]. Vielmehr kann dieser Zusammenhang nur als Anhaltspunkt gelten.

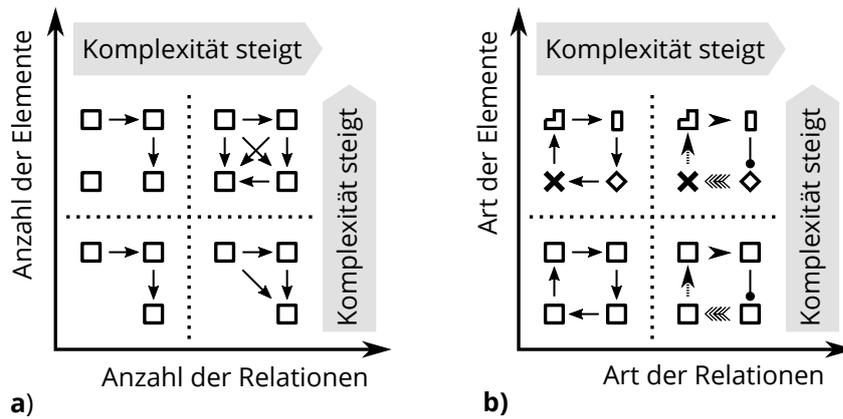


Abb. 6.10: Strukturelle Komplexität. a) Einfluss der Anzahl der Elemente und Relationen auf die Komplexität. b) Einfluss der Anzahl der Arten der Elemente und Relationen auf die Komplexität.

Hierarchische Komplexität Die Hierarchie eines Systems gibt ebenfalls Auskunft über die Komplexität eines Systems. So sind Systeme mit einer größeren Zahl von Hierarchiestufen und ungleichmäßigerer Verknüpfungsstruktur komplexer als Systeme mit wenigen Hierarchieebenen und gleichmäßiger Verknüpfung [79, 82]. Abb. 6.11 zeigt diesen Zusammenhang schematisch.

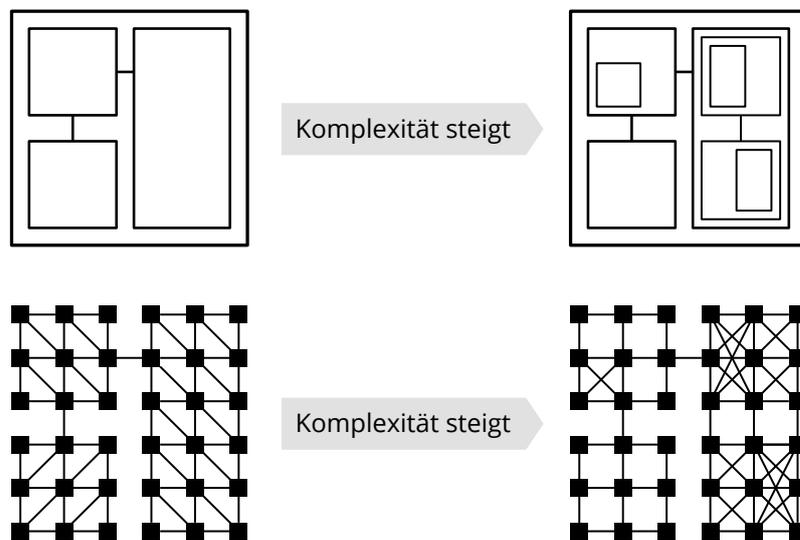


Abb. 6.11: Hierarchische Komplexität. Komplexität steigt mit der Anzahl der Hierarchieebenen.

Komplexität und das Gesetz der erforderlichen Varietät Es wurde gezeigt, dass die Komplexität eines Systems K_S in unmittelbarem Zusammenhang mit seiner Varietät V_S steht und daher gilt:

$$K_S = f(V_S) . \tag{6.7}$$

Folglich wirkt das Gesetz der erforderlichen Varietät auch auf die Komplexität. Ein System kann damit in einer Umwelt der Komplexität K_U nur dann stabil sein, wenn seine Komplexität K_S mindestens der Umwelt entspricht [80].

Subsystembildung als Mittel zur Aufteilung von Komplexität Die Beherrschbarkeit eines Systems erschwert sich mit wachsender Komplexität, weil die Anzahl der Zustände, der zeitliche Abstand und die Regeln ihrer Abfolge unübersichtlicher werden. Dagegen bewirkt die Bildung von Subsystemen, dass sich die Komplexität auf mehrere Hierarchieebenen verteilt. Innerhalb einer Ebene verringert sich die Anzahl der Elemente und Relationen. Die Komplexität auf jeder Hierarchieebene und in jedem Subsystem ist dann geringer als die des Gesamtsystems [83, 85]. Gleichzeitig steigt die strukturelle und hierarchische Komplexität mit der Anzahl der Subsysteme und Hierarchieebenen. In der Natur haben Strukturen aus diesem Grund meistens die Form von Hierarchien [79] und Komplexität kann damit als Auslöser der Systembildung angesehen werden [18]. Ein Beispiel für die Komplexitätsverteilung durch Subsystembildung sind Baukastensystemen, die durch lokale Unterbaukästen eine Aufteilung der Komplexität bewirken (siehe Kap. 3.1.2).

7 Systemmodelle für Verarbeitungsanlagen

7.1 Systemtheoretischer Ansatz für Verarbeitungsanlagen

7.1.1 Einführung neuer Begriffsdefinitionen

Verarbeitungssystem und Verarbeitungstechnisches System Kap. 3.2 nennt zwei Bedeutungen für den Begriff Verarbeitungssystem. Im weiteren Sinne ist das Verarbeitungssystem ein Oberbegriff für Verarbeitungsanlagen, -maschinen und -module. Im engeren Sinn benennt es das Teilsystem des Funktionsbereiches Stoff im Funktionsschema. Im Folgenden findet der Begriff Verarbeitungssystem in seinem engeren Sinn als Teilsystem im Funktionsschema Verwendung (siehe Tab. 3.5). Als Überbegriff für Verarbeitungsanlagen, -maschinen und -module wird der Begriff verarbeitungstechnisches System eingeführt. Er bezeichnet das technische System, das eine Verarbeitungsaufgabe umsetzt und umfasst sämtliche Teilsysteme, die dazu erforderlich sind, so auch das Verarbeitungssystem.

Verarbeitungsaufgabe und Verarbeitungsfunktion In Kap. 3.2.2 wurde erläutert, dass die Begriffe Verarbeitungsaufgabe und Verarbeitungsfunktion sowohl synonym als Bezeichnung für die gewünschte Zustandsänderung am Verarbeitungsgut Anwendung finden, als auch in unterschiedlicher Bedeutung für die gewünschte und tatsächlich vollzogene Zustandsänderung. Im Folgenden werden die unterscheidenden Definitionen verwendet. Die Verarbeitungsaufgabe formuliert demnach die gewünschte Zustandsänderung des Verarbeitungsgutes, die als Zielstellung zu verstehen ist, und die Verarbeitungsfunktion beschreibt die ausgeführte Zustandsänderung, die durch das verarbeitungstechnische System vollzogen wird.

Teilaufgabe und Teilfunktion Der Begriff Teilfunktion wurde in Kap. 3.2 zum Einen als Funktion eines Funktionsbereiches einer Verarbeitungsanlage vorgestellt, z.B. die Energiebereitstellungsfunktion, und zum Anderen im Sinne einer Teilaufgabe als Abschnitt im innermaschinellen Verfahren, z.B. das Siegeln einer Naht. Im Folgenden bleibt die Teilfunktion dem verarbeitungstechnischen System vorbehalten und beschreibt dort die Funktion der Teilsysteme (siehe Tab. 3.5). Die Teilaufgabe bezieht sich dann auf den Verarbeitungsablauf und meint ein Teilziel innerhalb der Verarbeitungsaufgabe.

Vorgang und Prozess Der Verarbeitungsvorgang wurde in Kap. 3.2.4 als die quantitative Formulierung der Zusammenhänge zwischen Arbeitsorgan, Verarbeitungsgut, Umwelteinflüssen sowie dem zeitlichen Ablauf der Einwirkung und der Zustandsänderung des Verarbeitungsgutes eingeführt. Er beschreibt einen abgeschlossenen Verarbeitungsablauf, der für jedes Verarbeitungsgut neu beginnt. Während des Betriebs einer Verarbeitungsanlage wiederholt sich dieser Vorgang zyklisch für jedes Produkt. Diese Wiederholung eines Verarbeitungsvorganges während des Anlagenbetriebs wird im Folgenden als Verarbeitungsprozess bezeichnet.

7.1.2 Ziel der Modellbildung

Vergleich von Aufgabe und Funktion Systeme verfolgen immer ein Ziel und haben eine nach außen wirkende Funktion. Systemeigenschaften und Systemfunktion können nur bezüglich dieses Ziels bewertet werden. Die Verarbeitungsaufgabe formuliert das Systemziel für Verarbeitungsanlagen. Aus diesem Grund dient sie hier als Maßstab, anhand dessen eine Verarbeitungsanlage beurteilt wird. Die Funktion einer Verarbeitungsanlage zeigt sich nach außen durch die Verarbeitungsfunktion. Stimmt sie mit der Verarbeitungsaufgabe überein, ist das Systemziel erreicht. Zielsetzung der folgenden Modelle ist demnach, beide zu vergleichen und damit zu bewerten, inwieweit eine Verarbeitungsanlage ihre Verarbeitungsaufgabe erfüllen kann. Abb. 7.1 stellt den Vergleich schematisch dar.

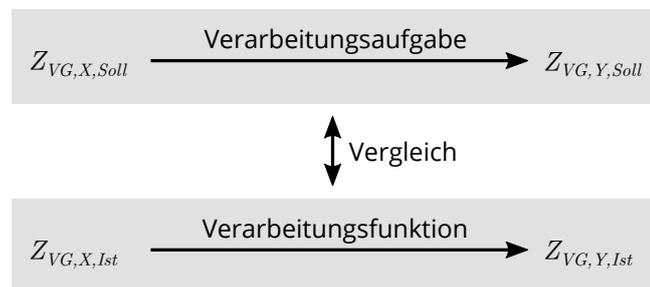


Abb. 7.1: Funktioneller Vergleich von Verarbeitungsaufgabe und Verarbeitungsfunktion. Geforderter Zustand $Z_{VG,X,Soll}$ vor der Verarbeitung und beabsichtigter Zustand $Z_{VG,Y,Soll}$ danach. Tatsächlicher Zustand $Z_{VG,X,Ist}$ vor und $Z_{VG,Y,Ist}$ nach der Verarbeitung.

Vergleich von Aufgabensystem und verarbeitungstechnischem System Das Gesetz der Funktionsbestimmtheit (siehe Kap. 6.1.2) besagt, dass die Funktion eines Systems aus seiner Struktur folgt. Für die Untersuchung der Ursache einer Abweichung der Verarbeitungsfunktion von der Verarbeitungsaufgabe und die angestrebte Ableitung von Gestaltungsprinzipien ist es daher notwendig, den oben beschriebenen Vergleich auch bezüglich der Struktur einer Verarbeitungsanlage durchführen zu können. Zu diesem Zweck lässt sich der Vergleich von Verarbeitungsaufgabe und Verarbeitungsfunktion auf den in Abb. 7.2 dargestellten Vergleich dreier Systeme zurückführen.

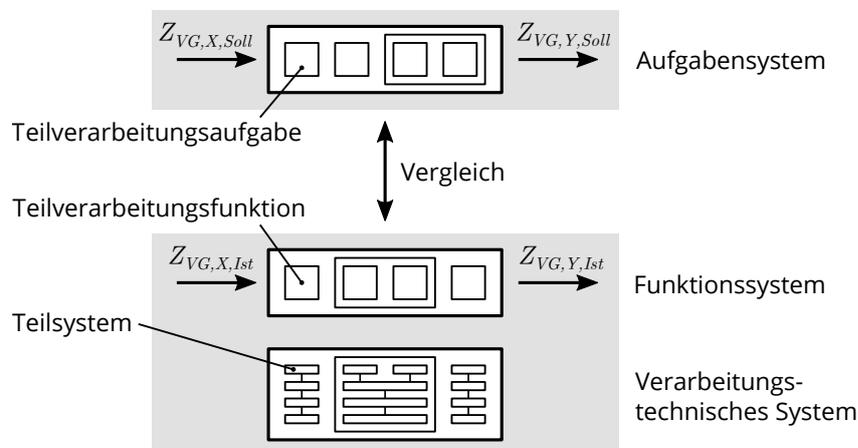


Abb. 7.2: Vergleich von Aufgaben-, Funktions- und verarbeitungstechnischem System. Geforderter Zustand $Z_{VG,X,Soll}$ vor der Verarbeitung und beabsichtigter Zustand $Z_{VG,Y,Soll}$ danach. Tatsächlicher Zustand $Z_{VG,X,Ist}$ vor und $Z_{VG,Y,Ist}$ nach der Verarbeitung.

In diesem Systemvergleich bilden die Teilverarbeitungsaufgaben der Verarbeitungsaufgabe zusammen ein Aufgabensystem und die Teilverarbeitungsfunktionen der Verarbeitungsanlage gemeinsam ein Funktionssystem. Hierbei bildet das Aufgabensystem die angestrebte Struktur und Hierarchie der Verarbeitungsaufgaben ab, wohingegen das Funktionssystem die tatsächliche Struktur und Hierarchie der Verarbeitungsfunktionen zeigt. Das Funktionssystem folgt nach dem Gesetz der Funktionsbestimmtheit aus Struktur und Hierarchie des verarbeitungstechnischen Systems und dient somit als Vermittler für einen Vergleich zwischen Aufgabensystem und verarbeitungstechnischem System. Dieser Vergleich kann Aussagen treffen, inwieweit die Struktur und Hierarchie einer Verarbeitungsanlage für die Umsetzung der Verarbeitungsaufgabe geeignet ist.

7.1.3 Formale Probleme der Modellbildung

Das formale Problem systemtheoretischer Beschreibungen der Verarbeitungstechnik

In verarbeitungstechnischen Prozessen steht die Qualität des einzelnen Verarbeitungsgutes und der einzelne Verarbeitungsvorgang im Zentrum. Das Verarbeitungsgut ist darüber hinaus Bestandteil eines Stoffstroms, dessen Elemente jedes für sich den Verarbeitungsvorgang durchlaufen. Daraus ergeben sich zwei verschiedene Modellansätze, die in Abb. 7.3 dargestellt sind:

- **Verarbeitungsgutorientierter Modellansatz:** Alle Betrachtungen, die eine Formulierung der Zusammenhänge im Verarbeitungsvorgang betreffen, beziehen sich auf das einzelne Verarbeitungsgut. Eine solche verarbeitungsgutorientierte Systemanalyse sieht das Verarbeitungsgut als Systemelement und die Einwirkungen, die zu einer Zustandsänderung führen, als Relationen an.
- **Anlagenorientierter Modellansatz:** In einem größeren, betriebswirtschaftlichen Verständnis zählt außerdem die Menge der verarbeiteten Produkte im Verhältnis zu den eingesetzten Ressourcen. In dieser anlagenorientierten, rein mengenbezogenen Darstellung bildet die Verarbeitungsanlage das systemtheoretische Element und das Verarbeitungsgut findet sich in Form eines Mengenstroms als Relation wieder.

Tab. 7.1 ordnet die bekannten Systemmodelle aus Kap. 3.2 den beiden Ansätzen zu. Beide Sichtweisen sind miteinander unvereinbar, weil sie Elemente und Relationen mit gegensätzlichen Bedeutungen belegen. Eine Systembetrachtung muss sich auf eine der beiden Ansätze festlegen. Anhang B vertieft die Hintergründe der Unvereinbarkeit der beiden Modellansätze.



Abb. 7.3: Modellansätze in der Verarbeitungstechnik. a) Verarbeitungsgutorientierter Modellansatz: Systemelement Verarbeitungsgut VG, Relation Einwirkung der Verarbeitungsanlage W_{VA} . b) Anlagenorientierter Modellansatz: Systemelement Verarbeitungsanlage VA, Relation Verarbeitungsgutstrom \dot{V}_{VG} .

Das formale Problem eines Vergleiches von Ablauf und Aufbau Kap. 7.1.2 formuliert als Zielstellung den Vergleich des Aufgabensystems mit dem verarbeitungstechnischen System. Beide Systeme sind formal nicht direkt vergleichbar, weil das Modell des Aufgabensystems eine Abfolge von Zuständen und seine Struktur eine Ablaufstruktur darstellt,

während das Modell des verarbeitungstechnischen Systems Wechselwirkungen und seine Struktur eine Aufbaustruktur beschreibt. Im Falle des Aufgabensystems drücken die Relationen zeitliche und im Falle des verarbeitungstechnischen Systems sachliche Zusammenhänge aus (vgl. Kap. 6.1.2). Der selbe Zusammenhang gilt bei der Übertragung des verarbeitungstechnischen Systems auf ein Funktionssystem. Untenstehende Tab. 7.1 ordnet die bekannten Systemmodelle aus Kap. 3.2 den beiden Modellansätzen zu.

Tab. 7.1: Bestandteile der Verarbeitungsaufgabe und Verarbeitungsfunktion.

	Ablaufmodell	Aufbaumodell
Verarbeitungsgut-orientiert	Innermaschinelles Verfahren (siehe Kap. 3.2.5)	Wirkpaarungsmodell (siehe Kap. 3.2.4)
Anlagenorientiert		Blackbox (siehe Kap. 3.2.2), Funktionsstruktur (siehe Kap. 3.2.3)

7.1.4 Modellansatz

Festlegung auf den verarbeitungsgutorientierten Modellansatz Das Innermaschinelle Verfahren sowie die Anordnung und Ausführung der Arbeitsorgane bestimmen Funktion und Struktur einer Verarbeitungsanlage und hängen ihrerseits vom Verarbeitungsvorgang und dem einzelnen Verarbeitungsgut ab. Verarbeitungsvorgang und Verarbeitungsgut legen damit die Funktion und Struktur fest. Aus diesem Grund wird im Folgenden der verarbeitungsgutorientierten Ansatz verfolgt. Ein bewährtes, verarbeitungsgutorientiertes Systemmodell für das Aufgabensystem ist das Innermaschinelle Verfahren nach Kap. 3.2.5. Ein Modell für das verarbeitungstechnische System wurde mit dem Funktionsschema aus Kap. 3.2.3 bislang nur nach dem anlagenorientierten Ansatz erstellt, sodass ein verarbeitungsgutorientiertes Modell in den folgenden Kapiteln entwickelt wird.

Vermittelter Vergleich von Ablauf und Aufbau Der Umstand, dass ein direkter Vergleich von verarbeitungstechnischen System und Aufgabensystem oder eine direkt Übertragung auf das Funktionssystem nicht möglich ist, erfordert ein vermittelndes Element. Zu diesem Zweck wird in den folgenden Modellen das Verarbeitungsgut aus dem verarbeitungstechnischen System herausgelöst und als eigenständiges System betrachtet. Dieses als Zustandssystem bezeichnete System beschreibt den Zustand des Verarbeitungsgutes sowie dessen Wechselwirkung mit der Umwelt und dem verarbeitungstechnischen System. Verändert sich dieser Zustand auf Grund der Wechselwirkung, kann davon ein Ablaufmodell erstellt werden, das den formalen Regeln des Funktions- und Aufgabensystems entspricht. Wird eine Zustandsänderung durch die Einwirkung des verarbeitungstechnischen Systems gezielt hervorgerufen und von dieser Änderung ein Ablaufmodell erstellt, entspricht dieses dem Funktionssystem. Der Zusammenhang zwischen verarbeitungstechnischem System und Funktionssystem ist damit gegeben.

Der dreiteilige Modellansatz Das hier vorgeschlagene Systemmodell enthält infolge der beiden vorangegangenen Festlegungen drei eigenständige Systemmodelle, die in Abb. 7.4 abgebildet sind:

- Das Funktionssystem FS,
- das Zustandssystem des Verarbeitungsgut VGS und
- das verarbeitungstechnische System VTS.

Das Funktionssystem FS bildet die Zustandsänderungen ab, die das verarbeitungstechnische System am Verarbeitungsgut durchführt und die aus den Wechselwirkungen mit der Umwelt folgen. Es beschreibt einen Ablauf der Zustandsänderung bzw. einen Abfolge von Zustände. Das Zustandssystem VGS beschreibt das Verarbeitungsgut während der Zustandsänderung und umfasst alle Wechselwirkungen mit der Umwelt und dem verarbeitungstechnischen System, die diese Zustandsänderung bewirken. Das verarbeitungstechnische System VTS stellt die Verarbeitungsanlage während der Ausführung der Verarbeitungsfunktion dar und zeigt sämtliche Wechselwirkungen mit der Umwelt, die letztlich zu einer Einwirkung auf das Verarbeitungsgut führen. Beide Systeme stellen einen Aufbau dar.

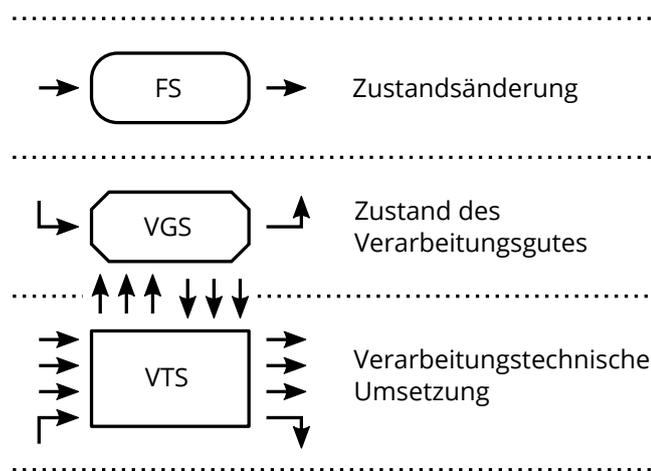


Abb. 7.4: Die drei Systemmodellen des Modellansatzes: Funktionssystem FS, Zustandssystem Verarbeitungsgut VGS und verarbeitungstechnisches System VTS.

Anwendungsbeispiel: Betrachtungstiefe der exemplarischen Untersuchung Die Anlagenprojektierung befasst sich mit der Kombination weitgehend selbstständiger Maschinen und Module zu Verarbeitungsanlagen. Sie betrachtet dabei nicht die innere Struktur der Maschinen und Module, sondern lediglich deren äußere Funktion und Wirkung im Anlagenlayout (vgl. Kap. 3.2.6). Entsprechend dieser Schwerpunktsetzung dringt die exemplarische Untersuchung nur auf die Ebene der Verarbeitungsmaschinen bzw. -module vor. Aussagen zu deren Innermaschinellen Verfahren und Funktionsstruktur oder zu den Vorgängen in den Wirkpaarungen kann sie nur in Ausnahmen treffen. Die kleinste betrachtete Einheit ist daher im Folgenden die Verarbeitungsmaschine bzw. das Anlagenmodul. Als Systemstruktur wird die Struktur des Anlagenlayouts betrachtet.

7.2 Systemmodelle für Verarbeitungsanlagen

7.2.1 Funktionsmodell

Aufgabensystem und Funktionssystem Formal sind die Funktionsmodelle des Aufgabensystems und des Funktionssystems identisch. Das Aufgabensystem bezieht sich lediglich auf die Verarbeitungsaufgabe, die beabsichtigte Zustandsänderung

$$\Delta Z_{VG,Soll} : Z_{VG,X,Soll} \longrightarrow Z_{VG,Y,Soll} , \quad (7.1)$$

und das Funktionssystem auf die Verarbeitungsfunktion, die tatsächliche Zustandsänderung

$$\Delta Z_{VG,Ist} : Z_{VG,X,Ist} \longrightarrow Z_{VG,Y,Ist} . \quad (7.2)$$

Die folgenden Erläuterungen werden am Aufgabensystem durchgeführt, dessen Modell in Abb. 7.5 dargestellt ist. Sie gelten aber ebenso für das Funktionssystem. Das Modell beschreibt die Zustandsänderung des Verarbeitungsgutes. Sie kann den stofflichen Zusammenhalt, den Energiezustand oder die Information des Verarbeitungsgutes betreffen.

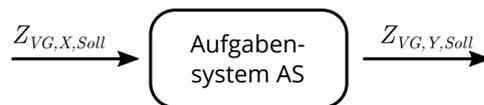


Abb. 7.5: Funktionsmodell des Aufgabensystems: Beabsichtigter Zustand des Verarbeitungsgutes vor $Z_{VG,X,Soll}$ und nach $Z_{VG,Y,Soll}$ der Verarbeitungsaufgabe.

Kap. 3.2.4 bezieht die Verarbeitungsaufgabe allein auf den Verarbeitungsvorgang. Damit definiert die Verarbeitungsaufgabe das Ziel des Vorgangs und die Verarbeitungsfunktion die bewirkte Zustandsänderung. Unter der Voraussetzung wechselnder Verarbeitungsgüter, wie sie infolge verschiedener Produktvarianten auftreten, genügt es nicht, diese Definitionen allein auf den einzelnen Verarbeitungsvorgang zu beschränken. Über einen längeren Zeitraum betrachtet, können Produktwechsel auftreten, die einen anderen Vorgang verlangen. Im Sinne des Verarbeitungsprozesses muss die Verarbeitungsaufgabe deshalb auch die Anforderungen für die wiederholte Durchführung des Verarbeitungsvorgangs erfassen. Tab. 7.2 stellt die beiden Ebenen der Verarbeitungsaufgabe dar. Diese Arbeit unterscheidet zudem zwischen einem qualitativen Aspekt, der die Art der Änderungen beschreibt, und einem quantitativen Aspekt, der ihre Anzahl enthält.

Tab. 7.2: Bestandteile der Verarbeitungsaufgabe und Verarbeitungsfunktion.

	Vorgang	Prozess
Qualitativ	Zustandsänderung des Verarbeitungsgutes	Änderung der Produktvariante
Quantitativ	Anzahl der Zustandsänderungen pro Zeiteinheit, Nennausbringung	Zeitlicher Abstand zwischen Produktwechsel, Losgröße

Zustandssystem Verarbeitungsgut Das in Abb. 7.6 dargestellte Funktionsmodell des Zustandssystems bildet den Zustand des Verarbeitungsgutes und die Wirkgrößen ab, die auf das Verarbeitungsgut Einfluss nehmen. Aus Blickrichtung des Verarbeitungsgutes zeigt es die Einwirkungen des verarbeitungstechnischen Systems und der Umwelt, die eine Zustandsänderung hervorrufen. Der Zustand des Verarbeitungsgutes wird durch die Zustandsgröße Z_{VG} beschrieben. Über die Einwirkungsgrößen $X_{HSt,VTS}$, $X_{E,VTS}$ und $X_{S,VTS}$ wirkt das verarbeitungstechnische System auf das Verarbeitungsgut ein und erzielt die Zustandsänderung. Über die Rückwirkungsgrößen $Y_{HSt,VTS}$, $Y_{E,VTS}$ und $Y_{S,VTS}$ beeinflusst das Verarbeitungsgut das verarbeitungstechnische System rückwirkend. Diese Wechselwirkung kann über Stoffaustausch (Index HSt), Energieaustausch (Index E) oder Informationsaustausch (Index S) erfolgen. X_U und Y_N bezeichnen die Wechselwirkungen mit der Umwelt.

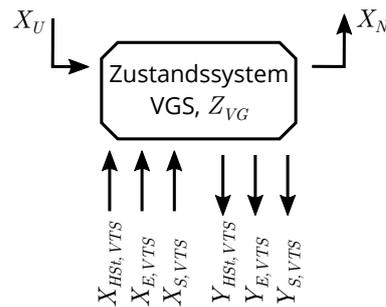


Abb. 7.6: Funktionsmodell des Zustandssystems Verarbeitungsgut: Einwirkungsgrößen $X_{HSt,VTS}$ Hilfsstoff, $X_{E,VTS}$ Energie, $X_{S,VTS}$ Signal; Eingangsgrößen vom Verarbeitungssystem. Eingangsgröße X_U Umwelteinfluss. Rückwirkungsgrößen $Y_{HSt,VTS}$ Hilfsstoff, $Y_{E,VTS}$ Energie, $Y_{S,VTS}$ Signal; Ausgangsgrößen zum Verarbeitungssystem. Ausgangsgröße Y_N Nebenwirkungen. Zustandsgrößen Z_{VG} des Verarbeitungsgutes.

Die Zustandsänderung des Verarbeitungsgutes, die aus der Einwirkung der Wirkgrößen tatsächlich folgt, hängt von den Umwelteinwirkungen X_U und den Eigenschaften des Verarbeitungsgutes ab, die durch seinen Zustand Z_{VG} beschrieben werden. Wie im Falle der Verarbeitungsaufgabe genügt es nicht, die Einflussgrößen alleine auf den einzelnen Vorgang zu beziehen. Vielmehr unterliegen sie während eines längeren Zeitraums Veränderungen, bspw. durch Schwankungen der Qualität des Verarbeitungsgutes. Diese Einflussgrößen des Zustandssystems beziehen sich deshalb ebenfalls auf den einzelnen Vorgang und den gesamten Prozess. Tab. 7.3 führt diese Größen auf.

Tab. 7.3: Einflussgrößen des Funktionssystems.

	Vorgang	Prozess
Verarbeitungsgut	Eigenschaften des Verarbeitungsgutes: Kennwerte, Kenngrößen	Schwankung der Eigenschaften des Verarbeitungsgutes
Umwelt	Umwelteinflüsse	Schwankung der Umwelteinflüsse

Verarbeitungstechnisches System Das Funktionsmodell des verarbeitungstechnischen Systems in Abb. 7.7 stellt die Wandlung der zur Verfügung stehenden Hilfsstoffe, Energie und Information für den Zweck der Einwirkung auf das Verarbeitungsgut dar. Aus Blickrichtung des verarbeitungstechnischen Systems zeigt es die Wechselwirkung zwischen dem verarbeitungstechnischen System und dem Zustandssystem des Verarbeitungsgutes sowie der Umwelt. Die Einwirkungsgrößen und Rückwirkungsgrößen entsprechen denen des Zustandssystems Verarbeitungsgut, sodass eine Einwirkungsgröße im verarbeitungstechnischen System als Ausgangsgröße erscheint und im Zustandssystem Verarbeitungsgut als Eingangsgröße. Mit den Rückwirkungsgrößen verhält es sich umgekehrt. Die Eingangsgrößen X_{HSt} , X_E und X_S sowie die Ausgangsgrößen Y_{HSt} , Y_E und Y_S beschreiben die Aufnahme und Abgabe von Hilfsstoff, Energie und Information aus der Systemumgebung, die für die Verarbeitung benötigt werden. X_U und Y_N bezeichnen die ungewollten Wechselwirkungen mit der Umwelt und Z_{VST} den Zustand des verarbeitungstechnischen Systems.

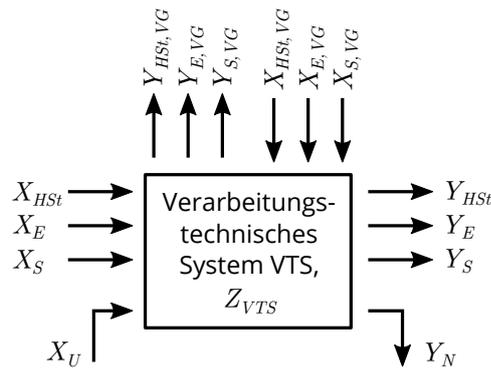


Abb. 7.7: Funktionsmodell für Verarbeitungssysteme: Eingangsgrößen X_{HSt} Hilfsstoff, X_E Energie, X_S Signal, X_U Umwelteinfluss. Ausgangsgrößen Y_{HSt} Hilfsstoff, Y_E Energie, Y_S Signal, Y_N Nebenwirkungen. Einwirkungsgrößen $Y_{HSt, VG}$ Hilfsstoff, $Y_{E, VG}$ Energie, $Y_{S, VG}$ Signal; Ausgangsgrößen zum Zustandssystem Verarbeitungsgut. Rückwirkungsgrößen $X_{HSt, VG}$ Hilfsstoff, $X_{E, VG}$ Energie, $X_{S, VG}$ Signal; Eingangsgrößen vom Zustandssystem Verarbeitungsgut. Zustandsgrößen Z_{VTS} des Verarbeitungssystems.

Die tatsächliche Ausprägung der Wirkgrößen und damit die Einwirkung auf das Verarbeitungsgut hängt von den Umweltbedingungen X_U auf das verarbeitungstechnische System ab und von dessen Eigenschaften, die durch seinen Zustand Z_{VTS} beschrieben werden. Sie unterliegen wie auch die Einflussgrößen des Zustandssystems über einen längeren Zeitraum Veränderungen. Tab. 7.4 zeigt die Einflussgrößen des verarbeitungstechnischen Systems und ihre Zuordnung zu den beiden Aspekten Vorgang und Prozess.

Tab. 7.4: Einflussgrößen des verarbeitungstechnischen Systems.

	Vorgang	Prozess
Verarbeitungstechn. System	Parameter des verarbeitungstechnischen Systems	Änderung der Parameter des Arbeitsorgans
Umwelt	Umwelteinflüsse	Schwankung der Umwelteinflüsse

Struktur- und Hierarchievergleich auf Grundlage der drei Systemmodelle Gemäß dem Gesetz der Funktionsbestimmtheit bestimmt die Struktur eines Systems seine Funktion. Sind die Strukturen und Hierarchien des Aufgabensystems, des Zustandssystems und des verarbeitungstechnischen Systems bekannt, ist deshalb ohne Kenntnis der spezifischen Elementfunktionen eine Abschätzung möglich, inwieweit ihre Systemfunktionen übereinstimmen. Der geforderte Vergleich des Aufgabensystems und des technischen Systems ist damit auf der strukturellen und hierarchischen Ebene möglich. Im Folgenden werden Struktur- und Hierarchiemodelle vorgestellt, die diesem Vergleich dienen.

Anwendungsbeispiel: Verarbeitungsaufgabe und Eigenschaften der Verarbeitungsgüter Für das Anwendungsbeispiel sind Funktionsmodelle auf zwei Ebenen denkbar: Auf der Anlagenebene beschreiben sie die Funktionen und Zustände der gesamten Anlage und auf Ebene der Maschinen bzw. Module die Funktionen und Zustände ihrer Strukturelemente. Die Angebotsdokumentation gibt für die Strukturelemente nur deren Verarbeitungsfunktionen an. Anhang C.1 gibt einen Überblick über die Verarbeitungsfunktionen der einzelnen Maschinen und Module. Bezüglich der gesamten Anlage können ausführlichere Aussagen zur Verarbeitungsaufgabe und ihren Randbedingungen gemacht werden. Tab. 7.5 gibt Auskunft über das Aufgabensystem der Anlage und führt Teilverarbeitungsaufgaben, Produktvarianten, Ausbringung und perspektivischen Erweiterungen auf.

Tab. 7.6 und Tab. 7.8 enthalten Angaben zum Zustandssystem Verarbeitungsgut und listet die Eigenschaften der Produktvarianten und der Packmittelvarianten auf. Tab. 7.7 geht auf das verarbeitungstechnische System ein und stellt die Anlagenverfügbarkeit dar. Darüber hinaus sind keine weiteren Aussagen über die Funktionsmodelle der Anlage möglich, weil die Angebotsdokumentation keine Aussagen über die Eingangs- und Ausgangsgrößen liefert.

Tab. 7.5: Verarbeitungsaufgabe der Verpackungsanlage des Anwendungsbeispiels.

	Vorgang	Prozess
Qualitativ	Übernahme von der Schokoladengießanlage	8 Formatvarianten
	Detektieren und Ausschleusen metallisch verunreinigter Produkte	
	Verpacken der Produkte	2 Verpackungsvarianten: Doppeldreheinschlag, Buncheinschlag
Quantitativ	Maximale Ausbringung: Dreheinschlag 2464 1/min, Buncheinschlag 1800 1/min	Ausbringungsbereich: Dreheinschlag 2288 - 2464 1/min, Buncheinschlag 1650 - 1800 1/min
	Perspektivische Steigerung der Ausbringung: Dreheinschlag 3520 1/min, Buncheinschlag 3000 1/min	

Tab. 7.6: Eigenschaften der Schokoladenprodukte. DDE Doppeldreheinschlag, BE Buncheinschlag.

	Maße L x B x H	Gewicht	Gruppierung	Art des Einschlags	Ausbringung der Herstellungsanlage
	[mm ³]	[g]	[Reihe x Stk. pro Reihe]		[Stk./min]
A	38,1 x 21 x 13	8,2	8 x 22	DDE	2288
B	38,1 x 21,1 x 13	8,8	8 x 22	DDE	2464
C	38,1 x 21,1 x 13	8,8	8 x 22	DDE	2464
D	38,1 x 21,1 x 13	8,8	8 x 22	DDE	2464
E	38,1 x 21,1 x 13	8,8	8 x 22	DDE	2288
F	30 x 23 x 20,6	10,0	10 x 15	BE	1800
G	29,1 x 23,1 x 18,6	8,6	10 x 15	BE	1650
H	30 x 30 x 14,1	8,6	10 x 15	BE	1650

Tab. 7.7: Eigenschaften des verarbeitungstechnischen Systems. Verfügbarkeit der Anlage in Abhängigkeit der Produktvariante.

	A, E	B, C, D	F	G	H
Anlagenverfügbarkeit [%]	99,9	99,8	99,6	99,9	96,6

Tab. 7.8: Eigenschaften der Packmittel. DDE Doppeldrehschlag, BE Buncheinschlag.

	Gewicht [g/m ²]	Gewicht pro Verpackung [g]	Max. Rollen-Ø [mm]	Max. Breite Rolle [mm]	Kern-Ø [mm]	Verschnitt [mm]
DDE	29,25	0,277	600	110	76	86
BE	37,7	0,192	600	110	76	70

7.2.2 Ablaufstruktur des Aufgaben- und Funktionssystems

Innermaschinelles Verfahren Die Strukturen des Aufgabensystems und des Funktionssystems sind Ablaufstrukturen, die die Abfolge der Zustandsänderungen enthalten. Kap. 3.2.5 stellt mit dem Innermaschinellen Verfahren ein Strukturmodell vor, das sowohl für das Aufgabensystem als auch für das Funktionssystem geeignet ist. Der Modellansatz hat sich bewährt, entspricht den formalen Vorgaben der Systemtheorie und ist in das Funktionsmodell integrierbar. Dieser Modellansatz wird deshalb als Strukturbeschreibung für das Aufgabensystem und das Funktionssystem übernommen.

Anwendungsbeispiel: Aufgabenstruktur und Innermaschinelles Verfahren Die Struktur des Aufgabensystems und die Struktur des Funktionssystems der Verpackungsanlage weichen voneinander ab. Abb. 7.8 zeigt die Ablaufstruktur der Verarbeitungsaufgabe, wie sie der Auftrag des Kunden beschreibt. Sie enthält drei aufeinanderfolgende Teilverarbeitungsaufgaben, infolge derer das Schokoladenprodukt von der Gießanlage übernommen, auf metallische Verunreinigungen geprüft, ggf. ausgeschleust und schließlich verpackt wird.

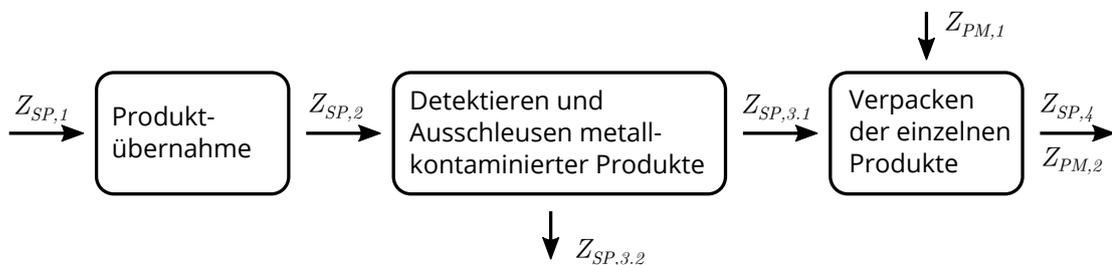


Abb. 7.8: Aufgabenabfolge der Verpackungsanlage. Schokoladenprodukte gruppiert durch vorge-lagerte Schokoladengießanlage, $Z_{SP,1}$. Schokoladenprodukt von Schokoladengießanlage übernommen, $Z_{SP,2}$. Schokoladenprodukt frei von Metallverunreinigungen $Z_{SP,3,1}$. Verunreinigte Schokoladenprodukte, Ausschuss, $Z_{SP,3,2}$. Packmittel auf Rolle, $Z_{PM,1}$. In Packmittel eingepackte Schokoladenprodukte, $Z_{SP,4}$ und $Z_{PM,2}$.

Die Ablaufstruktur der Verarbeitungsfunktion der projektierten Anlage weicht in zwei prinzipiellen Punkten von der Struktur der Verarbeitungsaufgabe ab:

- Weitere Zerlegung der Teilverarbeitungsaufgabe: Die drei Teilverarbeitungsaufgaben werden nicht von drei, sondern von einer deutlich größeren Zahl aufeinander folgender Teilverarbeitungsfunktionen umgesetzt.
- Parallele Funktionsstränge: Die Ablaufstruktur der Anlage zeigt mehrere Verzweigungen der Funktionsabfolge. Einige Zweige setzen identische Verarbeitungsaufgaben um, andere unterschiedliche.

Anhang C.2 stellt die komplette Ablaufstruktur der Verarbeitungsanlage dar. Anhand einem der abzweigenden Funktionsstränge, der in Abb. 7.9 ab der Aufteilung der beiden Produktionszweige dargestellt ist, können wesentliche Merkmale der Ablaufstruktur erläutert werden:

- Die Umsetzung der Teilverarbeitungsaufgaben durch eine deutlich größere Zahl aufeinanderfolgender Teilverarbeitungsfunktionen reduziert den Umfang der Zustandsänderung im Verarbeitungsvorgang.
- Die Umsetzung der Teilverarbeitungsaufgaben durch mehrere identische Funktionsstränge hat hier zur Folge, dass die Nennausbringung in jedem Funktionsstrang geringer ist als die der gesamten Anlage.
- Die Umsetzung der Teilverarbeitungsaufgabe Verpacken durch zwei unterschiedliche Funktionszweige verkleinert die Zahl der Produktvarianten in den Teilverarbeitungsfunktionen.

Alle diese Maßnahmen haben zur Folge, dass der Umfang der einzelnen Teilverarbeitungsfunktionen gegenüber der Teilverarbeitungsaufgabe, die sie gemeinsam umsetzen, kleiner ist.

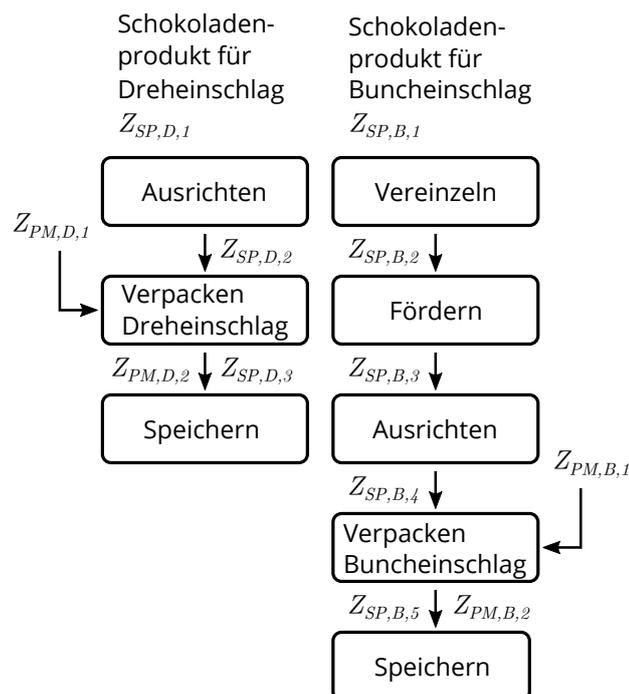


Abb. 7.9: Innermaschinelles Verfahren der beiden Produktionszweige eines Produktionsstranges. Schokoladenprodukte vereinzelt und geprüft $Z_{SP,D,1}$, ausgerichtet $Z_{SP,D,2}$. Packmittel auf Rolle $Z_{PM,D,1}$. In Packmittel eingepackte Schokoladenprodukte $Z_{SP,D,3}$ und $Z_{PM,D,2}$. Schokoladenprodukte teilweise vereinzelt und geprüft $Z_{SP,B,1}$, vereinzelt $Z_{SP,B,2}$ und $Z_{SP,B,3}$, ausgerichtet an langer Kante quer zur Stoffflussrichtung $Z_{SP,B,4}$. Packmittel auf Rolle $Z_{PM,B,1}$. In Packmittel eingepackte Schokoladenprodukte $Z_{SP,B,5}$ und $Z_{PM,B,2}$.

7.2.3 Aufbaustruktur der Wirkpaarung – Wirkpaarungsmodell

Die Wirkpaarung als Bindeglied zwischen Verarbeitungsaufgabe und -funktion Die Wirkpaarung ist das kleinste Teilsystem eines verarbeitungstechnischen Systems, das eine nicht mehr teilbare Verarbeitungsfunktion durchführt und eine Zustandsänderung am Verarbeitungsgut hervorruft. Somit enthält die Wirkpaarung die kleinsten Betrachtungseinheiten des Aufgabensystems, des Zustandssystems und des verarbeitungstechnischen Systems.

Notwendigkeit der Anpassung des Wirkpaarungsmodells Das Wirkpaarungsmodell aus Kap. 3.2.4 vermischt sowohl vorgangs- und anlagenorientierten Modellansatz als auch Aufbaustruktur und Ablaufstruktur. So wird dort das Wirkpaar einerseits im Sinne des anlagenorientierten Modells als technisches System interpretiert, worin das Verarbeitungsgut ein- und austritt (Relationen VG_I und VG_{II} in Abb. 3.7). Andererseits ist das Verarbeitungsgut im Sinne des verarbeitungsgutorientierten Ansatzes ein Element des Systems. Zusätzlich sind die Relationen VG_I und VG_{II} mit den Zuständen des Verarbeitungsgutes z_I vor und z_{II} nach der Einwirkung des Arbeitsorgans belegt. Das Modell erhält dadurch sowohl den Charakter eines Ablaufmodells als auch den eines Aufbaumodells. Hier wird deshalb ein alternatives Wirkpaarungsmodell vorgeschlagen, dass diese formale Vieldeutigkeit behebt.

Grundkonzept des Wirkpaarungsmodells Ein System besteht aus Elementen, die miteinander wechselwirken. Im Falle des Systems Wirkpaarung entsprechen Verarbeitungsgut und Arbeitsorgan den Elementen, die in Wechselwirkung stehen. Das System Wirkpaarung entsteht damit erst, wenn das Arbeitsorgan auf das Verarbeitungsgut einwirkt, und löst sich wieder auf, wenn die Wechselwirkung beendet ist. Die Wirkpaarung ist in dieser Modellvorstellung eine reine Aufbaustruktur und damit systemtheoretisch beschreibbar. Sie ist eine spezielle Form des Funktionsmodells aus Kap. 7.2.1, wobei das Verarbeitungsgut dem Zustandssystem und das Arbeitsorgan dem verarbeitungstechnischen System entspricht. Abb. 7.10 zeigt das Wirkpaarungsmodell und enthält äquivalente Elemente zu allen drei Funktionsmodellen des Modellansatzes.

Elemente und Relationen des Wirkpaarungsmodells Das Arbeitsorgan AO und das Verarbeitungsgut VG bilden gemeinsam die Wirkpaarung WP und setzen die Verarbeitungsfunktion um. Das Arbeitsorgan AO wirkt über die Wirkgrößen auf das Verarbeitungsgut VG ein und vollzieht dort eine Zustandsänderung ΔZ_{VG} , die durch das Funktionssystem FS der Verarbeitungsfunktion beschrieben wird. Das Verarbeitungsgut beeinflusst rückwirkend das Arbeitsorgan. Die gegenseitige Einwirkung kann über nicht stofflichen Energieaustausch E (z.B. kinetische Energie, Strahlungsenergie) oder über einen Hilfsstoff HSt (z.B. Kühlwasser, Druckluft) erfolgen. Ein Informationsaustausch S (z.B. Auslesen einer Druckmarke) kann ebenfalls stattfinden. Das Arbeitsorgan hat die Funktion, die bereitgestellten Hilfsstoffe X_{HSt} , Energie X_E und Information X_S auf das Verarbeitungsgut einwirken zu lassen sowie rückwirkend wieder aufzunehmen und abzuführen (Y_{HSt} , Y_E , Y_S). Arbeitsorgan und Verarbeitungsgut unterliegen außerdem Einflüssen aus der Umwelt Y_U und verursachen die Nebenwirkungen Y_N .

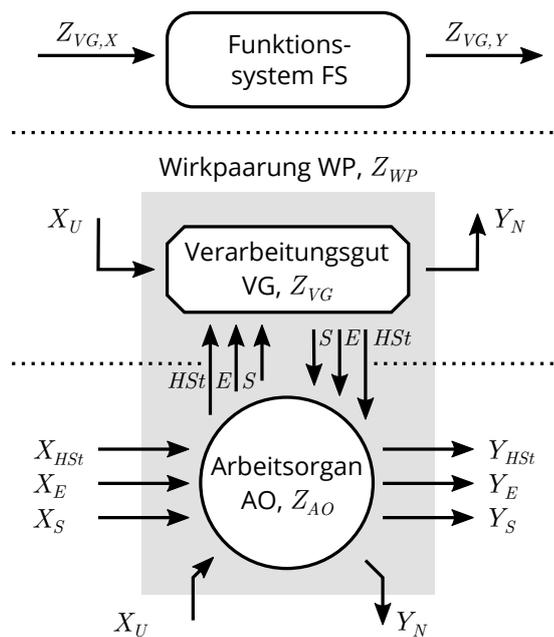


Abb. 7.10: Aufbaustruktur der Wirkpaarung: Arbeitsorgan AO, Verarbeitungsgut VG, Wirkpaarung WP, Funktionssystem FS. Z_{WP} Zustand der Wirkpaarung, Z_{AO} Zustand des Arbeitsorgans. Änderung $Z_{VG,X} \rightarrow Z_{VG,Y}$ des Zustandes Z_{VG} des Verarbeitungsgutes. Wirkgrößen HSt Hilfsstoff, E Energie, S Signal. Eingangsgrößen X_{HSt} Hilfsstoff, X_E Energie, X_S Signal, X_U Umwelteinfluss. Ausgangsgrößen Y_{HSt} Hilfsstoff, Y_E Energie, Y_S Signal, Y_N Nebenwirkungen.

Einflüsse auf die Zustandsänderung des Verarbeitungsgutes Nachdem die Wirkpaarung auf das Zustandssystem Verarbeitungsgut und das verarbeitungstechnischen System zurückzuführen ist, gelten auch die Einflussgrößen dieser Systeme in abgewandelter Form. Daraus folgt, dass die Verarbeitungsfunktion, die eine Wirkpaarung vollzieht von den Eigenschaften des Verarbeitungsgutes, den Parametern des Arbeitsorgans und den Umwelteinflüssen beeinflusst wird. Tab. 7.9 listet diese Einflussgrößen auf. Ein Vergleich mit den Einflussgrößen des Verarbeitungsvorganges aus Kap. 3.2.4 zeigt, dass sie äquivalent zu diesen sind, aber zusätzlich prozessbezogenen Einflüsse berücksichtigen.

Tab. 7.9: Einflüsse auf die Zustandsänderung des Verarbeitungsgutes.

	Vorgang	Prozess
Verarbeitungsgut	Eigenschaften des Verarbeitungsgutes: Kennwerte, Kenngrößen	Schwankung der Eigenschaften des Verarbeitungsgutes
Arbeitsorgan	Parameter des Arbeitsorgans	Änderung der Parameter des Arbeitsorgans
Umwelt	Umwelteinflüsse	Schwankung der Umwelteinflüsse

Anwendungsbeispiel: Zustandsgrößen des Verarbeitungsgutes Auf Grund der erläuterten Zielsetzung der Anlagenprojektierung und der Schwerpunktsetzung der Angebotsdokumentation können keine Aussagen über die Wirkpaarungen der Anlage getroffen werden. Allerdings sind die Eigenschaften der Verarbeitungsgüter aus Tab. 7.6 und Tab. 7.8 auch Bestandteil der Einflussgrößen der Wirkpaarung und stellen damit einige Zustandsgrößen des Verarbeitungsgutes im Wirkpaarungsmodell dar.

7.2.4 Aufbaustruktur des verarbeitungstechnischen Systems

Grundkonzept der Aufbaustruktur Die Wirkpaarung allein gibt noch keine Auskunft über die Struktur des verarbeitungstechnischen Systems. Ihr technologisches Element, das Arbeitsorgan, ist lediglich das letzte technische Glied vor der Einwirkung auf das Verarbeitungsgut. Davor stehen eine Reihe technischer Teilsysteme, die die Funktion des Arbeitsorgans ermöglichen. Sie stellen die dafür notwendigen Hilfsstoffe, Energie und Information zur Verfügung. Die Struktur dieser Teilsysteme ist in jeder Verarbeitungsanlage verschieden. Die Aufbaustruktur in Abb. 7.11 stellt die Gemeinsamkeiten aller Verarbeitungsanlagen dar und orientiert sich an dem Schema aus Kap. 3.2.3. Hier wurde allerdings der verarbeitungsgutorientierte Ansatz weiterverfolgt und das Modell ist mit den Funktionsmodellen aus Kap. 7.2.1 und dem Wirkpaarungsmodell aus Kap. 7.2.3 vereinbar.

Elemente des Strukturschemas – Teilsysteme des verarbeitungstechnischen Systems Die Änderungen gegenüber dem Funktionsschema aus Kap. 3.2.3 betreffen den Funktionsbereich Stoff und einen neuen Funktionsbereich Verarbeitung (vgl. Tab. 3.5). Die Verarbeitungsfunktion ist damit nicht mehr dem Funktionsbereich Stoff zugeordnet, sondern erhält einen eigenen Funktionsbereich. Stoffeingang und -ausgang des verarbeitungstechnischen Systems bezeichnen damit nicht mehr den Zu- und Abgang des Verarbeitungsgutes, sondern die Zu- und Abführung des Hilfsstoffes. In Abb. 7.11 sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die Relationen des Verarbeitungssystems mit den anderen Teilsystemen dargestellt. Alle übrigen Teilsysteme stehen untereinander ebenfalls in Wechselwirkung. Eine Sonderstellung nimmt das Stütz- und Hüllsystem ein. Es steht zwar in Wechselwirkung (gepunktete Linien) mit der Umgebung, aber nicht im Sinne eines bilanzierbaren Austauschprozesses, sondern im Sinne einer Zuordnung. Tab. 7.10 listet die Funktionsbereiche, Teilsysteme und die zugehörigen Teilfunktionen auf.

Tab. 7.10: Funktionsbereiche, Teilsysteme und Teilfunktionen der Aufbaustruktur. Vgl. Tab. 3.5.

Funktionsbereich	Teilsystem	Teilfunktion
Verarbeitung	Verarbeitungssystem VS	Durchführung der Verarbeitungsfunktion und des Stoffflusses durch gezielte Einwirkung auf das Verarbeitungsgut
Stoff	Hilfsstoffbereitstellungssystem EBS	Bereitstellung der erforderlichen Hilfsstoffe für die Teilsysteme
Energie	Energiebereitstellungssystem EBS	Bereitstellung der Energie für die Teilsysteme in erforderlicher Art, Form und Menge
Signal	Steuerungssystem SS	Gewinnung und Verarbeitung von Signalen zur Steuerung der Teilsysteme; Einwirkung auf die Teilsysteme, Kommunikation mit dem Verarbeitungsumfeld
Raum	Stütz- und Hüllsystem SHS	Sicherung der räumlichen Zuordnung der Elemente der Teilsysteme; Stützung, Führung, Lagerung, Umhüllung

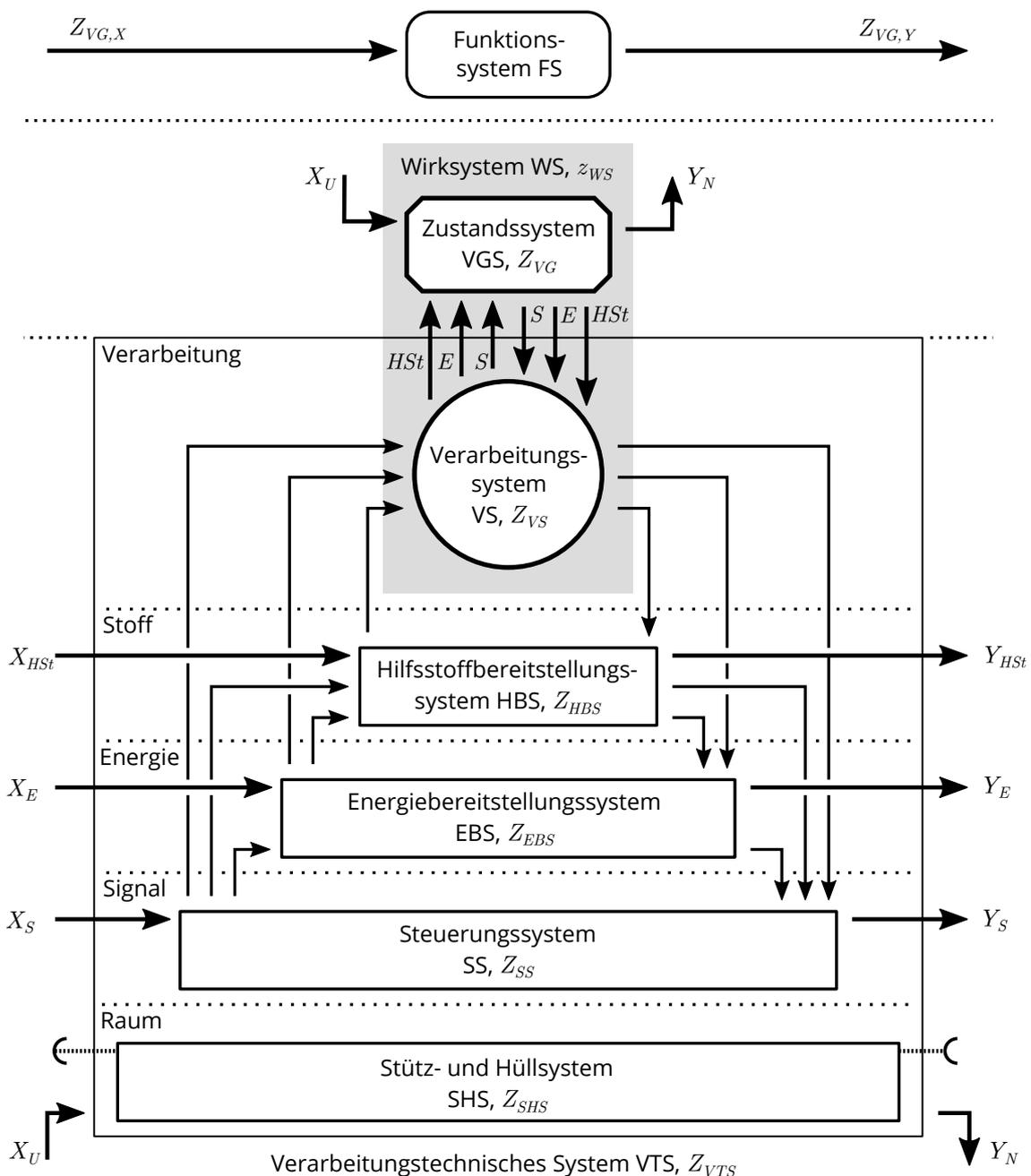


Abb. 7.11: Aufbaustruktur des verarbeitungstechnischen Systems: Stütz- und Hüllsystem SHS, Steuerungssystem SS, Energiebereitstellungssystem EBS, Stoffaufbereitungssystem SAS, Arbeitssystem AS sind Teilsysteme des Verarbeitungssystems VS. Z_i Zustandsgrößen der Teilsysteme. Wirksystem WS: Wirkgrößen HSt Hilfsstoff, E Energie, S Signal. Eingangsgrößen: X_{HSt} Hilfsstoff, X_E Energie, X_S Signal, X_U Umwelteinfluss. Ausgangsgrößen: Y_{HSt} Hilfsstoff, Y_E Energie, Y_S Signal, Y_N Nebenwirkungen. Funktionsbereiche Stoff, Energie, Signal, Raum. Nicht abgebildet sind die Relationen der Teilsysteme HBS, EBS, SS, und SHS untereinander.

Wirkpaarung und Wirksystem Die Wirkpaarung findet sich im Wirksystem WS wieder. Das Wirksystem ist die allgemeine Darstellung des Teilsystems, in dem die Wechselwirkung zwischen Verarbeitungsanlage und Verarbeitungsgut stattfindet. Die Wirkpaarung ist darin das kleinste nicht mehr teilbare Wirksystem. Sie bezieht sich auf die kleinste

nicht mehr teilbare Verarbeitungsfunktion und das Wirksystem verweist auf eine Verarbeitungsfunktion im Allgemeinen. Analog verhält es sich mit dem Arbeitsorgan und dem Verarbeitungssystem. Ein Wirksystem kann demnach aus einer Anzahl von Wirkpaarungen bestehen, so wie sich eine Verarbeitungsaufgabe in eine Anzahl von Elementaraufgaben aufteilen kann. Die strukturellen Zusammenhänge, die in Kap. 7.2.3 für die Wirkpaarung formuliert sind, gelten gleichermaßen für das Wirksystem.

Anwendungsbeispiel: Selbstständige Maschinen und unselbstständige Module Um ein vollständiges Bild der Aufbaustruktur der Verpackungsanlage zu erhalten, ist die Kenntnis aller Verknüpfungen zwischen den Maschinen und Modulen notwendig. D.h. zu jedem Funktionsbereich ist der Zusammenhang der entsprechenden Teilsysteme der Maschinen und Module zu ermitteln. Die Angebotsdokumentation gibt allerdings nur Auskunft über die Struktur der Teilsysteme des Funktionsbereiches Raum und der Teilsysteme des Funktionsbereiches Signal. Anhang C.3 zeigt die Aufbaustruktur der gesamten Verpackungsanlage für die Funktionsbereiche Raum und Signal. Abb. 7.12 stellt einen Ausschnitt dieser Gesamtstruktur dar und bildet die Aufbaustruktur der Komponenten eines Produktionszweiges für Buncheinschlag ab.

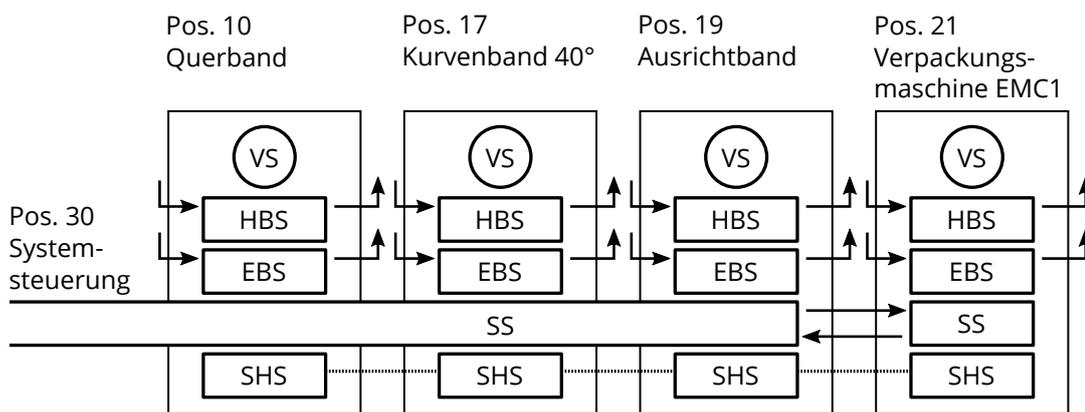


Abb. 7.12: Aufbaustruktur eines Produktionszweiges mit einer Buncheinschlagmaschine EMC1. VS Verarbeitungssystem, HBS Hilfsstoffbereitstellungssystem, SS Steuerungssystem, SHS Stütz- und Hüllsystem.

Die Struktur der Stütz- und Hüllsysteme erschließt sich aus der Layoutzeichnung und den Abbildungen der einzelnen Maschinen und Module in den Angebotsunterlagen. Jede Maschine und jedes Modul verfügt über ein eigenständiges Stütz- und Hüllsystem, das über mechanische Schnittstellen mit den benachbarten verbunden ist. Die Struktur der Steuerungssysteme ergibt sich aus der Stückliste und den Beschreibungen zur elektrischen Ausrüstung in der Angebotsdokumentation. Die Verpackungsmaschinen MCC und EMC1 sowie die Abgabestationen CTS-300 verfügen jede über eine eigene Maschinensteuerung (in Abb. 7.12 z.B. Pos. 21). Sämtliche Transport- und Vereinzelungsmodul werden über die gemeinsame, zentrale Systemsteuerung (Pos. 30) gesteuert.

7.2.5 Hierarchische Ordnung von Verarbeitungsanlagen

Hierarchie der Verarbeitungsaufgaben als Ausgangspunkt Eine Verarbeitungsaufgabe lässt sich in Teilverarbeitungsaufgaben aufteilen, wie das Innermaschinelle Verfahren zeigt. Mit der Wirkpaarung wurde auch die kleinste Einheit definiert, die eine nicht mehr teilbare Teilverarbeitungsaufgabe umsetzt. Für eine Verarbeitungsaufgabe gibt es folglich

eine hierarchische Gliederung, die sie in eine bestimmte Anzahl von Teilverarbeitungsaufgaben unterteilt und in hierarchischen Ebenen anordnet. Abb. 7.13 zeigt eine beispielhafte Aufgabenhierarchie in drei Ebenen. Hierbei bezeichnet die Gesamtverarbeitungsaufgabe GVA die oberste Ebene, die Elementarverarbeitungsaufgabe EVA die unterste Ebene und die Teilverarbeitungsaufgabe TVA eine dazwischenliegende Ebene. Allgemein sind beliebig viele Hierarchieebenen denkbar, wobei in dieser Arbeit die oberste immer mit Gesamtverarbeitungsaufgabe GVA, die unterste mit Elementarverarbeitungsaufgabe EVA und die dazwischenliegenden mit Teilverarbeitungsaufgaben TVA bezeichnet werden.

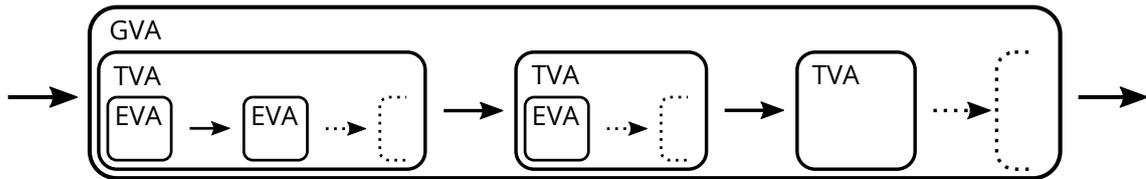


Abb. 7.13: Beispielhafte hierarchische Ordnung einer Verarbeitungsaufgabe in drei Ebenen: Gesamtverarbeitungsaufgabe GVA, Teilverarbeitungsaufgabe TVA, Elementarverarbeitungsaufgabe EVA.

Hierarchie des Funktionssystems und des verarbeitungstechnischen Systems Ausgehend von der Hierarchie der Verarbeitungsaufgaben finden sich auch für das Funktionssystem und die zuvor definierten Systeme und Teilsysteme des verarbeitungstechnischen Systems hierarchische Gliederungen. Entsprechend der Elementaraufgabe ist das kleinste, nicht mehr teilbare Wirksystem die Wirkpaarung, das kleinste Verarbeitungssystem das Arbeitsorgan und das kleinste verarbeitungstechnische System, das alle anderen Teilsysteme enthält, das verarbeitungstechnische Element. Tab. 7.11 führt eine Benennung der Hierarchieebenen ein. Die Hierarchieebenen der verschiedenen Teilsysteme müssen nicht zwangsläufig übereinstimmen, sodass das verarbeitungstechnische Element einer Verarbeitungsanlage mehrere Elementaraufgaben, Wirkpaarungen und Arbeitsorgane umfassen kann.

Tab. 7.11: Systemhierarchien einer Verarbeitungsanlage.

Verarbeitungsfunktion	Wirksystem	Verarbeitungstechnisches System	Verarbeitungssystem
Gesamtverarbeitungsfunktion GVF	Wirksystem WS	Verarbeitungsanlage VA Verarbeitungsmaschine VM	Verarbeitungssystem VS
Teilverarbeitungsfunktion TVF	Wirkpaarungsgruppe WPG	Verarbeitungstechnische Gruppe VTG	Arbeitsorgangruppe AOG
Elementarverarbeitungsfunktion EVF	Wirkpaarung WP	Verarbeitungstechnische Element VTE	Arbeitsorgan AO

Aussagen der Hierarchiemodelle Die hierarchische Ordnung der Verarbeitungsaufgabe stellt eine Zugehörigkeit zwischen den Teilverarbeitungsaufgaben her und fasst eine Abfolge von Aufgaben in zusammengehörige Einheiten zusammen. Die hierarchische Ordnung des verarbeitungstechnischen Systems hingegen zeigt die Abhängigkeit der Teilsysteme untereinander. Diese Abhängigkeit spiegelt sich in der Hierarchie der Verarbeitungsfunktion und bildet dort die tatsächlich zusammengehörige Teilverarbeitungsfunktion. Die Hierarchien der Verarbeitungsaufgabe und der Verarbeitungsfunktion müssen

nicht zwangsläufig übereinstimmen. So ist bspw. ein Arbeitsorgan denkbar, dass zwei verschiedene, aufeinanderfolgende Verarbeitungsaufgaben umsetzt, oder zwei Arbeitsorgane, die eine Aufgabe gemeinsam durchführen.

Hierarchie und Modularisierung Die Modularisierung von Anlagen, wie sie Kap. 3.1.2 vorstellt, entspricht aus Sicht der Systemtheorie der Bildung von Hierarchieebenen in der Baustruktur. Eine Baugruppe umfasst damit Bauteile, die untereinander stärker wechselwirken als zu Bauteilen außerhalb der Baugruppe und eine Einheit bilden. Die Baugruppe ist über wenige Relationen, die Schnittstellen, mit anderen Baugruppen der gleichen Hierarchieebene verbunden. Die Bauteile einer Baugruppe können selbst wieder untergeordnete Baugruppen bilden. Auf diese Weise entsteht eine Baugruppenhierarchie. In Verarbeitungsanlagen ist die Bildung von Baugruppen innerhalb jedes Teilsystems möglich. Ein selbständig arbeitendes Modul im Sinne des Plug&Play-Prinzips (siehe Kap. 3.1.2) setzt infolgedessen voraus, dass es alle fünf Teilsysteme eines verarbeitungstechnischen Systems einschließt.

Anwendungsbeispiel: Hierarchie des Aufgabensystems und des Funktionssystems Die hierarchische Ordnung der Gesamtverarbeitungsaufgabe geht aus der Aufgabenbeschreibung der Angebotsdokumentation hervor und ist in Abb. 7.14 abgebildet.

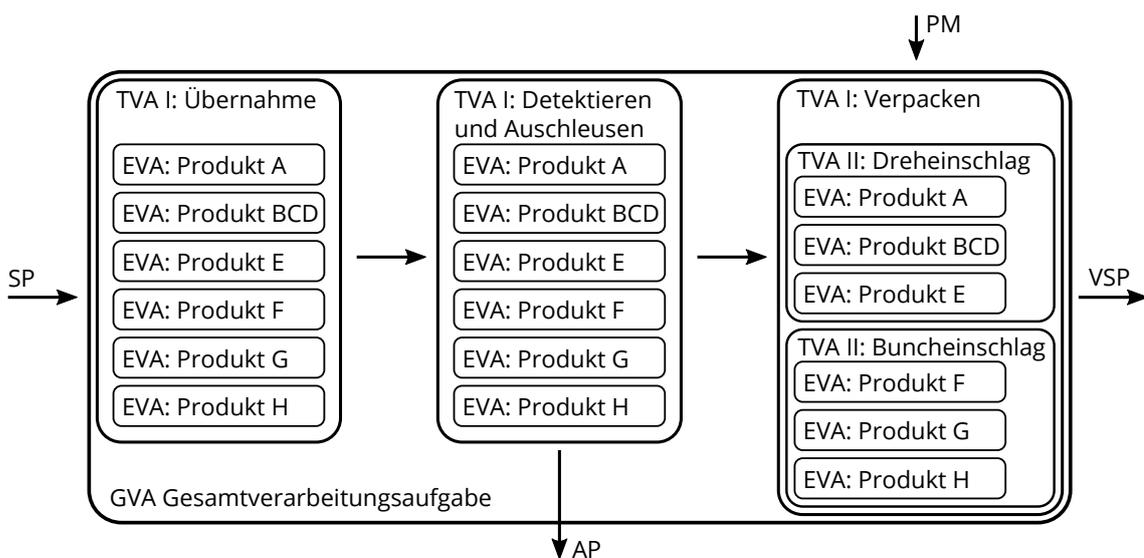


Abb. 7.14: Hierarchie der Verarbeitungsaufgabe. Gesamtverarbeitungsaufgabe GVA, Teilverarbeitungsaufgabe 1. Ordnung TVA I, Teilverarbeitungsaufgabe 2. Ordnung TVA II, Elementarverarbeitungsaufgabe. SP Schokoladenprodukt, AP Ausschussprodukt, PM Packmittel, VSP Verpacktes Schokoladenprodukt.

Die Verarbeitungsaufgabe umfasst acht verschiedene Produkte A bis H, die gemäß der Ablaufstruktur in Abb. 7.8 verarbeitet werden. Die dort gezeigte Aufgabenfolge bildet die Gesamtverarbeitungsaufgabe GVA der Verpackungsanlage. Die Aufgaben dieser Abfolge sind infolgedessen die erste Hierarchieebene darunter. Sie heißen in diesem Beispiel Teilverarbeitungsaufgaben 1. Ordnung TVA I. Die Aufgabenstellung sieht darüber hinaus zwei verschiedene Einschlagarten vor, sodass sich die Teilverarbeitungsaufgabe Verpacken in zwei weitere Teilverarbeitungsaufgaben 2. Ordnung TVA II untergliedert. Alle Teilverarbeitungsaufgaben sind zudem für die acht Produktvarianten umzusetzen, woraus eine

erneute Unterscheidung in untergeordnete Aufgaben resultiert. Die Aufteilung dieser Elementarverarbeitungsaufgaben EVA erfolgt nach den verarbeitungstechnisch relevanten Eigenschaften der Verarbeitungsgüter aus Tab. 7.6 und Tab. 7.8. Es ergeben sich 6 Elementaraufgaben EVA, wobei die Produkte B, C und D die gleichen verarbeitungstechnischen Kennwerte aufweisen und deshalb zu einer Aufgabe zusammengefasst werden. Die Hierarchische Ordnung des Funktionssystems folgt aus der Struktur der Teilsysteme der Verarbeitungsanlage. Die Angebotsdokumentation gibt lediglich Auskunft über die Gliederung der Baustruktur und der Steuerung. Abb. 7.15 zeigt einen Ausschnitt der Funktionshierarchie, die aus den beiden Gliederungen folgt. Sie entspricht dem Ausschnitt der Ablaufstruktur aus Abb. 7.9. Die vollständige Funktionshierarchie ist in Anhang C.4 und Anhang C.5 zu finden.

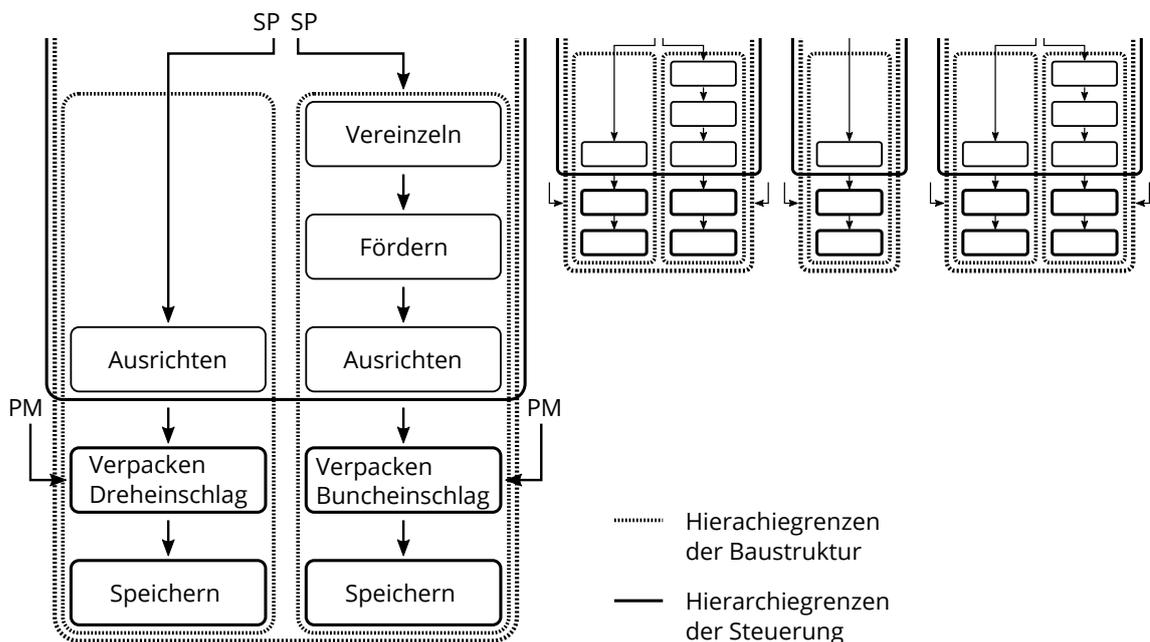


Abb. 7.15: Hierarchie der Teilverarbeitungsfunktionen aus Abb. 7.9. Hierarchie der Baustruktur und Steuerung überschneiden sich. Detailliert dargestellt sind die parallelen Produktionszweige eines Stranges, die hierarchische Gliederung der anderen ist identisch. Schokoladenprodukt SP, Packmittel PM.

Die Abbildungen zeigen, dass die hierarchische Gliederung der Verarbeitungsfunktionen, die sich aus der Steuerungsstruktur ergibt, nicht mit der Ordnung übereinstimmt, die auf die Baustruktur zurückgeht. Die Produktionsstränge und -zweige bilden auf Grund der gemeinsamen Steuerung der Fördererlemente ein zusammenhängendes Subsystem. Sie sind über diese Fördererlemente voneinander abhängig. Der Baustruktur folgend, bildet allerdings jeder Produktionsstrang und darunter auch jeder Produktionszweig ein eigenes Subsystem. Die Hierarchieebenen sind deshalb nicht einheitlich und die Grenzen der Teilfunktionen überschneiden sich. Die Anlage ist damit zwar einzeln betrachtet hinsichtlich der Funktionsbereiche Signal und Raum modular gestaltet, allerdings nicht vollständig im Sinne des Plug&Play-Prinzips, dass eine einheitliche Hierarchie über alle Funktionsbereiche verlangt (vgl. Kap. 3.1.2). Darüber hinaus stimmen die Hierarchieebenen des Funktionssystems mit denen des Aufgabensystems nicht überein. Tab. 7.12 stellt zur Verdeutlichung die hierarchischen Stufen des Aufgabensystems denen des Funktionssystems gegenüber.

Tab. 7.12: Systemhierarchien der Verpackungsanlage des Anwendungsbeispiels.
TVA Teilverarbeitungs-aufgabe.

Hierarchieebenen des Aufgabensystems	Hierarchieebenen des Funktionssystems infolge der Baustruktur	Hierarchieebenen des Funktionssystems infolge der Steuerungsstruktur
Gesamtverarbeitungsaufgabe	Anlagenebene	Anlagenebene
TVA 1. Ordnung	Verarbeitungsstränge	
TVA 2. Ordnung	Verarbeitungszweige	
Elementaraufgabe	Module und Maschinen	Module und Maschinen

7.3 Verarbeitungsanlagen als offene Systeme

7.3.1 Gründe für ein offenes Systemkonzept

Wechselwirkungen mit der Umwelt Kap. 7.2.3 hat gezeigt, dass die Verarbeitungsfunktion von äußeren Einflüssen der Umwelt abhängig ist. Ein verarbeitungstechnisches System tritt demnach in Wechselwirkung mit seiner Umwelt. Solche Relationen über eine Systemgrenze hinweg sieht das geschlossene Systemkonzept nicht vor, weshalb ein offenes Systemkonzept als Grundlage dienen muss.

Verarbeitungsprozesse unter veränderlichen Randbedingungen Das allgemeine Lastenheft aus Kap. 4.1 beschreibt als wesentliche Forderungen an Verarbeitungsanlagen stabile Verarbeitungsprozesse bei veränderlichen Randbedingungen und Anpassungsfähigkeit an wechselnde Verarbeitungsaufgaben. In Kap. 6.2 wurde dargelegt dass solche Anpassungsvorgänge und Fragen zur Stabilität eines Systems mit einem geschlossenen Systemkonzept nicht behandelt werden können. Aus diesem Grund ist hier eine Betrachtung als offenes System notwendig.

7.3.2 Gleichgewicht und Systemziel von Verarbeitungsanlagen

Ausschluss der Gleichgewichtsformulierung aus dem Umfang der Arbeit Die Formulierung eines Gleichgewichtes für verarbeitungstechnische Systeme erfordert die genaue Kenntnis des spezifischen Verarbeitungsprozesses und der Methoden der Wirkpaarungssimulation. Eine Betrachtung in dieser Detaillierung geht allerdings über die Zielstellung der Arbeit hinaus, sodass hier nur das Systemziel definiert wird, das einem solchen Gleichgewicht zugrunde liegt. Es sei aber an dieser Stelle auf [61] und [62] hingewiesen, die auf Grundlage einer Energiebilanz eine verarbeitungstechnische Gleichgewichtsbeschreibung aufstellen.

Verarbeitungsziel und Verarbeitungsergebnis Das Systemziel einer Verarbeitungsanlage ist die Erfüllung der Verarbeitungsaufgabe. Die Verarbeitungsaufgabe ist erfüllt, wenn für das Verarbeitungsergebnis $Z_{VG,Y,Ist}$ gegenüber dem Verarbeitungsziel $Z_{VG,Y,Soll}$ gilt:

$$Z_{VG,Y,Ist} = Z_{VG,Y,Soll} \cdot \quad (7.3)$$

Bezogen auf den Verarbeitungsvorgang fordert das Vorgangziel, dass der beabsichtigte Zustand eines Verarbeitungsgutes überhaupt erreicht wird. Im Bezug auf den Verarbeitungsprozess verlangt das Prozessziel, dass der beabsichtigte Zustand des Verarbeitungsgutes über alle Verarbeitungsgüter gehalten wird.

7.3.3 Dynamische Auffassung des Systems **Verarbeitungsanlage**

Verarbeitungsfunktion und Anlagenstruktur als Momentaufnahmen Unter Berücksichtigung veränderlicher Randbedingungen und Verarbeitungsaufgaben können Verarbeitungsfunktion und Anlagenstruktur nicht als statisch angesehen werden. Eine Veränderung der Umwelteinflüsse oder der Verarbeitungseigenschaften zieht eine Anpassung der Verarbeitungsvorgangs nach sich, falls das Prozessziel eingehalten werden soll. Wechselt die Verarbeitungsaufgabe und damit das Vorgangziel, ändert sich die Verarbeitungsfunktion. Auf Grund des Gesetzes der Funktionsbestimmtheit beruht eine Veränderung der Funktion immer auf einer Veränderung der Systemstruktur. Verarbeitungsfunktion und Anlagenstruktur bilden deshalb lediglich den momentanen Zustand einer Verarbeitungsanlage ab.

Verhalten von Verarbeitungsanlagen Beschreibt die Verarbeitungsfunktion den momentanen Zustand einer Verarbeitungsanlage, stellt sich die Frage nach der Änderung der Verarbeitungsfunktion über einen längeren Zeitraum. In Anlehnung an Kap. 6.2.3 bezeichnet dann die Funktionsanpassung oder -entwicklung die Veränderung der Verarbeitungsfunktion als Reaktion auf veränderte Randbedingungen oder auf eine gewechselte Verarbeitungsaufgabe. Die Gesamtheit der Verarbeitungsfunktion und der Funktionsentwicklung ist somit das Verhalten eines verarbeitungstechnischen Systems. In den Tab. 7.2, Tab. 7.3 und Tab. 7.4 wurden bereits die Einflussgrößen eingeführt, die die Verarbeitungsfunktion eines verarbeitungstechnischen Systems und deren Entwicklung direkt oder indirekt beeinflussen. Zusammen ergeben sie die Einflussgrößen des Verhaltens eines verarbeitungstechnischen Systems und sind in Tab. 7.13 aufgelistet.

Tab. 7.13: Einflussgrößen des Verhaltens von verarbeitungstechnischen Systemen.

	Verarbeitungsfunktion, Vorgang	Funktionsanpassung, Prozess
Verarbeitungsaufgabe		
Qualitativ	Zustandsänderung des Verarbeitungsgutes ΔZ_{VG}	Änderung der Produktvariante ($\Delta Z_{VG,1}, \Delta Z_{VG,2}, \Delta Z_{VG,3}, \dots$)
Quantitativ	Nennausbringung	Abstand zwischen Produktwechsel, Losgröße
Randbedingungen		
Verarbeitungsgut	Eigenschaften des Verarbeitungsgutes: Kennwerte, Kenngrößen Z_{VG}	Schwankung der Eigenschaften des Verarbeitungsgutes, Änderungsrate
Verarbeitungstechn. System	Parameter des verarbeitungstechnischen Systems Z_{VTS}	Änderung der Parameter, Änderungsrate
Umwelteinflüsse	Umwelteinflüsse X_U	Schwankung der Umwelteinflüsse, Änderungsrate

Anwendungsbeispiel: Produktwechsel und Anlagenerweiterung Zwei Aspekte illustrieren den dynamischen Charakter der Anlagenstruktur des Anwendungsbeispiels. Bei einem Wechsel zwischen den Verpackungsarten erfolgt eine Änderung des Stoffflusses und der Wechsel zwischen den Produktionszweigen für Dreh- und Buncheinschlag. Die aktive Struktur der Anlage verändert sich. Außerdem ist eine zukünftige Erweiterung der Anlage um drei zusätzliche Produktionszweige vorgesehen, die die Anlagenstruktur erheblich abändert.

7.4 Systemverhalten von Verarbeitungsanlagen

7.4.1 Variabilität und Flexibilität von Verarbeitungsanlagen

Verarbeitungstechnische Varietät Der Verarbeitungsvorgang beschreibt den zeitlichen Ablauf der Einwirkung auf das Verarbeitungsgut und dessen Zustandsänderung. Er erfasst damit alle Zustände, die das Wirksystem während des Vorgangs annimmt. Die Anzahl dieser Zustände wird hier als verarbeitungstechnische Varietät V_{VT} definiert. Sie hängt von der Verarbeitungsfunktion und den Randbedingungen des Verarbeitungsvorgangs ab, die ihn bestimmen. Die Anzahl der Zustände des Verarbeitungsgutes während der Zustandsänderung, die Anzahl der unterschiedlichen Zustandsänderungen im Verarbeitungsprozess und die Anzahl der unterschiedlichen Ausprägungen der Randbedingungen beeinflussen auf diese Weise die verarbeitungstechnische Varietät. Tab. 7.14 führt die Einflussgrößen der Varietät auf, die sich von den Einflussgrößen des Verhaltens von verarbeitungstechnischen Systemen in Tab. 7.13 ableiten.

Tab. 7.14: Einflussgrößen der verarbeitungstechnischen Varietät.

	Vorgang	Prozess
Verarbeitungsaufgabe		
Qualitativ	Anzahl der Zustände während der Zustandsänderung	Anzahl der unterschiedlichen Produktvarianten
Quantitativ	Einstellbereich der Ausbringung	Schwankungsbreite der Losgrößen
Randbedingungen		
Verarbeitungsgut	Anzahl der relevanten Kenngrößen und Kennwerte des Verarbeitungsgutes	Schwankungsbreite der Eigenschaften des Verarbeitungsgutes
Verarbeitungstechn. System	Anzahl der Parameter des Arbeitsorgans	Schwankungsbreite der Parameter des Arbeitsorgans
Umwelteinflüsse	Anzahl der relevanten Umwelteinflüsse	Schwankungsbreite der Umwelteinflüsse

Erforderliche Varietät von verarbeitungstechnischen Systemen Das Gesetz der erforderlichen Varietät aus Kap. 6.3.1 formuliert den Zusammenhang zwischen der Vielfalt der von außen auf ein System einwirkenden Einflüsse, der Varietät des Systems und der Anzahl der unterschiedlichen Verhaltensweisen, die es daraufhin zeigt. Im Falle von verarbeitungstechnischen Systemen legen die Verarbeitungsaufgabe und die Randbedingungen die Varietät $V_{A,RB}$ der von außen einwirkenden Einflüsse fest. Die Varietät V_{VTS} bezeichnet die Anzahl der möglichen Zustände des verarbeitungstechnischen Systems. Die Varietät V_V benennt die Anzahl der Verhaltensweisen des Systems, wobei die Erfüllung der Verarbeitungsaufgabe eine Verhaltensweise ist und jedes davon abweichende Verhalten einer weiteren. Damit lautet das Gesetz der erforderlichen Varietät für verarbeitungstechnische Systeme:

$$V_V \geq \frac{V_{A,RB}}{V_{VTS}} \quad (7.4)$$

Die Schwankungsbreite des Systemverhaltens kann nach diesem Gesetz nur konstant gehalten werden, wenn die Varietät des Systems gleichermaßen steigt. Die zunehmenden Anzahl an Produktvarianten, wie sie Kap. 2 erläutert, führt demnach zu einer wachsenden Vielfalt der äußeren Einflüsse, die auf ein verarbeitungstechnisches System wirken.

Variabilität und Flexibilität von Verarbeitungsanlagen Ein verarbeitungstechnisches System kann sowohl funktionsvariable Elemente besitzen als auch strukturflexibel sein und auf beide Arten seine Varietät V_{VTS} abbilden. Tab. 7.15 zeigt eine Auswahl möglicher Ausprägungen von Funktionsvariabilität und Strukturflexibilität in Verarbeitungsanlagen. Allerdings sind keine allgemeinen Aussagen dazu möglich, weil Variabilität und Flexibilität sowohl von der betrachteten Hierarchieebene als auch vom Anwendungsfall abhängen. Es kann lediglich auf den Zusammenhang aus Kap. 6.3.1 verwiesen werden, wonach sich die Funktionsvariabilität eines Systems in der darunterliegenden Hierarchieebene als Strukturflexibilität wiederfindet.

Tab. 7.15: Mögliche Ausprägungen der Variabilität und Flexibilität in Verarbeitungsanlagen.

Funktionsvariabilität	Strukturflexibilität
Änderung der Parameter der Einwirkung (z.B. Bewegungsbahn, Druck, Temperatur), Variation der Arbeitsgeschwindigkeit	Austausch oder Stillsetzen von Komponenten (Anlagenmodule, Arbeitsorgane), Änderung des Stoffflusses

Funktionale Redundanz von Verarbeitungsanlagen Ein verarbeitungstechnisches System ist nach Kap. 6.3.1 funktional redundant, wenn die Varietät des Systems größer ist als die Vielfalt der Einflüsse

$$V_{VTS} > V_{A,RB} . \quad (7.5)$$

So liegt funktionale Redundanz bspw. vor, wenn eine Verarbeitungsanlage mehr Formatvarianten des Produktes verarbeiten kann, als in der Verarbeitungsaufgabe gefordert, oder größere Schwankungen der Umwelteinflüsse kompensieren kann, als tatsächlich auftreten.

Anwendungsbeispiel: Varietät der Produkte Eine vollständige Erfassung der Varietät der Verpackungsanlage kann hier auf Grund der großen Anzahl von Einflussfaktoren und der unvollständigen Angaben der Angebotsunterlagen nicht geleistet werden. Stattdessen erfolgt eine exemplarische Untersuchung der Varietät bezüglich der Produktvarianten. Nach Tab. 7.6 und Abb. 7.8 beschreibt die Verarbeitungsaufgabe 8 verschiedene Varianten der Schokoladenprodukte und 2 verschiedene Packmittel. Produkt B, C und D haben identische, verarbeitungstechnische Eigenschaften, sodass nur 6 Schokoladenprodukte unterschieden werden müssen. Für jedes Schokoladenprodukt ist nur eine Verpackungsvariante und eine Sorte Packmittel vorgesehen (vgl. Abb. 7.14), wodurch keine Erhöhung der Variantenvielfalt entsteht. Damit beträgt die Varietät der Produkte laut Gesamtverarbeitungsaufgabe

$$V_{VA,PV} = 6 . \quad (7.6)$$

Die Varietät $V_{VA,PV}$ der Verarbeitungsanlage beschreibt in dieser exemplarischen Untersuchung die Anzahl der unterschiedlichen Produktvarianten, die die Anlage verpacken kann. Aus den Angebotsunterlagen geht hervor, dass die Anlage alle Produktvarianten verpacken kann. Ihre Varietät bezüglich der Produktvarianten beträgt damit

$$V_{VA,PV} = 6 . \quad (7.7)$$

Die Verpackungsanlage setzt diese Varietät sowohl durch Strukturflexibilität als auch durch Funktionsvariabilität um. Der Wechsel zwischen Dreheinschlag und Buncheinschlag erfolgt über das Wechseln der aktiven Produktionszweige. Auf diese Weise ändert sich die Struktur der im Betrieb befindlichen Anlage. Der Wechsel zwischen den unterschiedlichen

Schokoladenprodukten findet innerhalb der Module und Maschinen statt. Sie sind damit funktionsvariabel. Allerdings sei angemerkt, dass diese Sichtweise für das Anwendungsbeispiel nur deshalb gilt, weil die Module und Maschinen als kleinste Betrachtungselemente verwendet werden. Auf einer darunterliegenden Ebene zeigen sie Strukturflexibilität.

7.4.2 Stabilität von Verarbeitungsprozessen

Verarbeitungstechnische Stabilität Stabilität ist die Eigenschaft eines Systems, sein Systemziel trotz des Einflusses von Störungen zu erfüllen. Das Ziel jedes verarbeitungstechnischen Systems ist die Erfüllung der Verarbeitungsaufgabe (siehe Kap. 7.3.2). Jegliche äußeren Einflüsse, die das System von diesem Ziel abbringen können und zu einer Abweichung $Z_{VG,Y,Ist} \neq Z_{VG,Y,Soll}$ zwischen Verarbeitungsergebnis und Verarbeitungsziel führen, sind Störungen. Diese äußeren Einflüsse sind in Kap. 7.3.3 beschrieben worden. So kann bspw. sowohl die Änderung der Umweltparameter, als auch ein Produktwechsel zu einer Abweichung von der Verarbeitungsaufgabe führen. Ein Verarbeitungsprozess ist infolgedessen stabil, wenn das verarbeitungstechnische System zu jedem Zeitpunkt die Verarbeitungsaufgabe erfüllt. Es zeigt unter dieser Bedingung eine einzige Verhaltensweise und die verarbeitungstechnische Stabilität ist damit durch

$$V_V = 1 \quad (7.8)$$

definiert. Jede Art der Abweichung von der Verarbeitungsaufgabe ist Ausdruck einer anderen Verhaltensweise und hat zur Folge, dass die Varietät des Verhaltens $V_V > 1$ wird.

Stabilitätsbedingung für Verarbeitungsprozesse Aus dem Gesetz der erforderlichen Varietät folgt die Bedingung für einen stabilen Verarbeitungsprozess mit

$$V_{VTS} \geq V_{A,RB} \cdot \quad (7.9)$$

Sie besagt, dass ein verarbeitungstechnisches System nur dann die Verarbeitungsaufgabe zu jedem Zeitpunkt erfüllen kann, wenn seine Varietät mindestens der Vielfalt der Verarbeitungsaufgabe und Randbedingungen entspricht. Unter den Bedingungen der zunehmende Produktvielfalt (vgl. Kap. 2) bedeutet dieses Gesetz, dass Verarbeitungsanlagen variabelere Funktionen und flexiblere Strukturen vorweisen müssen, um dennoch Qualitätsprodukte herstellen zu können.

Verfügbarkeit als Maß für die Stabilität von Verarbeitungsprozessen Die Verfügbarkeit beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Verarbeitungsanlage zu einem bestimmten Zeitpunkt ihre Verarbeitungsaufgabe erfüllt (siehe Kap. 3.2.6). Sie entspricht der Wahrscheinlichkeit, mit der eine Anlage Einflüsse kompensieren kann, die während des Betriebes störend auf sie einwirken. Die Verfügbarkeit kann damit als Maß für die Stabilität eines Verarbeitungsprozesse gegenüber Störungen angesehen werden.

Stabilitätsformen verarbeitungstechnischer Systeme Kap. 6.3.2 führt drei verschiedene Stabilitätsformen ein, die sich durch die Anzahl der kompensierbaren Störungen unterscheiden. Tab. 7.16 überträgt sie auf verarbeitungstechnische Systeme. Dabei wird zwischen Stabilität gegenüber schwankenden Randbedingungen und gegenüber veränderlichen Verarbeitungsaufgaben unterschieden, weil erstere eine Veränderung der Systembedingungen und letztere eine Veränderung des Systemziels betreffen. Die Einteilung in einfache Stabilität, Ultrastabilität und Multistabilität bezieht sich im ersten Fall auf die

Anzahl der verschiedenen Randbedingungen und entspricht den drei Arten der Prozessregelung, wie sie in Kap. 3.1.3 beschrieben sind. Im zweiten Fall bezieht sich die Einteilung auf die Anzahl der unterschiedlichen Produktvarianten.

Tab. 7.16: Stabilitätsformen verarbeitungstechnischer Systeme.

Stabilitätsform	Varietät der Randbedingung	Varietät der Verarbeitungsaufgabe
Einfache Stabilität	Stabilität gegenüber Änderungen einer Randbedingung	Stabilität gegenüber Änderung eines Aufgabenparameters
Umsetzung	Konventionelle Regelung	Funktionsausführung
Beispiel	Geschwindigkeitsregelung entlang einer Bahnkurve $y = 2x^2 + x + 3$	Greifer schließt bis Kontakt mit Verarbeitungsgut
Ultrastabilität	Stabilität gegenüber Änderungen einer Klasse von Randbedingungen	Stabilität gegenüber Änderung einer Klasse von Aufgabenparameter
Umsetzung	Adaptive Regelung	Variable verarbeitungstechnische Elemente
Beispiel	Anpassung der Bahnkurve: $y = 2x^2 + x + 3 \rightarrow y = x^2 + 3x - 2$	Anpassung eines Greifers an versch. Formate durch Änderung des Abstandes der Greiferfinger
Multistabilität	Stabilität gegenüber Änderungen einer Vielfalt von Randbedingungen	Stabilität gegenüber umfangreichen Änderung der Aufgabe
Umsetzung	Selbstoptimierende Regelung	Flexible Anlagenstruktur
Beispiel	Änderung des Bewegungsgesetzes: $ax^2 + bx + c \rightarrow rx^3 + sx^2 + tx + u$	Wechsel verschiedener Greifer für unterschiedliche Geometrien

Anwendungsbeispiel: Stabilität gegenüber Produktwechseln Anschließend an die exemplarische Untersuchung der Varietät im vorangegangenen Kapitel, erfolgt auch die Illustration der Stabilität bezüglich des Wechsels der Produktvariante. Stabilität bedeutet in diesem Fall und unter Vernachlässigung der übrigen Einflussgrößen, dass die Verarbeitungsanlage alle Produktvarianten gemäß der Aufgabenstellung verpackt. Die Stabilitätsbedingung lautet damit

$$V_{VA,PV} \geq V_{GVA,PV} = 6. \quad (7.10)$$

Die Verarbeitungsanlage erfüllt diese Bedingung, wie im vorangegangenen Kapitel bereits erläutert wurde. Die Anpassung an die unterschiedlichen Verpackungsarten kann dabei als umfassender gelten, als die Anpassung an die Varianten der Schokoladenprodukte. Erstere betrifft das gesamte Einschlagprinzip, letztere lediglich Parameteränderungen innerhalb dieses Einschlagprinzips. Infolgedessen erfordert die Anpassung an den Wechsel der Verpackungsart eine Strukturveränderung dahingehend, dass der in Betrieb befindliche Produktionszweig wechselt, während die Anpassung an den Wechsel des Schokoladenproduktes nur eine Funktionsänderung der Verpackungsmaschine und der vorge-schalteten Module verlangt.

7.4.3 Komplexität von Verarbeitungsanlagen

Verarbeitungstechnische Komplexität Die Komplexität bezeichnet die Anzahl der unterschiedlichen Zustände pro Zeiteinheit und erweitert damit die Varietät um die zeitli-

che Komponente. Je größer die Anzahl der unterschiedlichen Zustände im betrachteten Zeitraum und je zufälliger ihr Auftreten ist, desto größer ist die Komplexität (siehe Kap. 6.3.3). Dieser Zeitbezug findet sich in den Einflussparametern des Verhaltens aus Kap. 7.3.3 wieder. Sie bestimmen damit die verarbeitungstechnische Komplexität K_{VT} :

- Die nomologische Komplexität $K_{VT,N}$ betrifft die Regeln, nach denen die Zustände im Verarbeitungsprozess nacheinander auftreten. Sie steigt mit der Zufälligkeit der Abfolge der Zustandsänderung und Produktvarianten sowie der Schwankungen der Randbedingungen.
- Die operationale Komplexität $K_{VT,O}$ betrifft die Anzahl der Zustände die während des Verarbeitungsprozess auftreten. Sie steigt mit der verarbeitungstechnischen Varietät, der Arbeitsgeschwindigkeit, der Änderungsrate der Randbedingungen und bei sinkender Losgröße.

Tab. 7.17 führt die Einflussparameter der Komplexität auf. Sie leiten sich ebenfalls von den Einflussgrößen des Verhaltens verarbeitungstechnischer Systeme in Tab. 7.13 ab. Die verarbeitungstechnische Komplexität ist bspw. bei höheren Arbeitsgeschwindigkeiten, kleineren Losgrößen, schnell schwankenden Umwelteinflüssen oder starkem Verschleiß der Arbeitsorgane größer als bei langsamen Arbeitstakten, selten wechselnden Produktvarianten, konstanten Umwelteinflüssen oder verschleißarmen Arbeitsorganen.

Tab. 7.17: Einflussparameter der verarbeitungstechnischen Komplexität.

	Verarbeitungstechn. Varietät V_{VT}	Nomologische Komplexität $K_{VT,N}$	Operationale Komplexität $K_{VT,O}$
Verarbeitungsaufgabe			
Qualitativ	Anzahl der Zustände der Zustandsänderung	Abfolge der Zustandsänderungen	Anzahl der Zustände pro Zeiteinheit
	Anzahl der Produktvarianten	Abfolge der Produktvarianten	Losgröße, Zeitlicher Abstand zwischen Produktwechseln
Quantitativ	Einstellbereich der Ausbringung	Zufälligkeit der Wechsel der Ausbringung	Zeitliche Dichte der Ausbringungswechsel
	Schwankungsbreite der Losgrößen	Zufälligkeit der Schwankungen der Losgröße	Änderungsrate der Losgröße
Randbedingungen			
Verarbeitungsgut	Anzahl und Schwankungsbreite der Verarbeitungguteigenschaften	Zufälligkeit der Schwankungen der Verarbeitungguteigenschaften	Änderungsrate der Verarbeitungsguteigenschaften
Verarbeitungstechnisches System	Anzahl und Schwankungsbreite der Parameter des Verarbeitungssystems	Abfolge der Parameteränderungen des Verarbeitungssystems	Änderungsrate der Parameter des Verarbeitungssystems
Umwelteinflüsse	Anzahl und Schwankungsbreite der Umwelteinflüsse	Zufälligkeit der Schwankungen der Umwelteinflüsse	Änderungsrate der Umwelteinflüsse

Komplexität von Verarbeitungsanlagen Die verarbeitungstechnische Komplexität definiert die funktionelle Komplexität eines verarbeitungstechnischen Systems. Seine Struktur und Hierarchie kann ebenfalls unter dem Gesichtspunkt der Komplexität bewertet werden. Die strukturelle Komplexität eines Systems ist umso größer, je größer die Anzahl der Elemente und Relationen sowie die Anzahl deren unterschiedlicher Arten ist. Im Falle verarbeitungstechnischer Systeme betrifft dies die Anzahl und Arten der Wirkpaarungen, Teilsysteme und ihrer Wechselwirkungen. So steigt die strukturelle Komplexität einer Verarbeitungsanlage mit der Zahl der Teilverarbeitungsaufgaben, die unterschiedliche Wirkpaarungen fordern, und mit der Abhängigkeit die sie voneinander haben. Die hierarchische Komplexität eines Systems ist umso größer, je mehr Hierarchieebenen es aufweist. Eine Verarbeitungsanlage ist hierarchisch umso komplexer, je mehr Baugruppenebenen sie besitzt. Kap. A.2 stellt eine Übersicht der Unterscheidungsmerkmale einfacher und komplexer Verarbeitungsanlagen bzw. verarbeitungstechnischer Systeme bereit.

Erforderliche Komplexität von Verarbeitungsanlagen Auf Grund der direkten Abhängigkeit der Komplexität von der Varietät (vgl. Kap. 6.3.3) kann das Gesetz der erforderlichen Varietät auch zwischen der Komplexität $K_{A,RB}$ der Verarbeitungsaufgabe und der Randbedingungen des Verarbeitungsvorganges, der Komplexität K_{VTS} des verarbeitungstechnischen Systems und der Komplexität K_V seines Verhaltens formuliert werden:

$$K_V \geq \frac{K_{A,RB}}{K_{VTS}} . \quad (7.11)$$

Unter der Maßgabe eines stabilen Verarbeitungsprozesses und der Erfüllung der Verarbeitungsaufgabe gilt infolgedessen auch die Stabilitätsbedingung

$$K_{VTS} \geq K_{A,RB} . \quad (7.12)$$

Dieses Gesetz sagt aus, dass die Komplexität einer Verarbeitungsanlage mindestens so groß sein muss wie die Komplexität der Verarbeitungsaufgabe und ihrer Randbedingungen, um die Verarbeitungsaufgabe zu erfüllen. Daraus folgt auch, dass die Komplexität einer Verarbeitungsanlage bei unveränderter Verarbeitungsaufgabe nicht unter den Wert $K_{VTS} = K_{A,RB}$ gesenkt werden kann, ohne dabei die Erfüllung der Verarbeitungsaufgabe zu beeinträchtigen.

Operationale Redundanz von Verarbeitungsanlagen Unter dem Zeitbezug der Komplexität ist auch der Begriff der Redundanz für Verarbeitungsanlagen erweiterbar. So ist eine Verarbeitungsanlage auch redundant, wenn ihre operationale Komplexität $K_{VTS,O}$ mit

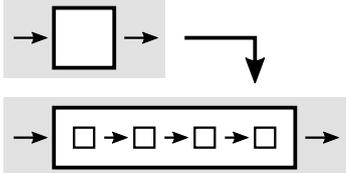
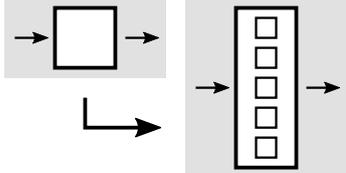
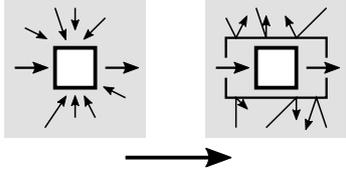
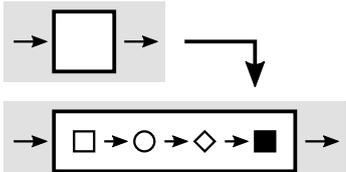
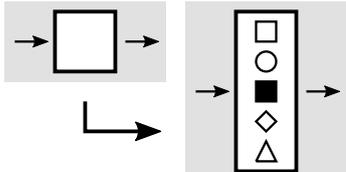
$$K_{VTS,O} > K_{VT,O} \quad (7.13)$$

größer ist als die entsprechende verarbeitungstechnische Komplexität $K_{VT,O}$. Dieser Fall tritt ein, wenn die Nennausbringung einer Anlage über der Arbeitsgeschwindigkeit liegt, mit der sie betrieben wird.

Komplexitätsauslagerung in Verarbeitungsanlagen Aus dem eben formulierten Gesetz folgt, dass die Komplexität einer Verarbeitungsanlage nicht reduziert werden kann, ohne ihre Verarbeitungsfunktion oder die Randbedingungen zu ändern. Kap. 6.3.3 zeigt allerdings, dass Komplexität auf mehrere Subsysteme verteilt werden kann, die eine geringere Komplexität aufweisen als das gesamte System. Die Verarbeitungstechnik hat im Rahmen des Innermaschinellen Verfahrens (siehe Kap. 3.2.5) mit der Reihenschaltung und Parallelschaltung von Wirkpaarungen Methoden entwickelt, die eine solche Aufteilung der

Komplexität der Verarbeitungsaufgabe erlauben. Sie lassen sich prinzipiell auch auf verarbeitungstechnische Systeme im Allgemeinen anwenden. Darüber hinaus können die Randbedingungen, die die Eigenschaften des Verarbeitungsgutes, des verarbeitungstechnischen Systems und der Umwelt stellen, über Konditionierungsmaßnahmen beeinflusst werden. Tab. 7.18 führt die Methoden im Einzelnen auf.

Tab. 7.18: Möglichkeiten zur Verteilung der verarbeitungstechnischen Komplexität. Auswirkung auf die Komplexität der einzelnen, verarbeitungstechnischen Elemente. Vgl. Tab. 3.6

Reihenschaltung	Parallelschaltung	Konditionierung
<p>Gleiche Funktionen</p>  <p>Reduzierung der Anzahl der Zustände pro Zeiteinheit</p>	<p>Gleiche Funktionen</p>  <p>Reduzierung der Komplexität der quantitativen Aspekte der Verarbeitungsaufgabe</p>	 <p>Reduzierung der Komplexität der Randbedingungen</p>
<p>Unterschiedliche Funktionen</p>  <p>Reduzierung der Anzahl der Zustände der Zustandsänderung</p>	<p>Unterschiedliche Funktionen</p>  <p>Reduzierung der Anzahl der Produktvarianten</p>	

Anwendungsbeispiel: Funktionstrennung, Parallelisierung und Konditionierung Die Veranschaulichung der Zusammenhänge zur Komplexität von Verarbeitungsanlage erfolgen an der Teilverarbeitungsaufgabe Verpacken. Die sieben Verpackungsmaschinen, die diese Teilverarbeitungsaufgabe umsetzen, weisen bezüglich der Produktvarianten und der Einstellausbringung eine geringere Komplexität K_{VM} auf, als die Komplexität K_{TVA} der Teilverarbeitungsaufgabe selbst :

$$K_{VM} < K_{TVA} . \quad (7.14)$$

Aus der Angebotsdokumentation sind drei Maßnahmen abzulesen, die zu dieser Aufteilung der Gesamtkomplexität der Teilverarbeitungsaufgabe Verpacken auf weniger komplexe Verpackungsmaschinen führen.

- **Funktionstrennung:** Die Aufteilung der Teilverarbeitungsaufgabe auf zwei verschiedene Typen von Verpackungsmaschinen reduziert die Komplexität der einzelnen Maschinen bezüglich der Produktvarianten. So beträgt die Komplexität für die Teilverarbeitungsaufgabe Verpacken $K_{TVA,PV} = 6$, wohingegen die Varietät der beiden Verpackungsmaschinen mit $K_{MCC1,PV} = 3$ und $K_{EMC1,PV} = 3$ geringer ist.
- **Parallelisierung:** Die Aufteilung der Teilverarbeitungsaufgabe auf drei bzw. vier identische Verpackungsmaschinen reduziert die operationale Komplexität im Bezug auf

die Nennausbringung. So beträgt die geforderte Ausbringung für Produkt A 2288 Stk./min, wohingegen die entsprechende Verpackungsmaschine MCC nur 950 Stk./min leistet. Alle vier Maschinen gemeinsam haben eine Nennausbringung von 3800 Stk./min und weisen damit operationale Redundanz auf.

- Konditionierung: Den Verpackungsmaschinen sind mehrere Module vorgeschaltet, die die Aufgabe haben, die Schokoladenprodukte in eine einheitliche Ausrichtung und einen konstanten Abstand zueinander zu bringen. Auf diese Weise wurde die Schwankungsbreite der Verarbeitungseigenschaften bezüglich ihrer Orientierung und Position verringert. Folglich ist die Komplexität der Randbedingungen für die einzelnen Maschinen geringer als für die gesamte Anlage.

Die angewendeten Maßnahmen greifen alle auf die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Methoden zur Verteilung von Komplexität zurück.

8 Systemtheoretische Untersuchung des Standes der Technik des Verarbeitungsmaschinenbaus

Sensible, technische Daten – Die Informationslage Eine aussagekräftige, systemtheoretische Analyse der Funktion und Struktur von Verarbeitungsanlagen setzt die Kenntnis ihrer technischen Details voraus. Diese Informationen stellen das verarbeitungstechnische Wissen der Unternehmen dar und sind deshalb sensible Daten, die i.d.R. nicht weitergegeben werden. Eine detaillierte, systemtheoretische Untersuchung des aktuellen Produktportfolios des Verarbeitungsmaschinenbaus ist aus diesem Grund an dieser Stelle nicht möglich. Die folgenden drei Aspekte beruhen auf den allgemeinen Feststellungen aus Kap. 2.3, Tab. 2.4 und Tab. 2.5.

Geschlossene, statische Anlagenstruktur – Flache Hierarchien Der hohe Anteil an Sonderanfertigungen, der geringe Standardisierungsgrad und die weitgehend unveränderlichen Anlagen deuten auf das Fehlen hierarchischer Anlagenstrukturen hin. Kap. 7.2.5 führt aus, dass die Modularisierung von Verarbeitungsanlagen zu Hierarchiebildung führt. Der hohe Anteil an Sondermaschinen und der geringe Grad der Standardisierung sind Ausdruck einer fehlenden Modularisierung (vgl. Kap. 3.1.2). Kap. 6.3.2 erläutert außerdem, dass die Fähigkeit zu Strukturveränderungen in hierarchischen Systemen größer ist als in nicht hierarchischen. Statische Anlagenstrukturen sind deshalb ein weiterer Hinweis auf fehlende Hierarchie.

Mechanische Prozesslösungen – Geschlossene Systeme Die Erfüllung der Verarbeitungsaufgabe erfordert i.d.R. mehrere, synchronisierte Verarbeitungsvorgänge und ungleichförmige Relativbewegungen der Verarbeitungsgüter. Sie führen bei hoher Arbeitsgeschwindigkeit zu großer, dynamischer Beanspruchung sowohl des verarbeitungstechnischen Systems, als auch des Verarbeitungsgutes. Verarbeitungsmaschinen weisen daher häufig komplizierte, zentrale Getriebe auf, die auch bei hohen Ausbringungen durch mechanischen Zwanglauf die Synchronizität und die Bahnführung garantieren, aber nur in beschränktem Umfang anpassungsfähig sind. Diese mechanischen Getriebe setzen kinematische Funktionen um, die eine eindeutige Zuordnung einer Ausgangsgröße zu einer Eingangsgröße vornehmen und damit einen deterministischen Zusammenhang zwischen beiden beschreiben. Solche Getriebeleistungen sind geschlossene Systeme und können umfangreiche Anpassungsvorgänge nicht durchführen (vgl. Kap. 6.2).

Spezialisierung – Geringe Varietät, große operationale Komplexität Verarbeitungsanlagen bauen i.d.R. auf wenigen, stark spezialisierten Verarbeitungsmaschinen mit hohen Ausbringungen auf, die die kleinsten, verarbeitungstechnischen Elemente einer Anlage darstellen. Eine enge Spezialisierung auf bestimmte Verarbeitungsaufgaben bedeutet geringe Anpassungsfähigkeit und Varietät. Hohe Nennausbringungen führen zu hoher operationaler, verarbeitungstechnischer Komplexität. Diesen Zusammenhang stellt

Tab. 7.17 her. Die Tatsache, dass die Konsumgüterproduzenten im Zusammenhang mit großer Produktvielfalt, kleinen Losgrößen und veränderlichen Randbedingungen über schlechte Anlagenauslastung, lange Stillstandszeiten und Minderung der Verarbeitungsqualität klagen, hängt mit dieser Spezialisierung zusammen. Die Mängel beschreiben die ungenügende Stabilität der Verarbeitungsprozesse gegenüber Schwankungen der äußeren Einflüssen und sind ursächlich auf eine zu geringe verarbeitungstechnische Varietät der Maschinen zurückzuführen (vgl. Kap. 7.4.2). Als Grund für die geringe Varietät kann die hohe Nennausbringung angeführt werden, die einen Anteil zur verarbeitungstechnischen Komplexität beiträgt. Die Komplexität der verarbeitungstechnischen Elemente ist deshalb allein auf Grund der hohen Nennausbringung groß. Die mögliche Erhöhung ihrer Varietät ist gering, weil sie durch eine Grenze der beherrschbaren Komplexität nach oben beschränkt wird (vgl. Kap. 6.3.3). Abb. 8.1 veranschaulicht diesen Zusammenhang ausgehend von einer konstanten verarbeitungstechnischen Komplexität. Es wird deutlich, dass sich umfangreiche Anpassungsfähigkeit, d.h. große verarbeitungstechnische Varietät, und hohe Nennausbringung, d.h. große operationalen Komplexität, unter der Voraussetzung einer begrenzten Gesamtkomplexität gegenseitig ausschließen.

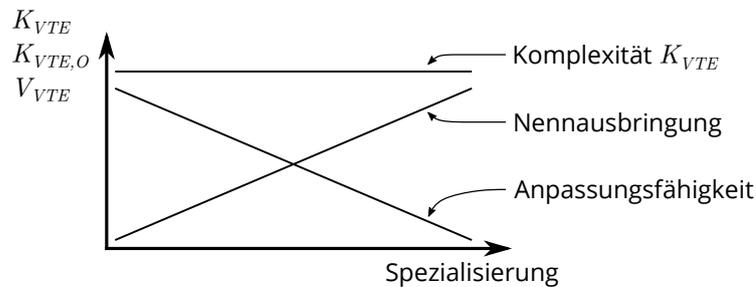


Abb. 8.1: Schematische Darstellung des Zusammenhanges zwischen Anpassungsfähigkeit, Nennausbringung und Komplexität K_{VTE} eines verarbeitungstechnischen Elementes. V_{VTE} Varietät des verarbeitungstechnischen Elementes, $K_{VTE,O}$ operationale Komplexität des verarbeitungstechnischen Elementes.

9 Vorschläge zur Neugestaltung von Verarbeitungsanlagen

9.1 Systemtheoretische Untersuchung des allgemeinen Lastenheftes

9.1.1 Systemtheoretische Interpretation der Anforderungen

Übersicht über die systemtheoretischen Anforderungen Das allgemeine Lastenheft aus Kap. 4.1 enthält Anforderungen, die das zu Beginn dieser Arbeit beschriebene Umfeld an Verarbeitungsanlagen stellt. Tab. 9.1 überträgt sie in systemtheoretische Formulierungen, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden. Diese systemtheoretischen Anforderungen beziehen sich auf die Funktion, die verarbeitungstechnische Varietät und die Struktur von Verarbeitungsanlagen und dienen als Ausgangspunkt für die Erarbeitung von Prinzipien und Mitteln zu deren Neugestaltung.

Tab. 9.1: Systemtheoretische Formulierung der Anforderungen des allgemeinen Lastenheftes.

Aspekt	Anforderung	Systemtheoretische Bedeutung
Skalierbare Anlagensysteme	Abstufung der Anlagenkapazität bzw. Nennausbringung	Funktion: Variation der quantitativen Bestandteile der Verarbeitungsfunktion
	Abstufung der Ausstattung und Anlagenfunktion	Funktion: Variation der qualitativen Bestandteile der Verarbeitungsfunktion
Rekonfigurierbare Anlagenstrukturen	Austauschbare Ausrüstung, erweiterbare Funktion	Funktion und Struktur: Veränderlichkeit der Verarbeitungsfunktion und der Anlagenstruktur
Anpassungsfähige Technologie	Einstellbare Nennausbringung	Varietät V_{VT} : Großer Ausbringungsbereich der Nennausbringung
	Große Variantenvielfalt der verarbeitbaren Produkte	Varietät V_{VT} : Große Anzahl der unterschiedlichen Produktvarianten und Losgrößen
	Stabile Prozesse unter veränderlichen Produktionsbedingungen	Varietät V_{VT} : Große Zahl und große Schwankungsbreite der äußeren Einflüsse, die kompensiert werden können
Integrierbare Anlagenkonzepte	Verschiedene Produktionsweisen	Funktion: Variation der Verarbeitungsfunktionen möglich
	Einbindung in bestehende Anlagen	Struktur: Hierarchische Gliederung der Anlagenstruktur
	Standardisierung der Entwicklungsprozesse	Struktur: Hierarchische Gliederung der Anlagenstruktur

Funktion – Variation und Veränderlichkeit der Verarbeitungsfunktion Skalierbarkeit, Rekonfigurierbarkeit und Integrierbarkeit fordern Verarbeitungsanlagen, die mit unterschiedlich umfangreichen Verarbeitungsfunktionen erhältlich sind und deren Verarbeitungsfunktion im Bestand veränderbar ist. Diese Forderung umfasst sowohl die qualitativen als auch die quantitativen Aspekte der Verarbeitungsfunktion (siehe Abb. 7.13):

- Qualitativ: Variation und Veränderlichkeit der Zustandsänderung, die eine Verarbeitungsanlage am Verarbeitungsgut durchführt, der Produktvarianten, die sie verarbeiten kann, und der störenden Einflussgrößen, gegenüber denen sie den Verarbeitungsprozess stabil halten kann.
- Quantitativ: Variation und Veränderlichkeit der Nennausbringung der gesamten Verarbeitungsanlage, der Losgrößen, die sie verarbeiten kann, und der Änderungsgeschwindigkeit der störenden Einflussgrößen, die kompensiert werden können.

Ein Vergleich mit Tab. 7.17 zeigt, dass diese Aspekte die verarbeitungstechnische Komplexität einer Anlage K_{VA} beeinflussen. Damit lässt sich der in Abb. 9.1 dargestellte Zusammenhang zwischen der Kapazität und dem Umfang der Ausstattung einer Verarbeitungsanlage sowie ihrer Komplexität herleiten. Skalierbarkeit von Anlagensystemen bedeutet deshalb Skalierbarkeit ihrer Komplexität.

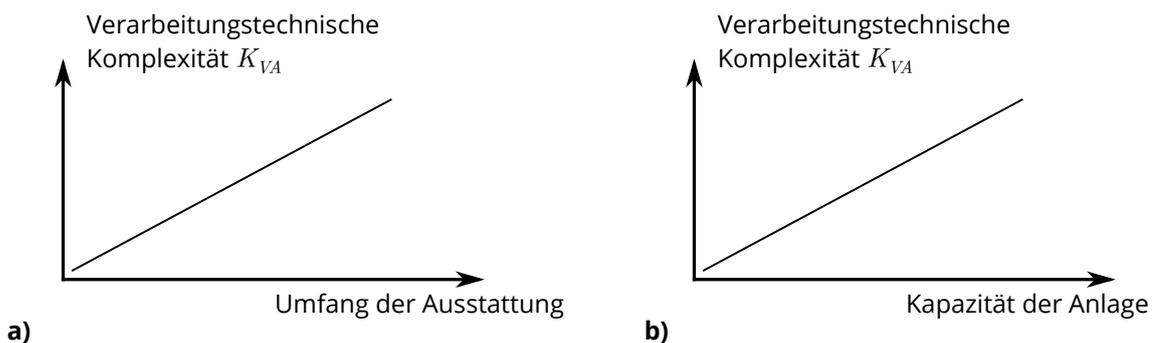


Abb. 9.1: Skalierbarkeit von Anlagensystemen: Prinzipieller Zusammenhang zwischen der verarbeitungstechnischen Komplexität K_{VA} einer Verarbeitungsanlage und a) dem Umfang ihrer Ausstattung bzw. b) der Anlagenkapazität.

Varietät – Große verarbeitungstechnische Varietät Unter dem Aspekt der Anpassungsfähigkeit verlangen die Anforderungen große, verarbeitungstechnische Varietät von einer Verarbeitungsanlage. Sie bezieht sich sowohl auf die Verarbeitungsaufgabe als auch auf die Randbedingungen des Verarbeitungsvorganges:

- Verarbeitungsaufgabe: Eine veränderliche Nennausbringung fordert einen großen Einstellungsbereich der Ausbringung. Große Variantenvielfalt der verarbeiteten Produkte äußert sich in unterschiedlichen Produkten und Losgrößen (vgl. Tab. 7.14).
- Randbedingungen: Veränderliche Produktionsbedingungen bedeuten schwankende Einflussgrößen, die als Störung auf den Verarbeitungsprozess wirken. Um in diesem Fall die Verarbeitungsaufgabe trotzdem zu erfüllen, ist nach dem Gesetz der erforderlichen Varietät eine große, verarbeitungstechnische Varietät erforderlich (siehe Kap. 7.4.2).

Die verarbeitungstechnische Varietät ist Bestandteil der verarbeitungstechnischen Komplexität, sodass aus den beschriebenen Anforderungen auch eine hohe Komplexität der Verarbeitungsanlagen folgt.

Struktur – Hierarchische Gliederung der Anlagenstruktur Lokal begrenzte Strukturänderungen wirken sich über die Relationen auf das gesamte System aus. Dieser Einfluss ist eingeschränkt, wenn sich die Wechselwirkungen durch Hierarchiebildung lokal konzentrieren (vgl. Kap. 6.1.3). Die Rekonfigurierung von Anlagenstrukturen durch den Austausch von Bestandteilen der Ausrüstung und die Einbindung von Anlagenteilen in bestehende Anlagen stellen eine solche, lokale Strukturänderung dar. Um die Funktion der anderen Bestandteile einer Verarbeitungsanlage durch diese Strukturänderung nicht über die Maßen zu beeinflussen, ist infolgedessen eine hierarchische Gestaltung der Anlagenstruktur notwendig. Eine solche Struktur hilft auch bei der Standardisierung von Entwicklungsprozessen, weil die Randbedingungen der Entwicklungsaufgabe dadurch begrenzt und bekannt sind.

9.1.2 Resultierende systemtheoretische Fragestellung

Aufteilung der verarbeitungstechnischen Komplexität Die im vorangegangenen Kapitel erläuterten Anforderungen des Lastenheftes führen zu Verarbeitungsanlagen hoher, veränderlicher Komplexität. Kap. 6.1.3 weist darauf hin, dass ein System mit zunehmender Komplexität schwieriger zu überschauen und zu handhaben ist. An dieser Grenze der Beherrschbarkeit ist der Verarbeitungsmaschinenbau angelangt, wie Kap. 8 erläutert. Kap. 6.1.3 zeigt, dass in diesem Fall die Verteilung der Komplexität auf mehrere Subsysteme Abhilfe schaffen kann. Hierbei gilt der Zusammenhang, dass durch Bildung von Subsystemen die Komplexität der einzelnen Elemente sinkt, während die Komplexität der Systemstruktur und -hierarchie steigt. Die grundlegende Fragestellung ist daher, wie diese Komplexität innerhalb der Anlage zwischen ihren Elementen und ihrer Struktur verteilt wird. Es ist die in Abb. 9.2 abgebildete Frage, ob sich die verarbeitungstechnische Komplexität in wenigen Elementen konzentriert oder unter Inkaufnahme einer größeren Komplexität der Anlagenstruktur auf viele verteilt.

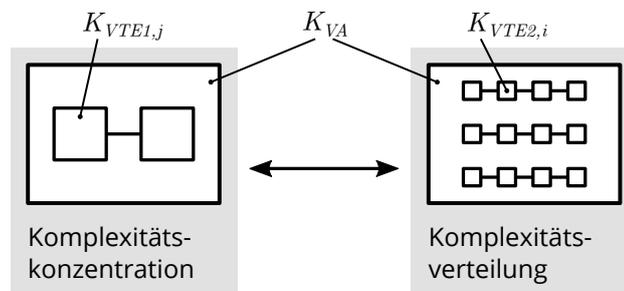


Abb. 9.2: Systemtheoretische Fragestellung: Konzentration der Anlagenkomplexität K_{VA} in wenigen Elementen mit hoher Komplexität $K_{VTE1,j}$ oder Verteilung auf viele Elemente kleinerer Komplexität $K_{VTE2,i}$. $K_{VTE1,j} \geq K_{VTE2,i}$.

Abgrenzung der Funktionselemente und Strukturierung der Anlage Die Elemente und die Struktur eines Systems bestimmen seine Funktion und Komplexität (siehe Kap. 6.1.2). So folgt auch die Verarbeitungsfunktion und die verarbeitungstechnische Komplexität einer Anlage aus der Verarbeitungsfunktion der verarbeitungstechnischen Elemente und ihrer Anordnung in der Anlagenstruktur. Die Aufteilung der Komplexität einer Verarbeitungsanlage umfasst damit zwei Hauptaufgaben:

- Die funktionelle Abgrenzung der verarbeitungstechnischen Elemente, da die Funktion eines Elementes seine Komplexität bestimmt (vgl. Kap. 6.3.3).
- Die strukturelle Anordnung der verarbeitungstechnischen Elemente in der Anlage, die Funktion und Komplexität der gesamten Verarbeitungsanlage festlegt.

Die Funktion der verarbeitungstechnischen Elemente und die Anlagenstruktur bedingen sich gegenseitig, sodass beide Hauptaufgaben gemeinsam betrachtet werden müssen.

9.2 Randbedingungen für die Neuentwicklung von Verarbeitungsanlagen

9.2.1 Vorüberlegungen

Methoden zur Reduzierung der verarbeitungstechnischen Komplexität Das allgemeine Lastenheftes fordert eine weitreichende Anpassungsfähigkeit von Verarbeitungsanlagen gegenüber einer Vielzahl von äußeren Einflüssen. Nach dem Gesetz der erforderlichen Varietät aus Kap. 7.4.2 kann nur eine hohe, verarbeitungstechnische Varietät diese Anpassungsfähigkeit ermöglichen. Gleichzeitig stellt die Konsumgüterindustrie hohe Anforderungen an die Ausbringung der Anlagen und fordert damit eine hohe, operationale Komplexität. Kap. 8 erläutert, dass auf Grund des Zusammenhang zwischen Varietät und Anpassungsfähigkeit sowie operationaler Komplexität und Nennausbringung die Komplexität eines verarbeitungstechnischen Elementes hauptsächlich von diesen beiden Größen beeinflusst wird. Damit ergeben sich zwei grundsätzliche Methoden zur Reduzierung seiner Komplexität:

- Reduzierung der Anpassungsfähigkeit: Verringerung der verarbeitungstechnischen Varietät.
- Senkung der Nennausbringung: Verringerung der operationalen, verarbeitungstechnischen Komplexität.

Kap. 8 zeigt außerdem, dass bislang überwiegend die erste Methode Anwendung fand. Durch Spezialisierung wurde die Varietät gesenkt, um bei beherrschbarer Komplexität hohe Ausbringungen zu erreichen.

Bezugsebenen der Komplexitätsverteilung Die Anforderungen des Lastenheftes unterscheiden sich hinsichtlich ihres Zeitbezuges und des Umfanges der geforderten Anpassung. Die Veränderungen, auf die sie sich beziehen, treten in unterschiedlichen Zeitabständen auf und umfassen unterschiedliche Anzahlen von Parametern. So tritt bspw. eine Änderung der Verarbeitungsguteigenschaften mit jedem der aufeinanderfolgenden Verarbeitungsgüter auf, wohingegen ein Produktwechsel erst nach einem deutlich längeren Zeitraum erfolgt. Gleichzeitig ist die Änderung der Verarbeitungsguteigenschaften nicht so umfangreich, wie ein Produktwechsel, der gänzlich neue Ausprägungen und Schwankungsbreiten einschließt. Aus diesen unterschiedlichen Bezugsebenen folgen unterschiedliche Forderungen an die Anpassungsfähigkeit einer Verarbeitungsanlage, z.B. im Bezug auf die Schnelligkeit eines Anpassungsvorganges. Tab. 9.2 schlägt deshalb drei Bezugsebenen vor, innerhalb derer die Verteilung der Komplexität behandelt wird. Die Ebenen orientieren sich an der gesonderten Betrachtung von Verarbeitungsaufgabe und Randbedingungen, die in Kap. 7.4.2 im Rahmen der Stabilität vorgenommen wurde.

Tab. 9.2: Bezugsebenen der Komplexitätsverteilung.

Zeitbezug, Umfang	Beschreibung	Beispiel
langfristig, hoch	Änderungen, die Funktion und Struktur der Anlage betreffend	Änderung der Anlagenkapazität und der verarbeitungstechnischen Ausstattung
mittelfristig, mittel	Änderungen, die Verarbeitungsaufgabe betreffend	Produktwechsel, Änderung der Losgröße
kurzzeitig, gering	Änderungen, die Randbedingungen betreffend	Schwankungen der Randbedingungen

9.2.2 Grundkonzept

Zweistufige Komplexitätsaufteilung Das vorgeschlagene Anlagenkonzept verfolgt entlang der Einteilung der Bezugsebenen der Komplexitätsverteilung eine zweistufige Aufteilung der Komplexität:

- In allen drei Bezugsebenen: Reduzierung der Nennausbringung der verarbeitungstechnischen Elemente.
- Ergänzend mit aufsteigender Bezugsebene: Reduzierung der Anpassungsfähigkeit der verarbeitungstechnischen Elemente.

Diese Form der Verteilung berücksichtigt, dass kurzzeitige, dicht aufeinanderfolgende Änderungen schnelle Anpassungsvorgänge erfordern und langfristige Änderungen langsamere Anpassungsvorgänge erlauben. Strukturänderungen bedeuten in Verarbeitungsanlagen den zeitaufwendigen Wechsel von Baugruppen, der für schnelle Anpassungsvorgänge nicht praktikabel ist. Langfristige Anpassungen hingegen können mit Blick auf einer Reduzierung der Komplexität der verarbeitungstechnischen Elemente durchaus auf Basis von Strukturänderungen erfolgen.

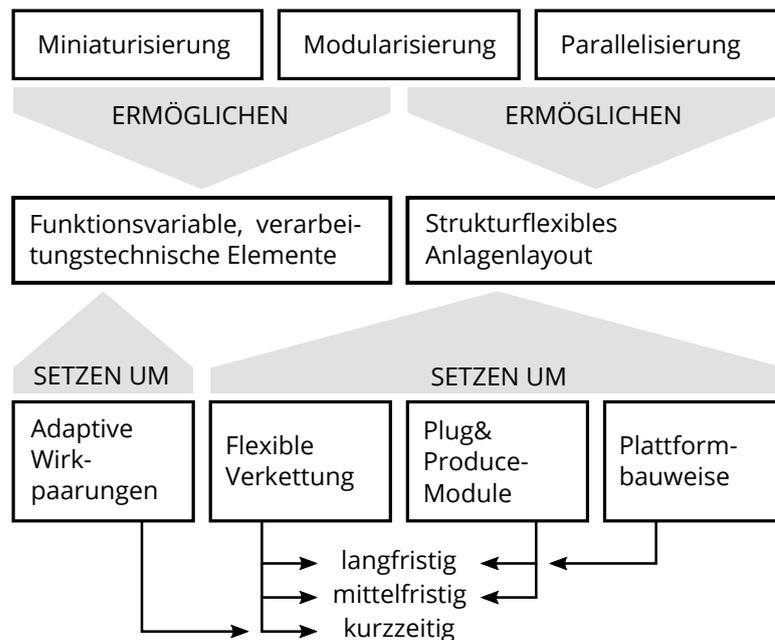


Abb. 9.3: Übersicht über das Grundkonzept, die Gestaltungsprinzipie und technologischen Mittel bei der Neugestaltung von Verarbeitungsanlagen.

Übersicht über die Prinzipie und technischen Maßnahmen Das beschriebene Grundkonzept baut auf funktionsvariablen, verarbeitungstechnischen Elementen und einem strukturflexiblen Anlagenlayout auf. Voraussetzung dafür ist die Reduzierung der Komplexität der verarbeitungstechnischen Elemente und die hierarchische Gliederung der Anlagenstruktur. Miniaturisierung (vgl. Kap. 3.1.4), Modularisierung (vgl. Kap. 3.1.2) und Parallelisierung (vgl. Kap. 7.2.5) schaffen diese Voraussetzungen. Darüber hinaus setzen vier Einzelmaßnahmen die Anforderungen des Lastenheftes in den drei Bezugsebenen um. Abb. 9.3 stellt die Prinzipie und Maßnahmen sowie ihren Zusammenhang zu den Bestandteilen des Grundkonzeptes dar.

9.3 Gestaltungsprinzipie – Modularisierung, Miniaturisierung, Parallelisierung

Ziel – Basis für anpassungsfähige Elemente und rekonfigurierbare Strukturen Miniaturisierung und Modularisierung ermöglichen gemeinsam funktionsvariable, verarbeitungstechnische Elemente, indem sie durch Reduzierung der Nennausbringung und Aufteilung der Verarbeitungsfunktionen die Komplexität der einzelnen Elemente senken. Parallelisierung und Modularisierung ermöglichen gemeinsam strukturflexible Anlagen, indem sie eine hierarchische Struktur aus vielen Elementen bilden. Abb. 9.4 veranschaulicht das Zusammenwirken der drei Prinzipie, die in den folgenden drei Abschnitten detailliert behandelt werden.



Abb. 9.4: Schematische Darstellung des Zusammenwirkens von Miniaturisierung, Modularisierung und Parallelisierung.

Modularisierung – Module für Teilverarbeitungsfunktionen Kap. 3.1.2 erläutert, dass es durch Modularisierung möglich ist, verschiedenartige Dinge systematisch zu beherrschen, indem sie aus wenigen, standardisierten Bestandteilen, den Modulen, zusammengesetzt werden. Kap. 7.2.5 ergänzt, dass durch Modularisierung hierarchische Anlagenstrukturen entstehen. Modularisierung ist damit der Weg zu strukturflexiblen Anlagen, die durch Kombination einer begrenzten Menge standardisierter Funktionsmodule verschiedene Verarbeitungsfunktionen umsetzen. Hierbei entscheidet die Abgrenzung der Teilverarbeitungsfunktionen untereinander über den Erfolg des Modulsystems in der Praxis. Welche Teilverarbeitungsfunktionen in einem Modul gemeinsam zu integrieren sind und welche auf verschiedenen Modulen zu verteilen, hängt vom Anwendungsfall ab und kann nicht pauschal entschieden werden. An dieser Stelle dient ein Verweis auf die Bezugsebenen aus Tab. 9.2 als Orientierung:

- In einem Modul zu vereinende Teilverarbeitungsfunktionen: Ähnliche Funktionen und solche, die im häufigen Wechsel aufeinander folgen.
- Auf verschiedenen Modulen zu verteilende Teilverarbeitungsfunktionen: Funktionen, die sich stark unterscheiden und seltener wechseln.

Die Formulierung allgemeingültiger Regeln für die Aufteilung der Verarbeitungsfunktionen und die Entwicklung konkreter Modulsysteme für spezielle Anwendungsfälle, erfordern eine eigene Untersuchung.

Miniaturisierung – Verkleinerung und mechanische Vereinfachung In Tab. 2.5 und Kap. 8 wurde bereits erläutert, dass sich große operationale Komplexität in verarbeitungstechnischen Elementen durch komplizierte, mechanische und daher eingeschränkt anpassungsfähige Getriebe zeigt. Sie werden eingesetzt, um die dynamische Beanspruchung in der Wirkpaarung durch beschleunigungsarme Bahnführung zu senken und aufeinanderfolgende, voneinander abhängige Vorgänge zu synchronisieren. Die Reduzierung der Nennausbringung bewirkt nun, dass die Beschleunigungskräfte durch geringere Bewegungsgeschwindigkeiten absinken und die Synchronisierung durch eine großzügigere Bemessung der Vorgangszeiten an Bedeutung verliert. Kap. 3.1.4 führt aus, dass dadurch einerseits alternative Wirkprinzipien Anwendung finden können und andererseits auch eine Verdichtung der Funktion erfolgen kann. Im Falle von Verarbeitungsanlagen bedeutet das vor allen Dingen die Abkehr von zentralen Getrieben zugunsten dezentraler, kompakter Servomotoren und Roboter. Sie ermöglichen aufgrund des fehlenden, mechanischen Zwanglaufes auch eine Veränderung der Bahnführung. Die Miniaturisierung eröffnet damit die Möglichkeit zur

- Vereinfachung der mechanischen Bestandteile,
- Verkleinerung des Bauraumes und
- Steigerung der Anpassungsfähigkeit der Verarbeitungsmodule.

Konkrete Methoden und technische Lösungen für die Miniaturisierung zu finden, kann Aufgabestellung zukünftiger Forschung und Entwicklung sein.

Parallelisierung – Grundlegende Struktur für Verarbeitungsanlagen Zweck und Folge der Miniaturisierung ist die Reduzierung der Nennausbringung $Q_{r,VMo}$ der Verarbeitungsmodule auf einen Bruchteil der Nennausbringung $Q_{r,VA}$ einer Verarbeitungsanlage. Zum Erreichen der geforderten Anlagenausbringung ist es allerdings notwendig, die Verarbeitungsmodule in n_{VL} identischen, parallelen Verarbeitungslinien anzuordnen. Nach Tab. 3.7 gilt:

$$Q_{r,VA} = n_{VL} \cdot Q_{r,VMo} \quad (9.1)$$

Auf diese Weise entsteht eine Anlagenstruktur aus mehreren parallelen Linien, die wiederum aus aufeinanderfolgenden Verarbeitungsmodulen bestehen kann (siehe Abb. 9.4). Die Anzahl der parallelen Linien steigt mit zunehmender Miniaturisierung und die Anzahl der unterschiedlichen Module mit zunehmender Aufteilung der Verarbeitungsfunktion. Die strukturelle Komplexität der Anlage steigt infolgedessen, weil sich die Anzahl und Vielfalt der Elemente erhöht (siehe Abb. 6.10). Gleichzeitig sinkt die Komplexität der Verarbeitungsmodule. Abb. 9.5 veranschaulicht diesen Zusammenhang. Die Frage, wie weit die Miniaturisierung und Funktionstrennung gehen darf, ohne dass die Anlagenstruktur zu komplex wird, führt zur grundlegenden, systemtheoretischen Fragestellung, die in Kap. 9.1.2 formuliert wurde. Eine Untersuchung dieser Frage ist daher von großem Interesse.

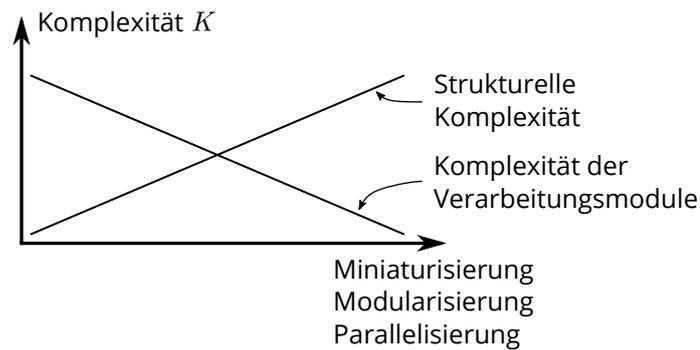


Abb. 9.5: Schematische Darstellung der gegenseitigen Beeinflussung der Komplexität der einzelnen Verarbeitungsmodule und der strukturellen Komplexität der Anlage.

9.4 Technologische Mittel zur Umsetzung

9.4.1 Plug&Produce-Module und Plattformbauweise

Ziel – Austauschbare Verarbeitungsmodule und Entwicklungsfähigkeit des Baukastens
Flexible Anlagenstrukturen erfordern austauschbare Verarbeitungsmodule, die an verschiedene Stellen ohne großen Rüstaufwand in die Anlagenstruktur eingebunden werden können und deren Austausch die Verarbeitungsanlage nicht beeinträchtigen. Module nach dem Plug&Play-Prinzip erfüllen diese Anforderungen (siehe Kap. 3.1.2). Darüber hinaus ist es erforderlich, auf zukünftige, heute noch nicht bekannte Entwicklungen des Konsumgütermarktes zu reagieren und neue Verarbeitungsaufgaben umsetzen zu können. Solche nicht absehbaren Änderungen sind mit Hilfe einer Plattformbauweise realisierbar (siehe Kap. 3.1.2). Plug&Produce-Module in Plattformbauweise ermöglichen damit mittel- und langfristige Veränderungen der Verarbeitungsfunktion einer Anlage.

Plug&Produce – Autonome Verarbeitungsmodule Damit Verarbeitungsmodule ohne großen Aufwand und ohne Beeinträchtigung der Verarbeitungsanlage ausgetauscht werden können, müssen sie zwei Voraussetzungen erfüllen:

- Selbständige Durchführung der Verarbeitungsfunktion einschließlich aller dazu notwendigen Teilfunktionen.
- Einheitliche Kopplungsstellen, über die die Verarbeitungsmodule in die Anlage eingebunden werden.

Diese Voraussetzungen sind Teil des Plug&Produce-Prinzips. Verarbeitungsmodule müssen deshalb alle Teilsysteme eines verarbeitungstechnischen Systems aus Tab. 7.10 besitzen, die für die Umsetzung der Verarbeitungsfunktion notwendig sind. Standardisierte Schnittstellen verbinden jedes Teilsystem mit dem entsprechenden Teilsystem eines anderen Moduls der Verarbeitungsanlage. So entstehen Verarbeitungsmodule, die nach außen über einheitlich Wege wechselwirken und autonom ihre Verarbeitungsfunktion umsetzen. Abb. 9.6 a) zeigt das Schema eines solchen Moduls. Verarbeitungsanlagen, die auf Plug&Produce-Modulen aufbauen, zeigen für alle verarbeitungstechnischen Teilsysteme die selbe Struktur und Hierarchie (vgl. Kap. 7.2.5). Die konkrete Umsetzung des Plug&Produce-Prinzips betrifft von der Steuerungsarchitektur bis zur Baugruppenstruktur alle Teilsysteme eines Verarbeitungsmoduls und bedarf einer weiterführenden Betrachtung.

Plattformbauweise – Verarbeitungstechnische Elemente für zukünftige Aufgaben Die Plattformbauweise unterteilt ein technisches System in eine ausführungsneutrale Plattform und anwendungsspezifische Anbauten (siehe Kap. 3.1.2). Diese Bauweise ermöglicht die Schnittstellen der Verarbeitungsmodule festzulegen, ohne dass die Verarbeitungsfunktion bekannt ist. Der innere Aufbau folgt dann den spezifischen Anforderungen jeder einzelnen Verarbeitungsfunktion. Eine geeignete Modulplattform gewährleistet dadurch, dass auch zukünftige Verarbeitungsfunktionen in eine Anlage integriert werden können. Abb. 9.6 a) und b) veranschaulichen schematisch, dass sich die äußere Erscheinung, die Schnittstellen und die Plattform bei einer Änderung der funktionellen Baugruppen nicht verändern. Die Ausgestaltung einer solchen Plattform und die Faktoren die sie beeinflussen, sind ein eigenständiges Thema für die Forschung und Entwicklung.

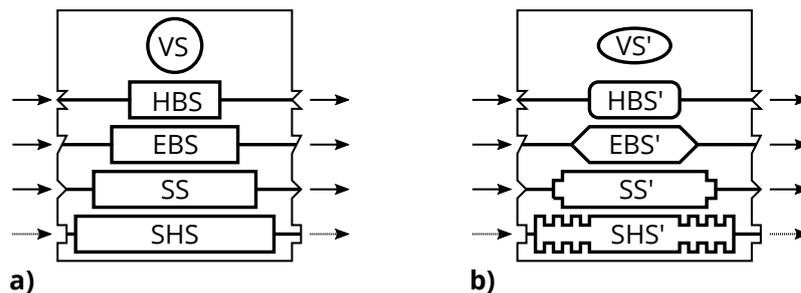


Abb. 9.6: Schematische Darstellung eines Plug&Produce-Moduls in Plattformbauweise. VS Verarbeitungssystem, HBS Hilfsstoffbereitstellungssystem, EBS Energiebereitstellungssystem, SS Steuerungssystem, SHS Stütz- und Hüllsystem. a) Plug&Produce-Prinzip: Modularisierung und Integration aller Teilsysteme des verarbeitungstechnischen Systems in ein Verarbeitungsmodul und einheitliche Schnittstellen. b) Plattformbauweise: Neu- und Weiterentwicklung ggü. a) ohne Änderung der Schnittstellen.

9.4.2 Adaptive Wirkpaarungen

Ziel – Stabilität gegenüber schwankenden Randbedingungen Schwankende Umwelteinflüsse, Verarbeitungseigenschaften und Eigenschaften des Verarbeitungsmoduls sind die schnellsten Veränderungen, die eine Verarbeitungsanlage berücksichtigen muss. Kap. 9.2 führt aus, dass funktionsvariable Verarbeitungsmodule Stabilität gegenüber diesen Randbedingungen gewährleisten können. Variable Wirkpaarungen mit selbstoptimierender Prozessregelung ermöglichen diese Stabilität und werden durch Methoden der vorausschauenden Instandhaltung ergänzt.

Variable Wirkpaarungen und selbstoptimierende Prozessregelung Ein stabiler Verarbeitungsprozess bedeutet, dass das Verarbeitungsergebnis unabhängig von den Umwelteinflüssen sowie den Eigenschaften des Verarbeitungsgutes und des verarbeitungstechnischen Systems konstant den Qualitätsforderungen entspricht (siehe Kap. 7.4.2). Dieses Ziel kann durch anpassungsfähige Wirkpaarungen und selbstoptimierende Prozessregelung erreicht werden, wie Kap. 3.1.3 beschreibt. Voraussetzung ist, dass

- die Umwelteinflüsse, die Verarbeitungseigenschaften und die Eigenschaften des Verarbeitungsmoduls erfasst und
- gegenüber dem Prozess und den Qualitätsmerkmalen des Produktes der Verarbeitung bewertet werden können sowie
- eine ausreichende Variabilität der Wirkpaarungen besteht.

Vorausschauende Instandhaltung Verarbeitungstechnische Systeme können durch Verschleiß, Abnutzung und Ermüdung einen Zustand erreichen, der so stark von dem für den Verarbeitungsvorgang erforderlichen Zustand abweicht, dass die Qualitätsvorgaben der Verarbeitungsaufgabe nicht erfüllt werden können. Vorausschauenden Instandhaltung ermöglicht es, den Zeitpunkt vorherzusagen, zu dem dieser Zustand eintritt (vgl. Kap. 3.1.3). Auf diese Weise können unvorhergesehene Ausfälle der Verarbeitungsmodulare durch vorbeugende Instandhaltungsmaßnahmen und ein Produktionsausfall verhindert werden.

9.4.3 Flexible Verkettung

Ziel – Skalierung, Variation und Ausgleich Verarbeitungsmodulen, die Fördervorgänge umsetzen, kommt in strukturflexiblen Verarbeitungsanlagen eine besondere Stellung zu. Eine Veränderung der Anordnung der aufeinanderfolgenden Verarbeitungsmodulare und parallelen Verarbeitungslinien, die die Verarbeitungsgüter durchlaufen, verursacht immer auch eine Veränderung des Stoffflusses. Die Verkettung der Verarbeitungsmodulare muss diese Strukturänderungen abbilden können und infolgedessen flexibel sein. Diese Flexibilität verfolgt in den drei Bezugsebenen unterschiedliche Ziele:

- Langfristige, umfangreiche Änderungen: Skalierung von Verarbeitungsanlagen.
- Mittelfristige Änderungen mittleren Umfangs: Variation von Nennausbringung und Produktwechsel.
- Kurzzeitige Änderungen geringen Umfangs: Ausgleich ausgefallener Anlagenteile.

Skalierung von Verarbeitungsanlagen Die Skalierung von Verarbeitungsanlagen spielt in zwei Fällen langfristiger, umfangreicher Änderungen eine Rolle (vgl. Tab. 4.1):

- In der Projektierung, wenn Anlagen in unterschiedlichen Kapazitätsstufen und Ausstattungen angeboten werden.
- Bei der Erweiterung bzw. beim Umbau einer Anlage, wenn die Anlagenkapazität oder Ausstattung verändert wird.

Abb. 9.7 veranschaulicht diese Veränderungen. Beide Fälle fordern, dass die Verkettung selbst skalierbar ist. Sowohl die Fördermenge, die das Fördersystem bewerkstelligen kann, als auch die Förderrichtungen, in die es transportieren und verteilen kann, muss veränderlich sein. Auf Grund der Seltenheit dieser Veränderungen ist es nicht notwendig, die erforderlichen Anpassungen des Fördersystems während des Anlagenbetriebes durchzuführen. Ein Baukastensystem aus standardisierten Fördermodulen, die je nach projektierte Anlage und im Falle einer Änderung unterschiedlich angewendet und ausgetauscht werden, ist denkbar.

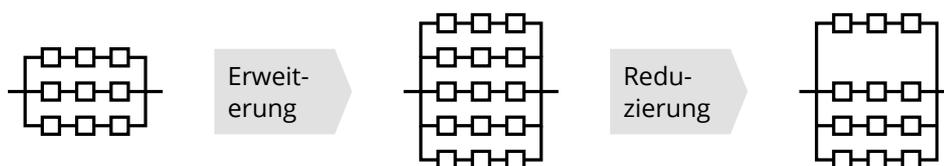


Abb. 9.7: Flexible Verkettung bei langfristigen, umfangreichen Änderungen: Erweiterung, Entfernung und Tausch von Verarbeitungslinien.

Variation der Nennausbringung und Produktwechsel Mittelfristige Veränderungen gehen vom Produktlos aus und umfassen die Produktvariante und Losgröße (siehe Tab. 9.2). Je nach Losgröße und Auslieferungstermin sind deshalb unterschiedliche Ausbringungen notwendig (vgl. Tab. 9.1). Eine flexible Verkettung erlaubt es in diesem Fall parallele Verarbeitungslinien in unterschiedlicher Weise zusammenzuschalten, wie Abb. 9.8 schematisch darstellt. Die Ausbringung steigt mit der Anzahl der zusammengeschalteten Verarbeitungslinien. Ebenso kann die Anzahl gleichzeitig verarbeiteter, unterschiedlicher Produktvarianten durch die Aufteilung in mehrere Gruppen paralleler Verarbeitungslinien variiert werden. Daraus entsteht die Möglichkeit, verschieden Lose in unterschiedlichen Zeitdauern, parallel oder aufeinanderfolgend zu verarbeiten. Voraussetzung ist, dass die Trennung und Zusammenschaltung der Verarbeitungslinien durch schnelle und einfache Umrüstvorgänge an den Fördermodulen möglich ist.

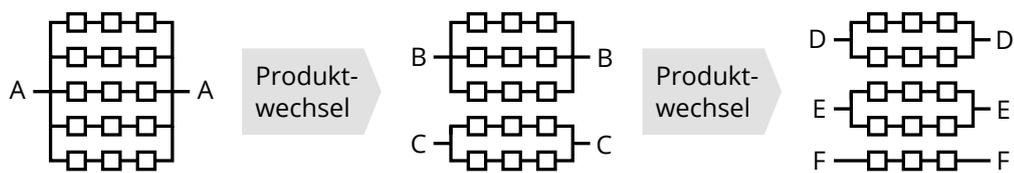


Abb. 9.8: Flexible Verkettung bei mittelfristigen Änderungen mittleren Umfangs: Produktwechsel mit unterschiedlicher Anzahl von Produktvarianten und verschiedenen Nennausbringungen.

Ausgleich ausgefallener Anlagenteile Kurzzeitige Veränderungen des Stoffflusses liegen dann vor, wenn eine Verarbeitungslinie ausfällt und durch eine redundante Reservelinie ersetzt werden muss (siehe Abb. 9.9). In diesem Szenario steht der zeitliche Aspekt im Vordergrund. Um den Produktivitätsverlust zu minimieren, muss der Umschaltvorgang auf die Reservelinie in möglichst kurzer Zeit stattfinden. Eine flexible Verkettung muss diesen Vorgang bestenfalls automatisch vollziehen.

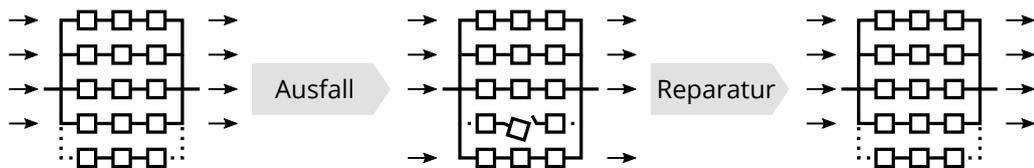


Abb. 9.9: Flexible Verkettung bei kurzzeitigen Änderungen geringen Umfangs: Ausfall einzelner Verarbeitungslinien und zeitweiser Ersatz durch redundante Linien.

Ressourcenplanung im Anlagenbetrieb Die Anlagenbelegung mit unterschiedlichen Produktionslosen und die Reaktion bei Störungen verlangt eine umfassende Produktionsplanung, die Losgrößen, Liefertermine, geplante Stillstandszeiten, Personalbedarf, Rüstzeiten und andere Aspekte einbezieht. Das Potential der flexiblen Verkettung kann nur ausgeschöpft werden, wenn diese Faktoren in die Optimierung des Anlagenbetriebs einfließen. Voraussetzung dafür ist ein Optimierungswerkzeug für die Ressourcenplanung.

9.4.4 Exemplarischer Vorschlag für das Anwendungsbeispiel

Hauptziel des vorgeschlagenen Konzeptes Kap. 7.4.3 erläutert, dass etliche Module der Verarbeitungsanlage des Anwendungsbeispiels ausschließlich dazu dienen, den Verarbeitungsgutstrom zu vereinzeln und zu konditionieren. Die Ursache ist in der hohen Arbeitsgeschwindigkeit der Verarbeitungsmaschinen zu suchen, die sehr enge Toleranzen bezüglich der Ausrichtung, des Abstandes und der Geschwindigkeit der Verarbeitungsgüter fordert. Hauptziel des hier vorgeschlagenen und in Abb. 9.10 dargestellten Anlagenkonzeptes ist es daher durch Reduzierung der Ausbringung der einzelnen Verpackungsmaschinen auf die vorgelagerten Vereinzelnungs- und Konditioniervorgänge zu verzichten.

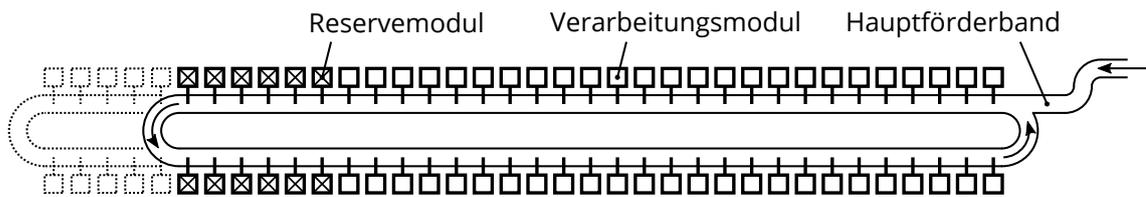


Abb. 9.10: Exemplarischer Vorschlag eines Layouts für das Anwendungsbeispiel, das die Prinzipien Miniaturisierung, Modularisierung und Parallelisierung umsetzt. Optionale Ausbaustufen sind gepunktet dargestellt.

Miniaturisierung und Funktionsintegration Kern des Konzeptes ist ein Verarbeitungsmodul, das Vereinzeln, Metalledektion, Ausschleusung kontaminierter Produkte und Verpackung in einem Modul vereint. Eine exemplarische Aufbaustruktur ist in Abb. 9.11 abgebildet. Denkbar sind sowohl Verarbeitungsmodulare für Doppeldreheinschlag und Bunch-einschlag, als auch Wechselmodule, die nur eine der beiden Einschlagarten umsetzen. Die Vereinzelnung erfolgt dabei als direkte Entnahme der einzelnen Produkte durch einen Greifer o.Ä. vom Hauptband. Auf diese Weise entfallen sämtliche Vereinzelnungs- und Fördermodule von der Abgabestation CTS-300 bis zum Ausrichtband. Die Metalledektion und Ausschleusung findet im Verarbeitungsmodul statt, sodass sich der Ausfall dieser Funktion nur auf das jeweilige Modul auswirkt. Diese Funktionsintegration bedeuten eine größere Komplexität der Module gegenüber den aktuellen Verpackungsmaschinen und ist nur durch starke Reduzierung der Ausbringung zu verwirklichen (vgl. Abb. 8.1). In welchem Maße diese Miniaturisierung stattfindet, kann hier nicht festgelegt werden. Exemplarisch wird daher eine Nennausbringung von 50 Stk./min angenommen.

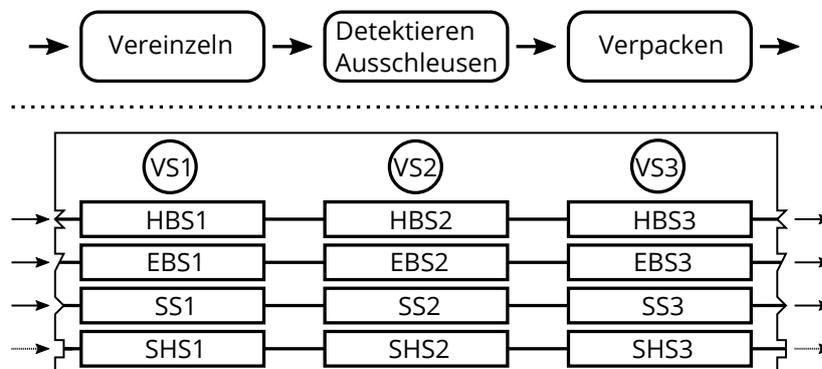


Abb. 9.11: Aufbaustruktur eines Verpackungsmoduls. Funktionsablauf und Teilsysteme. VS Verarbeitungssystem, HBS Hilfsstoffaufbereitungssystem, EBS Energieaufbereitungssystem, SS Steuerungssystem und SHS Stütz- und Hüllsystem.

Parallelisiertes Layout Zentrales Element des Layouts ist ein endloses Hauptförderband, dem die Produkte von der Schokoladengießanlage zugeführt werden. Die Produkte haben auf diesem Band keine bestimmte Ordnung und laufen kontinuierlich um. Entlang des Bandes stehen die austauschbaren Verarbeitungsmodule, die über Greifersysteme Produkte vom Band entnehmen. Auf diese Weise ist der Betrieb der Verarbeitungsmodule untereinander vollständig unabhängig und Pufferspeicher sind bei ausreichender Dimensionierung des Hauptbandes nicht notwendig. Die Anzahl der notwendigen Verarbeitungsmodule hängt von ihrer Verfügbarkeit ab (vgl. Kap. 3.2.6), über die hier allerdings keine Aussage getroffen werden kann. Unter Annahme einer Verfügbarkeit von 100% wären bei einer Nennausbringung von 50 Stk./min 50 Verarbeitungsmodule notwendig. Bei geringerer Einzelverfügbarkeit kommen Reservemodule hinzu (siehe Kap. 3.2.6). Die Anlage ist durch Verlängerung des Hauptbandes und Hinzufügen weiterer Module erweiterbar.

9.5 Allgemeines Pflichtenheft

Die in Kap. 9.2 beschriebenen technologischen Mittel ergeben zusammen den Lösungsvorschlag für die Forderungen des allgemeinen Lastenheftes. Er ist in Abb. 9.3 in Form eines allgemeinen Pflichtenheftes dargestellt.

Tab. 9.3: Allgemeines Pflichtenheft: Prinzipien für die Gestaltung von Verarbeitungsanlagen

Maßnahme	Beschreibung
Plug&Produce-Module	Selbständige Durchführung der Verarbeitungsfunktion einschließlich aller dazu notwendigen Teilfunktionen
	Einheitliche Kopplungsstellen zur Einbindung in die Verarbeitungsanlage
Plattformbauweise	Ausführungsneutrale Plattform und anwendungsspezifische Anbauten
Adaptive Wirkpaarungen	Variable Wirkpaarungen
	Selbstoptimierende Prozessregelung
	Vorausschauende Instandhaltung
Flexible Verkettung	Auswechselbare Fördermodule
	Variable Vernetzung des Stoffflusses und einfache Umrüstvorgänge
	Automatische Umlenkung des Stoffflusses im laufenden Betrieb
	Umfassende Ressourcenplanung im Anlagenbetrieb

10 Bewertung des Lösungskonzeptes

10.1 Ökonomische Bewertung

10.1.1 Die Produktion in der Ökonomie

Die Mikroökonomie versteht die Produktion als Umwandlung von Produktionsfaktoren in Produkte. Abb. 10.1 verdeutlicht diesen Zusammenhang für den hier relevanten Fall der Konsumgüterproduktion. Eine einfachen Näherung der Ökonomie stellt Ausbringungsmengen der Güter und Einsatzmengen der Produktionsfaktoren gegenüber und soll hier als Ansatz genügen. In einer groben Übersicht erläutern die folgenden Kapitel die Wirkung des vorgestellten Anlagenkonzeptes auf die Produktionsfaktoren und Produktionsausbringung [86, 87].

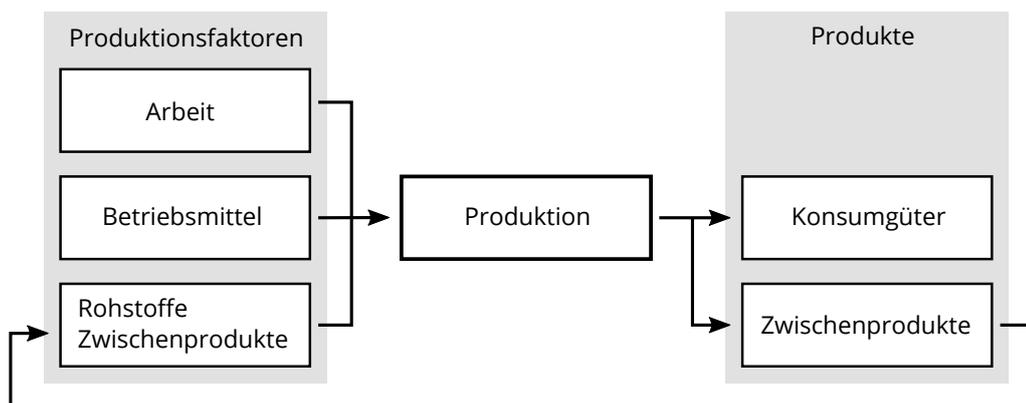


Abb. 10.1: Produktion als Umwandlung von Produktionsfaktoren in Produkte, Anwendungsfall Konsumgüterproduktion. In Anlehnung an [86, 87].

10.1.2 Arbeit

Menschliche Arbeitsleistung Das Verhältnis zwischen dem Arbeitsergebnis, das eine Arbeitskraft erzielt, und der Arbeitszeit, die sie dazu benötigt, wird als Arbeitsleistung bezeichnet. Betrieblichen Bedingungen beeinflussen maßgeblich die Leistungsfähigkeit eines Menschen. Zu ihnen zählen

- das erforderliche Fachwissen zur Erbringung der Arbeitsleistung und
- die Arbeitsgestaltung [87].

Die folgenden beiden Abschnitte umreißen den Einfluss des vorgeschlagenen Anlagenkonzeptes auf diese beiden Bedingungen.

Reduzierung des erforderlichen Fachwissens durch vereinfachte Bedienung Adaptive Wirkpaarungen führen zu stabileren Prozessen (vgl. Kap. 9.4.2) und verringern damit die Anzahl der Störungen, die das Bedienungspersonal behandeln muss. Die damit verbundene

umfangreiche Prozessdatenerfassung ermöglicht darüber hinaus eine genauere Bestimmung des Betriebszustandes einer Verarbeitungsanlage und im Störfall eine präzise Beschreibung der Ursache. Die notwendige Fachkenntnis und erforderliche Erfahrung zur Bedienung einer Anlage sinkt infolgedessen. Modularisierte Anlagen helfen zudem die Ursache einer Störung lokal einzugrenzen, weil die Wechselwirkungen zwischen den Anlagenteilen überschaubarer sind (vgl. Kap. 9.1). Das vorgestellte Anlagenkonzept stellt eine einfacherer Bedienung in Aussicht und dadurch kürzere Reparaturzeiten der Anlage sowie den Einsatz geringer qualifizierten Personals.

Lerneffekte durch Wiederholung Aus der parallelisierten Anlagenstruktur folgt, dass Rüst- und Wartungsaufgaben in großer Wiederholungszahl an identischen Modulen ausgeführt werden müssen (vgl. Kap. 9.3). Durch Wiederholung einer Tätigkeit gewinnen Menschen Übung, Erfahrung und Sicherheit, die zu einer effizienteren und effektiveren Ausführung der Arbeit beitragen [87, 88]. Parallelisierte Anlagen helfen demnach Personal einzulernen und zuverlässiger zu machen.

10.1.3 Rohstoffe und Zwischenprodukte

Rohstoffe, Halbzeuge und Betriebsstoffe Rohstoffe und Zwischenprodukte, auch Halbzeuge genannt, sind Stoffe, die für die Erzeugung der Güter notwendig sind. Dabei ist zu unterscheiden zwischen

- Rohstoffen und Halbzeugen, die Bestandteil der späteren Güter sind, und
- Rohstoffen, die als Hilfs- und Betriebsstoffe für den Betrieb der Anlage erforderlich sind [87, 89].

Die Produktion der Rohstoffe und Halbzeuge ist der Konsumgüterverarbeitung innerhalb der Wertschöpfungskette vorgelagert und auf deren Bedürfnisse eingestellt. Das vorgestellte Anlagenkonzept stellt veränderte Anforderungen an die Rohstoff- und Halbzeugproduktion, wie der folgenden Abschnitt erläutert.

Kleine, veränderliche Gebindegrößen für Rohstoffe und Halbzeuge Herkömmliche Hochleistungsmaschinen benötigen auf Grund ihrer hohen Ausbringung Rohstoffe und Halbzeuge in großen Gebinden, um die Anzahl der Wechsel der Gebinde pro Los gering zu halten. Die Prozesse der Rohstoff- und Halbzeugproduzenten sind deshalb auf große Gebinde ausgerichtet. Bspw. werden Verpackungsfolien i.d.R. nur auf großen Rollen angeboten, die mehrere tausend Packungen ergeben. Miniaturisierte Anlagenmodule und flexible Produktionsplanung fordern allerdings kleine und unterschiedlich große Gebinde. Je nach Losgröße und Termindruck kann die Produktionsplanung mehrere Verarbeitungslinien über einen kurzen Zeitraum oder wenige Linien über einen längeren Dauer für das Los einplanen (vgl. Kap. 9.4.3). Im ersten Fall produzieren viele Linien je eine geringe Produktmenge, was viele Gebinde in kleinen Größen erfordert. Im zweiten Fall produzieren wenige Linien je eine große Produktmenge, was wenige, große Gebinde ermöglicht. Es stellt sich die Frage, ob die Rohstoff- und Halbzeugproduzenten eine solche veränderliche Nachfrage bedienen können, oder ob zusätzliche Prozesse notwendig sind, die große Gebinde anforderungsgerecht portionieren.

10.1.4 Betriebsmittel

Betriebsmittelarten Alle die Elemente einer Produktion, die für die Verrichtung des Produktionsprozesses notwendig sind, werden als Betriebsmittel bezeichnet. Zu ihnen gehören neben Anderen

- Grundstücke und Gebäude,
- Werkzeuge, Apparate, Maschinen und Anlagen sowie
- Lagereinrichtungen [87, 89].

Die folgenden Abschnitte beleuchten einzelne Aspekte der Betriebsmittel.

Vergrößerung der Aufstellfläche Herkömmliche Hochleistungsmaschinen haben eine kompakte Bauart und im Bezug auf ihre Ausbringungsleistung einen geringen Platzbedarf. Je nach Anwendungsfall und technischer Umsetzung kann das hier vorgestellte Anlagenkonzept eine deutlich größer Aufstellfläche benötigen. Zum Einen kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich im Rahmen der Miniaturisierung Ausbringung und Bauraum gleichermaßen reduzieren. Zum Anderen steigt mit der Parallelisierung der Umfang der Verkettungstechnik und damit auch die benötigte Aufstellfläche.

Herstellungskosten für Verarbeitungsanlagen Die Herstellungskosten einer Anlage setzen sich aus Materialkosten, Teilefertigungskosten und Montagekosten zusammen. Folgende Aspekte beeinflussen u.a. die Herstellungskosten:

- Aufgabenstellung: Hohe Anforderungen an Toleranzen, Güte, Garantien u.Ä. steigern die Herstellungskosten.
- Konzept: Je größer die Bauteile sind und je komplexer ihr Aufbau ist, desto teurer ist ein Produkt.
- Stückzahl: Aufteilung einmaliger Kosten, Optimierung von Konstruktion und Fertigung, Mengenrabatte senken die produktbezogenen Herstellungskosten.

Miniaturisierung, Parallelisierung und Modularisierung haben zur Folge, dass sich eine Verarbeitungsanlage aus vielen identischen und kleineren Modulen zusammensetzen. Dadurch sinkt die Größe der Bauteile und die Anzahl der Wiederholungsteile steigt. Komplexe, mechanische Getriebe mit vielen Bauteilen und strengen Toleranzforderungen werden infolge der geringeren Arbeitsgeschwindigkeit durch einfachere Mechanik ersetzt. Es ist daher davon auszugehen, dass die Herstellungskosten eines einzelnen Verarbeitungsmoduls weit unter den Kosten für eine herkömmliche Verarbeitungsmaschine liegen. Inwieweit diese Einsparung durch umfangreichere Verkettungstechnik, die große Anzahl benötigter Anlagenmodule sowie aufwändigere Regelungstechnik für die Stoffflusssteuerung und die Regelung der adaptiven Wirkpaarungen aufgehoben wird, bleibt zu untersuchen.

Optimierung der Ausbringung und Lagerhaltung Die Lagerung von bereits fertiggestellten Produkten verursacht Kosten, weshalb die Produktionsplanung geringe Lagerbestände anstrebt. Die Lagermenge hängt dabei von der Produktionsausbringung und der Absatzgeschwindigkeit ab. Je größer die Ausbringung und je kleiner die Absatzgeschwindigkeit ist, desto größer sind die erforderlichen Lagerkapazitäten [87, 89]. Die Absatzmenge

lässt sich nicht beeinflussen, wohingegen durch die Anzahl der parallel verschalteten Verarbeitungslinien die Ausbringung bestimmt werden kann (siehe Kap. 9.4.3). Indem so die Produktionsausbringung an die Absatzgeschwindigkeit angeglichen wird, sinkt die einzulagernde Produktmenge.

Variable Zeitanteile für Rüstvorgänge Rüstzeiten sind Zeiten, die benötigt werden um eine Anlage bei Produktwechsel umzubauen und einzurichten. Die Dauer eines Rüstvorgangs hängt von

- den Fähigkeiten des Bedienungspersonals und
- vom Arbeitsumfang, den das Umrüsten erfordert, ab [87].

Auf den Aspekt Personal wurde bereits in Kap. 10.1.2 eingegangen. Der Arbeitsumfang wird von den Eigenschaften der Anlage und der Produktabfolge beeinflusst, ist aber unabhängig von der Losgröße [87]. Je kleiner eine Losgröße ist, desto größer ist dadurch der Zeitanteil des Rüstvorgangs gegenüber dem Produktionszeitraum. Dieser Zusammenhang kann durch Parallelisierung und flexible Verkettung teilweise aufgehoben werden. Abhängig von der Anzahl der parallel geschalteten Verarbeitungslinien ist die Losgröße pro Linie kleiner oder größer und der Zeitanteil des Rüstvorganges am Produktionszeitraum pro Linie entsprechend größer bzw. kleiner (vgl. Kap. 9.4.3). Ebenso verhält es sich mit der aufsummierten Rüstzeit für ein Los, sodass über die Anzahl der parallel geschalteten Verarbeitungslinien der Rüstzeitanteil beeinflusst werden kann. Abb. 10.2 zeigt diesen Zusammenhang schematisch.

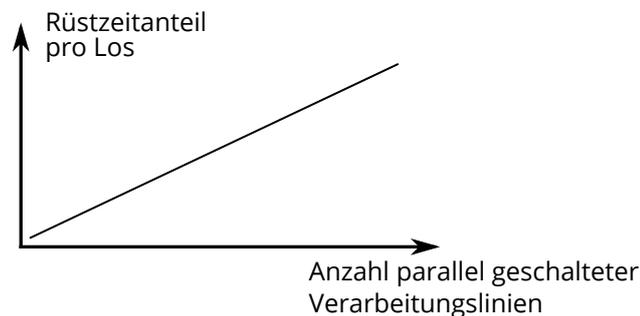


Abb. 10.2: Rüstzeitanteil pro Los in Abhängigkeit der Anzahl parallel geschalteter Verarbeitungslinien.

Steigerung der Anlagenverfügbarkeit Die Verfügbarkeit V ist die wichtigste Kenngröße des Betriebsverhaltens von Verarbeitungsanlagen und hängt sowohl von der Verfügbarkeit der Anlagenelemente als auch von deren Verkettung ab (siehe Kap. 3.2.6). Sie ist außerdem ein Maß für die Stabilität eines Verarbeitungsprozesses, wie Kap. 7.4.2 erläutert. Die Verwendung adaptiver Wirkpaarungen führt infolgedessen zu einer höheren Verfügbarkeit, weil sie die Varietät und damit auch die Stabilität der Verarbeitungsmodule vergrößert. Für die Mengenverfügbarkeit $V_{M,VA}$ einer gesamten Anlage mit identischen, parallelen Verarbeitungslinien der Verfügbarkeit $V_{M,VL}$ gilt nach [51]:

$$V_{M,VA} = V_{M,VL} \quad (10.1)$$

sodass die Gesamtverfügbarkeit einer parallelisierten Verarbeitungsanlage der Verfügbarkeit ihrer Einzelelemente entspricht. Dieser Zusammenhang gilt, wenn keine parallel geschalteten Reserveelemente vorgesehen sind, die im Bedarfsfall eine ausgefallene Verarbeitungslinie ersetzen und damit die Gesamtverfügbarkeit der Anlage erhöhen. Die Anzahl dieser Reservelinien, die notwendig sind um eine bestimmte Anlagenverfügbarkeit

zu erreichen, sinkt mit zunehmender Verfügbarkeit der Anlage ohne Reserveelemente [51]. Es können also folgende Aussagen getroffen werden:

- Die Verfügbarkeit einer Anlage ohne Reserveelemente steigt durch die Verwendung adaptiver Verarbeitungsmodule.
- Dadurch sinkt auch die erforderliche Reservekapazität, um eine bestimmte Anlagenverfügbarkeit zu erreichen.

Es sei allerdings angemerkt, dass die Verkettungselemente bei der Berechnung der Anlagenverfügbarkeit als störungsfrei angesehen werden (siehe Kap. 3.2.6). Es ist allerdings fraglich, ob diese Näherung im Falle von Anlagen mit komplexer und umfangreicher Verkettung noch gültig ist.

10.2 Bewertung im Bezug auf die Situation der Konsumgüterproduktion

Produktionsformen Kap. 2 beschreibt mit der Massenfertigung, der Serienfertigung und der Einzelanfertigung drei verschiedene Produktionsformen der Konsumgüterindustrie, die sich bezüglich der Vielfalt der Produktvarianten und der Losgröße der Produkte unterscheiden. Das vorgestellte Anlagenkonzept ist in der Lage jede dieser Produktionsformen umsetzen. Große Losgrößen und hohe Ausbringungen bedient es durch eine große Anzahl parallel geschalteter Verarbeitungsstränge, kleine Losgröße und geringe Ausbringung durch wenige Verarbeitungsstränge. Das Plug&Produce-Prinzip und die Plattformbauweise erlaubt es, Module in eine Anlage zu integrieren, die eine unterschiedliche Anzahl von Produktvarianten verarbeiten können. Es ist damit möglich ohne Veränderung des prinzipiellen Anlagenkonzepte, des Modulbaukastens oder der Schnittstellen alle drei Produktionsformen zu realisieren.

Übersicht über die Anforderungen, Prinzipie und Maßnahmen Das vorgestellte Anlagenkonzept erfüllt die Anforderungen an Verarbeitungsanlagen, die im allgemeinen Lastenheft in Tab. 4.1 formuliert wurden. Es ermöglicht skalierbare Anlagenkapazität und unterschiedliche Ausstattungsstufen sowie die Rekonfigurierbarkeit der Anlagenstruktur und funktion. Das Konzept sieht anpassungsfähige Verarbeitungsprozesse vor, die gegenüber schwankenden Randbedingungen stabil sind. Es garantiert die Integrierbarkeit neuer System und Prozess in bestehende Anlagen. Die in Kap. 9.2 vorgestellten Prinzipie und technologischen Mittel erfüllen gemeinsam und anteilig diese Anforderungen. Abb. 10.3 zeigt den Zusammenhang zwischen Prinzipien, technologischer Mittel und erfüllten Anforderungen.

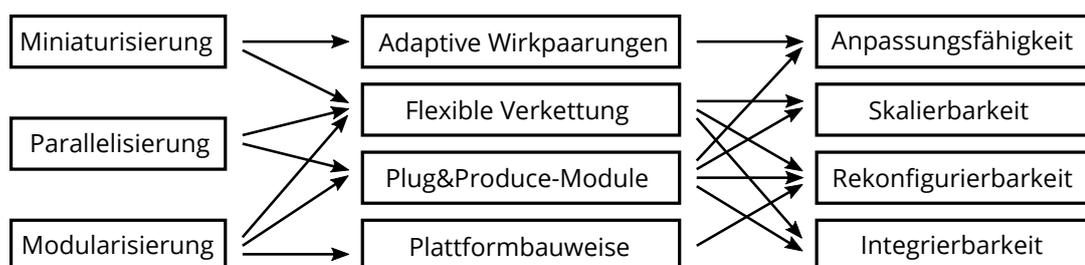


Abb. 10.3: Zuordnung der Prinzipie und technologischen Mittel zu den Anforderungen des allgemeinen Lastenheftes.

11 Fazit

11.1 Zusammenfassung

Aufgabenstellung Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit war die Feststellung, dass die Konsumgüterproduktion derzeit einen Wandel vollzieht und sich dadurch die Anforderungen an Verarbeitungsanlagen stark verändern. Daraus folgte die Aufgabenstellung, das System Verarbeitungsanlage mit systemtheoretischen Methoden neu zu untersuchen und Kriterien für die Neugestaltung solcher Anlagen zu formulieren, die den veränderten Anforderungen genügen.

Marktanalyse, Stand der Wissenschaft und Technik, systemtheoretische Grundlagen Die Arbeit steigt mit einer Analyse der aktuellen Situation der Konsumgüterindustrie ein. Anhand der Nahrungsmittelindustrie stellt sie exemplarisch die Forderungen der Verbraucher den Lösungskonzepten des Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinenbaus gegenüber und erarbeitet daraus vier prinzipielle Forderungen:

- Skalierbarkeit der Produktionskapazität und technischen Ausstattung.
- Konfigurierbarkeit der Anlagen für unterschiedliche Aufgaben.
- Anpassungsfähigkeit der Prozesse gegenüber veränderlichen Randbedingungen.
- Integrationsfähigkeit in bestehende Systeme und Prozesse.

Entlang dieser Forderungen gliedert sich ein allgemeines Lastenheft, das im Rahmen der Präzisierung der Aufgabenstellung die Anforderungen an Verarbeitungsanlagen definiert. Im Stand der Wissenschaft und Technik stellt die Arbeit bereits bekannte Methoden und technische Lösungen vor, die der Erfüllung einzelner Anforderungen dienen. Weiter gibt sie einen Überblick über die etablierten systemtheoretischen Modelle der Verarbeitungstechnik. Anschließend führt die Arbeit im Rahmen einer Literaturrecherche in die Methoden und Modelle der Systemtheorie ein. Sie behandelt den Aufbau von Systemen unter den Aspekten Funktion, Struktur und Hierarchie. Ausgehend von der Vorstellung des offenen Systems erläutert sie die Systemeigenschaften Varietät, Variabilität, Flexibilität, Stabilität und Komplexität.

Systemmodelle für Verarbeitungsanlagen Aus den Erkenntnissen der Grundlagenbetrachtungen zur Systemtheorie folgt eine Anpassung und Ergänzung der bestehenden Systemmodelle der Verarbeitungstechnik. Infolgedessen wurde die Definition der Verarbeitungsaufgabe um die Aspekte Produktvariante und Produktlos erweitert. Außerdem gelang es, die Modelle des Innermaschinellen Verfahrens, der Wirkpaarung und der Funktionsstruktur in einem Modell zu vereinen und um ein Hierarchiemodell der verarbeitungstechnischen Systeme zu ergänzen. Auf dieser Grundlage wurden die Begriffe Varietät, Variabilität, Flexibilität und Komplexität für Verarbeitungsanlagen definiert. Das Verhalten von Verarbeitungsanlagen konnte außerdem mit den Formalismen des Regelkreises als zielgerichteter Prozess unter Einfluss von Störungen beschrieben und folgende zentrale Aussagen zur Stabilität getroffen werden:

- Ein Verarbeitungsprozess ist stabil, wenn er zu jedem Zeitpunkt die Verarbeitungsaufgabe erfüllt. Ein Maß für die Stabilität ist die Kenngröße Verfügbarkeit.
- Diese Stabilitätsbedingung kann nur dann erfüllt werden, wenn die Komplexität der Verarbeitungsanlage mindestens derjenigen der Verarbeitungsaufgabe entspricht.
- Die Komplexität einer Verarbeitungsanlage kann nicht reduziert werden, ohne die Verarbeitungsaufgabe zu ändern.

Darüber hinaus legt die Arbeit dar, dass die veränderten Anforderungen der Konsumgüterindustrie zu einem Anstieg der Komplexität der Verarbeitungsaufgaben führen und dass sich diese Komplexität durch Modularisierung auf weniger komplexe Module und Baugruppen verteilen lässt.

Vorschläge für die Neugestaltung von Verarbeitungsanlagen Mit Hilfe des erarbeiteten Systemmodells wurde festgestellt, dass die Anforderungen des Lastenheftes auf Grund der geschlossenen und zentralisierten Anlagenstruktur sowie der hohe Spezialisierung und Arbeitsgeschwindigkeiten der Anlagenelemente nicht erfüllt werden können. Sie kommt darüber hinaus zu dem Schluss, dass Anpassungsfähigkeit und hohe Arbeitsgeschwindigkeiten nicht miteinander vereinbar sind. Die Anforderungen konnten anschließend in die folgende systemtheoretische Formulierung übertragen werden:

- Veränderlichkeit der Anlagenkomplexität,
- hohe Varietät der Anlage und
- hierarchische Anlagenstruktur.

Daraus werden drei Prinzipie für die Neugestaltung von Verarbeitungsanlagen abgeleitet:

- Modularisierung: Zerlegung der Verarbeitungsanlage in Module, die Teilverarbeitungsfunktionen umsetzen.
- Miniaturisierung: Reduzierung der Arbeitsgeschwindigkeit der Module.
- Parallelisierung: Parallele Verschaltung mehrerer, identischer Module zum Erreichen der geforderten Ausbringung.

Zur Umsetzung dieser Prinzipie schlägt die Arbeit anschließend eine technische Lösung aus den folgenden Bestandteilen vor:

- Adaptive Wirkpaarungen für eine hohe Anpassungsfähigkeit gegenüber schwankenden Randbedingungen.
- Flexible Verkettung zur Erhöhung der Stabilität und Steigerung der Produktvielfalt.
- Plug&Produce-Module und Plattformbauweise für rekonfigurierbare und skalierbare Anlagen sowie die Integration in bestehende Anlagen.

Anwendungsbeispiel und ökonomische Analyse Die Systemmodelle und Aussagen wurden an einer beispielhaften Verarbeitungsanlage zur Verpackung von Schokoladenprodukten angewendet und geprüft sowie ein Anlagenkonzept vorgeschlagen, dass die Prinzipie zur Neugestaltung umsetzt. Eine ökonomische Analyse, die den Einfluss der vorgeschlagenen Prinzipie auf den Personaleinsatz, die Zusammenhänge in der Wertschöpfungskette, die Anschaffungskosten und das Betriebsverhalten bezieht, schließt die Arbeit ab.

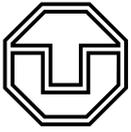
11.2 Ausblick

Weiterführende, systemtheoretische Untersuchungen Kap. 7.1.3 beschreibt mit dem verarbeitungsgutorientiertem und anlagenorientiertem Ansatz des Aufbau- und Ablaufmodells vier mögliche Systemmodelle für Verarbeitungsanlagen. Ein anlagenorientiertes Ablaufmodell, das den Entwicklungsgang von Verarbeitungsanlagen darstellt, ist nicht bekannt. Im Zusammenhang mit veränderlichen Anlagenstrukturen kann ein solches Modell von Interesse sein. Darüber hinaus fehlt für das anlagenorientierte Aufbaumodell bislang eine mathematische Darstellung der Systembilanz. Eine Energiebilanz, wie sie Kap. 7.3.2 für die Wirkpaarung erwähnt, kann dafür ein Ausgangspunkt sein.

Prinzipielle Fragestellungen zur Miniaturisierung und Parallelisierung In dieser Arbeit wird die zentrale Frage nach der Verteilung der Komplexität innerhalb einer Verarbeitungsanlage gestellt. Es konnte nicht beantwortet werden, welches Maß der Verteilung und der Hierarchiebildung das richtige ist. Kap. 7.4.3 weist darauf hin, dass die Komplexität der Verarbeitungsmodule durch Miniaturisierung und Parallelisierung zwar sinkt, im Gegenzug allerdings die Komplexität der Anlagenstruktur und der Verkettung steigt. Die Frage nach der Verteilung der Komplexität ist damit eine Optimierungsaufgabe zwischen der Nennausbringung des einzelnen Moduls und der Anzahl der parallel geschalteten Module. Im Zusammenhang mit den in Kap. 10 aufgeführten ökonomischen Aspekten kann eine Untersuchung von Interesse sein.

Anwendungsbezogene Entwicklungsaufgaben Kap. 9.2 stellt konkrete technische Lösungen zur Umsetzung der Miniaturisierung, Parallelisierung und Modularisierung vor. Sie enthalten eine Reihe von Entwicklungs- und Forschungsaufgaben, die sich auf den spezifischen Anwendungsfall beziehen:

- **Adaptive Wirkpaarungen:** Die Reduzierung der Arbeitsgeschwindigkeit ermöglicht andere Wirkprinzipie als bisher (vgl. Kap. 3.1.4) und selbstoptimierende Prozessregelung erfordert die umfassende Kenntnis der Eigenschaften der Wirkpaarung (vgl. Kap. 3.1.3). Dazu ist die Erforschung neuer Wirkprinzipie und die Entwicklung neuer Arbeitsorgane notwendig, die diese umsetzen und eine Erfassung der Eigenschaften von Verarbeitungsgut, verarbeitungstechnischem System und Umwelt möglich machen. Ausgangspunkt können die Erfahrung mit selbstoptimierenden Regelungen und anpassungsfähigen Wirkpaarungen sein, die in Kap. 3.1.3 beschrieben werden.
- **Flexible Verkettung:** In strukturflexiblen Anlagen spielt die Verkettung der Anlagenmodule eine herausragende Rolle, wie Kap. 9.4.3 verdeutlicht. Es ist Fördertechnik notwendig, die umfangreiche und veränderliche Verteilungs- und Leitfunktionen durchführt und großteils automatisch umsetzt. In diesem Zusammenhang ist auch der Einfluss der Fördermodule auf die Gesamtverfügbarkeit einer Anlage u.U. neu zu bewerten (vgl. Kap. 3.2.6 und Kap. 10.1.4).
- **Plug&Produce-Module und Plattformbauweise:** Flexible Anlagenstrukturen setzen eine weitgehend uneingeschränkte Kombinierbarkeit der Verarbeitungsmodule voraus (siehe Kap. 9.4.1). Darüber hinaus sind universelle Modulplattformen unverzichtbar, um Verarbeitungsmodule und Baukastensystem an nicht vorhersehbare, zukünftige Anforderungen anpassen zu können (siehe Kap. 3.1.2). Es ist deshalb eine wesentliche Aufgabe, Standards für alle Teilsysteme eines Verarbeitungssystems zu definieren und geeignete Plattformen zu entwickeln.



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit bestätige ich mit meiner Unterschrift, dass ich die von mir am heutigen Tag eingereichte Diplomarbeit zum Thema:

Untersuchung des Systems Verarbeitungsanlage mit
Methoden der Systemtheorie und Formulierung
wesentlicher Randbedingungen für Neuentwicklungen

vollkommen selbständig und nur unter Verwendung der in der Arbeit angegebenen Literatur und Abstimmungspartner angefertigt habe.

Peter Lochmann

Dresden, den 02. Oktober 2019

Thesen

1. Die gegenwärtigen Veränderungen der Konsumgüterproduktion stellen grundlegend neue Anforderungen an Verarbeitungsanlagen.
2. Verarbeitungsanlagen aus verschiedenen Bereichen der Konsumgüterindustrie erfüllen äußerlich sehr unterschiedliche Aufgaben, sind sich in den zugrundeliegenden technischen Prinzipien jedoch ähnlich.
3. Verarbeitungsanlagen können mit den Methoden und Modellen der Systemtheorie beschrieben werden.
4. Die Wechselwirkungen zwischen Verarbeitungsgut, Verarbeitungsanlagen und Umwelt können nicht gemeinsam mit dem Ablauf der Zustandsänderung am Verarbeitungsgutes in einem Systemmodell dargestellt werden.
5. Der Zweck einer Verarbeitungsanlage ist die Erfüllung der Verarbeitungsaufgabe.
6. Verarbeitungsfunktion und Anlagenstruktur sind Momentaufnahmen und unterliegen einer zeitlichen Veränderung.
7. Produktwechsel und veränderliche Randbedingungen sind Störungen, die eine Verarbeitungsanlage an der Erfüllung der Verarbeitungsaufgabe hindern können.
8. Ein Verarbeitungsprozess ist stabil, wenn eine Verarbeitungsanlage zu jedem Zeitpunkt ihre Verarbeitungsaufgabe erfüllt.
9. Es gibt eine Komplexitätsgrenze, oberhalb derer eine Verarbeitungsanlage nicht mehr handhabbar ist.

Peter Lochmann

Literaturverzeichnis

- [1] **SANTERAMO, F. G.** u. a. „Emerging Trends in European Food, Diets and Food Industry“. In: *Food Research International* 104 (2018), S. 39–47.
- [2] **BVE**, Hrsg. *BVE-Jahresbericht 2017 - 2018*. 2018.
- [3] **IKW**, Hrsg. *Jahresbericht 2018 - 2019*. 2019.
- [4] **BPI**, Hrsg. *Pharma-Daten 2018*. 48. überarb. Aufl. 2018.
- [5] **MAJSCHAK, J.-P.** u. a. „Verarbeitungsanlagen Und Verpackungsmaschinen“. In: *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017.
- [6] **HEIDENREICH, E.** u. a. *Verarbeitungstechnik. Verfahrenstechnik*. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1978.
- [7] **GROTE, K.-H., BENDER, B.** und **GÖHLICH, D.**, Hrsg. *Dubbel: Taschenbuch Für Den Maschinenbau*. 25., neu bearb. u. aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [8] **FRANK, H.** und **RIESS, M.** „Cyber-Physische Produktionssysteme - Produktivitäts- Und Flexibilitätssteigerung Durch Die Vernetzung Intelligenter Systeme in Der Fabrik“. In: *Intelligente Vernetzung in Der Fabrik - Industrie 4.0 Umsetzungsbeispiele Für Die Praxis*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2015.
- [9] **ENDERLEIN, H., HILDEBRAND, T.** und **MÜLLER, E.** „Plug+Produce - Die Fabrik Mit Zukunft Aus Dem Baukasten“. In: *wt Werkstattstechnik online* 93.4 (2003), S. 282–286.
- [10] **KALUZA, T.** „Modularer Mikro-Kartonierer“. Großer Beleg. TU Dresden, 2017.
- [11] **RICHTER, M.** u. a. „Mut Zur Zusammenarbeit, Schluss Mit Der Abschottung“. In: *Packaging 360° Das unabhängige Verpackungsmagazin*. Frankfurter Gespräche 02 (2019), S. 26–32.
- [12] **RAUH, K.** *Aufbaulehre Der Verarbeitungsmaschinen*. Essen: Verlag W. Girardet, 1950.
- [13] Von **BERTALANFFY, L.** *General System Theory*. London: Allen Lane The Penguin Press, 1971.
- [14] **PAHL, G.** u. a. *Konstruktionslehre - Grundlagen Erfolgreicher Produktentwicklung - Methoden Und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [15] **PILLER, F. T.** *Kundenindividuelle Massenproduktion - Die Wettbewerbsstrategie Der Zukunft*. München Wien: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 1998.
- [16] **REINHART, G.** „Minifabriken Für Die Marktnahe Produktion“. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 95.12 (2000).
- [17] **DÜRRSCHMIDT, S.** „Planung Und Betrieb Wandlungsfähiger Logistiksysteme in Der Varienreichen Serienproduktion“. Diss. TU München, 2001.
- [18] **F.A. BROCKHAUS GMBH.** *Brockhaus Enzyklopädie in 30 Bänden*. 21., völlig neu bearb. Aufl. Leipzig ; Mannheim: F.A. Brockhaus GmbH, 2005.
- [19] **KUMAR, S.** „A Study of the Supermarket Industry and Its Growing Logistics Capabilities“. In: *International Journal of Retail & Distribution Management* Vol. 36 (No. 3 2008), S. 192–209.

- [20] **HANSEN, H. O.** *Food Economics - Industry and Markets*. London ; New York: Routledge, 2013.
- [21] **GOLZ, P.** und **VDMA**. „Zukunftsszenarien Deutscher Verpackungsmaschinenbau 2035“. 2018.
- [22] **VDMA** und **MCKINSEY & COMPANY**, Hrsg. *Erfolgsmuster Und Trends Im Deutschen Nahrungsmittel- Und Verpackungsmaschinenbau*. Studie Zukunftsperspektive Deutscher Maschinenbau. 2014.
- [23] **VDMA**. *Maschinenbau in Zahl Und Bild 2019*. Frankfurt a. M., 2019.
- [24] **STATISTISCHES BUNDESAMT**, Hrsg. *Statistisches Jahrbuch 2018*. 2018.
- [25] **STATISTISCHES BUNDESAMT**. *Beschäftigte Und Umsatz Der Betriebe Im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Jahre, Beschäftigtengrößenklassen, Wirtschaftszweige (WZ2008 2-4-Steller Hierarchie)*. Tab.: 42271-0006. 2018.
- [26] **HDE**. *HDE - Zahlenspiegel 2018*. 2018.
- [27] **BVE**, Hrsg. *Herausforderungen in Komplexen Lieferketten - Studie Zum Risiko- Und Krisenmanagement in Der Ernährungsindustrie*. 2019.
- [28] **BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT**. *BMEL-Umfrage Ergebnisbericht*. TNS Emnid, 2014.
- [29] **BLEIEL, J.** „Functional Foods from the Perspective of the Consumer: How to Make It a Success?“ In: *International Dairy Journal* 20 (2010), S. 303–306.
- [30] **HAMERMAN, E. J.** „Cooking and Disgust Sensitivity Influence Preference for Attending Insect-Based Food Events“. In: *Appetite* 96 (2016), S. 319–326.
- [31] **BÄCKSTRÖM, A.**, **PIRTTILA-BACKMAN, A.-M.** und **TUORILA, H.** „Willingness to Try New Foods as Predicted by Social Representations and Attitude and Trait Scales“. In: *Appetite* 43 (2004), S. 75–83.
- [32] **GAUGEL, T.**, **BENGEL, M.** und **MALTHAN, D.** „Building a Mini-Assembly System from a Technology Construction Kit“. In: *Assembly Automation* 24.1 (2004), S. 43–48.
- [33] **WIENDAHL, H.-P.** u. a. „Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation“. In: *Annals of the CIRP* Vol. 56.2 (2007), S. 783–809.
- [34] **NASVYTIS, A.** *Die Gesetzmäßigkeiten Kombinatorischer Technik*. Bd. 3. Wissenschaftliche Normung. Berlin Göttingen Heidelberg: Springer-Verlag, 1953.
- [35] **KOHLHASE, N.** *Strukturieren Und Beurteilen von Baukastensystemen - Strategien, Methoden, Instrumente*. Bd. Nr. 275. VDI Fortschrittsberichte, Konstruktionstechnik / Maschinenelemente Reihe 1. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 1997.
- [36] **HILDEBRAND, T.**, **MÄDING, K.** und **ZIMMERMANN, U.** *Plug+Produce - Gestaltungsstrategien Für Die Wandlungsfähige Fabrik*. Chemnitz: Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme IBF, TU Chemnitz, 2005.
- [37] **ZIMMERMANN, U. E.** u. a. „Communication, Configuration, Application - The Three Layer Concept for Plug-and-Produce“. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. 2008, S. 255–262.
- [38] **ÄSTRÖM, K. J.** und **WITTENMARK, B.** *Adaptive Control*. Reading, Menlo Park: Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [39] **LUNZE, J.** *Regelungstechnik 1 - Systemtheoretische Grundlagen, Analyse Und Entwurf Einschleifiger Regelungen*. 8., neu bearb. Aufl. Heidelberg Dordrecht London New York: Springer, 2010.

- [40] **SCHRÜFER, E.** *Lexikon Meß- Und Automatisierungstechnik*. Berlin: Springer, 2012.
- [41] **MAJSCHAK, J.-P.** u. a. „Verarbeitungstechnik“. In: *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017.
- [42] **DENKENA, B.** u. a. „Das Gentelligente Werkstück“. In: *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017.
- [43] **ECKERT, C.** „Cyber-Sicherheit in Industrie 4.0“. In: *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017.
- [44] **WULFSBERG, J. P., REDLICH, T. und KOHRS, P.** „Square Foot Manufacturing: An New Production Concept for Micro Manufacturing“. In: *Production Engineering 4* (2010), S. 75–83.
- [45] **OKAZAKI, Y., MISHIMA, N. und ASHIDA, K.** „Microfactory - Concept, History, and Developments“. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 126 (2004), S. 837–844.
- [46] **HESSEL, V. und LÖWE, H.** „Microchemical Engineering: Components, Plant Concepts User Acceptance, Part 1 - 3“. In: *Chemical Engineering Technology* 26 (1, 4, 5 2003), S. 13–24, 391–408, 531–544.
- [47] **VERETTAS, I., CLAVEL, R. und CODOUREY, A.** „PocketFactory: A Modular and Miniature Assembly Chain Including a Clean Environment“. In: International Workshop on MicroFactories IWMF. Besancon, 2006.
- [48] **BURISCH, A.** u. a. „PARVUS - Miniaturised Robot for Improved Flexibility in Micro Production“. In: *Assembly Automation* 27.1 (2007), S. 65–73.
- [49] **JANOCHA, H.** „Microactuators - Principles, Applications, Trends“. In: *VDE World Microtechnologies Congress 2000*. Berlin Offenbach: VDE Verlag, 2000, S. 61–67.
- [50] **SCHMIDT, D. und KEGELER, J.** „MiniProd - Miniaturisiertes Produktionssystem“. In: *wt Werkstattstechnik online* 95.3 (2005), S. 146–149.
- [51] **RÖMISCH, P. und WEISS, M.** *Projektierungspraxis Verarbeitungsanlagen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [52] Van **VOORTHUYSEN, E.** u. a. „Design for Scalability of Industrial Processes Using Modular Components“. In: *Journal of Engineering Manufacturing* 231.8 (2017), S. 1464–1478.
- [53] **TARQUIN, A. J. und BLANK, L. T.** *Engineering Economy*. 7. Aufl. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [54] **GOLDHAHN, H.** „Aufbau Eines Systems Verarbeitungstechnischer Grundlagen“. Diss. TU Dresden, 1968.
- [55] **RÖMISCH, P.** „Zur Strukturierung von Verarbeitungsanlagen Unter Besonderer Berücksichtigung Der Verfügbarkeit“. Diss. TU Dresden, 1983.
- [56] **KUBIAS, M. und STEINWACHS, J.** „Effektivität von Verarbeitungsmaschinensystemen Sowie Möglichkeiten Ihrer Beeinflussung Unter Berücksichtigung Der Technischen Zuverlässigkeit“. Diss. TU Dresden, 1975.
- [57] **HENNIG, J.** „Ein Beitrag Zur Methodik Der Verarbeitungsmaschinenlehre“. Habil. TU Dresden, 1976.
- [58] **GOLDHAHN, H.** „Beitrag Zur Verallgemeinerung Wirkpaarungstechnischer Zusammenhänge“. Habil. TU Dresden, 1978.

- [59] **MAJSCHAK, J.-P.** „Rechnerunterstützung Für Die Suche Nach Verarbeitungstechnischen Prinziplösungen“. Diss. TU Dresden, 1996.
- [60] **HEINRICH, W.** u. a. „Die Untersuchung von Funktionsgruppen - Eine Maschinentech-nische Grundlage Der Konstruktion von Verarbeitungsanlagen“. In: *Wissenschaft-liche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* 14.4 (1965), S. 951–955.
- [61] **SCHMIDT, F.** „Vorgangsdeduzierte Verarbeitungstechnik“. Habil. TU Dresden, 1999.
- [62] **SCHMIDT, F.** und **DIDZIOKAS, R.** *Grundlagen Zur Energetischen Bewertung von Verarbei-tungsvorgängen*. Forschungsbericht 993. TU Dresden, 1996.
- [63] **RAUSENDORFF, D.** *Systematisierung Der Verarbeitungstechnik*. Bd. 1983/4. Wissenschaft-liche Schriftenreihe Der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt. 1983.
- [64] **DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG.** *DIN 8743: Verpackungsmaschinen Und Verpa-ckungsanlagen - Kennzahlen Zur Charakterisierung Des Betriebsverhaltens Und Bedin-gungen Für Deren Ermittlung Im Rahmen Des Abnahmeablaufes*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014.
- [65] **KOCH, A.** *OEE Für Das Produktionsteam - Das Vollständige OEE-Benutzerhandbuch - Oder Wie Sie Die Verborgene Maschine Entdecken*. 3., korr. Aufl. Ansbach: CETPM Pu-blishing, 2016.
- [66] **SOMMERLATTE, T.** „Systemisch Denken, Handeln Und Gestalten - Der Gemeinsame Nenner Einer Situationsgerechten Universalität“. In: *Angewandte Systemforschung - Ein Interdisziplinärer Ansatz*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2002.
- [67] Von **BERTALANFFY, L.** *Das Biologische Weltbild*. Bd. Erster Band. Bern: A. Francke AG. Verlag, 1949.
- [68] **WIENER, N.** *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. 2. Auflage. New York, London: The M.I.T Press and John Wiley and Sons, Inc., 1961.
- [69] **GROCHLA, E.** und **LEHMANN, H.** „Systemtheorie Und Organisation“. In: *Handwörter-buch Der Organisation*. 2., völlig neu gest. Aufl. Bd. II. Enzyklopädie Der Betriebswirt-schaftslehre. Stuttgart: C. E. Poeschel Verlag, 1980, S. 2204–2216.
- [70] **PATZAK, G.** *Systemtechnik - Planung Komplexer Innovativer System: Grundlagen, Metho-den, Techniken*. Berlin: Springer, 1982.
- [71] **ROPOHL, G.** *Allgemeine Technologie - Eine Systemtheorie Der Technik*. 3. überarb. Aufl. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2009.
- [72] **SCHERF, O.** „Komplexität Aus Systemischer Sicht“. Diss. Universität St. Gallen, 2003.
- [73] **KRAUCH, H.** „Entwicklung Des Systemdenkens“. In: *Angewandte Systemforschung - Ein Interdisziplinärer Ansatz*. Hrsg. von **SOMMERLATTE, T.** Wiesbaden: Gabler Verlag, 2002.
- [74] **LAMBERT, J. H.** *Fragment Einer Systematologie*. Hrsg. von **ARNDT, H. W.** Reprint von 1787. Bd. Band 2. Logische Und Philosophische Abhandlungen. Hildesheim: Georg Olms Verlagsbuchhandlung, 1969.
- [75] **MIROW, H. M.** *Kybernetik - Grundlage Einer Allgemeinen Theorie Der Organisation*. Wies-baden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, 1969.
- [76] **MESAROVIC, M. D., MACKO, D.** und **TAKAHARA, Y.** *Theory of Hierarchical, Multilevel, Sys-tems*. Bd. Volume 68. Mathematics in Science and Engineering. New York, London: Academic Press, 1970.
- [77] **KLAUS, G.** und **LIEBSCHER, H.**, Hrsg. *Wörterbuch Der Kybernetik*. 4., völlig überarb. Aufl. Berlin: Dietz Verlag, 1976.

- [78] **KOSIOL, E.** *Organisation Der Unternehmung*. Hrsg. von **GUTENBERG, E.** Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, 1962.
- [79] **SIMON, H. A.** „The Architecture of Complexity“. In: *Proceedings of the American Philosophical Society* Vol. 106.12 (Dez. 1962), S. 467–482.
- [80] **ASHBY, W. R.** *An Introduction to Cybernetics*. 5. Aufl. London: Chapman & Hall Ltd., 1963.
- [81] **RAPOPORT, A.** *General System Theory – Essential Concepts and Applications*. Bd. Volume 10. Cybernetics and Systems Series. Tunbridge Wells, Cambridge: Abacus Press, 1986.
- [82] **RESCHER, N.** *Complexity - A Philosophical Overview*. New Brunswick, London: Transaction Publishers, 1998.
- [83] **LUHMANN, N.** *Soziologische Aufklärung 2*. 6. Aufl. Wiesbaden: VS Verlags für Sozialwissenschaften, 2009.
- [84] **LA PORTE, T. R.** *Organized Social Complexity*. Princetown: Princetown University Press, 1975.
- [85] **GAGSCH, S.** „Subsystembildung“. In: *Handwörterbuch Der Organisation*. 2., völlig neu gest. Aufl. Bd. II. Enzyklopädie Der Betriebswirtschaftslehre. Stuttgart: C. E. Poeschel Verlag, 1980, S. 2156–2171.
- [86] Von **BÖVENTER, E.** u. a. *Einführung in Die Mikroökonomie*. 9., bearb. Aufl. München Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1997.
- [87] **BLOHM, H.** u. a. *Produktionswirtschaft*. 3., völlig neu bearb. Aufl. Herne Berlin: Verlag Neue Wirtschafts-Briefe GmbH & Co., 1997.
- [88] **EHRENSPIEL, K., KIEWERT, A.** und **LINDEMANN, U.** *Kostengünstig Entwickeln Und Konstruieren - Kostenmanagement Bei Der Integrierten Produktentwicklung*. 6., bearb. u. ergänzte Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [89] **STEVEN, M.** *Handbuch Produktion - Theorie, Management, Logistik, Controlling*. Stuttgart: Verlag W. Kohlhammer, 2007.
- [90] **TRUCKENBRODT, E.** *Lehrbuch Der Angewandten Fluidmechanik*. 2., überarb. und erw. Aufl. Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo: Springer, 1988.
- [91] **SIEKMANN, H.** *Strömungslehre - Grundlagen*. Berlin Heidelberg: Springer, 2000.
- [92] **KRAUME, M.** *Transportvorgänge in Der Verfahrenstechnik - Grundlagen Und Apparative Umsetzung*. Berlin Heidelberg: Spinger, 2004.

Tabellenverzeichnis

2.1	Unterscheidung der Konsumgüter. Definition, Beispiele und Produktionsweise. Unter Verwendung von [15, 18].	6
2.2	Güterproduktion in den Industrie- und Entwicklungsländern. Merkmale, Marktstrukturen und Produktionsformen. Unter Verwendung von [15, 19, 20]. . .	6
2.3	Kaufverhalten und Forderungen der Verbraucher und ihre Auswirkung auf die Nahrungsmittelproduktion.	9
2.4	Marktbedingungen und Eigenschaften der Verarbeitungsanlagen, Folgen. Unter Verwendung von [8].	10
2.5	Nachteile für den Verarbeitungsmaschinenbau und dessen Ursachen. . . .	11
3.1	Ziele der Miniaturisierung und beispielhafte Umsetzungen.	15
3.2	Prinzipie der Miniaturisierung.	16
3.3	Alternative Strukturen für Stoffströme in Anlagen. Unter Verwendung von [5].	16
3.4	Betrachtungseinheiten für Verarbeitungssysteme. Unter Verwendung von [6, 57, 56].	19
3.5	Zuordnung der Funktionsbereiche, Teilsysteme und Teilfunktionen. Nach [6].	20
3.6	Grundlegende Funktionsstrukturen des Innermaschinellen Verfahrens. VG Verarbeitungsgut, WP Wirkpaarung. Unter Verwendung von [54].	22
3.7	Prinzipielle Verkettungsarten von Elementen und ihre Eigenschaften. Q_r Rechnerische Ausbringung der gesamten Struktur, $Q_{r,i}$ rechnerische Ausbringung eines Elements, V_M Mengenverfügbarkeit der gesamten Struktur, $V_{M,i}$ Mengenverfügbarkeit eines Elementes. Unter Verwendung von [55]. .	23
4.1	Grundlegende Anforderungen an Verarbeitungssysteme, allgemeines Lastenheft.	24
7.1	Bestandteile der Verarbeitungsaufgabe und Verarbeitungsfunktion.	45
7.2	Bestandteile der Verarbeitungsaufgabe und Verarbeitungsfunktion.	47
7.3	Einflussgrößen des Funktionssystems.	48
7.4	Einflussgrößen des verarbeitungstechnischen Systems.	49
7.5	Verarbeitungsaufgabe der Verpackungsanlage des Anwendungsbeispiels. .	50
7.6	Eigenschaften der Schokoladenprodukte. DDE Doppeldreheinschlag, BE Buncheinschlag.	50
7.7	Eigenschaften des verarbeitungstechnischen Systems. Verfügbarkeit der Anlage in Abhängigkeit der Produktvariante.	50
7.8	Eigenschaften der Packmittel. DDE Doppeldreheinschlag, BE Buncheinschlag.	51
7.9	Einflüsse auf die Zustandsänderung des Verarbeitungsgutes.	54
7.10	Funktionsbereiche, Teilsysteme und Teilfunktionen der Aufbaustruktur. Vgl. Tab. 3.5.	55
7.11	Systemhierarchien einer Verarbeitungsanlage.	58
7.12	Systemhierarchien der Verpackungsanlage des Anwendungsbeispiels. TVA Teilverarbeitungsaufgabe.	61
7.13	Einflussgrößen des Verhaltens von verarbeitungstechnischen Systemen. . .	62
7.14	Einflussgrößen der verarbeitungstechnischen Varietät.	63

7.15	Mögliche Ausprägungen der Variabilität und Flexibilität in Verarbeitungsanlagen.	64
7.16	Stabilitätsformen verarbeitungstechnischer Systeme.	66
7.17	Einflussparameter der verarbeitungstechnischen Komplexität.	67
7.18	Möglichkeiten zur Verteilung der verarbeitungstechnischen Komplexität. Auswirkung auf die Komplexität der einzelnen, verarbeitungstechnischen Elemente. Vgl. Tab. 3.6	69
9.1	Systemtheoretische Formulierung der Anforderungen des allgemeinen Lastenheftes.	73
9.2	Bezugsebenen der Komplexitätsverteilung.	77
9.3	Allgemeines Pflichtenheft: Prinzipien für die Gestaltung von Verarbeitungsanlagen	85
A.1	Klassifizierung von Systemen zwischen geschlossenem und offenem Systemtyp.	xvi
A.2	Klassifizierung von verarbeitungstechnischen Systemen nach einfachem und komplexem System.	xviii
C.1	Maschinen und Module der Verpackungsanlage. Bezeichnung und Funktion.	xx

Abbildungsverzeichnis

1.1	Abstraktion des Problems und Vergleich mit ähnlichen Problemen.	2
1.2	Arbeitsschritte zu Analyse und Synthese von Systemen. In Anlehnung an [14].	3
2.1	Entwicklung der Güterproduktion. Produktarten, Absatzmärkte und Produktionsweisen. Unter Verwendung von [15, 16, 17].	5
2.2	Struktur des Nahrungsmittelmarktes. Marktteilnehmer und Anzahl der Unternehmen. Nach [20].	7
2.3	Bevorzugte Einkaufsorte und Händler für den Lebensmitteleinkauf. Nach [28].	8
2.4	Wichtigkeit bestimmter Qualitätsmerkmale beim Lebensmittelkauf. Nach [28].	8
2.5	Exportregionen deutscher Hersteller von Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen. Nach [22].	9
2.6	Anteil am Welthandelsvolumen von Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen. Nach [22].	9
3.1	Baukastenkonzept. Normung und Kombination.	12
3.2	Baukasten- und Plattformsystem. a) Baukastensystem mit standardisierten Bausteinen, b) Plattformsystem mit standardisierter Plattform und individuell angepassten Anbauteilen.	13
3.3	Adaptive Prozessregelung als vereinfachter Regelkreis. w_z Übergeordnete Zielgröße, u Bedingungen, w Führungsgröße, d Regeldifferenz, v Stellgröße, s Störgröße, a Regelgröße der zu regelnden Prozessgröße. In Anlehnung an [39, 38].	14
3.4	Schematische Darstellung der Regelungsarten: a) Konventionelle Regelung, b) adaptive Regelung, c) selbstoptimierende Regelung; ZG Zielgröße, FG Führungsgröße, Ist Ist-Wert der Regelgröße, Soll Soll-Wert der Regelgröße, RB Randbedingungen des Prozesses, PG Prozessgrößen, MB Modellbildung.	14
3.5	Funktionsmodell eines Verarbeitungssystems. E_{St} Eingangsgröße Stoff (Verarbeitungsgut), A_{St} Ausgangsgröße Stoff (Produkt), E_E Eingangsgröße Energie, E_S Eingangsgröße Signal, U Umstände, N Nebenwirkungen. Nach [6, 57].	18
3.6	Allgemeines Funktionsschema von Verarbeitungssystemen. Nach [61].	19
3.7	Modell einer Wirkpaarung: VG_I Verarbeitungsgut im Zustand z_I , VG_{II} Verarbeitungsgut im Zustand z_{II} , U Umstände, N Nebenwirkungen. Nach [7].	20
3.8	Strukturelemente des Zuverlässigkeitsmodells. Nach [55]. a) Maschine mit konstanter Ausbringung Q_r , b) Maschine mit variabler Ausbringung im Stellbereich $Q_{rmin} \dots Q_{rmax}$, c) Speicher mit Fassungsvermögen M , V Verfügbarkeit.	23
4.1	Schematische Darstellung der Produktvariante A der Angebotsdokumentation. a) Geometrie des Schokoladenproduktes. b) Gruppierung der Schokoladenprodukte.	26

4.2	Schematische Darstellung des Layouts der Verpackungsanlage der Angebotsdokumentation. CTS Abgabestation CTS-300, MD Station für Metalldetektion, MCC Verpackungsmaschine für Doppeldreheinschlag, EMC1 Verpackungsmaschine für Buncheinschlag, SB Speicherband. Optionale Ausbaustufen sind gepunktet dargestellt.	26
5.1	Komponenten der systemtheoretischen Modellbildung. Nach [71].	28
5.2	Menge: Ansammlung von Objekten. System: Anzahl von Elemente, die zueinander in Beziehung stehen.	29
6.1	Allgemeines Funktionsmodell: X Eingangsgrößen, Y Ausgangsgrößen, Z Zustandsgrößen, F_{XY} Übertragungsfunktion, F_{XZ} Überföhrungsfunktion, F_{ZY} Markierungsfunktion. In Anlehnung an [71, 70].	30
6.2	Strukturmodell eines System S : e_i Elemente, r_i Relationen, Z_i Zustandsgrößen des Elements e_i , $x_{i,j}$ j -te Eingangsgröße des Elements e_i , $y_{i,j}$ j -te Ausgangsgröße des Elements e_i , F_i Funktionen des Elements e_i . Unter Verwendung von [72, 70].	31
6.3	Beispielhaftes Hierarchiemodell. Unter Verwendung von [71, 76]. a) Darstellung der Zugehörigkeiten als Mengenschaubild. b) Darstellung der Abhängigkeiten als Hierarchiebaum.	32
6.4	Stufenbau der Subsysteme: W reale Gesamtheit, U Umwelt, S^+ Übersystem, S System, S^- Subsystem, e Element. In Anlehnung an [71].	33
6.5	Hierarchiebildung durch ungleichmäßige Konzentration von Relationen. Stark voneinander abhängige Elemente bilden gegenüber anderen Subsysteme.	33
6.6	Grundlegende Verhaltensweise geschlossener und offener Systeme. a) Determinierter Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung in geschlossenen Systemen. b) Zielorientierung und Äquifinalität in offenen Systeme. $z(t)$ Zustandsgröße, t Zeit. In Anlehnung an [13].	34
6.7	Zusammenhang zwischen Struktur, Funktion und Entwicklung, schematische Darstellung: Der temporäre Zustand z_j bestimmt die Funktion f_j . Die zeitliche Änderung der Struktur und Funktion beschreibt die Entwicklung e	35
6.8	Schematische Gegenüberstellung von Stabilität, Ultrastabilität und Multistabilität. Störungsfunktion $s(t)$ im Abschnitt 1 sinusförmig, im Abschnitt 2 mit abweichender Amplitude und Wellenlänge und im Abschnitt 3 Wechsel der Störungsklasse zu einer Rechteckfunktion.	38
6.9	Funktionelle Komplexität. a) Nomologische Komplexität: Die Regeln des Verhaltens betreffend. b) Operationale Komplexität: Die Anzahl der eingenommenen Zustände betreffend. $z(t)$ Zustandsgröße, z_j j -ter Zustand, t Zeit.	39
6.10	Strukturelle Komplexität. a) Einfluss der Anzahl der Elemente und Relationen auf die Komplexität. b) Einfluss der Anzahl der Arten der Elemente und Relationen auf die Komplexität.	40
6.11	Hierarchische Komplexität. Komplexität steigt mit der Anzahl der Hierarchieebenen.	40
7.1	Funktioneller Vergleich von Verarbeitungsaufgabe und Verarbeitungsfunktion. Geforderter Zustand $Z_{VG,X,Soll}$ vor der Verarbeitung und beabsichtigter Zustand $Z_{VG,Y,Soll}$ danach. Tatsächlicher Zustand $Z_{VG,X,Ist}$ vor und $Z_{VG,Y,Ist}$ nach der Verarbeitung.	43

7.2	Vergleich von Aufgaben-, Funktions- und verarbeitungstechnischem System. Geforderter Zustand $Z_{VG,X,Soll}$ vor der Verarbeitung und beabsichtigter Zustand $Z_{VG,Y,Soll}$ danach. Tatsächlicher Zustand $Z_{VG,X,Ist}$ vor und $Z_{VG,Y,Ist}$ nach der Verarbeitung.	43
7.3	Modellansätze in der Verarbeitungstechnik. a) Verarbeitungsgutorientierter Modellansatz: Systemelement Verarbeitungsgut VG, Relation Einwirkung der Verarbeitungsanlage W_{VA} . b) Anlagenorientierter Modellansatz: Systemelement Verarbeitungsanlage VA, Relation Verarbeitungsgutstrom \dot{V}_{VG}	44
7.4	Die drei Systemmodellen des Modellansatzes: Funktionssystem FS, Zustandssystem Verarbeitungsgut VGS und verarbeitungstechnisches System VTS.	46
7.5	Funktionsmodell des Aufgabensystems: Beabsichtigter Zustand des Verarbeitungsgutes vor $Z_{VG,X,Soll}$ und nach $Z_{VG,Y,Soll}$ der Verarbeitungsaufgabe.	47
7.6	Funktionsmodell des Zustandssystems Verarbeitungsgut: Einwirkungsgrößen $X_{HSt,VTS}$ Hilfsstoff, $X_{E,VTS}$ Energie, $X_{S,VTS}$ Signal; Eingangsgrößen vom Verarbeitungssystem. Eingangsgröße X_U Umwelteinfluss. Rückwirkungsgrößen $Y_{HSt,VTS}$ Hilfsstoff, $Y_{E,VTS}$ Energie, $Y_{S,VTS}$ Signal; Ausgangsgrößen zum Verarbeitungssystem. Ausgangsgröße Y_N Nebenwirkungen. Zustandsgrößen Z_{VG} des Verarbeitungsgutes.	48
7.7	Funktionsmodell für Verarbeitungssysteme: Eingangsgrößen X_{HSt} Hilfsstoff, X_E Energie, X_S Signal, X_U Umwelteinfluss. Ausgangsgrößen Y_{HSt} Hilfsstoff, Y_E Energie, Y_S Signal, Y_N Nebenwirkungen. Einwirkungsgrößen $Y_{HSt,VG}$ Hilfsstoff, $Y_{E,VG}$ Energie, $Y_{S,VG}$ Signal; Ausgangsgrößen zum Zustandssystem Verarbeitungsgut. Rückwirkungsgrößen $X_{HSt,VG}$ Hilfsstoff, $X_{E,VG}$ Energie, $X_{S,VG}$ Signal; Eingangsgrößen vom Zustandssystem Verarbeitungsgut. Zustandsgrößen Z_{VTS} des Verarbeitungssystems.	49
7.8	Aufgabenabfolge der Verpackungsanlage. Schokoladenprodukte gruppiert durch vorgelagerte Schokoladengießanlage, $Z_{SP,1}$. Schokoladenprodukt von Schokoladengießanlage übernommen, $Z_{SP,2}$. Schokoladenprodukt frei von Metallverunreinigungen $Z_{SP,3,1}$. Verunreinigte Schokoladenprodukte, Ausschuss, $Z_{SP,3,2}$. Packmittel auf Rolle, $Z_{PM,1}$. In Packmittel eingepackte Schokoladenprodukte, $Z_{SP,4}$ und $Z_{PM,2}$	51
7.9	Innermaschinelles Verfahren der beiden Produktionszweige eines Produktionsstranges. Schokoladenprodukte vereinzelt und geprüft $Z_{SP,D,1}$, ausgerichtet $Z_{SP,D,2}$. Packmittel auf Rolle $Z_{PM,D,1}$. In Packmittel eingepackte Schokoladenprodukte $Z_{SP,D,3}$ und $Z_{PM,D,2}$. Schokoladenprodukte teilweise vereinzelt und geprüft $Z_{SP,B,1}$, vereinzelt $Z_{SP,B,2}$ und $Z_{SP,B,3}$, ausgerichtet an langer Kante quer zur Stoffflussrichtung $Z_{SP,B,4}$. Packmittel auf Rolle $Z_{PM,B,1}$. In Packmittel eingepackte Schokoladenprodukte $Z_{SP,B,5}$ und $Z_{PM,B,2}$	52
7.10	Aufbaustruktur der Wirkpaarung: Arbeitsorgan AO, Verarbeitungsgut VG, Wirkpaarung WP, Funktionssystem FS. Z_{WP} Zustand der Wirkpaarung, Z_{AO} Zustand des Arbeitsorgans. Änderung $Z_{VG,X} \rightarrow Z_{VG,Y}$ des Zustandes Z_{VG} des Verarbeitungsgutes. Wirkgrößen HSt Hilfsstoff, E Energie, S Signal. Eingangsgrößen X_{HSt} Hilfsstoff, X_E Energie, X_S Signal, X_U Umwelteinfluss. Ausgangsgrößen Y_{HSt} Hilfsstoff, Y_E Energie, Y_S Signal, Y_N Nebenwirkungen.	54

7.11	Aufbaustruktur des verarbeitungstechnischen Systems: Stütz- und Hüllsystem SHS, Steuerungssystem SS, Energiebereitstellungssystem EBS, Stoffaufbereitungssystem SAS, Arbeitssystem AS sind Teilsysteme des Verarbeitungssystems VS. Z_i Zustandsgrößen der Teilsysteme. Wirksystem WS: Wirkgrößen HSt Hilfsstoff, E Energie, S Signal. Eingangsgrößen: X_{HSt} Hilfsstoff, X_E Energie, X_S Signal, X_U Umwelteinfluss. Ausgangsgrößen: Y_{HSt} Hilfsstoff, Y_E Energie, Y_S Signal, Y_N Nebenwirkungen. Funktionsbereiche Stoff, Energie, Signal, Raum. Nicht abgebildet sind die Relationen der Teilsysteme HBS, EBS, SS, und SHS untereinander.	56
7.12	Aufbaustruktur eines Produktionszweiges mit einer Buncheinschlagmaschine EMC1. VS Verarbeitungssystem, HBS Hilfsstoffbereitstellungssystem, SS Steuerungssystem, SHS Stütz- und Hüllsystem.	57
7.13	Beispielhafte hierarchische Ordnung einer Verarbeitungsaufgabe in drei Ebenen: Gesamtverarbeitungsaufgabe GVA, Teilverarbeitungsaufgabe TVA, Elementarverarbeitungsaufgabe EVA.	58
7.14	Hierarchie der Verarbeitungsaufgabe. Gesamtverarbeitungsaufgabe GVA, Teilverarbeitungsaufgabe 1. Ordnung TVA I, Teilverarbeitungsaufgabe 2. Ordnung TVA II, Elementarverarbeitungsaufgabe. SP Schokoladenprodukt, AP Ausschussprodukt, PM Packmittel, VSP Verpacktes Schokoladenprodukt.	59
7.15	Hierarchie der Teilverarbeitungsfunktionen aus Abb. 7.9. Hierarchie der Baustruktur und Steuerung überschneiden sich. Detailliert dargestellt sind die parallelen Produktionszweige eines Stranges, die hierarchische Gliederung der anderen ist identisch. Schokoladenprodukt SP, Packmittel PM.	60
8.1	Schematische Darstellung des Zusammenhanges zwischen Anpassungsfähigkeit, Nennausbringung und Komplexität K_{VTE} eines verarbeitungstechnischen Elementes. V_{VTE} Varietät des verarbeitungstechnischen Elements, $K_{VTE,O}$ operationale Komplexität des verarbeitungstechnischen Elements.	72
9.1	Skalierbarkeit von Anlagensystemen: Prinzipieller Zusammenhang zwischen der verarbeitungstechnischen Komplexität K_{VA} einer Verarbeitungsanlage und a) dem Umfangs ihrer Ausstattung bzw. b) der Anlagenkapazität.	74
9.2	Systemtheoretische Fragestellung: Konzentration der Anlagenkomplexität K_{VA} in wenigen Elementen mit hoher Komplexität $K_{VE1,j}$ oder Verteilung auf viele Elemente kleinerer Komplexität $K_{VE2,i}$. $K_{VTE1,j} \geq K_{VTE2,i}$	75
9.3	Übersicht über das Grundkonzept, die Gestaltungsprinzipie und technologischen Mittel bei der Neugestaltung von Verarbeitungsanlagen.	77
9.4	Schematische Darstellung des Zusammenwirkens von Miniaturisierung, Modularisierung und Parallelisierung.	78
9.5	Schematische Darstellung der gegenseitigen Beeinflussung der Komplexität der einzelnen Verarbeitungsmodule und der strukturellen Komplexität der Anlage.	80
9.6	Schematische Darstellung eines Plug&Produce-Moduls in Plattformbauweise. VS Verarbeitungssystem, HBS Hilfsstoffbereitstellungssystem, EBS Energiebereitstellungssystem, SS Steuerungssystem, SHS Stütz- und Hüllsystem. a) Plug&Produce-Prinzip: Modularisierung und Integration aller Teilsysteme des verarbeitungstechnischen Systems in ein Verarbeitungsmodul und einheitliche Schnittstellen. b) Plattformbauweise: Neu- und Weiterentwicklung ggü. a) ohne Änderung der Schnittstellen.	81
9.7	Flexible Verkettung bei langfristigen, umfangreichen Änderungen: Erweiterung, Entfernung und Tausch von Verarbeitungslinien.	82

9.8	Flexible Verkettung bei mittelfristigen Änderungen mittleren Umfangs: Produktwechsel mit unterschiedlicher Anzahl von Produktvarianten und verschiedenen Nennausbringungen.	83
9.9	Flexible Verkettung bei kurzzeitigen Änderungen geringen Umfangs: Ausfall einzelner Verarbeitungslinien und zeitweiser Ersatz durch redundante Linien.	83
9.10	Exemplarischer Vorschlag eines Layouts für das Anwendungsbeispiel, dass die Prinzipien Miniaturisierung, Modularisierung und Parallelisierung umgesetzt. Optionale Ausbaustufen sind gepunktet dargestellt.	84
9.11	Aufbaustruktur eines Verpackungsmoduls. Funktionsablauf und Teilsysteme. VS Verarbeitungssystem, HBS Hilfsstoffaufbereitungssystem, EBS Energieaufbereitungssystem, SS Steuerungssystem und SHS Stütz- und Hüllsystem.	84
10.1	Produktion als Umwandlung von Produktionsfaktoren in Produkte, Anwendungsfall Konsumgüterproduktion. In Anlehnung an [86, 87].	86
10.2	Rüstzeitanteil pro Los in Abhängigkeit der Anzahl parallel geschalteter Verarbeitungslinien.	89
10.3	Zuordnung der Prinzipie und technologischen Mittel zu den Anforderungen des allgemeinen Lastenheftes.	90
C.1	Innermaschinelles Verfahren der Verpackungsanlage. SP Schokoladenprodukt, PM Packmittel, AP Ausschussprodukt.	xxii
C.2	Aufbaustruktur der Verpackungsanlage. Angaben zur Struktur der Teilsysteme der Funktionsbereiche Hilfsstoff und Energie sind in den Angebotsunterlagen nicht enthalten. Wechselwirkungen der Teilsteuerungssysteme sind mit Pfeilen dargestellt. Mechanische Verbindungen der einzelnen Stütz- und Hüllsysteme durch gestrichelte Linien.	xxiii
C.3	Funktionshierarchie der Verpackungsanlage nach seiner Baustruktur. Abhängigkeit der Funktionen untereinander auf Grund ihrer baulichen Zusammengehörigkeit. Vier Hierarchieebenen: Verpackungsanlage, Produktionsstrang, Produktionszweig und Module bzw. Maschine.	xxiv
C.4	Funktionshierarchie der Verpackungsanlage nach seiner Steuerung. Abhängigkeit der Teilverarbeitungsfunktionen auf Grund der Steuerungsstruktur. Eine Hierarchieebene mit der Steuerung der Transport- und Vereinzelungssysteme sowie den Steuerungen der Verpackungsmaschinen und der Abgabestationen.	xxv

Anhangverzeichnis

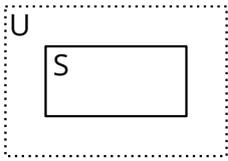
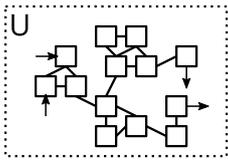
A	Klassifizierung allgemeiner und verarbeitungstechnischer Systeme	xvi
A.1	Klassifizierung allgemeiner Systeme	xvi
A.2	Klassifizierung verarbeitungstechnischer Systeme	xviii
B	Strömungsmechanische Grundlagen von Zustandsänderungen in Stoffströmen	xix
C	Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel	xx
C.1	Verarbeitungsfunktionen der Maschinen und Module	xx
C.2	Innermaschinelles Verfahren der Verpackungsanlage	xxii
C.3	Aufbaustruktur der Verpackungsanlage	xxiii
C.4	Hierarchie nach der Baustruktur	xxiv
C.5	Hierarchie nach der Steuerung	xxv
D	Inhalt der beigelegten Daten-CD	xxvi

A Klassifizierung allgemeiner und verarbeitungstechnischer Systeme

A.1 Klassifizierung allgemeiner Systeme

Gegenseitige Abhängigkeit von Systemaufbau und -verhalten Aufbau und Verhalten von Systemen können nicht losgelöst voneinander betrachtet werden, sondern stehen in einer wechselseitigen Abhängigkeit. Für viele Eigenschaften lassen sich zudem Extremwerte formulieren oder Abstufungen erstellen. Es ist daher naheliegend eine Klassifizierung zu versuchen, die diese Eigenschaften erfasst und Systeme vergleichbar macht.

Tab. A.1: Klassifizierung von Systemen zwischen geschlossenem und offenem Systemtyp.

	Geschlossenes System		Offenes System
			
Umweltbezug	keine Wechselwirkung	—————>	stetiger Zu- und Abfluss
Zustandsänderung	deterministisch	—————>	äquifinal
Stationärer Zustand	statisches Gleichgewicht	—————>	Fließgleichgewicht
Funktion	feste Funktion	—————>	Entwicklung
Variabilität	invariabel	—————>	variabel
Struktur	statisch	—————>	stetiger Ab- und Aufbau
Flexibilität	inflexibel	—————>	flexibel
Varietät	$V_S = 1$	—————>	$V_S \rightarrow \infty$
Stabilität	stabil	ultrastabil	multistabil
Komplexität	einfach	—————>	komplex
Anzahl der Zustände	$n_z = 1$	—————>	$n_z \rightarrow \infty$
Anzahl der Elemente n_e und Relationen n_r	$n_e = 1, n_r = 1$	—————>	$n_e \rightarrow \infty, n_r \rightarrow \infty$
Vielfalt der Elemente und Relationen	$n_z = 1$	—————>	$n_z \rightarrow \infty$
Verknüpfungsstruktur	gleichmäßig	—————>	ungleichmäßig
Anzahl der Hierarchieebenen	$n_h = 1$	—————>	$n_h \rightarrow \infty$

Geschlossenes und offenes System als Bezugspunkte der Klassifizierung Die untersuchten Systemeigenschaften bewegen sich zwischen zwei Polen. So steht ein System bspw. zwischen einfacher Stabilität und Multistabilität oder zwischen starrem Aufbau und Strukturflexibilität. Dabei ist ein Pol in gewisser Hinsicht seiner Charakteristik immer statisch, funktionell determiniert sowie strukturell unveränderlich und der andere dynamisch, funktionell unbestimmt und strukturell veränderlich. Die Eigenschaften eines Systems bewegen sich damit zwischen den beiden Idealen des geschlossenen und offenen Systems, die deshalb der Klassifizierung in Tab. A.1 zugrunde liegen. Eine ähnliche Einteilung der Systeme unter den Begriffen Mechanismus und Organismus führt VON BERTALANFFY durch [67].

A.2 Klassifizierung verarbeitungstechnischer Systeme

Kap. A.1 stellt eine Systemklassifizierung nach geschlossenem und offenem Systemtyp vor. Auch verarbeitungstechnische Systeme bewegen sich zwischen diesen beiden Idealen. Allerdings ist die Erfassung einer Verarbeitungsanlage als geschlossenes System nicht zielführend, weil sie in diesem Fall keine Wechselwirkung mit der Umwelt zeigt und infolgedessen auch keine Verarbeitungsfunktion aufweist. Die Klassifizierung erfolgt deshalb unter den beiden Bezeichnungen des einfachen und des komplexen Systems.

Tab. A.2: Klassifizierung von verarbeitungstechnischen Systemen nach einfachem und komplexem System.

	Einfaches System		Komplexes System	
Umweltbezug	isoliert, lediglich Stoffaustausch des Verarbeitungsgutes	→	Vielzahl von Wechselwirkungen zwischen Verarbeitungsgut, Arbeitsorgan und Umwelt	
Verhalten	einzelne, statische Verarbeitungsfunktion	→	Funktionsanpassung an verschiedene Verarbeitungsaufgaben und Randbedingungen	
Variabilität	invariabel	→	variabel	
Struktur	statisch	→	Komponentenaustausch, Stoffflussänderung	
Flexibilität	inflexibel	→	flexibel	
Varietät	$V_{VT} = 1$	→	$V_{VT} \rightarrow \infty$	
Stabilität	stabil	→	ultrastabil	multistabil
Veränderl. Randbedingungen	konventionelle Regelung	→	adaptive Regelung	selbstoptimierende Regelung
Wechselnde Verarbeitungsaufgabe	Funktionsausführung	→	Funktionsanpassung der verarbeitungstechn. Elemente	Anpassung der Anlagenstruktur
Komplexität	einfach	→	komplex	
Verhalten	$K_V > 1$	→	$K_V = 1$	
Verarbeitungstechnische Komplexität	$K_{A,RB} = 1$, eine Produktvariante, eine Teilverarbeitungsaufgabe, niedrige Arbeitsgeschwindigkeit, kein Produktwechsel, keine Randbedingungen	→	$K_{A,RB} \rightarrow \infty$; viele Produktvarianten und Teilverarbeitungsaufgaben, hohe Arbeitsgeschwindigkeit, kleine Losgrößen, viele Randbedingungen mit hohen Änderungsraten	
Komplexität der Verarbeitungsanlage	$K_{VTS} = 1$; eine Wirkpaarung, keine Teilsysteme, eine Hierarchieebene	→	$K_{VTS} \rightarrow \infty$; viele Wirkpaarungen, viele Teilsysteme, viele Hierarchieebenen	

B Strömungsmechanische Grundlagen von Zustandsänderungen in Stoffströmen

Verarbeitungsgüter im Verarbeitungsprozess können als Stoffstrom angesehen werden, der beim Durchlauf durch eine Verarbeitungsanlage einer Zustandsänderung unterliegt. Mit der Darstellung solcher Stoffströme und deren Zustandsänderungen befasst sich die Strömungsmechanik. Sie kennt zwei verschiedenen Beschreibungsformen für Strömungen [90, 91]:

- Die EULER'sche Darstellung betrachtet die physikalischen Größen an einem bestimmten Ort und deren zeitliche Veränderung. Sie gibt keine Auskunft über den Zustand oder das Verhalten eines einzelnen Fluidelements.
- Die LAGRANGE'sche Darstellung betrachtet ein einzelnes Fluidelement und beobachtet die zeitliche Änderung seines Zustandes, indem sie es auf seiner Bewegungsbahn verfolgt.

Die mathematischen Beschreibungsmittel der EULER'schen Darstellung sind Bilanzgleichungen, die an problemspezifischen Systemgrenzen aufgestellt werden. Die Verfahrenstechnik nutzt diese Beschreibungsform und stellt Energiebilanzen auf, die sich auf Stoffmengenströme beziehen. Ihr genügt die EULER'sche Darstellung, weil sie sich nicht für die Vorgänge im Inneren des Stoffstroms interessiert [92]. Die Verarbeitungstechnik betrachtet jedoch das einzelne Element im Stofffluss, das Verarbeitungsgut, und dessen Zustandsänderung. In einem Verarbeitungsprozess zählt die Qualität des einzelnen Verarbeitungsgut und nicht die durchschnittlichen Werte ihrer Zustandsgrößen an den Grenzen der Verarbeitungsanlage. Verarbeitungsgutorientierte Modelle gründen deshalb im weitesten Sinne auf der LAGRANGE'schen Betrachtungsweise.

C Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel

C.1 Verarbeitungsfunktionen der Maschinen und Module

Tab. C.1: Maschinen und Module der Verpackungsanlage. Bezeichnung und Funktion.

Pos.	Bezeichnung	Funktion
02	Taktband 2-stufig	Vergleichmäßigen des Produktstroms, Erzeugen von bestimmten Gruppierungen
03	Zwischenband mit Rückzugkante	Transport der Produkte, Ausschleusen von fehlerhaften Produkten
04	Hauptband	Transport der Produkte
05	Abgabestation CTS-300	Übergabe von Produktgruppen auf abzweigende Produktionsstränge
06	Hauptband	Transport der Produkte
07	Reversierband	Übergabe der Produkte in einer Abgabestation an eine nachfolgende Speichereinrichtung, Zurückfördern der Produkte in die Abgabestation
08	Speicherband	Speichern von Produkten, Arbeitsprinzip First-In Last-Out
10	Querband	Übernahme der Produkte von der Abgabestation, Transport der Produkte, Schließen von Lücken im Produktstrom
11	Vereinzelungsband Typ MG6 1-stufig	Vereinzelung der Produkte vor der Verpackungsmaschine
12	Kurvenband 90°	Transport der Produkte, 90° Kurve
13	Vereinzelungsbänder MG6 2-stufig	Vereinzelung der Produkte vor der Verpackungsmaschine
14	Metallsuchband	Detektieren und Ausschleusen metallkontaminierter Produkte, Ausschleusen nicht vereinzelter bzw. nicht ausgerichteter Produkte
15	Transportbänder Typ MG6	Transport der Produkte
16	Vereinzelungsband Typ MG6 1-stufig	Vereinzelung der Produkte vor der Verpackungsmaschine

17	Kurvenband 40°	Transport der Produkte, 40° Kurve
18	Vereinzelungsband Typ MG6	Vereinzelung der Produkte vor der Verpackungsmaschine
19	Ausrichtband	Ausrichten der Produkte zum Einlauf in die Verpackungsmaschine, Ausschleusen nicht vereinzelter bzw. nicht ausgerichteter Produkte
20	Verpackungsmaschine MCC	Verpacken der Produkte mit Doppeldreheinschlag
21	Verpackungsmaschine EMC1	Verpacken der Produkte im Buncheinschlag
22	Handaufgabeband Typ MG6	Aufgeben von Produkten von Platte auf ein Transportband
30	Systemsteuerung	Steuerung der Verpackungsanlage mit Ausnahme der Verpackungsmaschinen und der Abgabestation
31	Steuerung MCC	Steuerung der Verpackungsmaschine MCC
32	Steuerung EMC1	Steuerung der Verpackungsmaschine EMC1
33	Steuerung CTS-300	Steuerung der Abgabestation CTS-300

C.2 Innermaschinelles Verfahren der Verpackungsanlage

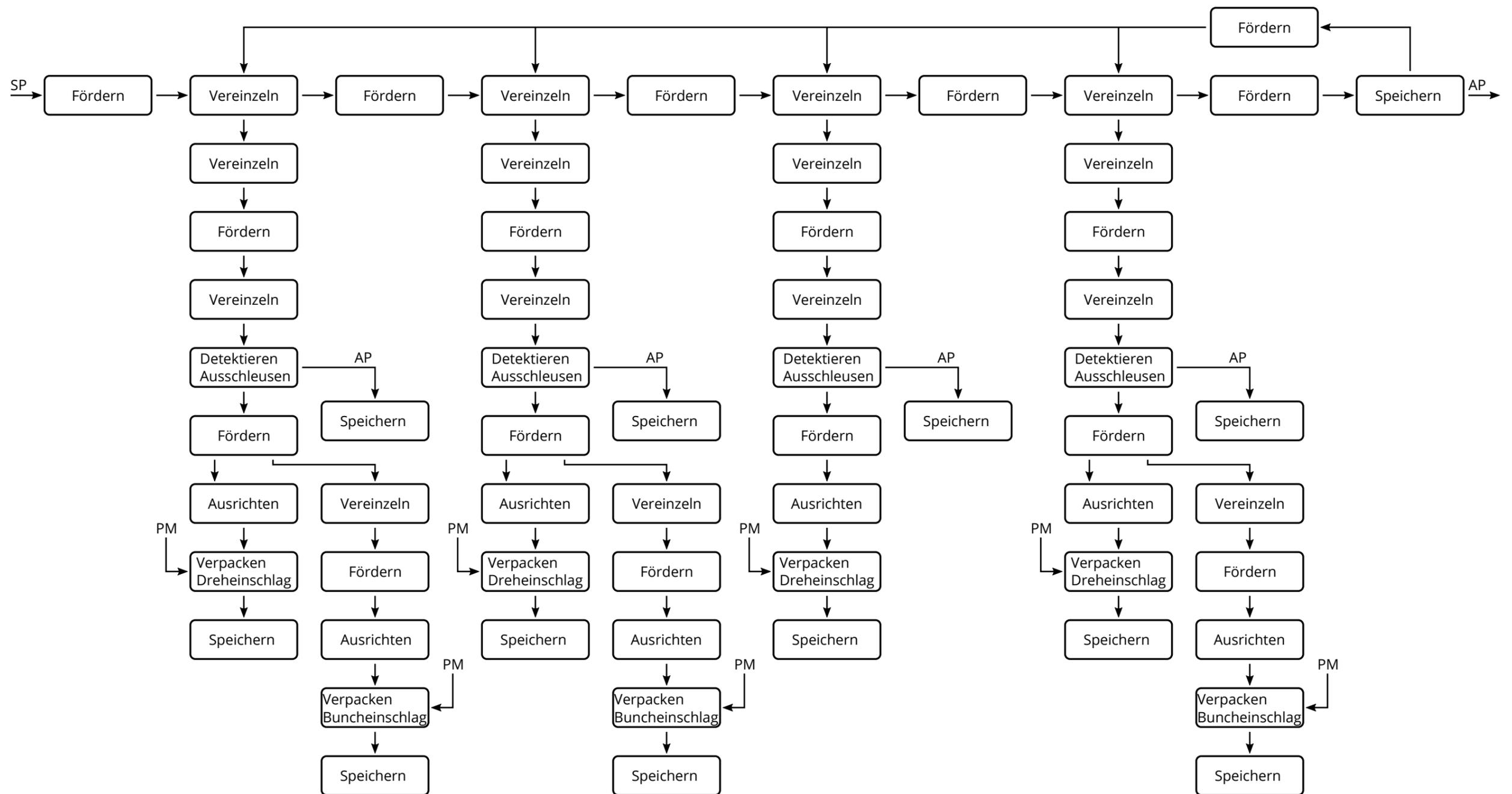


Abb. C.1: Innermaschinelles Verfahren der Verpackungsanlage. SP Schokoladenprodukt, PM Packmittel, AP Ausschussprodukt.

C.3 Aufbaustruktur der Verpackungsanlage

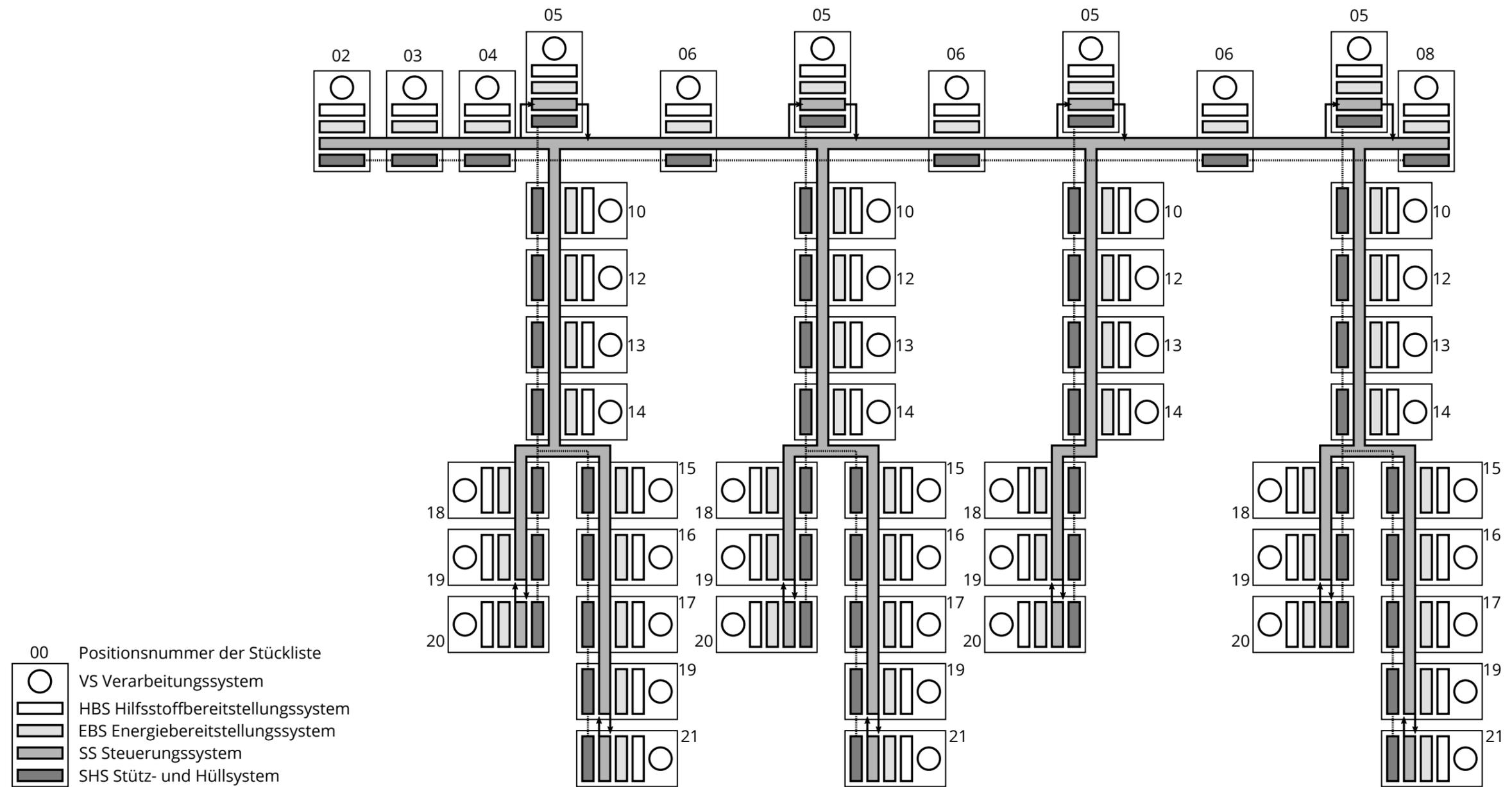


Abb. C.2: Aufbaustruktur der Verpackungsanlage. Angaben zur Struktur der Teilsysteme der Funktionsbereiche Hilfsstoff und Energie sind in den Angebotsunterlagen nicht enthalten. Wechselwirkungen der Teilsteuersystem sind mit Pfeilen dargestellt. Mechanische Verbindungen der einzelnen Stütz- und Hüllsysteme durch gestrichelte Linien.

C.5 Hierarchie nach der Steuerung

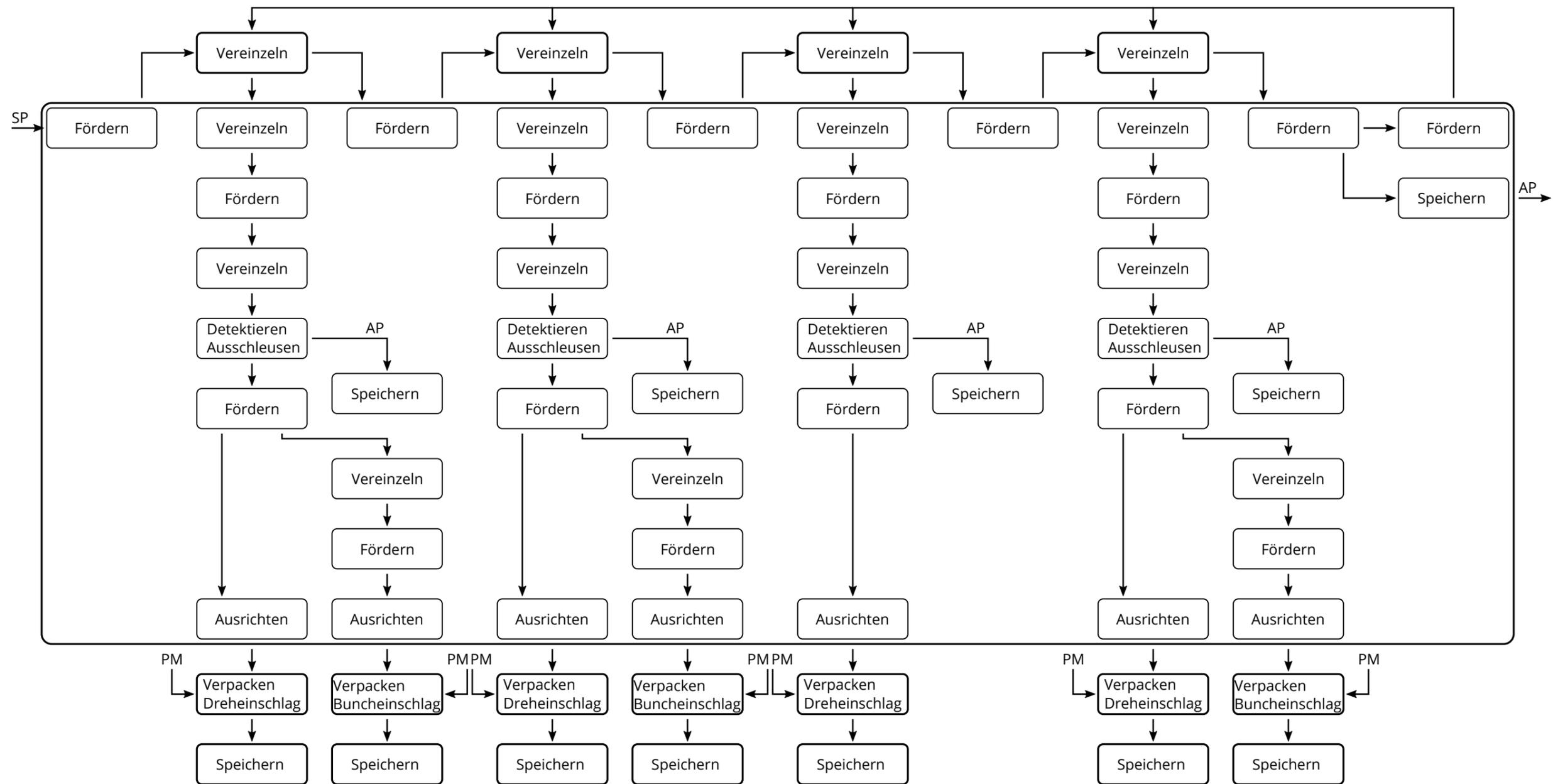


Abb. C.4: Funktionshierarchie der Verpackungsanlage nach seiner Steuerung. Abhängigkeit der Teilverarbeitungsfunktionen auf Grund der Steuerungsstruktur. Eine Hierarchieebene mit der Steuerung der Transport- und Vereinzlungssysteme sowie den Steuerungen der Verpackungsmaschinen und der Abgabestationen.