

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

Abbildung von transientem Produktverhalten in der Maschinenbelegungsplanung

Marcel Wagner

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr. rer. nat. Horst-Christian Langowski

Die Dissertation wurde am ..25.07.2016.. bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am ..27.11.2016.. angenommen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Projektgruppe Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen des Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik in der Zeit von 2010 bis 2015 entstanden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, den Leitern des Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), gilt mein besonderer Dank für die Förderung und Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr. Horst-Christian Langowski, dem Leiter des Lehrstuhls für für Lebensmittelverpackungstechnik der Technischen Universität München möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts recht herzlich für die zielführende und angenehme Zusammenarbeit. Besonders hervorheben möchte ich dabei Markus Graßl, Andreas Hees und Thilo Martens, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit mit Rat und Tat unterstützt haben.

Bei den Studenten, die meine Forschung in Form von Studienarbeiten begleitet haben, bedanke ich mich für ihr Interesse und Engagement. Ein besonderer Dank gilt dabei Tobias Seeberger und Tim Schleimer. Ein weiterer Dank geht an Dr.-Ing. Christoph Hechl, der neben Andreas Hees und Markus Graßl die Manuskriptversionen dieser Dissertation kritisch begutachtet hat und durch viele wertvolle Anregungen zum erfolgreichen Abschluss meiner Arbeit beitragen konnte.

Besonderer Dank gilt zudem meinen Eltern, meiner Schwester Diana und allen meinen Freunden, die immer an mich geglaubt haben und mir so den nötigen Rückhalt für diese Arbeit gegeben haben. Vor allem möchte ich mich bei meiner Frau Anja, meiner Tochter Rekha und meinem Sohn Yannis bedanken. Sie haben mir während der Fertigstellung dieser Arbeit mit sehr viel Geduld und Liebe den Rücken freigehalten und mich auch in schwierigen Momenten stets moralisch unterstützt.

Vielen Dank!

Marcel Wagner

Für Rekha, Yannis und Anja

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Abkürzungsverzeichnis	IX
Verzeichnis der Formelzeichen	XI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.1.1 Allgemeines	1
1.1.2 Lebensmittelverarbeitung in Deutschland	2
1.1.3 Individuelle Lebensmittelverarbeitung	3
1.1.4 Wegwerfraten	5
1.1.5 Individualisierung und Ressourcenschonung durch Automatisierung	5
1.2 Aufgabenstellung	7
1.3 Zielsetzung	9
1.4 Aufbau der Arbeit	10
2 Grundlagen, Stand der Technik und Wissenschaft	13
2.1 Allgemeines	13
2.2 Maschinenbelegungsplanung	
in der Produktionsplanung und -steuerung	16
2.2.1 Ziele der Produktionsplanung und -steuerung	17
2.2.2 Maschinenbelegung in der Produktionsplanung	17
2.2.3 Lösung des Maschinenbelegungsproblems	26
2.2.4 Fazit	29
2.3 Qualität und Qualitätsbegriff	30
2.3.1 Produktionstechnischer Ansatz	31
2.3.2 Kundengeprägter Qualitätsbegriff	33
2.3.3 Fazit	35
2.4 Qualitätsbetrachtung von Lebensmitteln	35
2.4.1 Partikularinteressen an der Lebensmittelqualität	36
2.4.2 Die Summe von Teilqualitäten	37
2.4.3 Qualitätsstudien für Lebensmittel	39
2.4.4 Der Garegrad	42

2.4.5 Fazit	43
2.5 Kundenorientierung, Kundenfeedback	44
2.5.1 Kundenzufriedenheit	44
2.5.2 Kundenorientierung durch Kundenfeedback	46
2.5.3 Fazit	48
2.6 Ableiten des Handlungsbedarfes	48
3 Methode zur Integration des transienten Produktverhaltens in die Maschinenbelegungsplanung	51
3.1 Allgemeines	51
3.2 Ablauf	52
3.3 Pufferzeitoptimierte Belegungsplanung	53
3.3.1 Entwicklung der Zielfunktionen	53
3.3.2 Definition von Nebenbedingungen	55
3.4 Qualitätsmodell zur Optimierung	56
3.4.1 Allgemeines	56
3.4.2 Prozessanalyse	57
3.4.3 Prozess- und Umgebungsmodellierung	59
3.4.4 Produktanalyse	61
3.4.5 Produktmodellierung	62
3.4.6 Einfluss- und Integrationsmöglichkeiten zur Optimierung der Be- legungsplanung	68
3.5 Feedbackgestützte Individualisierung	73
3.5.1 Allgemeines Vorgehen	73
3.5.2 Prozessinterpretation	74
3.5.3 Feedbackinterpretation und Qualitätsregelkreis	75
3.6 Fazit	78
4 Umsetzung am Beispiel der automatisierten Lebensmittelverarbeitung	79
4.1 Allgemeines Vorgehen	79
4.2 Der Anwendungsfall	79
4.3 Einordnung als Maschinenbelegungsproblem und Aufbau der Planungsdaten	80
4.4 Übersicht zur Implementierung des Planungssystems	83
4.5 Das zugrundeliegende Datenmodell	84
4.6 Pufferzeitoptimierte Belegungsplanung	85
4.6.1 Nebenbedingungen des Szenarios	85
4.6.2 Realisierung der Terminplanung	86

4.6.3	Heuristikentwurf und Implementierung	88
4.6.4	Weiterentwicklung der Heuristik	90
4.6.5	Algorithmenvergleich und Bewertung	92
4.7	Optimierung mit Qualitätsmodell	105
4.7.1	Ablauf	105
4.7.2	Prozess- und Produktmodellierung	106
4.7.3	Ergebnisse der Simulation des Kerntemperaturverlaufs	112
4.7.4	Die Ermittlung eines optimalen Qualitätswertes	114
4.7.5	Verwendung des Modells in der Maschinenbelegungsplanung	116
4.7.6	Auswirkung der Qualitätsbetrachtung auf das Planungsergebnis	122
4.8	Feedbackgestützte Individualisierung	123
4.8.1	Ablauf	123
4.8.2	Integration in das bestehende Planungssystem	124
4.8.3	Realisierung einer Bewertungsoberfläche	126
4.8.4	Test und Auswirkung auf die Qualitätsfunktion	127
4.8.5	Bewertung des Moduls	129
5	Bewertung der wirtschaftlichen Relevanz	131
5.1	Allgemeines	131
5.2	Untersuchungsszenarien für die Gemeinschaftsverpflegung	131
5.3	Wirtschaftliche Bilanzierung	133
5.3.1	Methodische Datenerhebung	133
5.3.2	Investitionsvergleichsrechnung	141
5.3.3	Zusammenfassung und Bewertung	146
6	Zusammenfassung und Ausblick	149
A	Betreute Studienarbeiten	155
B	Datenbankstruktur im Umsetzungsbeispiel	157
C	Ablaufdiagramme der implementierten Methoden	159
C.1	Die Methode „firsttime1“	159
C.2	Die Methode „disturbance1“	160
	Literaturverzeichnis	161

Abkürzungsverzeichnis

AfA	.....	Abschreibung für Abnutzung
allg.	.....	allgemein
bspw.	.....	beispielsweise
ca.	.....	circa
d. h.	.....	das heißt
DE	.....	Differential Evolution Algorithmus
DIN	.....	Deutsches Institut für Normung e.V.
EN	.....	Europäische Norm
engl.	.....	englisch
ggf.	.....	gegebenenfalls
HLD	.....	Heißluftdampfgarer
i. d. R.	.....	in der Regel
ISO	.....	International Organization for Standardization
KBA	.....	Kundenbedarfsanalyse
konst.	.....	konstant
LMFG	.....	Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch
MC	.....	Mass Customization
MMA	.....	Multimomentenaufnahme
o. ä.	.....	oder ähnliche
OG	.....	Obergrenze
PFB	.....	Produktfamilienbildung
PPS	.....	Produktionsplanung und -steuerung
PSO	.....	Particle Swarm Optimierung
SFB	.....	Sonderforschungsbereich
sog.	.....	sogenannte/-n
u. U.	.....	unter Umständen
UG	.....	Untergrenze
usw.	.....	und so weiter

vgl.	vergleiche
VK	Vollkostenstellen
WHO	World Health Organization
z. B.	zum Beispiel
zzgl.	zuzüglich

Verzeichnis der Formelzeichen

<i>Parameter</i>	<i>Einheit</i>	Erklärung
A	$[m^2]$	Fläche
a_{ϑ}	$[\frac{m^2}{s}]$	Temperaturleitfähigkeit
a, b	$[\quad]$	Aus empirisch ermittelter Garkurve berechnete konstante, vom Lebensmittel abhängige Faktoren
A_j	$[\quad]$	Auftrag/Job
A_{j1}, \dots, A_{jn}	$[\quad]$	Arbeitsgänge 1. . . n des Auftrages/Jobs j
B	$[\quad]$	Anzahl von Beobachtern
$b_r(t)$	$[\quad]$	Funktion der Fächerbelegung für die Ressource r zum Zeitpunkt t
c	$[\frac{J}{kg \cdot K}]$	Spezifische Wärmekapazität
c_1, c_2	$[\quad]$	Beschleunigungskoeffizienten zur Korrektur des Schwarms
CC, DD	$[\quad]$	Menge der Stauchungsparameter cc_i, dd_i der vereinfachten Qualitätsfunktion
C_{th}	$[J/K]$	thermische Kapazität
dd_j	$[\quad]$	Fälligkeitstermin (engl. Due Date)
d_{jr}	$[s]$	Bearbeitungsdauer des Jobs j auf der Ressource r
E_A	$[\frac{J}{mol}]$	Arrhenius'sche Aktivierungsenergie
F	$[\quad]$	Mutationsfaktor
fa, Fa	$[\quad]$	Fach, Fächer
$f(P)$	$[\quad]$	Fitnessfunktion für den betrachteten Partikelraum P
$f(x)$	$[\quad]$	Originale Zielfunktion
$F(x)$	$[\quad]$	Zielfunktion beaufschlagt mit einem residualen Term
$f(x_i, GE)$	$[\quad]$	Fitnessfunktion für ein untersuchtes Problem mit Partikelvektor x_i in der Generation GE
f_v	$[\quad]$	Vertrauensbereich
f'_v	$[\quad]$	Gewünschter Vertrauensbereich
f_j	$[\quad]$	Freigabe- oder Bereitstellungszeitpunkt
G	$[\quad]$	Garegrad
GE	$[\quad]$	Generation/Eltern

ge	[]	Aktuell gewählte Generation
$GE + 1$	[]	Nachkommen
$g(x), g'_j, g_j$	[]	Terme der Nebenbedingungen der evolutionären Algorithmen
$g_{nb,max}$	[]	Nebenbedingung mit dem größten normierten Einfluss
$h(t)$	[]	Beschreibungsfunktion eines dynamischen Zielwertes
$H(x)$	[]	Strafffunktion (Residualterm) in der Metaheuristik
i	[]	Laufvariable für Komponenten oder Produkte der Aufträge sowie der Populationsmitglieder, Schichten oder Bewertungen
j, J	[]	Laufende Nummer des Jobs/Auftrags und Gesamtanzahl an Jobs
k_v	$\left[\left(\frac{l}{mol} \right)^{(n-1)} \cdot \frac{1}{s} \right]$	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante (n entspricht der Reaktionsordnung)
K	[]	Gesamtanzahl an Komponenten
k	[]	Laufvariable für Komponenten eines Auftrages, Arbeitsschritte
k_0	$\left[\frac{1}{s} \right]$	Aktionskonstante
K_A	[€]	Kosten der Variante A
$K_{A,fix}$	[€]	Fixkostenanteil der Variante A
$K_{A,var}$	[€]	Variabler Kostenanteil der Variante A
K_B	[€]	Kosten der Variante B
$K_{B,fix}$	[€]	Fixkostenanteil der Variante B
$K_{B,var}$	[€]	Variabler Kostenanteil der Variante B
KF	[]	Korrekturfaktor
KF_{neu_i}	[]	Neuer Korrekturfaktor nach der i-ten Bewertung
$K_{opportun}$	[€]	Opportunitätskosten
LF	[%]	Luftfeuchtigkeit
LF_i^*	[%]	Luftfeuchtigkeit des Produktes i im Anwendungsfall
LF_{ref}	[%]	Referenzluftfeuchtigkeit
m	[kg]	Masse einer Schicht
m_{ST}	$\left[\frac{K}{min} \right]$	Steigung der Approximationsgerade in der Prozessmodellierung
$\overline{m_{ST}}$	$\left[\frac{K}{min} \right]$	Mittelwert der Steigungen verschiedener Approximationsgeraden

$M_{r,f}$	[]	Anlagenmatrix (Größe: Anzahl Anlagen R mal Flächenanzahl FA)
MW_{WB}	[]	Mittelwert des Wertebereiches der Skala einer Ratingfrage
n	[]	Laufvariable (Aufträge, Kurven, o. a.)
n_{Beo}	[]	Beobachtungen
n'_{Beo}	[]	Gesamtzahl der erforderlichen Beobachtungen
nb, NB	[]	Anzahl an Nebenbedingungstermen
Np	[]	Populationsmitglieder, Partikel
$n_{R'}$	[]	Anzahl der Arbeitsplätze bei der Multimomentaufnahme
p_{Beo}	[]	Beobachtungswahrscheinlichkeit
p'	[]	Erwartungswert
$p'_{j,i,GE}$	[]	Nachkommen von $x_{j,i}$ in der Generation GE
$p_{i,GE}$	[]	Mutant/Probevektor von $x_{i,GE}$
$Parameter_{Real}$	$[f(Parameter)]$	Real gemessener Wert des Prozessparameters
$Parameter_{Referenz}$	$[f(Parameter)]$	Referenzwert des Prozessparameters bei nicht individueller Verarbeitung
P_g^{ti}	[]	Global beste Position eines Partikel g im Iterationsschritt ti
P_j	[]	Menge an Komponenten/Produkten
ps	[]	Produktionsstufen
P_z^{ti}	[]	Positionsinformation des Partikels z im Iterationsschritt ti
P_{zz}^{ti}	[]	Positionsinformation des Partikels z im Iterationsschritt ti
Q	[]	Qualität
Q_{min}	[]	Qualitätsrandbedingung (Minimum)
$q(\dots)$	[]	Qualitätsfunktion
Q_{10}	[]	Faktor für die Reaktionsgeschwindigkeit
R_{allg}	$[8, 3144598 \frac{J}{mol \cdot K}]$	allgemeine Gaskonstante
r, R	[]	Lfd. Nummer Maschinen-/Anlagenpark, Ressourcen, Maschinen
R'	[]	Initiale Anzahl an Rundgängen
$R1, R2$	[]	Reaktionsgeschwindigkeiten
$rand_j(0, 1)$	[]	Zufallsbasierte Initialisierung

r_{BT}	[]	Beobachtungsrundgänge (Anzahl Rundgang je Beobachter und Tag)
$R_{Schicht}$	$[\frac{K}{W}]$	Thermischer Widerstand einer Schicht
R_{th}	$[\frac{K}{W}]$	Wärmewiderstand
$R_{Uebergang}$	$[\frac{K}{W}]$	Wärmeübergangswiderstand
s	$[m]$	Dicke
S	[]	Statistischer Sicherheitsfaktor
$T, T1, T2$	$[^{\circ}C]$	Temperatur
Ta	[]	Anzahl an Beobachtungstagen
$t_{R'}$	[]	Beobachtungsaufwand
t	$[s]$	Zeit
t_e	$[s]$	Einwirkzeit
$t_{e,i}^*$	$[s]$	Einwirkzeit des Produktes i im Anwendungsfall
t_{end}	$[s]$	Fertigstellungstermin
$t_{end,i/k/l}$	$[s]$	Geforderte Zielzeit einer Komponente
$T_{end,j}$	$[s]$	Endzeit eines Auftrages j
$T_{end,j}^*$	$[s]$	Wunschtermin eines Auftrages
t_G	$[min]$	Garzeit bis zum Garendpunkt
t_{Gesamt}	$[s]$	Rechenzeit
ti	$[s]$	Zeiteinheit, Iterationsschritt
t_{ofen}	$[s]$	Technische Zeitkonstante für Beförderungsaufwand von Produkten (Befüllungszeit)
$t_{puffer,j}$	$[s]$	Pufferzeit eines Auftrages j
$t_{Qmax_{Kartoffel}}$	$[s]$	Einwirkzeit bis Q_{max} der untersuchten Kartoffel
$t_{Qmax_{Schwein}}$	$[s]$	Einwirkzeit bis Q_{max} des untersuchten Fleisches
$t_{Abkühl}$	$[s]$	Anlagenspezifische Zeitkonstante des Abkühlvorganges bei einem Bestückungsvorgang
t_{start}	$[s]$	Startzeit
$t_{start,i}$	$[s]$	Geplante Startzeit einer Komponente i
$T_{start,j}$	$[s]$	Startzeit des Auftrages j
t_v	$[s]$	Verschiebezeit einer/-s Komponente/Auftrages
$t_{Verzögerung}$	$[s]$	Verzögerungszeit bei der Befüllung
$T_{warte,j}$	$[s]$	Wartezeit eines Auftrages j
V	$[m^3]$	Volumen eines Produktes
V_z^{ti}	[]	Geschwindigkeitsinformation des Partikels z im Iterationsschritt ti
w	[]	Gewichtungsfaktoren

w_i	[]	Wertetripel
w_j	[]	Gewichtungsfaktoren
W_j	[]	Menge an Anweisungen in einem
Wk_{Cr}	[]	Wahrscheinlichkeit zur Entscheidung für die Eigen- schaften der Elterngeneration
$X_z^{(ti)}$	[]	Partikelraum
$x_{i,GE}$	[]	Vektor eines Populationsmitglieds im DE- Algorithmus
$X_{i,GE}$	[]	Matrix aller Populationsvektoren einer Generation GE
$x_{i,GE+1}$	[]	Selektierter Nachkomme von $x_{i,G}$ in der Folgegene- ration
z, zz	[]	Lfd. Nummer der Partikel
$z(i)$	[]	Natürliche Funktion, welche einem Produkt einen Auftrag zuweist und umgekehrt

Griechische Variablen

<i>Parameter</i>	<i>Einheit</i>	Erklärung
α	$[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$	Wärmeübergangskoeffizient
α_{Cha}	[]	Maschinencharakteristik
β_{Cha}	[]	Jobcharakteristik
γ_{Cha}	[]	Vorgegebene Zielsetzung
δ	[]	Dimension des Partikelraums
ΔT	[K]	Temperaturdifferenz
Δt	[s]	Zeitdifferenz
$\Delta \vartheta_{Steig}$	[K/s]	Steigrate der Temperatur
λ	$[\frac{W}{mK}]$	Wärmeleitfähigkeit
λ^2	[]	Gauß'-scher Parameter
ϕ	$[W = \frac{kgm^2}{s^3}]$	Wärmestrom
ρ	[]	Dichte des betrachteten Materials
ϑ	[°C]	Temperatur
ϑ_i^*	[°C]	Temperatur des Produktes i im Anwendungsfall
ϑ_{Anlage}	[°C]	Anlagentemperatur
ϑ_{End}	[°C]	Endtemperatur
ϑ_{Ofen}	[°C]	Temperatur im Ofen
ϑ_{Raum}	[°C]	Raumtemperatur
ϑ_{ref}	[°C]	Referenztemperatur

$\vartheta_{Schicht\ i}$	$[^{\circ}C]$	Temperatur einer Schicht i
ϑ_{Start}	$[^{\circ}C]$	Starttemperatur
$\vartheta_{t=2min}$	$[^{\circ}C]$	Temperatur nach der Simulationszeit t (hier 2 min)
$\vartheta_{Umgebung}$	$[^{\circ}C]$	Umgebungstemperatur
τ	$[s]$	Zeitkonstante
$\xi(q_i(x))$	$[\quad]$	Strafterm (Residuum) im PSO
$\dot{\omega}$	$[\frac{W}{m^3}]$	Quelldichte, Maß an freigesetzter Energie

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

1.1.1 Allgemeines

Der Produktionsstandort Deutschland genießt nach wie vor einen sehr guten Ruf hinsichtlich der Qualität exportierter Güter jeder Art. Die Auswirkungen der Globalisierung verlangen von den internationalen Marktteilnehmern eine starke Diversifizierung hinsichtlich der Produkte (ABELE & REINHART 2011). Um im Verkauf jedoch ein Global Player zu sein und zu bleiben, entscheidet oftmals ausschließlich die Qualität der angebotenen Produkte. Die heutige Marke „Made in Germany“, welche ursprünglich durch die von der britischen Regierung eingeführte Kennzeichnungspflicht (PARLAMENT VON GROSSBRITANNIEN 1887) für ausländische Produkte zum Ende des 19. Jahrhunderts zu Stande kam, wandelte sich von der Brandmarkung minderwertiger deutscher Produkte hin zu einem Garant für Qualität (SPIEGEL-ONLINE 2008). Zudem sieht auch der internationale Wettbewerb nach wie vor diese Marke als vertrauenswürdig an. Die Abbildung 1.1 zeigt dazu ein Meinungsbild der größten wirtschaftlichen Partner Deutschlands.

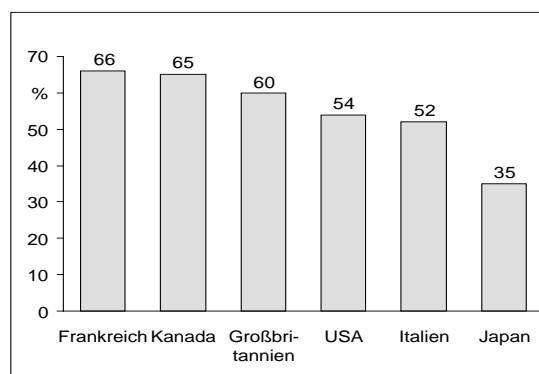


Abbildung 1.1: Internationale Meinung zur Marke „Made in Germany“ (in Prozent der Befragten) DIE WELT (2008)

Werden dazu die internationalen Märkte mit den auf sie einwirkenden Megatrends, wie bspw. Ressourcenverknappung oder die Durchdringung mit neuen Technologien (vgl. auch ABELE & REINHART (2011)), betrachte, ist von einer Verschärfung des Marktdrucks auszugehen (ABELE & REINHART 2011). Dies ist auch davon geprägt, dass verschiedene Einflussfaktoren (vgl. Abbildung 1.2) auf die Unternehmen einwirken, welche wiederum Unternehmen dazu veranlassen, bspw. die Qualität der von ihnen angebotene Produkte

stetig zu gewährleisten und zu verbessern.

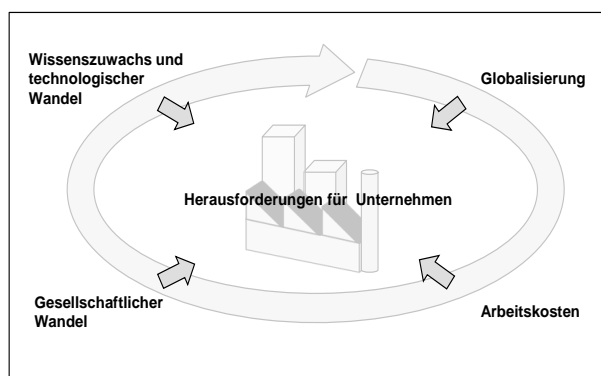


Abbildung 1.2: Abbildung der Einflussfaktoren auf Unternehmen nach PRASCH (2010)

Der stetige Wettbewerb und die ständige Konkurrenzsituation, welche durch die Globalisierung noch begünstigt werden (PRASCH 2010), fördern die Fokussierung auf Kriterien wie Produkt- und Produktionsqualität. Im Allgemeinen ist eine Konzentration auf qualitätsbeschreibende Kennzahlen zu verzeichnen. Diese Trends bilden jedoch ebenfalls eine Grundlage für neue Chancen und weitere Entwicklungspotenziale in der Produktionslandschaft eines Standortes wie Deutschland. Innovative Ideen und zukunftsweisende Entwicklungen benötigen immer auch ein innovationsfreudiges Umfeld, in welchem sich Reaktionen auf die vorherrschenden Trends entwickeln können.

1.1.2 Lebensmittelverarbeitung in Deutschland

Für das umfassende Verständnis der nachfolgenden Ausführungen und die Betrachtung des Anwendungsbeispiels ist es zielführend, eine Einführung in die Branche der Lebensmittelverarbeitung zu geben. An dieser Stelle soll zunächst, für ein gleiches Verständnis, der Kernbegriff für dieses Kapitel eingeführt werden. Das *Lebensmittel* als solches kann als eine breite Variation an Produkten verstanden werden (STRECKER ET AL. 1996, JÄGER 2004). Das anzuwendende Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch (LFGB) ordnet dem Begriff des Lebensmittels gemäß der Verordnung EG 178 Artikel 2

„(...) alle Stoffe, die dazu bestimmt sind, in unverändertem, zubereitetem und/oder verarbeitetem Zustand vom Menschen verzehrt zu werden (...)“

zu. Der Artikel 2 der europäischen Verordnung grenzt weiterführend ab, welche Produkte nicht zu den Lebensmitteln gezählt werden. Beispielfhaft aufgeführt seien hier Futtermittel, Arzneimittel, Betäubungsmittel und lebende Tiere (EU PARLAMENT 2002). Diese Verordnung definiert zudem die Rolle eines Lebensmittelunternehmens als ein „(...) Unternehmen, gleichgültig, ob (es) auf Gewinnerzielung ausgerichtet (ist) oder nicht und ob

(es) öffentlich oder privat (ist, das) eine mit der Produktion, der Verarbeitung und dem Vertrieb von Lebensmitteln zusammenhängende Tätigkeit (ausführt);“ (EU PARLAMENT 2002). Ausgehend vom Einzelunternehmen kann die zentrale Aufgabe der Branche der Ernährungswirtschaft zusammengefasst werden, als das Produzieren, Weiterverarbeiten und zur Verfügung stellen von Lebensmitteln für die menschliche Ernährung. Dazu kann das Ernährungsgewerbe, eine Untergruppe der Ernährungswirtschaft, mit den jeweils zugehörigen Dienstleistungsbereichen im Wesentlichen in fünf Bereiche untergliedert werden. Diese sind in der Abbildung 1.3 schematisch aufgezeigt.

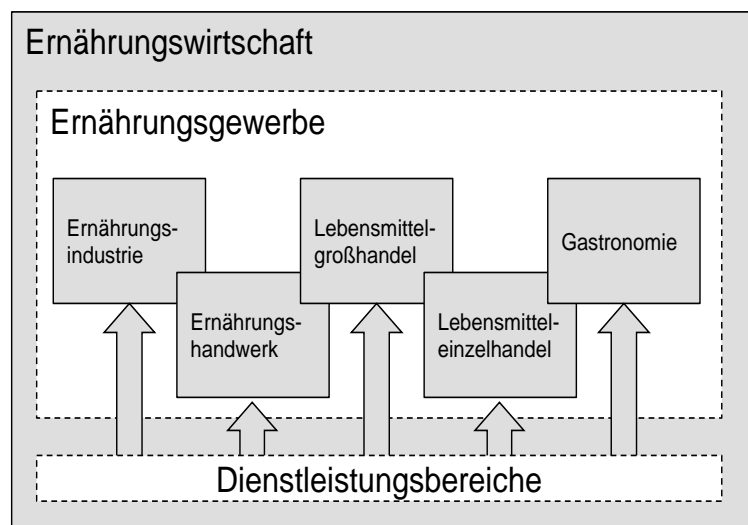


Abbildung 1.3: Vereinfachte Gliederung der Ernährungswirtschaft in Anlehnung an STRECKER ET AL. (1996)

Im Folgenden sollen nur die Bereiche der Lebensmittelproduktion und -verarbeitung eine Rolle spielen, welche sich den Bereichen der Ernährungsindustrie oder der Gastronomie zuordnen lassen. Die Aspekte des Handels und der dargestellte Dienstleistungsbereich sind in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Die aufgezeigte Untergliederung des Ernährungsgewerbes im produzierenden Umfeld (Ernährungsindustrie, -handwerk und Gastronomie) unterscheidet sich mit Blick auf das Interesse nach Kundenindividualität und die spezifische Qualität enorm. Die Spanne erstreckt sich von der industriellen Massenproduktion sowie teilweise der kundenindividuellen Massenfertigung im Bereich der Ernährungsindustrie und des Ernährungshandwerks, bis hin zu einer Produktion von tatsächlich individuellen, kundenangepassten Produkten im Umfeld der Gastronomie und der Systemgastronomie.

1.1.3 Individuelle Lebensmittelverarbeitung

Die Individualisierung der Produkte in Folge der Veränderungen der gesellschaftlichen Struktur ist auch in der Ernährungsindustrie festzustellen. Direkt aus den Herausforderungen

des demographischen Wandels kann der Wunsch der Konsumenten hin zu individualisierten Produkten abgeleitet werden. Bereits innerhalb der vergangenen Jahre war festzustellen, dass die Produktion immer stärker auf den Kunden ausgerichtet wurde und vorwiegend angepasste Produkte hergestellt werden (REINHART & ZÄH 2003). Teile der Ernährungsindustrie sowie der Großproduktion, des Handwerks oder der Gastronomie haben den Kunden wieder in den Mittelpunkt gestellt. Dennoch ist die tatsächliche Einzelfertigung eines Produktes oder kleinere Lose in der industriellen Produktion von Lebensmitteln selten. Meist finden sich nur Nischenprodukte (z. B. Müsli, Schokolade, Getränke), bei welchen der Kunde direkten Einfluss auf die Zusammensetzung oder auf das Erscheinungsbild des Endproduktes (individuelle Verpackung bzw. individuelles Etikett) nehmen kann (JÄGER 2004). Alternativ dazu lässt sich bspw. das Luftfahrtcatering anführen. Hier existieren Kategorien, nach welchen die Bordmahlzeit individualisiert werden kann (JONES 2004). Zu diesen zählen bspw. halal, hindu oder koscher nach religiösem Individualisierungswunsch oder vegan, vegetarisch oder laktosefrei für Wünsche bei Unverträglichkeiten oder anderen Gewohnheiten. Die Fluggesellschaften haben in den letzten Jahren einen starken Wandel in ihren Konzepten der Gemeinschaftsverpflegung vollzogen (JONES 2004). Dennoch ist auch hier der Eingriff in die Rezepturen der Menüs, speziell in der warmen Zubereitung (JONES 2004), nicht möglich, da jeweils nur eine einheitliche Rezeptur verwendet wird. Zumeist ist dies auch nicht erwünscht oder führt dazu, bspw. bei den Luftfahrtcaterern, dass die Herstellung von Spezialmenüs aus den bereits erwähnten Menükategorien an zusätzliche Zulieferer ausgelagert wird (JONES 2004).

Speziell die Einzelfertigung von Mahlzeiten ist im industriellen Bereich nicht oder extrem selten zu finden. Bei der Betrachtung abseits von der industriell umgesetzten, kundenindividuellen Massenfertigung (engl. Mass Customization, MC) ist eine tatsächliche Verarbeitung in Losgröße 1 in den Bereich der Gastronomie (sowohl Einzel- als auch Gemeinschaftsverpflegung) zu finden. Auch hier sind Ansätze der Massenfertigung festzustellen. Die Verpflegung großer Personengruppen bedingt eine Optimierung der Abläufe. Dies führt unmittelbar zu den Methoden einer Massenproduktion (dem „Mass“) zurück. Eine Individualisierung ist häufig in der Anpassung von Bestellungen an medizinische Anforderungen der Kunden begründet. Allergien oder Unverträglichkeiten zwingen die Kunden zur Äußerung von individuellen Wünschen (dem „Customization“). Diese Hard Customization, auch geschlossene Customization (PILLER 2006) genannte Form der Äußerung der Anforderung an die unmittelbar fertigende Instanz, bedeutet mit den heutigen Mitteln einen höheren Aufwand für die Verarbeiter. Daraus lässt sich als direkte Konsequenz ein höherer Preis ableiten. Die Herausforderungen sind dabei vielschichtig. Beispielsweise werden aufgrund der hohen Zahl an Betroffenen von Nahrungsmittelunverträglichkeiten (bis zu 25 % der Erwachsenen

(SPIEGEL-ONLINE 2014)) die Anpassungen von Bestellungen an kundenspezifischen Bedürfnisse notwendig. Heute ist bereits die Subjektivität in diesem Umfeld als der Treiber für Individualisierung auszumachen. Zusätzlich ist heute eine echte Auftragsfertigung im handwerklichen (Gastwirtschaft, Restaurant) oder privaten Bereich zu finden. Dort kann der Kunde direkt in die Produktion mit seinen Wünschen eingreifen und bspw. den Zustand des gebratenen Fleisches (durchgebraten, medium oder englisch) oder die Komposition weiterer Zutaten seines Gerichtes modular zusammensetzen. Auch in den Bereichen der Gemeinschaftsverpflegung (in Kantinen, Großküchen) sind heute vergleichbare kundenspezifische Produkthanpassungen möglich (MAYER 2012). Jedoch werden diese individuellen Anpassungen lediglich durch einen hohen Einsatz von Personal in manueller Verarbeitung hergestellt. Dies ist nicht nur kostenintensiv, wenn in Betracht gezogen wird, dass ca. 60 % der Betriebskosten in einer Klinikküche durch das Personal entstehen (LIEB 1996), sondern auch der manuelle Eingriff als solches stellt im Sinne der Hygiene und Verwertung ein Risiko dar.

1.1.4 Wegwerfraten

Bei der Betrachtung der Verwertung der Ausgangsmaterialien und des Aufkommens von Abfällen und Ausschuss in der Ernährungsindustrie, speziell im Bereich der (System-) Gastronomie, ist festzustellen, dass für den Bereich der Gemeinschaftsverpflegung (bspw. in Betriebsrestaurants) enorm hohe Menge an Abfällen (Wegwerfmengen) von 147.492 t bis zu 402.250 t pro Jahr (KRANERT ET AL. 2012) nachgewiesen werden können. Herauszustellen ist, dass bei der Herstellung, der Verarbeitung und beim Kunden nahezu zwei Drittel der Abfälle entstehen. Dieser Bereich ist in der Abbildung 1.4 mit dem Hinweis darauf, dass es sich hierbei um Planungs- und/oder Verarbeitungsfehler handelt, speziell ausgewiesen. Etwa 50 % dieser Abfälle wiederum entstehen in Bereichen, welche direkt durch die Verarbeitung oder die Organisation der Verarbeitungsprozesse beeinflusst werden können. 17 % dieser Verschwendungen entstehen durch zu große Portionen, welche vom Kunden zurückgegeben werden. Zudem entstehen 18 % des Ausschusses durch den unsachgemäßen Umgang mit den Produkten. Um diese Raten (vgl. Abbildung 1.4) zu senken, bedarf es in Zukunft eines noch stärkeren Bewusstseins hinsichtlich einer Ressourcenschonung bei den Produzenten. Zudem ist eine Unterstützung der Produzenten durch moderne Verarbeitungsweisen und Verarbeitungstechnik ratsam.

1.1.5 Individualisierung und Ressourcenschonung durch Automatisierung

Die Aussagen zur Automatisierung im Bereich der Lebensmittelverarbeitung gehen, abhängig vom Betrachtungsbereich innerhalb der Wertschöpfungskette sowie vom betrachteten

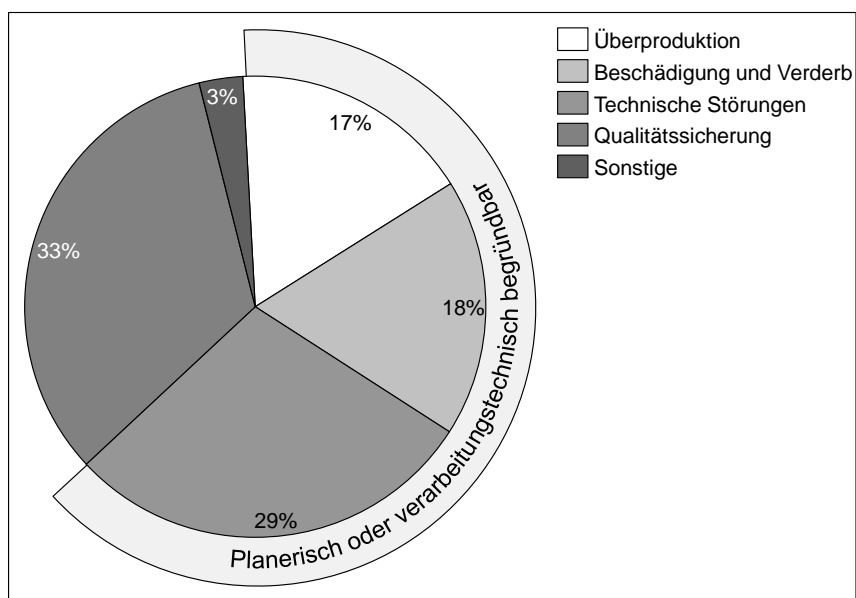


Abbildung 1.4: Gründe für die Entstehung von Lebensmittelabfälle (KRANERT ET AL. 2012)

Produkt, weit auseinander. In einer Studie der Ishida GmbH zusammen mit der Universität Lincoln wird aufgezeigt, dass vor allem in der Primärverpackung und bei der Warenkennzeichnung Automatisierungstechnik eingesetzt wird (ISHIDA & UNIVERSITY OF LINCOLN 2007) gefolgt von der Primärverarbeitung, also der unmittelbaren Lebensmittelverarbeitung. Es wird deutlich, dass es sich in den meisten Fällen um Einzelmaschinen handelt, welche sehr spezifische Arbeiten wie Garen, Frittieren oder ähnliche handwerkliche Schritte unterstützen sollen. Die befragten Unternehmen aus Deutschland, England und Frankreich weisen hierbei häufig Mischkonfigurationen auf. Weitgehend integrierte Systeme werden nur wenig eingesetzt (WERNER 2008). Zuzufolge der Studie kommt Deutschland seiner Rolle als Technologieführer auch in diesem Bereich nach und schafft im Vergleich den höchsten Automatisierungsgrad (WERNER 2008). Es wurde zudem festgestellt, dass Hersteller von Produkten mit kurzer Haltbarkeit deutlich weniger automatisiert arbeiten als Unternehmen, deren Produkte eine hohe Haltbarkeit aufweisen (ISHIDA & UNIVERSITY OF LINCOLN 2007). Dieses Indiz ist als Untermauerung der Tatsache zu verstehen, dass bspw. in der Gastronomie trotz eines erhöhten Drucks des Marktes nach wie vor wenig Automatisierungstechnik Einzug gehalten hat. Die Autoren der Studie weisen jedoch darauf hin, dass es zusätzliche, besondere Hemmnisse in der Branche gibt, welche die stärkere Verbreitung von Automation behindern. Insbesondere sind dabei die Investitionskosten zu nennen. In der preislich sensible Branche mit geringen Ausgaben für Entwicklung und Modernisierung (vgl. Abbildung 1.5) wird zusätzlich mit der fehlenden Flexibilität der Anlagen und der damit eingeschränkten Wandlungsfähigkeit, hinsichtlich häufiger Produktwechsel NYHUIS ET AL.

(2008), argumentiert. Die Abbildung zeigt auf, dass 2011 lediglich 30 Mio. € an Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen in der kompletten Ernährungswirtschaft investiert wurden. Verglichen mit Branchen mit ähnlich großen Umsatz, wie der chemischen Industrie (ca. 450 Mio. €) oder der Branche zur Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten (DV-Geräte) (ca. 1.050 Mio. €), ist von einem sehr geringen Investitionsaufkommen zu sprechen.

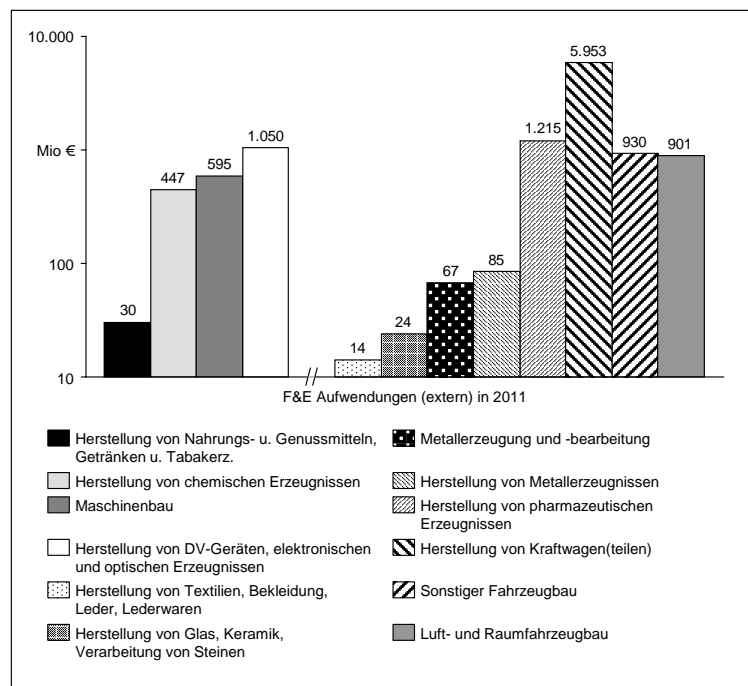


Abbildung 1.5: Forschungs- und Entwicklungsausgaben in der Lebensmittelindustrie im Vergleich zu anderen Industriezweigen (KLADROBA 2013, KLADROBA & STENKE 2012)

1.2 Aufgabenstellung

Die Prozesskette in der Gemeinschaftsverpflegung (vgl. Abbildung 1.6) wird, wie bereits beschrieben, lediglich durch einzelne automatisierte Verarbeitungsanlagen unterstützt. Es kann hierbei nicht von einer Automatisierung der Prozesskette ausgegangen werden. Speziell im Bereich der Produktion stellt sich die Automatisierung als nicht trivial heraus. Die detaillierten Produktionsprozessschritte in Abbildung 1.6 lassen vermuten, dass im Ablauf besonders auf Puffer zwischen den einzelnen Produktionsschritten zu achten ist. Die hier entstehenden Puffer beeinträchtigen die Qualität des verarbeiteten Produktes im ungünstigen Fall negativ. Unnötige Liegezeiten oder eine ungeschickte Prozessführung im tatsächlichen Zubereitungsschritt in einem automatisierten Umfeld begründen letztlich eine Erhöhung der Wegwerfraten als eine Verbesserung der Qualität des Outputs bei

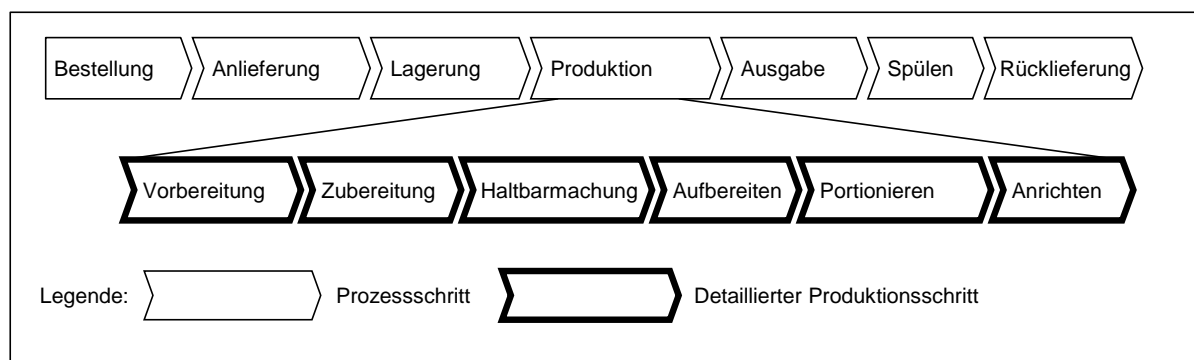


Abbildung 1.6: Prozesskette in der Gemeinschaftsverpflegung (HAMPICH 2006) mit Fokus auf Produktionsschritte (SCHWARZ ET AL. 2010)

gleichzeitig schonenderem Umgang mit Ressourcen wie Material, Energie und Personal. Die Schwierigkeit bei der Automatisierung dieser Prozesskette ist jedoch auch an anderer Stelle zu suchen. Das Wissen und handwerkliche Geschick eines Kochs¹ in Bezug auf das Bestücken der Zubereitungsgeräte mit den hoch inhomogenen Ausgangsprodukten ist derzeit nicht in Anlagen implementiert. Die Anlagentechnik unterstützt lediglich die Ausführung. Bei einer vollständig automatisierte Herstellung von Mahlzeiten für die Gemeinschaftsverpflegung wäre es erforderlich, dieses handwerkliche Wissen abzubilden und die Handlungsweisen eines Kochs nachzuempfinden. In erster Linie spielt hier eine intelligente Maschinenbelegungsplanung für die Kochgeräten eine Rolle. Diese muss in der Lage sein, im Sinne der Individualisierung der Mahlzeiten gänzlich unterschiedliche Auftragskompositionen aus Lebensmitteln unterschiedlichster Art und physiologischer Beschaffenheit an den Zubereitungsanlagen einzuplanen. Dabei ist insbesondere die Prozessführung für die Parallelverarbeitung unterschiedlicher Produkte in einer Prozesskammer von besonderem Interesse.

Die größte Herausforderung, sowohl für die industriellen Massenfertigung als auch die Gastronomie, stellt die Verarbeitungsqualität bei der Lebensmittelverarbeitung dar. Im Speziellen in Hinblick auf ihre zeitliche Veränderlichkeit, der sogenannten Transienz. Bei einem stark inhomogenen Naturprodukt, wie einem Lebensmittel, sind die Experten dazu gezwungen, nicht nur die Prozesse sehr gut konfigurieren zu können, sondern gleichzeitig das Produkt besser zu verstehen. Die entscheidende Frage ist dennoch die nach der zeitlichen Abhängigkeit der Qualität und nach dem Qualitätsanspruch in der Verarbeitung. Produktionsprozesse sind heute auf die Verbesserung der Prozesse und Abläufe

¹Gender Hinweis: Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Dissertationsschrift die Sprachform des generischen Maskulinums angewendet. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die ausschließliche Verwendung der männlichen Form geschlechtsunabhängig verstanden werden soll.

ausgerichtet. Die Qualität in den Fokus zu rücken und aus Sicht der Produktionsplanung als Zielgröße anzusehen, ist hierbei nicht der Standard. Es ist nachzuvollziehen, dass ein Unternehmen bestrebt ist, hohe Produkt- und Produktionsqualitäten zu erreichen. Dies wird jedoch vielmals dadurch gewährleistet, dass bereits in der Entwicklungsphase eines Produktes durch sehr enge Toleranzfelder dafür gesorgt wird, dass es als hoch präzise und somit als qualitativ hochwertig angenommen wird. Immer besser werdende Entwicklungswerkzeuge unterstützen Mitarbeiter dabei, eine immer höhere Produktqualität auch bei höherer Produktvarianz und immer kleineren Losen zu gewährleisten. Aus den angeführten gesellschaftlichen Randbedingungen sowie den aufgeführten Rahmenbedingungen und Herausforderungen im Umgang mit Lebensmitteln in der Verarbeitung lässt sich ein Handlungsbedarf für die Produktionstechnik ableiten. Dazu gehört zum einen, mit Hilfe des Technologietreibers *Automation* auch auf die Bereiche der Life-Sciences einzuwirken, um dadurch eine Arbeitsunterstützung, eine Reduzierung von Ausschuss sowie eine Steigerung der Produktgüte zu erzielen. Zum anderen ist die Fokussierung auf die zeitliche Abhängigkeit der Produktionsergebnisse und deren Planung zur Erfüllung eines Kundeninteresses von zentraler Bedeutung.

1.3 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Vorgehens zur Integration der Maschinenbelegungsvorgehens für den Einsatz in der automatisierten Lebensmittelverarbeitung. Dieses soll insbesondere durch die Berücksichtigung der Zeitveränderlichkeit der zu planenden Produkte eine Qualitätsorientierung aufweisen. Zur Spezifizierung des Einsatzgebietes wird die Einschränkung auf den Bereich der (System-)Gastronomie gewählt. Wie dargelegt, stellt in diesem Umfeld die Integration der Ansätze der Automatisierungstechnik und Produktionstechnik einen Paradigmenwechsel dar. Die Rückkopplung des Kunden zum Verarbeiter ist in Bezug auf die Betrachtung von Qualitätsaspekten hier als am unmittelbar anzunehmen. Damit ist eine Fokussierung auf den Qualitätsanspruch des Kunden in diesem Umfeld besonders relevant. Als Nebenziel wird formuliert, dass individuelle Kundenwünsche zur Anpassung des Planungsprozesses führen sollen. Die Methoden der Produktionsplanung sind auf ihre Eignung der Abbildung einer Transienz von Produktverhalten zu untersuchen und gegebenenfalls anzupassen. Diese Methoden müssen derart gestaltet sein, dass explizit der durch die Zeitabhängigkeit repräsentierte Faktor der Produktqualität als Zielkriterium verfolgt werden kann. Die Fokussierung auf das Kundeninteresse, weg vom Interesse am standardisierten guten Produktionsergebnis, ist darzulegen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel (vgl. Abbildung 1.7).

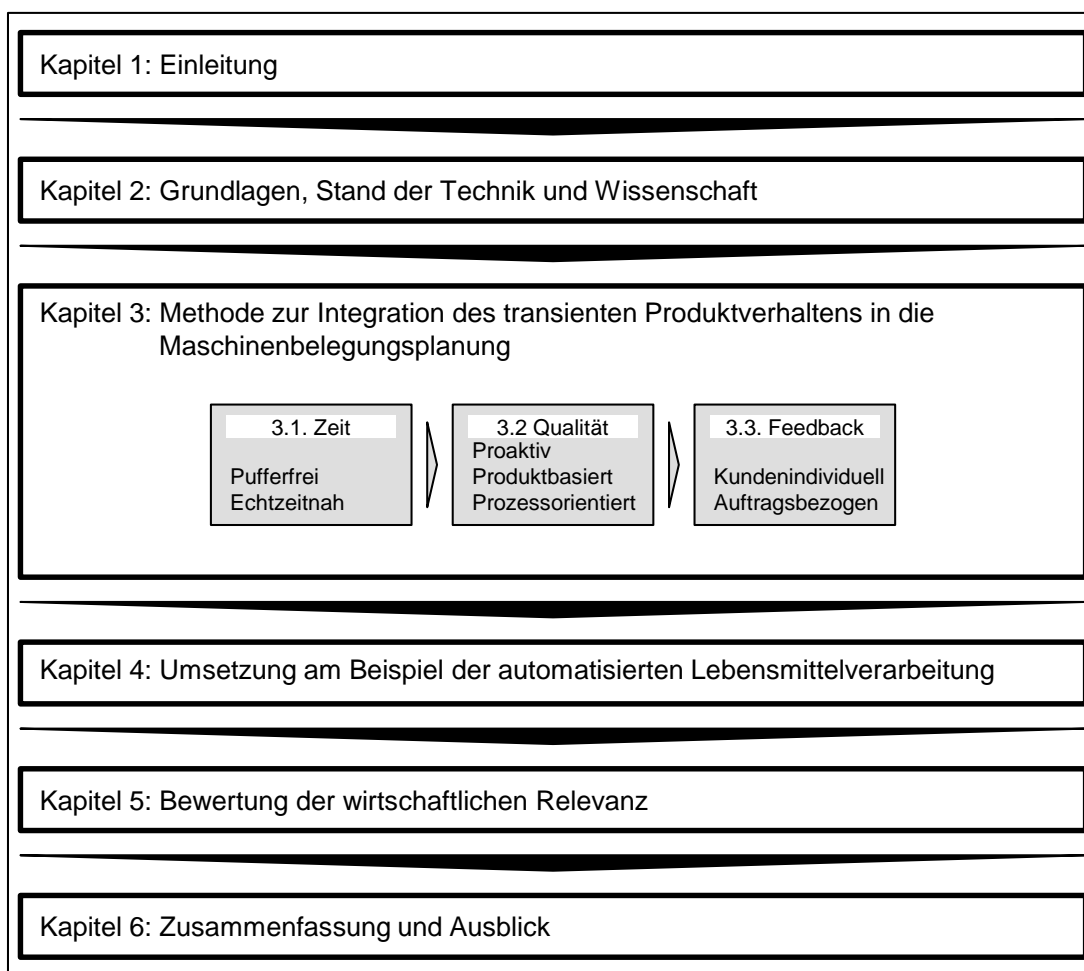


Abbildung 1.7: Aufbau der Arbeit

Nachdem im Kapitel 1 der grundlegende Überblick über das Umfeld der vorliegenden Arbeit gegeben und aufbauend auf der Problemstellung die Zielstellung abgeleitet wurde, wird im Kapitel 2 der relevante Stand der Technik und Wissenschaft aufgezeigt. Die Diskussion des Qualitätsbegriffes bildet dabei die Grundlage, bevor einzelne Konzepte des Qualitätsmanagements vorgestellt und bezüglich ihrer Anwendbarkeit beurteilt werden. Anschließend folgen die Ausführungen zu den Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. Hier wird im Speziellen die Maschinenbelegungsplanung in das Umfeld der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) eingeordnet und deren Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt. Die Diskussion der Nutzungsmöglichkeiten von Feedback in Bezug auf die Individualisierung von Produkten erweitert die Ausführungen zum Stand der Technik. Das Kapitel schließt mit einer Bewertung und der Ableitung von Handlungsfeldern für die

Ausrichtung der Zielstellung.

Auf Basis dieser Einflüsse werden in Kapitel 3 die Schritte detailliert dargestellt, welche notwendig sind, um das transiente Produktverhalten als Zielgröße in der Maschinenbelegungsplanung zu nutzen, um eine Steigerung und Planung der Produktqualität zu erreichen. Dafür wird ein qualitätsorientiertes Produktmodell eingeführt, welches für die Planung der Maschinenbelegung herangezogen wird. Die Ausrichtung auf die Produktqualität ist durch das zeitabhängige Produktverhalten repräsentiert. Beim Modell handelt es sich um die Abbildung der physikalischen Vorgänge innerhalb eines Produktes. Die zeitliche Veränderung tritt dabei speziell durch das Einwirken eines Verarbeitungsprozesses, meist thermodynamischer Natur, ein. Zudem wird ein Feedbacksystem aufgebaut, welches die Anpassung des Qualitätsziels ermöglicht. Die Erläuterungen, nach welchem Vorgehen diese Erkenntnisse in die Maschinenbelegungsplanung einfließen können, um die Verbesserung der Produktqualität bereits in der Auftragsreihenfolgebildung mit zu berücksichtigen, werden im Kapitel 4 in Form eines Anwendungsfalls beschrieben.

Anhand von Simulationen werden die Veränderungen in der Maschinenbelegung unter Einfluss des eingeführten Qualitätskriteriums aufgezeigt und die Wirkungsweise erläutert. Die Ergebnisse des erarbeiteten Algorithmus', im Vergleich zu herkömmlichen Algorithmen zur Lösung des Maschinenbelegungsproblems unter Berücksichtigung der geforderten Randbedingungen, werden ebenfalls in Kapitel 4 diskutiert.

Der Autor beschäftigt sich in Kapitel 5 mit der Bewertung der wirtschaftlichen Relevanz des Vorgehens anhand eines Anwendungsbeispiels. Das Kapitel zeigt auf, dass mit Hilfe der Methode neue Möglichkeiten für die lebensmittelverarbeitende Industrie eröffnet werden. Dazu wird eine bestehende manuelle Mahlzeitenproduktion im Vergleich zu einer vollständig automatisierten, anlagentechnischen Realisierung der Mahlzeitenproduktion betrachtet.

Zum Abschluss der Arbeit werden die Ergebnisse in Kapitel 6 zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Entwicklungsmöglichkeiten wird gegeben.

2 Grundlagen, Stand der Technik und Wissenschaft

2.1 Allgemeines

Das Konzept der Mass Customization (MC) setzt sich mit der Realisierung differenzierter Kundenwünsche auseinander. Das heutige Marktumfeld bewegt produzierende Unternehmen dazu, mehr auf die differenzierten Wünsche der Kunden einzugehen (PILLER 2006). Dabei deutet PINE (1999) darauf hin, dass mit stärkeren Marktturbulenzen die Unternehmen stärker in die individuelle Massenfertigung gedrängt werden, um konkurrenzfähig zu bleiben. LINDEMANN ET AL. (2006) zeigen auf, dass der Anteil der durch Kunden-sonderwünsche angepassten Produkte in Zukunft noch ansteigen wird. Daraus resultiert nach LINDEMANN ET AL. (2006), dass Unternehmen, welche individuelle Produkte zu angemessenen Preisen anbieten können, sich einen Wettbewerbsvorteil erarbeiten werden. Die Übersetzung „kundenindividuelle Massenfertigung“ beschreibt bereits die Herkunft dieser Betrachtung. Anders als die Auftragsfertigung strebt MC danach, eine kundenindividuelle Fertigung kostenbewusst unter Anwendung der Möglichkeiten einer Massenfertigung umzusetzen. Das Konzept beschäftigt sich somit im Wesentlichen damit, die Vorteile einer standardisierten mit einer individualisierten Fertigung (PILLER 2006, REINHART & ZÄH 2003) zu verbinden. Dabei ist vor allem hervorzuheben, dass der Kunde kein neues Produkt entwickelt, sondern auf Basis bekannter Produktmodule seinen individuellen Wünschen entsprechend ein neuartiges Ziel spezifiziert. PILLER (2006) weist darauf hin, dass zur Befriedigung der Kundenwünsche relevante Produktkomponenten während des Entwicklungsprozesses entsprechend individualisiert werden. Im klassischen Produktionsumfeld wird dazu von den Sonderwünschen des Kunden ausgegangen und ein Produkt mit bestimmten gewünschten Eigenschaften entwickelt (PILLER 2006). Daraus kann eine Losgröße von 1 erzeugt werden, welche jedoch ebenfalls in eine Kleinserien- oder Serienproduktion überführt werden kann (PILLER 2006). Die Hauptaktivitäten zur Umsetzung der MC lassen sich grundsätzlich in Aktivitäten mit und ohne konkreten Kundenbezug unterteilen (siehe Abbildung 2.1). Demnach benötigt MC einige unterstützende Bereiche in einem Unternehmen, um umgesetzt zu werden. Weiterhin ist zu unterscheiden, ob eine allgemeine oder eine kundenindividuelle Fertigung durch MC realisiert werden soll. Für die hier betrachtete Kundenindividualisierung ist es erforderlich, in erster Linie die Wünsche und Bedürfnisse des Kunden zu erfassen (FEIGENBAUM 1951, JÄGER 2004, PILLER 2006). Diese Aufteilung in einen standardisierten und einen individuellen Teil sieht PILLER (2006)

als ein wesentliches Kennzeichen der Wertschöpfungskette von MC. Eine zweidimensionale Systematik soll die heute existierenden Konzepte zur Realisierung der MC kurz erläutern.

Unterstützende Aktivitäten	Unternehmensinfrastruktur (Planung, etc.)					
	Personalplanungen					
	Forschung und Entwicklung (Prozessentwicklung, Entwurf der Module, Grundproduktion, Variantenbildung)					
	Informations- und Kommunikationstechnik					
Kunden-individuell	Erhebung des Kundenwunsches/ Konfiguration	Kundenindividuelle Vorbereitung	Eingehende Logistik (individuelle Beschaffung)	Individuelle Verarbeitung	Ausgehende Logistik (individuelle Distribution)	Service, Kundendienst, Nutzung von Kundeninformationen zum Lernen
Allgemein	Klassisches Marketing	Eingehende Logistik	Auftragsneutrale Vorbereitung von Modulen			

Abbildung 2.1: Systematik der MC im Sinne des Kundennutzens (PILLER 2006)

Einerseits wird von Variabilität der Wertschöpfungsaktivitäten gesprochen. Diese spannt sich zwischen Soft und Hard Customization auf (COATES 1995). Soft Customization (offene Individualisierung) wird als die Herstellung weniger Varianten in großen Stückzahlen verstanden, bei welcher die Möglichkeit zur Produktindividualisierung durch den Kunden oder den Handel immanent ist. Diese Form der Individualisierung beruht lediglich auf Aktivitäten im Bereich der Forschung und Entwicklung, Konstruktion oder dem Vertrieb. Eine weiterführende Interaktion zwischen Hersteller und Kunden ist dabei nicht notwendig, womit der Ansatz einer langfristigen Kundenbeziehung bei der offenen Individualisierung entfällt (PILLER 2006). Diese Betrachtung ist für die Produktionstechnik sehr relevant. Mit Blick auf das Verarbeiten von Lebensmitteln erscheint es schwierig, die Adaption zu finden. Einfacher erscheint die Zuordnung in der Hard Customization (geschlossenen Individualisierung). Diese setzt im Gegensatz zur Soft Customization eine Interaktion zwischen Hersteller und Kunden spätestens vor Beginn der Fertigung voraus (PILLER 2006). Durch einen direkten Zusammenhang jedes gefertigten Produktes mit einem bestimmten Kundenauftrag schlussfolgert PILLER (2006) mehr Möglichkeiten der Produktindividualisierung durch gezielte Variation der Leistung. Andererseits erstreckt sich die zweite Dimension der Systematisierung bestehender Konzepte über die Wertschöpfungsstufe, auf der die Produktindividualisierung vorgenommen wird. Dabei ist sowohl der Zeitpunkt der Individualisierung in der Wertschöpfungskette, als auch ihr Umfang entscheidend (PILLER 2006). Die Abbildung der vorgestellten Systematisierung nach Piller spannt die sechs Konzeptionen zur Realisierung der MC auf. Die Darstellung wurde auf das Umfeld der Lebensmittelbranche angepasst. Zusammenfassend kann man mit Blick auf die Lebensmittelbranche sagen, dass MC auf den ersten Blick utopisch erscheint. Dennoch ist die Herangehensweise direkt auf dieses Umfeld übertragbar und geradezu offensichtlich. Die Individualität ist bei

Lebensmittelkonsum hauptsächlich durch die Subjektivität von Geschmack geprägt. Die kundenindividuellen Produkte bedürfen demzufolge keiner unterschiedlichen Fertigungsverfahren, sondern werden über angepasste Rezepturwünsche individualisiert. Die industrielle Massenproduktion von Lebensmitteln erlaubt diesen Eingriff jedoch kaum.

Nach dem Gesetz der industriellen Massenproduktion von K. W. Bücher aus dem Jahre 1910 heißt es:

„Wenn fixe Kosten vorhanden sind, sinken die Stückkosten bei zunehmendem Ausstoß (auch: Output) und zwar umso stärker, je höher der Anteil der fixen Kosten an den Gesamtkosten ist.“ (BÜCHER 1910)

Dies bedeutet im übertragenen Sinn, dass zur Senkung der Kosten und zur gleichzeitigen Steigerung des Gewinns für ein Unternehmen große Mengen zu produzieren sind. Das haben die Vertreter der Ernährungsindustrie genauso für sich erkannt wie bspw. die Hersteller in der Automobilbranche.

Bedingt durch prozessuale Voraussetzungen ist dennoch ein großer Anteil der industriellen Lebensmittelproduktion als Chargenfertigung (diskontinuierliche Fertigung in Behältern) gestaltet. Die Chargenfertigung (vgl. Abschnitt 2.2.2.2) ist dabei mehr als eine Sonderform der Serienfertigung denn als eine Einzelfertigung zu verstehen. Im Ergebnis werden wegen der Chargenbildung meist größere Produktionsmengen hergestellt. Dies bedeutet, dass gleiche Erzeugnisse in großem Umfang über einen längeren Zeitraum hergestellt werden können.

Die gleichen Erzeugnisse sind dabei Ergebnis eines gleichbleibenden Produktionsprozesses. JÄGER (2004) beschreibt die Situation in der Betrachtung des Kunden als sogenanntes made-to-stock-System. Dies bedeutet, dass keine Interaktion mit dem Kunden (Endverbraucher) stattfindet. Der Kunde kann erst im Verkaufsraum entscheiden, ob das Lebensmittelprodukt den Nutzen der Bedürfnisbefriedigung für ihn erfüllt oder nicht (vgl. Soft Customization). Die Großunternehmen der Lebensmittelbranche sind darauf angewiesen, über die Steigerung der Produktivität ihrer Produktionsanlagen einen immer größeren Output zu gewährleisten. Hinzu kommt, dass die notwendigen Absatzmärkte vorhanden sind, um eine Vielzahl eines auch variantenreichen Angebotes zu verkaufen. Der Absatzmarkt bedingt, teilweise nicht nur durch seine schiere Größe, sondern auch durch seine gesellschaftlichen Rahmenbedingungen, das Voranschreiten einer Massenproduktion (DAPD 2012).

Um auf die in der Einleitung (Kapitel 1) beschriebenen Änderungen in der Gesellschaft und die damit einhergehende Stellenwertänderung eines Lebensmittelproduktes zu reagieren, positioniert sich die Ernährungsindustrie mit Varianten- und Sortenausweitungen neu.

Die Produktionslose werden kleiner. Der Kunde reagiert jedoch mit einer „verringerten Wahrnehmung der Verschiedenartigkeit der Leistungsangebote“ (JÄGER 2004), was zu einem begrenzten Erfolg bei neu eingeführten Produkten führt. Im Unterschied dazu ist der Bereich der Gastronomie wenig mit den Möglichkeiten der industriellen Verarbeitung von Lebensmitteln ausgestattet.

2.2 Maschinenbelegungsplanung in der Produktionsplanung und -steuerung

Nach SCHUH & GIERTH (2006) stellt die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) heute häufig den Kern eines Industrieunternehmens dar. Sie trägt maßgeblich zur Bewältigung der Auftragsabwicklung im Produktionsumfeld bei (WIENDAHL 2010).

Die wichtigste Aufgabe der PPS ist es, das aktuelle Produktionsprogramm in Art und Menge sowie unter Berücksichtigung von Terminen und Kapazitäten für zukünftige Perioden zu planen (EVERSHEIM 1996). Unter Berücksichtigung möglicher Störungen¹ ist dieses Produktionsprogramm zudem gut und planungsnah zu realisieren (WIENDAHL 1997). Dies macht auch die systematisierte Gliederung in Abbildung 2.2 deutlich. Die Produktionsprogrammplanung entspricht der Aktivität mit dem größten zeitlichen Horizont, in der strategische Produkte bereits vorausgeplant werden. Eine Ausdetaillieren davon erfolgt in der Produktionsbedarfsplanung. Mit der eher kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung, welche den unmittelbaren Planungsschritt vor der Auftragsfreigabe darstellt, sind die Aufgaben der Produktionsplanung vollständig.

Demgegenüber stehen die fertigungsnahen Aufgaben der Produktionssteuerung, welche das Ziel verfolgt, die Vorgaben der Produktionsplanung umzusetzen (LÖDDING & WIENDAHL 2005). Dazu zählen die Auftragsfreigabe sowie die spätere Auftragsüberwachung. Als Querschnittsfunktion kann die Datenverwaltung genannt werden.

Die PPS als übergreifendes Konzept der Material- und Zeitwirtschaft hat sich im Laufe der Jahre immer weiter verändert und den Bedingungen des Marktes angepasst. So wurde anfänglich nur die Produktion mit ihren direkt und indirekt beteiligten Bereichen (Konstruktion bis Fertigung) betrachtet. Dies wandelte sich danach von der Betrachtung der kompletten technischen Auftragsabwicklung (von Angebotseinholung bis zum Versand) hin zur Einbeziehung der kompletten Lieferkette. Die Kernaufgaben, wie die Planung von

¹nach KLETTI & SCHUMACHER (2011) eine Abweichungen vom geplanten Verlauf

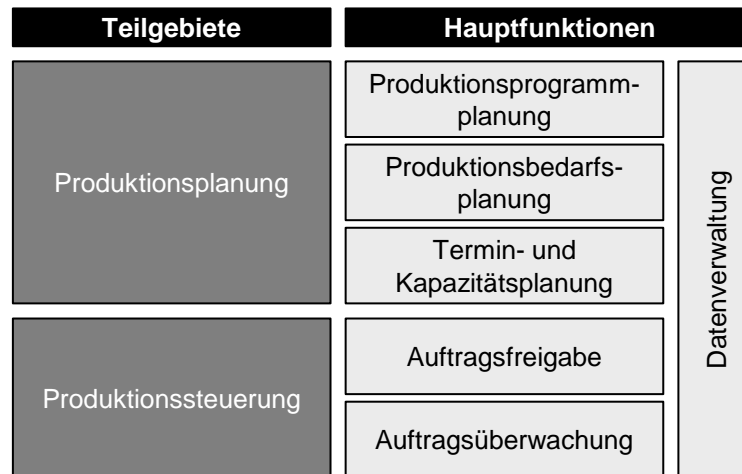


Abbildung 2.2: Gliederung und Funktionen der PPS

Ressourcen und Produktionsprozessen, blieben jedoch immer gleich (SCHUH 2006).

2.2.1 Ziele der Produktionsplanung und -steuerung

Die PPS hat im Allgemeinen vier Kernziele zu erreichen und in ein richtiges Verhältnis zu bringen. Zu den wichtigsten Zielen gehören laut SCHUH & STICH (2012) und WIENDAHL (1997):

- hohe Termintreue,
- hohe und gleichmäßige Kapazitätsauslastung,
- kurze Durchlaufzeiten sowie
- geringe Lager- und Werkstattbestände.

Diese Ziele dienen dazu, die für den Kunden (interne und externe Kundenbeziehung) wichtigen logistischen Zielsetzungen (Liefertreue, Bestände, Durchlaufzeit) unter Beachtung einer wirtschaftlichen Fertigung zu erreichen (WIENDAHL 1997). Um diesen Zielen nachzukommen, haben sich in der Vergangenheit in verschiedenen Ebenen Planungsmethoden ausgebildet. Da im Sinne dieser Arbeit vor allem die Lösung des Maschinenbelegungsproblems auf der sogenannten Feinplanungsebene innerhalb der Termin- und Kapazitätsplanung von Belang ist, soll hierauf näher eingegangen werden.

2.2.2 Maschinenbelegung in der Produktionsplanung

Die Maschinenbelegungsplanung wird im Englischen auch als *Scheduling* bezeichnet und beschäftigt sich mit der Einplanung von Aufträgen oder Jobs j auf einem gewissen Maschinen-/Anlagenpark r . Die Maschinenbelegung ist Teil der Termin- und Kapazitätsplanung

innerhalb der Produktionsplanung. Sie hat das Ziel, eine oder mehrere Zielfunktionen zu optimieren, während vorgegebene Restriktionen eingehalten werden. Optimal sind solche Parameter, die eine gegebene Funktion minimieren oder maximieren, während sie gegebene Nebenbedingungen erfüllen. Wegen $\max(f(x)) = \min(-f(x))$ kann sich hier lediglich auf die Suche von Minima beschränkt werden (NEUMANN & MORLOCK 2002). Als Nebenbedingung wird häufig festgelegt, dass jede Maschine zu jedem Zeitpunkt höchstens einen Job bearbeiten kann und umgekehrt jeder Job gleichzeitig nur von einer Maschine bearbeitet werden kann.

Grundlegend sind $j = 1, \dots, J$ Jobs auf $r = 1, \dots, R$ Ressourcen bzw. Maschinen zu bearbeiten. Die Bildung der Jobs wird häufig mithilfe der sog. Losgrößenplanung realisiert, bei der in einer früheren Phase der PPS auf Basis von gegebenen Nachfragemengen für Endprodukte, die in verschiedenen Perioden herzustellenden Mengen für Vor- und Zwischenprodukte ermittelt werden. Für die ermittelte Zusammenstellung von Mengen werden folglich entsprechende Jobs gebildet (GÜNTHER & TEMPELMEIER 2000). Jedem Job werden ein Freigabe- oder Bereitstellungszeitpunkt f_j sowie eine Bearbeitungsdauer d_{jr} auf der Maschine r und u. U. ein Fälligkeitstermin dd_j (engl. Due Date) zugeordnet. Teilweise können Gewichtungsfaktoren w_j , mit denen die Dringlichkeit eines Jobs ausgedrückt werden kann, vergeben werden (WITT 2004). Für die Belegungsplanung ist zudem die folgende Annahme hilfreich: Ein Job j wird in einzelne Arbeitsgänge A_{j1}, \dots, A_{jn} unterteilt, die in einer fest vorgegebenen Reihenfolge durchzuführen sind. Als *zulässiger Ablaufplan* wird die Reihenfolge an Arbeitsgängen auf den Maschinen bezeichnet, die alle relevanten Restriktionen berücksichtigt. Einen Spezialfall stellt dabei der sog. *Permutationsplan* dar. Bei ihm ist die Jobreihenfolge für alle Maschinen identisch.

Ablaufpläne werden üblicherweise in sogenannten Gantt-Diagrammen abgebildet. Das Gantt-Diagramm stellt den Ablaufplan als Balkendiagramm dar (GANTT 1903, WILSON 2003). Die Arbeitsgänge werden dabei über einer Zeitlinie als horizontale Balken oder Linien gezeichnet. Die Länge eines Balkens entspricht der zeitlichen Dauer eines Arbeitsgangs. Gantt-Diagramme stellen somit vor allem die terminliche Lage der Arbeitsgänge anschaulich dar. Logische Abhängigkeiten zwischen den Arbeitsgängen werden i. d. R. nicht abgebildet. Jedoch können implizit Informationen über die Bearbeitungsreihenfolge und terminliche Restriktionen abgelesen werden.

Weiterhin hat sich für die Notation von Maschinenbelegungsproblemen ein Klassifizierungsschema etabliert (vgl. hierzu GRAHAM ET AL. (1979)). Das Schema $[\alpha_{Cha}|\beta_{Cha}|\gamma_{Cha}]$ unterscheidet Probleme hinsichtlich ihrer Maschinencharakteristik α_{Cha} , der Jobcharakteristik β_{Cha} sowie der vorgegebenen Zielsetzung γ_{Cha} . Eine grobe Darstellung dieser Klassifizierungsschemata kann bei WITT (2004) gefunden werden. Ausführliche Beschrei-

bungen dieser Notation sind bei DOMSCHKE ET AL. (1997) zu finden und sollen hier nicht weiter ausgeführt werden.

2.2.2.1 Berücksichtigung beschränkter Zwischenlagerkapazitäten

Zum zeitlichen Ausgleich von asynchronen Materialströmen werden bei der Ablaufplanung typischerweise Zwischenlager (auch Puffer) eingerichtet. Asynchrone Zu- und Abflüsse an Material treten dabei in verschiedenen Phasen der Wertschöpfungskette innerhalb eines produzierenden Unternehmens auf, sodass zwischen verschiedenen Formen von Lagern wie z. B. Eingangs-, Zwischen- oder Ausgangslager unterschieden wird (vgl. dazu u.a. LIESEGANG (1993)). Nach WITT (2004) dienen Zwischenlager dazu, die auf einer Produktionsstufe fertig bearbeiteten Produkte aufzunehmen, wenn der nächste Bearbeitungsvorgang noch nicht vorgenommen werden kann, weil die folgende Produktionsstufe dazu noch nicht bereit ist.

Für die folgenden Betrachtungen ist speziell das Zwischenlager, der sog. Puffer zwischen zwei Fertigungsstufen, von Interesse. Dabei spielt jedoch nicht das räumliche Lager sondern vielmehr ein zeitlicher Puffer die entscheidende Rolle. Dies ist damit zu begründen, dass die zu planenden Aufträge innerhalb der Lebensmittelverarbeitung zur Fertigstellung einer vollständigen Rezeptur aus diversen Komponenten bestehen, welche zwingend zu einem Termin an einer bestimmten Verarbeitungsstufe sein müssen. Abbildung 2.3 zeigt schematisch, wie sich der Puffer in dieser Betrachtung zusammensetzt.

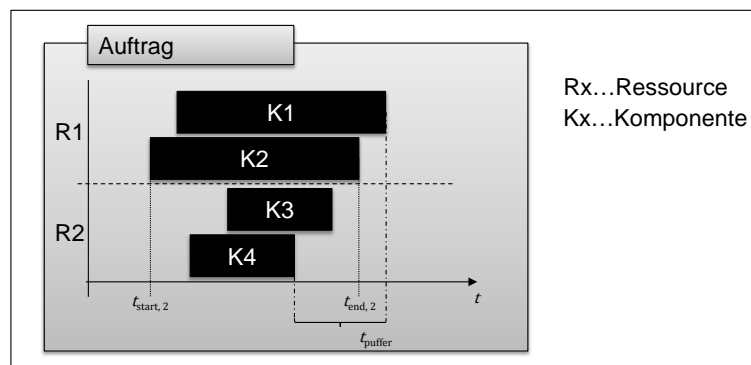


Abbildung 2.3: Darstellung der Pufferzeit in einem Gantt-Diagramm

Die Pufferzeit eines Auftrages j ist demnach wie folgt definiert:

$$t_{\text{puffer},j} = \max_{\substack{\{k=1 \dots n-1\} \\ \{l=k+1 \dots n\}}} |t_{\text{end},k} - t_{\text{end},l}| \quad (2.1)$$

Auch im Rahmen der Ablaufplanung kommt den Zwischenlagern (örtlich und zeitlich) eine

mit:

$j \in \mathbb{G}$ = lfd. Nummer des Auftrags

$k, l \in \mathbb{G}$ = lfd. Nummer der Komponenten eines Auftrages

$n \in \mathbb{G}$ = maximale Anzahl an Komponenten des Auftrages j .

hohe Bedeutung zu, denn es können häufig nicht alle Jobs ohne Wartezeiten zwischen den Produktionsstufen eingeplant werden (WITT 2004). Zwischen den Stufen bilden Jobs für ihre entsprechende Wartezeit den Lagerbestand.

Die Einrichtung von Zwischenlagern ist zumeist technologisch bedingt, wenn die verarbeiteten Materialien z. B. abkühlen oder trocknen müssen. Zur Belegungsplanung in der verfahrenstechnischen Produktion, wozu bspw. auch die Lebensmittelproduktion zu zählen ist, sind Zwischenlager von großer Bedeutung. Jedoch ist anzumerken, dass diese Bedeutung vielmehr deren Vermeidung als deren Erweiterung die Herausforderung ausmacht. Bei diskreten Produktionen von Ausgangsstoffen ohne qualitätsbeeinflussendes, transientes Produktverhalten finden Zwischenlager vergleichsweise wenig Beachtung. Weitere Ausführungen für die verfahrenstechnischen Prozessplanungen können bei WITT (2004), PHILIPP (2014), PAPAGEORGIOU & PANTELIDES (1996), BLÖMER (1999) sowie bei TRAUTMANN (2001) gefunden werden.

WITT (2004) stellt ein Planungsverfahren vor, welches die Verarbeitung von Stahl effizienter gestaltet. Er stellt einen Ansatz auf, der die Vermeidung von Zwischenlagern in der Stahlherstellung anstrebt. Dieser Ansatz kann analog auf die Lebensmittelverarbeitung adaptiert werden. Der vorgestellte heuristische Ansatz orientiert sich bereits an den organisatorischen Abläufen aus dem Projektmanagement. Die konkrete Maschinenbelegungsplanung spielt bei WITT (2004) keine exponierte Rolle.

Bei PHILIPP (2014) wird ein Ansatz für die Verarbeitung von Kohlefaser-Verbundmaterialien der Luft- und Raumfahrtbranche vorgestellt. Eine spezifische Form dieser Materialien ist in einem vorverarbeiteten Stadium bereits mit temperaturempfindlichem Bindemittel für die Weiterverarbeitung infiltriert. Dadurch erhalten diese Materialien sog. Warm- und Kaltzeitkontingente (PHILIPP 2014). Insbesondere zeigt PHILIPP (2014) auf, dass es sich bei dieser Verarbeitung um eine Chargenproduktion handelt. Die angepassten Lösungsverfahren basieren auf einem heuristischen Ansatz. Im Vergleich dazu wird in der vorliegenden Arbeit ein Prozess betrachtet, welcher die Chargenbildung als solches nicht zulässt. Die dargelegten Zeit-Temperatur-Kontingente können jedoch in ihrer Grundform als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Produktmodells dienen.

In den meisten Forschungsarbeiten der Maschinenbelegungsplanung werden unbegrenzte Zwischenlagerkapazitäten unterstellt (WITT 2004). Sofern beschränkte Zwischenlagerka-

pazitäten (Puffer) berücksichtigt sind, werden i. d. R. sog. Flow-Shops² betrachtet. Die Lagerkapazitäten werden dabei durch die Angabe einer maximal erlaubten Anzahl von Jobs definiert ohne zu berücksichtigen, dass von verschiedenen Jobs möglicherweise in unterschiedlichem Ausmaß an Lagerplatz in Anspruch genommen wird, vgl. hierzu auch PAPADIMITRIOU & KANELLAKIS (1980), LEISTEN (1985, 1990), PINEDO (2012) sowie HALL & SRISKANDARAJAH (1996).

Für deterministische Flow-Shop-Probleme mit beschränkten Zwischenlagerkapazitäten gilt, dass ein Job nur von einer Maschine bearbeitet werden bzw. eine Maschine nach seiner Bearbeitung verlassen kann, wenn der Puffer vor der nächsten Produktionsstufe genügend freie Kapazität zur Verfügung stellt (BLÖMER 1999, WITT 2004). Zudem wird berücksichtigt, dass der Bestand vor einer Produktionsstufe reduziert wird, wenn ein Job bzw. das zugehörige Material aus dem betreffenden Lager entnommen und von der entsprechenden Maschine bearbeitet wird. In LEISTEN (1985) und LEISTEN (1990) werden Zwischenlagerkapazitäten nach folgendem Muster klassifiziert:

- **Unlimited Intermediate Storage (UIS, $\beta_{10} = o$):** Die Zwischenlagerkapazitäten werden als unbeschränkt angenommen. Bei der Erstellung von Ablaufplänen brauchen somit keine Lagerkapazitäten berücksichtigt werden.
- **No Intermediate Storage (NIS):** Es existiert kein Zwischenlager, d. h. die Lagerkapazitäten sind gleich null. Dies hat zur Folge, dass die Jobs ohne Wartezeiten sofort nach dem Verlassen einer Produktionsstufe auf der nächsten Stufe weiterbearbeitet werden müssen. Dies entspricht *no-wait-Problemen* ($\beta_2 = no - wait$). Alternativ besteht die Möglichkeit des Blockierens, wenn ein Job nach seiner Fertigstellung auf einer Ressource verbleiben darf, weil die nachfolgende Ressource noch belegt ist.
- **Limited Intermediate Storage (LIS, $\beta_{10} = \kappa$):** Zwischen den Produktionsstufen $ps = 1, \dots, PS$ gibt es Lager mit beschränkten Kapazitäten $\kappa_{ps} \geq 0$, von denen mindestens ein Lager eine Kapazität $\kappa_{ps} > 0$ hat.

Arbeiten zur Lösung verschiedener Belegungsprobleme mit Zwischenlagerkapazitäten werden im Folgenden vorgestellt.

PINEDO (2012) zeigt auf, dass ein Flow-Shop der Art LIS, wobei die κ_{ps} durch eine maximal zulässige Anzahl an Jobs definiert ist, in ein Flow-Shop-Problem der Art NIS

²Flow-Shop ist die Produktionsform, in welcher eine Auftragssequenz in einer prozessabhängigen Reihenfolge über verschiedene, in dieser Reihenfolge angeordneten Maschinen oder andere Ressourcen geführt wird (STECCA 2014).

transformiert werden kann, indem jeder Lagerplatz, der einen Job aufnehmen kann, als eine Maschine aufgefasst wird, für die alle Bearbeitungszeiten gleich null sind. Dann können die Lager vor jeder Produktionsstufe durch eine Anzahl an Maschinen, die gleich der jeweiligen Lagerkapazität ist, ersetzt werden. Dieser Ansatz soll im Folgenden aufgegriffen werden, um die Zielfunktionen eines qualitätsorientierten Planungssystems zu entwickeln. Als Abwandlung ist dabei anzuführen, dass nicht die räumliche Lagerkapazität reduziert wird, sondern der zeitliche Puffer als Zielgröße der Planung herangezogen werden soll.

Profile Fitting ist eine Heuristik, welche von MCCORMICK ET AL. (1989) vorgestellt wurde, um, für den Fall des Blockierens ohne Zwischenlagerkapazitäten, zulässige Permutationspläne zu generieren mit der Zielsetzung der Minimierung der maximalen Fertigstellungszeiten ($\min C_{max}$). Dafür wird mittels Zeitprofilen für Jobs eine optimale Lösung für den Belegungsplan gefunden. Ein erster Job wird so eingeplant, dass er ohne Behinderungen durch den Flow-Shop läuft und gleichzeitig auf keiner Produktionsstufe blockiert wird. Die Abgangszeiten auf jeder Ressource definieren das Profil. Der zweite Job wird ausgewählt, indem für jeden vorliegenden Job bestimmt wird, in welchem Ausmaß er blockiert und Leerzeiten auf den Stufen verursachen würde. Zu diesem Zweck werden die Abgangszeiten des zuvor eingeplanten Jobs, d. h. das Profil, herangezogen. Der Job mit der kleinsten Summe an Leerzeiten und blockierten Zeiten wird ausgewählt und als nächstes eingeplant, woraus ein neues Zeitprofil entsteht. Die Heuristik wird entsprechend des Auftragsvorrates fortgesetzt. Die Nutzung eines Belegungsprofils wird in der vorliegenden Arbeit herangezogen, um eine Parallelverarbeitung von Produkten beschreiben zu können.

Weitere Lösungsverfahren für Flow-Shop-Probleme mit beschränkten Zwischenlagerkapazitäten können bei WITTRICK (1988) und SAWIK (1993) gefunden werden. Weitergehende Ansätze, die mit den Jobs verbundene Materialmengen explizit berücksichtigen, konnten nur in der bereits erwähnten Anlagenbelegungsplanung der verfahrensorientierten Produktion gefunden werden.

Bei der Lebensmittelproduktion ist davon auszugehen, dass mit beschränkten Zwischenlagerkapazitäten zu planen ist. Zudem ist insbesondere bei der Verarbeitung von Lebensmitteln eine Minimierung von zeitlichen Puffern (gemäß NIS) anzustreben. Gefüllte Puffer stellen eine Unsicherheit in der Pufferdauer dar, was unmittelbar zu einem Qualitätsverlust am Produkt führt.

2.2.2.2 Chargen in der Belegungsplanung

Wie bereits im vorangehenden Kapitel klassifiziert, handelt es sich bei der industriellen Verarbeitung von Lebensmitteln meist um Chargenfertigungen.

Nach WITT (2004) wird von einer Charge gesprochen, wenn Produkte oder Jobs, die denselben Rüstzustand erfordern, in Form von Familien gruppiert und möglicherweise gemeinsam verarbeitet werden, sodass innerhalb der Gruppierung keine Rüstvorgänge erforderlich sind. Diese Familien können in Abhängigkeit ihrer Liefertermine oder zu verarbeitender Materialien in Untergruppen zergliedert werden. Solange Rüstvorgänge im Sinne eines veränderten Betriebszustands für deren Bearbeitung nicht erforderlich sind, spricht man weiterhin von einer Charge.

BLÖMER (1999) und SCHWINDT & TRAUTMANN (2000) sehen vor allem in der verfahrenstechnischen Produktion eine Chargenproduktion. Beide definieren eine Charge (auch Batch) als Kombination einer Aufgabe (ein physikalischer oder chemischer Transformationsprozess, z. B. Erhitzen oder Filtern) und einer Produktionsmenge, während die Produktion eines Batches im Sinne einer Durchführung der Aufgabe als Aktivität oder Operation verstanden wird. Da die Transformationsprozesse oft nicht vollständig beherrschbar sind, weisen unterschiedliche Chargen des gleichen Produkts teilweise Qualitätsunterschiede auf. Grundlegende Darstellungen zur Produktionsplanung in der verfahrenstechnischen Produktion finden sich bei PHILIPP (2014), WITT (2004), SIMPSON & ABAKAROV (2009) oder LÜTKE ENTRUP ET AL. (2005).

Sofern die Chargengrößen (im Sinne von Losgrößen) im Rahmen eines hierarchischen Ansatzes in einer vorgelagerten Planungsstufe festgelegt werden (sog. Batching), sind für das anschließende Batch-Scheduling u. U. Methoden der diskreten Produktions- bzw. Ablaufplanung anwendbar (SCHWINDT & TRAUTMANN 2000). Dabei stellen dann die gebildeten Batches die zu terminierenden Operationen oder Jobs dar. Da Chargenfertigung oft auftragsorientiert stattfindet (SCHONER 2008) und prioritätsabhängige Reihenfolgen gebildet werden, treten in der Produktion unterschiedliche Durchlaufzeiten auf (ERLACH 2010). Dies hat zur Folge, dass Liefertermine nicht zwingend eingehalten werden können (LÖDDING & WIENDAHL 2005).

Die Ansätze zur chargenweisen Optimierung der Belegungspläne erweisen sich im Anwendungsfall als nicht zielführend. Die Individualisierung eines Auftrages bis hin zu einer direkten Beeinflussung einer Rezeptur oder der qualitätsbeeinflussenden Prozessparameter durch den Kunden ermöglicht nur in Ausnahmefällen die Bildung von Chargen. Ein Zusammenbringen von Komponenten verschiedener Aufträge ist bei der Realisierung einer kundenindividuellen Verarbeitung nicht möglich. Dennoch finden sich, wie bereits erwähnt, in den Arbeiten von PHILIPP (2014) oder auch WITT (2004) gute Ansätze zur Modellierung eines Produktes, was als Grundlage für die produktspezifische Planung genutzt werden kann.

2.2.2.3 Planung für die kundenindividuelle Qualität

Durch den Wandel vom angebotsorientierten Markt hin zum nachfrageorientierten Markt erwarten die Kunden eine zunehmende Qualität und Individualität von Produkten (JÄGER 2004, SCHOTH ET AL. 2012). Dieser Wertewandel stellt Unternehmen vor Herausforderungen und Probleme, die logistischen Zielsetzungen unter Beachtung des gewünschten Prozessergebnisses (z. B. Sachgüter in einwandfreier Qualität) zu erreichen. Verschiedene Konzepte beschäftigen sich mit diesem Themenfeld wie zum Beispiel Lean Thinking, kundenindividuelle Massenproduktion oder die sog. flexible Produktionsendstufe. Ein Anstieg der Varianten führt laut WIENDAHL (2004) direkt zu einer erheblichen Zunahme der Produkt-, Prozess-, und Produktionssystemkomplexität. Die Industrie reagiert darauf mit diversen Anlagen, die einen hohen Standardisierungsgrad besitzen, modular aufgebaut sind und über offene mechanische und steuerungstechnische Schnittstellen verfügen. Diese Anlagen werden dabei gegebenenfalls mit Handarbeitsplätzen kombiniert, sog. hybride Anlagen (WIENDAHL 2004). Dies hat zusätzliche Auswirkungen auf die Komplexität der PPS. Speziell die in der Termin- und Kapazitätsplanung enthaltene Reihenfolgeplanung bzw. Maschinenbelegungsplanung bedarf dabei der Reorganisation. Die Reihenfolgeplanung geschieht hier meist durch Prioritätsregeln. Dies stellt zwar eine praxisnahe Möglichkeit dar, jedoch fehlt den PPS-Systemen meist ein Werkzeug zur Auswahl und Gewichtung verschiedener Regeln, welches mit der Ziel- und Fertigungsstruktur des Betriebes übereinstimmt, womit der Planer auf sein Erfahrungswissen angewiesen ist (PILLER 2006).

Die erhöhte Komplexität und Dynamik der Prozesse stellen auch neue Herausforderungen an die Qualität. Aus Sicht der Qualität werden heute teilweise bereits im Produktentwicklungsprozess Maßnahmen ergriffen, um eine Verbesserung der Produkte und deren Verarbeitungsprozesse zu erreichen. Zu ihnen gehört bspw. die FMEA (Fehlermöglichkeits- und einflussanalyse) als Qualitätsmanagement-Methode mit hohem Nutzenpotential (BARRANTES 2003). Die FMEA läuft in fünf Schritten ab und bewirkt eine systematische Betrachtung aller Fehlerursachen, die ein Produkt betreffen können. Diese Vorverlagerung der Qualitätsmaßnahme kommt einer Forderung aus WIENDAHL (2004) zum frühen Ergreifen von Qualitätssicherungsmaßnahmen nach.

Sowohl die prozessintegrierte Qualitätsüberwachung als auch die nachgelagerte Qualitätsdatenauswertung werden aufwendiger, da durch die weniger zur Verfügung stehende Zeit die Prüfumfänge anteilmäßig zunehmen. Die Konsequenz ist, dass qualitätsfördernde Maßnahmen weiter nach vorn verlagert und präventiv durchgeführt werden müssen. Es sollen Prozesse bereits in der Planungsphase robuster gegen Störeinflüsse ausgelegt werden (WIENDAHL 2004). Die Abbildung 2.4 zeigt auf, dass durch die vorgelagerte Fehlerentde-

ckung in der Produktentwicklung eine Qualitätsverbesserung erreicht werden kann (analog zur FMEA). Diese Forderung kann als Grundlage auch für den hier betrachteten Bereich der Lebensmittelverarbeitung angewendet werden.

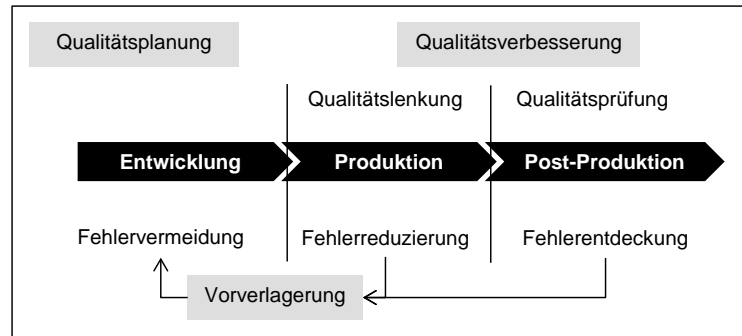


Abbildung 2.4: Kategorisierung qualitätsbezogener Maßnahmen in Anlehnung an WIENDAHL (2004)

Eine erhöhte Qualität aus Sicht des Kunden wird dadurch erreicht, dass man den Kunden in den Produktentwurf, in diesem Fall die Konzeption einer Rezeptur, mit integriert. Dies ist ähnlich wie bei WIENDAHL (2004) als Qualitätsregelkreis zu verstehen. Es benötigt demzufolge die Rückkopplung des Kundeneindrucks über ein verarbeitetes Produkt. Dennoch ist das Konzept der FMEA für die Beeinflussung einer Rezeptur in der Lebensmittelverarbeitung ungeeignet. Die Einbindung des Verfahrens in den Planungsprozess erfolgt lediglich über das Feststellen von Fehlerquellen und damit das Einschränken von Betrachtungsräumen, nicht jedoch bei der Optimierung eines Planungsschrittes innerhalb der Produktionsplanungsphase.

Die Möglichkeit zur Erstellung adaptiver Planungsdaten (Produktions- und Maschinenbelegungsplänen) für eine Produktion von kundenindividuellen Produkten bis hin zu einer Losgröße 1 ist heute bereits vorhanden und bietet zum Beispiel für die Automobilproduktion ein hohes Maß an Flexibilität. In der Automobilbranche jedoch gewinnt man eine Individualität durch die Möglichkeit der Konfiguration, also dem Kombinieren bekannter Standardprodukte zu neuen, vermeintlich individuellen Produkten. Beim Eingriff des Kunden in die Produktkonzeption, wie bspw. eine Rezeptur oder eine Veränderung des Prozesses, kann man von einer Steigerung der Kundenintegration gegenüber einer Konfiguration sprechen.

Um die Produktion kundenindividueller Produkte auch mit einem vertretbaren Planungsaufwand bewältigen zu können, sind gerade aus Sicht der PPS-Systeme intelligente, schnell adaptierende Planungsalgorithmen erforderlich. Die Bewältigung der steigenden Komplexität der Produktionsabläufe gewinnt zudem mit der Einführung *sprechender, intelligenter* Produkte einen Freiheitsgrad. Im Sonderforschungsbereich (SFB) 653 der Deutschen For-

schungsgemeinschaft (DFG) werden die intelligenten Produkte hinsichtlich ihrer Potenziale und Einsatzgebiete untersucht. Schwerpunkt ist dabei die technische Realisierung von sogenannten *gentelligenten* Bauteilen sowie die zustandsbezogene Reihenfolgebildung im Rahmen einer Ablaufsteuerung. Dies ist für die Lebensmittelverarbeitung als abstraktes Konzept zu verstehen und zu adaptieren. Dennoch ist es auch in diesem Verarbeitungsbereich zielführend, wenn Informationen über den Zustand eines Produktes vorhanden sind und für den Verarbeitungsprozess genutzt werden können.

Die PPS hält auch Einzug in der individuellen Lebensmittelverarbeitung in modernen Großküchen. Dies beschränkt sich jedoch hauptsächlich auf die Produktionsplanung und beschäftigt sich mit der Frage, wie Mitarbeiter besser und effektiver in den Produktionsprozess eingebunden werden können. Auch der Umgang mit den Ressourcen, Rohprodukt oder Energie wird hier berücksichtigt. Die Produktionssteuerung, also die direkte Zubereitung von Mahlzeiten, obliegt dem einzelnen Mitarbeiter. Den Haupteinfluss auf die Produktionsqualität von Mahlzeiten bildet somit dessen Know-how (BRAUN & DIRSCHAUER 2005, SALVIS AG 2009).

2.2.3 Lösung des Maschinenbelegungsproblems

Obwohl das Belegungsproblem bereits seit mehr als fünf Jahrzehnten durchdrungen wird, hat sich noch keine Universallösungsmethode herausgebildet. Dafür sind die Fragestellungen und die Zielfunktionen zu heterogen. Dennoch haben sich verschiedene Lösungsstrategien entwickelt:

- Systematische Lösungssuche
- Heuristische Ansätze
 - Dispatching Rules (Prioritätsregeln)
 - Tabu-Search
 - u. a.
- Meta-Heuristische Ansätze
 - Genetische Algorithmen
 - Evolutionsstrategien
 - u. a.

Systematische Suchen beruhen auf dem Versuch, die optimale Lösung durch schrittweises Einschränken des Lösungsraums zu finden. Ihnen liegt zu Grunde, dass das Problem als

mathematisches Optimierungsproblem formuliert werden kann. Bekannte Vertreter sind der Johnson-Algorithmus (NEUMANN & MORLOCK 2002) und der Branch & Bound-Algorithmus (MITTEN 1970, WEINBERG 1973). Diese Suchverfahren sind im Allgemeinen als sehr rechenintensiv zu betrachten, da nach dem globalen Optimum im Suchraum gesucht wird.

Heuristische Verfahren können angewendet werden, wenn keine formale Beschreibung des Problems vorliegt oder der Rechenaufwand für ein systematisches Suchverfahren zu groß erscheint (SCHONER 2008). Nachteil an der Heuristik ist jedoch, dass nicht sicher gestellt werden kann, dass die optimale Lösung vorgeschlagen wird. Sie zählen daher auch zu den Approximationsverfahren. Häufig werden auch Kombinationen für die Lösungsfindung eingesetzt. Dabei finden Prioritätsregeln Anwendung, welche den Suchraum einschränken. Anschließend wird eine *Greedy-Suche* angewandt. Für eine Anlagenbelegungsplanung von verfahrenstechnischen Produktionen werden u. a. von KUDVA ET AL. (1994) oder TRAUTMANN (2001) Heuristiken beschrieben. Eine allgemeine Übersicht zu Lösungsverfahren bietet PANWALKAR & ISKANDER (1977).

Meta-Heuristische Verfahren sind die Erweiterung für klassische Heuristiken. Sie verlaufen zumeist zweistufig. Eine bestehende Lösung wird in eine neue mit Hilfe einer *Veränderungsvorschrift* in eine neue Lösung transformiert und mit einem Entscheidungsschritt gekoppelt. Nach dieser *Akzeptanzvorschrift* wird entschieden, ob die neue Lösung akzeptiert werden kann, wenngleich der Zielfunktionswert vielleicht sogar schlechter ist. Vertreter dieser Verfahren sind bspw. das *Simulated Annealing* (LAARHOVEN & AARTS 1987) oder auch der *Bergsteigeralgorithmus* (NELDER & MEAD 1965). Die Anwendung in der verfahrenstechnischen Industrie wurde u.a. bei KARIMI & HASEBE (1995) gezeigt.

Die Problemstellungen für die Anwendung der metaheuristischen Verfahren sind weitreichend, gerade für die Produktionsplanung. Die hier zur Anwendung kommenden Metaheuristiken stammen aus den Klassen der evolutionären und der schwarmbildenden Methoden.

2.2.3.1 Differential Evolution Algorithmus

Die evolutionären Ansätze versuchen die darwinistische Theorie nachzuempfinden und auf technologische Fragestellungen anzuwenden. Dabei werden ganz allgemein vier abstrakte Schritte - *Initialisierung, Mutation, Rekombination und Selektion* - durchlaufen. Es entsteht zunächst die sog. Generation GE von Populationsmitgliedern Np . Ein Populationsmitglied wird durch einen D -dimensionalen reellwertigen Vektor beschrieben. Diese besitzt die Form $X_{i,GE} = [x_{1,i,GE}, x_{2,i,GE}, \dots, x_{D,i,GE}]$ mit $i = 1, 2, \dots, Np$. Anders als bei vergleichbaren evolutionären Algorithmen wird bei DE vor der Rekombination der Populationsmitglieder

zunächst die Mutation durchgeführt. Dadurch werden Nachkommen generiert. Als Abschluss wird zwischen den Eltern GE und den Nachkommen $GE + 1$ selektiert, um so die neue Elterngeneration zu erzeugen. Dieses evolutionäre Verhalten wird solange wiederholt, bis sich definierte Abbruchkriterien eingestellt haben. Mathematisch zusammengefasst ergeben sich die vier Schritte zu:

$$\text{Initialisierung :} \quad x_{j,i,1} = \text{rand}_j(0, 1) \cdot (g_{j,o} - g_{j,u}) + g_{j,u}. \quad (2.2)$$

$$\text{Mutation :} \quad p_{i,GE} = x_{r_1,GE} + F \cdot (x_{r_2,GE} - x_{r_3,GE}). \quad (2.3)$$

$$\text{Rekombination :} \quad p'_{j,i,GE} = \begin{cases} p_{j,i,GE} & \text{für } \text{rand}_j(0, 1) \leq Wk_{Cr} \\ x_{j,i,GE} & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\text{Selektion :} \quad x_{i,GE+1} = \begin{cases} p'_{i,GE} & \text{für } f(p'_{i,GE}) \leq f(x_{i,GE}) \\ x_{i,GE} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.5)$$

mit:

$\text{rand}_j(0, 1)$ = zufallsbasierte Initialisierung

o, u = Ober-/Untergrenze der Populationsvektoren $g_{j,o}, g_{j,u}$

$p_{i,GE}$ = Mutant/Probevektor von $x_{i,GE}$

r_1, r_2, r_3 = Mutationsvektoren aus dem Intervall $[1, Np]$

F = Mutationsfaktor

$p'_{j,i,GE}$ = Nachkomme von $x_{j,i}$ in der Generation GE

Wk_{Cr} = Wahrscheinlichkeit für Wahl der Eigenschaften der Elterngeneration (Crossover)

$x_{i,GE+1}$ = selektierter Nachkomme von $x_{i,GE}$ in der Folgegeneration

$f(x_{i,GE})$ = Fitnessfunktion für das untersuchte Problem

2.2.3.2 Particle Swarm Optimization

Bei den schwarmbildenden Algorithmen wie dem Particle Swarm Optimization-Algorithmus ist das Vorbild ebenfalls in der Natur zu suchen. Die Flexibilität und Agilität von schwarmbildenden Organismen wie Ameisen, Fischen oder Vögeln wird mathematisch nachgeahmt, um für eine Problemstellung ein globales Optimum zu finden. Ein Schwarm, bestehend aus Np Partikeln, befindet sich allgemein in einem δ -dimensionalen Raum in der Form:

$$X_z^{(ti)} = [x_{z,1}, x_{z,2}, \dots, x_{z,\delta}] \text{ mit } z = 1, 2, \dots, Np$$

Der allgemeine Ablauf kann ebenfalls mit abstrakten Schritten beschrieben werden. Zu ihnen gehören: *Initialisierung*, *Positionsanpassung*, *Schwarmbewertung* und *Geschwindigkeitsanpassung*. Jedem Partikel wird zusätzlich eine Geschwindigkeits- ($V_z^{(ti)} = [v_{z,1}, v_{z,2}, \dots, v_{z,\delta}]$ mit $z = 1, 2, \dots, Np$) und Positionsinformation

$(P_z^{(ti)} = [p_{z,1}, p_{z,2}, \dots, p_{z,\delta}]$ mit $z = 1, 2, \dots, Np$) zugeordnet. Bei der Positionsanpassung wird der Ursprungsposition die durch die Geschwindigkeit hervorgerufene Positionsänderung aufaddiert. Anschließend erfolgt die Bewertung jedes Partikels gemäß seiner Fitness-Werte in Bezug auf das zu erreichende Optimum. Zum Abschluss erfolgt die Anpassung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Historie eines Partikels (persönlicher Einfluss) und der Einflüsse der Schwarmelemente aufeinander (sozialer Einfluss). Auch dieses Vorgehen erfolgt iterativ bis ein Abbruchkriterium erfüllt wird. Mathematisch ausgedrückt ergibt sich folgendes Formel-Set:

$$\text{Initialisierung :} \quad x_{z,zz} = 10 \cdot \text{rand}_{zz}(0, 1) \quad (2.6)$$

$$\text{Positionierung :} \quad X_z^{(ti+1)} = X_z^{(ti)} + V_z^{(ti+1)} \quad (2.7)$$

$$\text{Schwarmbewertung a :} \quad P_z^{(ti+1)} = \begin{cases} P_z^{(ti)} & \text{für } f(P_z^{(ti)}) < f(X_z^{(ti+1)}) \\ X_z^{(ti+1)} & \text{für } f(P_z^{(ti)}) > f(X_z^{(ti+1)}) \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\text{Schwarmbewertung b :} \quad P_g^{(ti)} = P_{zz}^{(ti)} \quad \text{mit } f(P_{zz}) = \min_{z \in \mathcal{N}} (f(P_z)) \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \text{Anpassung :} \quad V_z^{(ti+1)} &= w \cdot V_z^{(ti)} + c_1 \cdot \text{rand}_{zz}(0, 1) \cdot (P_z^{(ti)} - X_z^{(ti)}) \\ &\quad + c_2 \cdot \text{rand}_{zz}(0, 1) \cdot (P_g^{(ti)} - X_z^{(ti)}) \end{aligned} \quad (2.10)$$

mit:

$\text{rand}_{zz}(0, 1)$ = zufallsbasierte Initialisierung in Raumdimension zz

$X_z^{(ti)}$ = Partikelraum

$P_z^{(ti)}$ = Positionsinformation des Partikels z im Iterationsschritt ti

$V_z^{(ti)}$ = Geschwindigkeitsinformation des Partikels z im Iterationsschritt ti

ti = Zeiteinheit, Iterationsschritt

$P_g^{(ti)}$ = global beste Position eines Partikels im Iterationsschritt ti

$f(P)$ = Fitnessfunktion der Positionsinformation

c_1, c_2 = Beschleunigungskoeffizienten zur Korrektur des Schwarms hinsichtlich seiner persönlichen oder sozialen Tendenz

In dieser Arbeit wird der von CZOGALLA (2010) für das Maschinenbelegungsproblem vorgestellte Particle Swarm Optimization-Algorithmus herangezogen, um einen Algorithmenvergleich anzustellen.

2.2.4 Fazit

Die bisherigen Ansätze zur Produktionsplanung und -steuerung können die steigende Komplexität, hervorgerufen durch eine stärkere Kundenindividualisierung, nur unzureichend bewältigen. Die Ansätze mittels metaheuristischer Verfahren erscheinen mit dem Vorbehalt

einer anwendungsspezifischen Adaption teilweise geeignet. Die Integration des Kunden in den Planungsprozess wird hierbei nicht betrachtet. Die Verwendung des transienten Produktverhaltens (hier insbesondere die Qualität) in Planungsprozessen konnte in keinem der hier betrachteten Ansätze gefunden werden. Die Verbesserung der Qualität steht lediglich im Ergebnis der verbesserten Planung und Steuerung der Verarbeitungsprozesse. Einzelne Forschungsaktivitäten liefern dennoch Ergebnisse, welche bei der Gestaltung eines angepassten Planungssystems für die kundenindividuelle Lebensmittelverarbeitung hilfreich sein können. Dort wiederum existieren für den Bereich der gemeinschaftsverpflegenden (System-)Gastronomie keine integrierten Lösungen für Planungssysteme, die neben dem Produktionsprogramm auch die Belegung der Ressourcen vorgeben.

2.3 Qualität und Qualitätsbegriff

Initialisiert durch die Arbeiten von William Edward Deming oder A. V. Feigenbaum Anfang der 1940-er Jahre, wurden im Bereich der Qualitätsforschung große Fortschritte gemacht. FEIGENBAUM (1951) definiert die Qualitätskontrolle folgendermaßen:

„Total quality control is an effective system for integrating the quality development, quality maintenance, and quality improvement efforts of the various groups in an organization so as to enable production and service at the most economical levels which allow full customer satisfaction.“

Daran lässt sich eine wichtige Komponente der Qualität ableiten. Es geht um die Zufriedenheit des Kunden, nicht ausschließlich um die Einhaltung von Randbedingungen, welche sich ein Unternehmen selbst auferlegt. Im weiteren Sinne sind auch die Anforderungen, die ein Kunde an ein Produkt stellt, als relevant zu berücksichtigen. Damit erhält die Qualität für die Industrie bereits zwei ganz unterschiedliche Facetten. Auch die wissenschaftlichen Ausführungen unterscheiden sich maßgeblich, je nach betrachtetem Wissenschaftsbereich. Es ist festzustellen, dass die Diskussion um einen normierten Qualitätsbegriff noch immer andauert. HOLBROOK & CORFMAN (1985) stellten dazu bereits 1985 fest, dass es annähernd so viele Qualitätsbegriffe wie Autoren zu diesem Thema gibt. Allgemein wird die Definition der DIN EN ISO 9000 heute als Standard angesehen, wenn gleich sie noch immer zur Diskussion steht. Die Beschreibung von Qualität ist eine sehr weitreichende Thematik, welche nicht vollständig im Rahmen dieser Arbeit diskutiert werden kann. Für den vorliegenden Fall empfiehlt es sich, einige Konzepte in der Betrachtung der *Qualität* als mathematisch fassbaren Faktor genauer zu beleuchten. Der Begriff stammt aus dem lateinischen und bedeutet zunächst einmal *wie beschaffen* (STOWASSER ET AL. 1991). Eine

formalere Definition ist in diversen Normen zu finden. Die DIN EN ISO 9000 definiert Qualität folgendermaßen:

„Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt.“

Diese Definition beruht auf den Ausführungen der DIN EN ISO 8402. Hier beschrieb man Qualität

„(... als) die Gesamtheit der Eigenschaften und Merkmale bezüglich ihrer Eignung, (die) festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse (...) erfüllen.“

Die Spezifizierung auf inhärente (innewohnende) Eigenschaften deutet dabei insbesondere auf ständige objektive Wesensmerkmale eines Produktes hin. Für das Umfeld der Produktion ist auch die Präzisierung des Begriffes Qualität als die Güte eines Produktes weitverbreitet.

Für das Verständnis der Einordnung des Qualitätsbegriffes entsprechend dieser Arbeit, sollen im Folgenden sowohl der produktionstechnische als auch der kundengeprägte Ansatz näher erläutert werden. Sie beruhen auf der Einteilung nach GARVIN (1984) und deren Weiterentwicklung nach STEENKAMP (1989) und GLASER (1995). Im Anschluss daran soll ein Grundverständnis und damit eine Fokussierung auf die Qualitätsbetrachtung von Lebensmitteln geschaffen werden.

2.3.1 Produktionstechnischer Ansatz

STEINMEIER (2014) führt an, dass, vorangetrieben durch die Entwicklungen vom Handwerk hin zur industriellen Fertigung mit einem bedeutenden Grad an Automatisierung, genaue Spezifikationen von Arbeitsschritten und deren Qualitätsanforderung erforderlich wurden. Diese zu definieren und die Produktionsprozesse auf genau diese Spezifikationen einzustellen, ist die zentrale Aufgabe der Qualitätssicherung in der Produktion. Qualität bedeutet in diesem Umfeld somit in erster Näherung das Einhalten von Spezifikationen und kommt damit dem Synonym der Güte am nächsten. Am Beispiel einer getakteten Montagelinie wird schnell deutlich, dass eine Nacharbeit von Fehlern zu Stillständen der gesamten Anlage führen kann. Dadurch entstehen enorme wirtschaftliche Schäden für den Hersteller (STEINMEIER 2014). Somit sind die qualitätsbestimmenden Merkmale durch Maße und zugehörige Toleranzen festgelegt. In der Entwicklung produktionstechnischer Anlagen und Prozesse führte dies zur Einführung aufwendiger manueller Qualitätssicherungsmaßnahmen. Diese wurden durch methodische und statistische Prüfungen und Methoden, bspw. durch die Qualitätsregelkarte nach SHEWHART (1980), im Sinne der Kosteneffizienz abgelöst. Diese Methoden entsprechen in ihrer Aussage einer typischen Herangehensweise nach der

produktionstechnischen Sicht. Sie dienen als Indikator für die Richtigkeit des Prozesses, der, wenn er innerhalb der gültigen Toleranzen verläuft, eine angestrebte Qualität am Produkt einstellt.

Juran gilt als weiterer Autor, welcher Qualität nach dem produktionstechnischen Ansatz definiert. Die Arbeit von RILEY & JURAN (1999) stellt eine Definition für die Qualitätsplanung vor:

„Quality planning, as used here, is a structured process for developing products (both goods and services) that ensures that customer needs are met by the final result.“

Auch er sieht den Kundenwunsch als oberste Priorität. Ganz allgemein ist Juran der Ansicht, dass Qualität nicht zufällig erreicht wird, sondern Ausdruck eines planvollen Vorgehens ist. Dieses Vorgehen gliedert sich nach RILEY & JURAN (1999) zunächst in eine Trilogie aus *Qualitätsplanung, -kontrolle und -verbesserung*. Diese drei Phasen sind im Qualitätsmanagement zyklisch durchzuführen. Jede dieser drei Komponenten ist nach Juran in verschiedenen Schritten zu durchlaufen. Die in Abbildung 2.5 aufgezeigten Schritte dienen dazu, eine Organisation darauf vorzubereiten, ein neues oder überarbeitetes Produkt herzustellen und auszuliefern (RILEY & JURAN 1999). Demnach sind in erster Linie die Kunden eines Produktes zu identifizieren. Dabei ist es nicht entscheidend, ob es sich um interne oder externe Kunden-Lieferanten-Beziehungen handelt. Erkennt man das Bedürfnis des Kunden richtig, kann mit einer kundenangepassten Produktentwicklung begonnen werden. Aufbauend darauf, entwickeln sich angepasste Prozesse und Steuermechanismen. Es ist damit aus produktionstechnischer Sicht durchaus möglich, einen Qualitätsprozess zu organisieren und planvoll ablaufen zu lassen.

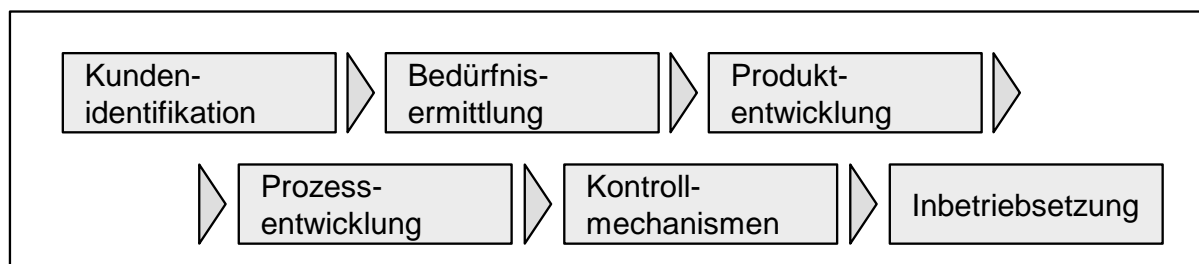


Abbildung 2.5: Schritte der Qualitätsplanung zur Einführung eines neuen Produktes gem. RILEY & JURAN (1999)

Basierend auf den Arbeiten von Juran und Shewhart konnte bis heute eine große Anzahl an Methoden zur Vermeidung, Erkennung und Behebung von Fehlern entwickelt werden. Das zugrunde liegende Qualitätsverständnis begreift Qualität als eine quantifizierbare objektive Größe, welche sich durch technische Spezifikationen beschreiben lässt. Diesem Verständnis

wird in erster Linie die Qualitätsnorm DIN ISO 9000 gerecht.

Die *Inhärenz* von Merkmalen, welche die Norm definiert, schafft dabei eine klare Abgrenzung zu Wahrnehmungsmerkmalen eines potentiellen Kunden. STEINMEIER (2014) schreibt, dass

„(...) auf das Produkt projizierte Eigenschaften, wie z. B. das Image einer Marke oder der Preis (...)“

in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt werden.

2.3.2 Kundengeprägter Qualitätsbegriff

REEVES & BEDNAR (1994) zeigen in ihrer Arbeit auf, in welchem Maße ein Produkt oder eine Dienstleistung die Erwartungen des Kunden erfüllt. Die Ansätze von SHEWHART (1980), RILEY & JURAN (1999) und FEIGENBAUM (1951) stellen die Wichtigkeit des Kunden bei der Qualitätsdiskussion heraus, jedoch fehlen jeweils verwertbare Ansätze, wie man die Rolle des Kunden messen und für produktionstechnische Belange verwerten kann. Ausgehend von Arbeiten zum Marketing im Dienstleistungssektor entwickelte sich in der jüngeren Vergangenheit eine neue Sicht auf den Qualitätsbegriff im Umfeld der Konsumentenforschung. In diesem Fachgebiet wird der Kunde als zentraler Meinungsmacher im Sinne einer Bewertung von Qualität definiert. Der kundengeprägte Ansatz ist in der Folge als sehr subjektiv zu betrachten (STEINMEIER 2014) und damit im Vergleich zum produktionstechnischen Ansatz nicht oder nur schwer messbar. Insbesondere die kundenindividuelle Wahrnehmung, die Bedürfnisse und die Ziele jedes Einzelnen beeinflussen die Aussage zur Qualität eines Produktes/einer Dienstleistung maßgeblich. Auch hierfür wurden in der Vergangenheit diverse Ansätze und Definitionen geschaffen (vgl. hierzu auch KRAMER & TWIGG (1970)). Im Folgenden werden drei Ansätze der kundenorientierten Qualitätsbeurteilungen vorgestellt.

OLSEN & JACOBY (1972) beschreiben ein Zwei-Ebenen-Modell der Qualitätswahrnehmung. Danach bestimmt der Kunde die für ihn qualitätsrelevanten Eigenschaften aus einem Pool an Elementen, welche das Produkt beschreiben. Im zweiten Schritt werden diese sogenannten *cues*³ zusammengefasst. Bewertet werden diese Eigenschaften nach ihrer Wichtigkeit anhand zweier Aussagehorizonte. Zum einen liegt der *Vorhersagewert* zugrunde, der angibt, welche Bedeutung die gewählte Eigenschaft in Bezug auf die Wunschqualität besitzt. Dieser basiert in großen Teilen auf Erfahrungen und Informationen, die der Kunde

³Nach Olson wichtige Eigenschaften für die Qualitätseinschätzung und -bewertung eines Gesamtproduktes.

in der Vergangenheit gemacht hat. Zum anderen bestimmt der *Vertrauenswert* die zweite Dimension der Bewertung. Die Aussage des Wertes berücksichtigt die Fähigkeit zur Selbsteinschätzung eines Kunden bzgl. der Bewertung einer ausgewählten Qualitätseigenschaft. Die Abbildung 2.6 zeigt die Bewertung von Qualitätsinformationen nach OLSEN & JACOBY (1972).

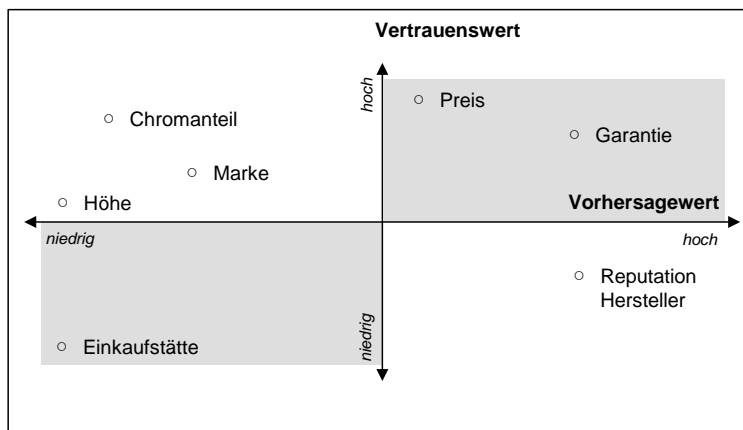


Abbildung 2.6: Bewertung von Qualitätsinformationen (OLSEN & JACOBY 1972) (Eintragungen sind beispielhaft für ein Produkt des Maschinenbaus)

Bei WIMMER (1975) wird die kognitive⁴, demnach typisch menschliche, Informationsverarbeitung und deren Einfluss auf die Qualitätswahrnehmung diskutiert. Wimmer geht insbesondere auf die Einflüsse der Umgebung eines Kunden auf dessen Qualitätsempfinden ein. Diese Einflüsse wirken nach Wimmer auf den kognitiven Verarbeitungsprozess, der wie erwähnt in direktem Zusammenhang mit dem Empfinden des Kunden bezogen auf Qualitätskriterien steht. In seiner Arbeit führt Wimmer an, dass es sich lediglich um einen Ansatz einer Erklärung für den Bereich der Informationsverarbeitung handelt. Eine empirische Untersuchung für den Nachweis dieser Aussage wird nicht beschrieben (WIMMER 1975).

Ein dritter Ansatz von Steenkamp zielt darauf ab, dem subjektiven Charakter von Qualität gerecht zu werden. Sein Modell differenziert nach *intrinsischen* und *extrinsischen* Kriterien. Diese sind durch den Kunden, nach dem eigenen Empfinden, zu bewerten und entsprechend ihrer Glaubwürdigkeit in drei Ebenen einzuordnen (STEENKAMP 1989):

- Descriptive beliefs: basierend auf dem Produkt,
- Informational beliefs: basierend auf Umwelteinflüssen und

⁴ *Kognition technischer Systeme* ist die Wissenschaft von der Wissensverarbeitung gemäß der Stufen: Wahrnehmen - Planen - Reagieren - Lernen - Anwenden (vgl. BANNAT ET AL. (2011))

- Inferential beliefs: basiert auf Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen oder Konsequenzen von Entscheidungen oder Wahrnehmungsverzerrungen.

Letztere stellen für Steenkamp die Haupteinflussnehmer auf die Bewertung der Qualitätsattribute dar. Diese fließen neben weiteren umfangreichen Beschreibungsvariablen in die Qualitätsinformation ein. Auf die Weiterverwendung dieser Daten geht Steenkamp nicht ein. Lediglich die Vergleichbarkeit von Qualitätsaussagen kann abgeleitet werden.

2.3.3 Fazit

Wie bereits Juran mit seinem Ablauf beschreibt, muss der Kunde identifiziert werden. Die vorgestellten Arbeiten zeigen gute übertragbare Ansätze für einen Qualitätsentwicklungsprozess auf, welche auch praktische Anwendung finden. Mit Blick auf eine kundenindividuelle Verarbeitung in Losgröße 1 stehen hier mit den Ansätzen nach Juran Herausforderungen bevor, da auch jedes Produkt nach diesem Ablauf neu entwickelt werden muss. Der Ansatz des rein kundengeprägte Qualitätsbegriffs liefert Hinweise, wie abseits von technischen Details auch die subjektive Bewertung des Kunden erfasst werden kann. Es wird jedoch nicht aufgezeigt, wie die Information in den Produktentwicklungsprozess einfließen kann, um hier einen Qualitätszugewinn zu erzielen. Die strikte Trennung der Ansätze erscheint aus Sicht der hier vorliegenden Arbeit nicht geeignet. Es bedarf vielmehr einer Vermischung von Komponenten beider Ansätze. Olson zeigte, wie Kundenkenntnisse dokumentiert werden können. Integriert man diese Informationsquelle in Jurans Phasen der Qualitätskontrolle oder -verbesserung, so erhält man ein flexibleres System des Qualitätsmanagements in Bezug auf die Individualisierung von Produkten.

2.4 Qualitätsbetrachtung von Lebensmitteln

Wie voran beschrieben, ist der Qualitätsbegriff ein oft diskutierter und teilweise nicht fixierbarer. Im Sinne der Grundlagen für das Verständnis dieser Arbeit soll der Begriff speziell für die Betrachtung von Lebensmitteln hinterfragt werden.

In der Gesetzgebung und Normung sind zwei Strömungen für die Sicherstellung von Lebensmittelqualität festzustellen. Einerseits werden über Vorschriften bestimmte objektive Eigenschaften von Lebensmittelprodukten definiert, um den Verbraucher vor Gefahren sowie Täuschung zu bewahren. Andererseits schützen Vorschriften auch die Interessen der Teilnehmer in der Wertschöpfungskette, vom Erzeuger bis zum Handel.

Für das deutsche Lebensmittelrecht gilt das *Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch*

(LMFG) als Grundlage. Dieses Gesetz ist Ausgangspunkt für diverse produktspezifische sowie produktübergreifende Verordnungen bspw. die Hygieneverordnungen, die Sicherheitsverordnungen oder die Diätverordnung. Diese sind klar auf den Verbraucher ausgerichtet, der durch die in den Gesetzen angewandten lebensmittelrechtlichen Prinzipien der *Verbote zum Schutz der Gesundheit*, *Verbote zum Schutz vor Täuschung* und *Verbote von Zusatzstoffen mit pharmakologischer Wirkung* geschützt werden soll (BERTLING 2011).

Für die wertschöpfenden Beteiligten in der Lebensmittelkette - Erzeuger, Verarbeiter und Handel - gilt in übergeordneter Weise der sog. *Codex Alimentarius*. Diese von der WHO erarbeitete Zusammenstellung von Normen beinhaltet Aussagen zu Verfahrensanweisungen zur Lebensmittelsicherheit sowie Standards für Produktionsverfahren und Produkteigenschaften. Davon abgeleitet entstanden in der Vergangenheit länderspezifische Verordnungen und Klassifizierungen, wie z. B. Güte- oder Handelsklassen (MEIER-PLOEGER & VOGTMANN 1991).

2.4.1 Partikularinteressen an der Lebensmittelqualität

Bereits in den Normen und Regularien zeigt sich, dass eine Zielgruppenabhängigkeit bei Lebensmitteln vorherrscht. Diese sog. Partikularinteressen spiegeln letztlich die Sichtweisen auf den Qualitätsbegriff gemäß den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 wider. Für die Teilnehmer entlang der Wertschöpfungskette sind nahezu ausschließlich die Parameter von Interesse, die auf den sog. Eignungswert (vgl. Abschnitt 2.4.2) eines Produktes einwirken. Die Abbildung 2.7 zeigt dafür die Hauptinteressen der einzelnen Teilnehmer der Wertschöpfungskette.

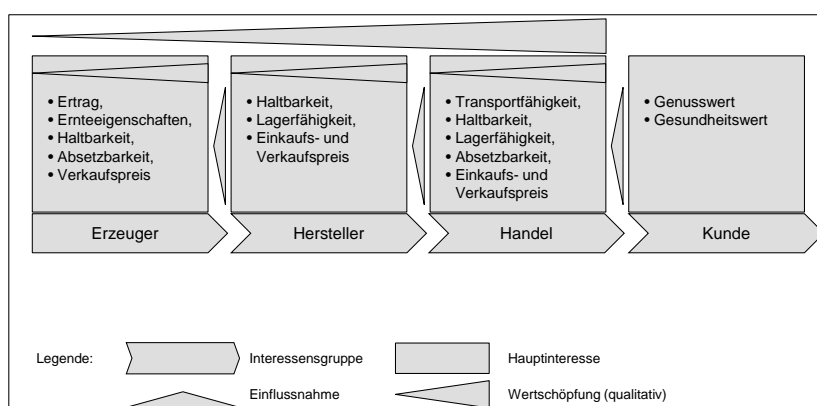


Abbildung 2.7: Partikularinteressen entlang der Wertschöpfungskette und Einfluss des Kunden (eigene Darstellung, nach LEITZMANN & SICHERT-OEVERMANN (1991))

Eine tiefer gehende Auseinandersetzung mit den Interessen der einzelnen Beteiligten kann zudem bei JÄGER (2004), ANDREÄ ET AL. (2010) oder auch KOERBER (2012) nachgelesen

werden. Da der Kunde als nicht-wertschöpfender Teil der vollständigen Lebensmittelkette (Wertschöpfungskette + Kunde) spezielle Interessen hegt, sei auch dieser noch einmal in die Betrachtung mit einbezogen. Wie eine Studie der Gesellschaft für Konsumgüterforschung zeigt, sind für den Kunden der Genusswert und die ernährungsphysiologische Qualität die wichtigsten Faktoren bei der Bewertung von Lebensmitteln (MICHELS 2012). Auf die Frage, was die Kaufentscheidung bei Lebensmitteln beeinflusst (siehe Abbildung 2.8), antworteten 95% der Befragten mit „Es muss gut schmecken“. Mit 93% steht die gesundheitliche Unbedenklichkeit beim Verzehr an zweiter Stelle der Antworten. Die Studie von MICHELS (2012) kann somit als Indiz dafür gesehen werden, dass es aus Verbrauchersicht in erster Linie um die tatsächliche Qualität des Endproduktes (im Folgenden auch als Verarbeitungsqualität bezeichnet) und nicht um die Qualität der Verarbeitungsprozesse geht.

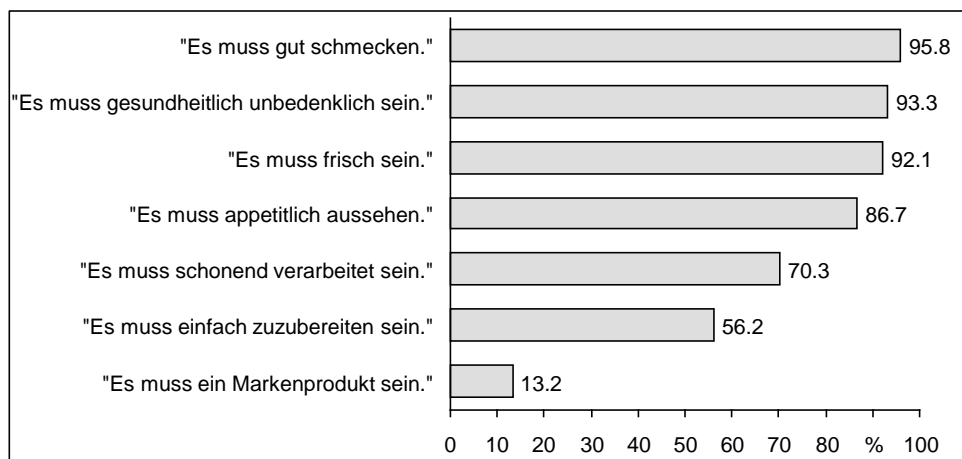


Abbildung 2.8: Wichtige Kriterien der Kunden an verarbeiteten Lebensmitteln (MICHELS 2012), Auszug

2.4.2 Die Summe von Teilqualitäten

Nach LEITZMANN & SICHERT-OEVERMANN (1991) ist die Lebensmittelqualität als die Summe sämtlicher bewertbarer Eigenschaften eines Lebensmittels zu verstehen. Dabei handelt es sich um Bewertungen, folglich um Urteile mit subjektiver Komponente aus den sog. *anerkannten Teilqualitäten* (HAENEL 1976), welche Lebensmittelqualität beschreiben sollen. Dazu zählen *der Gesundheitswert*, *der Genusswert* und *der Eignungswert*.

Die ernährungsphysiologische Qualität (auch: Gesundheitswert) stellt aus medizinischer Sicht die wesentliche Lebensmittelqualität dar. Sie beruht auf den Inhaltsstoffen eines Lebensmittels und wird diese beeinflusst und beschrieben. Dabei wird in wertgebende und wertmindernde Qualitätseigenschaften unterschieden (Tabelle 2.1). Positiv wirkende Inhaltsstoffe (bspw. Nährstoffe und Vitamine) gelten als wertgebend. Inhalte mit teilweise negativer Gesundheitswirkung werden den wertmindernden Eigenschaften zugeordnet.

wertgebend	wertmindernd
Energiegehalt	Pathogene Mikroorganismen
Hauptnährstoffe	Toxine
Schutzsubstanzen	Rückstände
u.a.	u.a.

Tabelle 2.1: Auswahl an Qualitätseigenschaften im Sinne des Gesundheitswertes (LEITZMANN & SICHERT-OEVERMANN 1991)

All diese Inhaltsstoffe führen nach LEITZMANN & SICHERT-OEVERMANN (1991) zu einer Veränderung der Parameter: *Hygiene, Energiegehalt, Nährstoffgehalt und Toxikologie*. Die Aussage des Gesundheitswertes wird vornehmlich für den Vergleich zwischen konventionell angebauten/hergestellten Lebensmitteln und biologischen Anbausystemen verwendet. Dabei wird hauptsächlich auf die wertmindernden Kriterien das Augenmerk gelegt. So können die Pestizidrückstände im konventionell hergestellten Lebensmittel einen bis zu 700 mal größeren Wert aufweisen als im Bioprodukt (ALFÖLDI 2006).

ALFÖLDI (2006) definiert den *Genusswert* als den sensorischen Gesamteindruck des betrachteten Produktes. Bei JELLINEK (1981) wird Sensorik definiert als die Prüfung von Lebensmitteln mit unseren Sinnen. Dabei unterscheidet sie zwischen statistisch gesicherten Methoden, der Prüfung mit getesteten Sinnesfähigkeiten der Prüfer in der Sensorik (sensorischen Prüfung) und der sog. Organoleptik⁵. Gemäß der Terminologie der Sinnessensorik erstellte JELLINEK (1981) eine Zusammenhangsdarstellung, welche in den folgenden Jahren bspw. in JÄGER (2004) weiterentwickelt wurde. Die Abbildung 2.9 zeigt den Stand nach JÄGER (2004). Der Gesamteindruck eines Lebensmittels wird im Wesentlichen durch das Einwirken auf die menschlichen Sinne (2. Spalte von links) hervorgerufen. Links davon stehen die Ursachen für diese Empfindungen. Rechts folgt welche Ausprägung einer Lebensmitteleigenschaft durch einen menschlichen Sinn wahrgenommen wird. Die Summe bildet den sensorischen Gesamteindruck, auf den die Darstellung zur Rechten verdichtet wird.

Da es sich beim Genusswert in erster Linie um das durch den Menschen wahrnehmbare Qualitätsabbild eines Lebensmittels handelt, ist diese Form der Qualität für die Mehrzahl der Kunden relevant (LEITZMANN & SICHERT-OEVERMANN 1991).

Die technischen und physikalischen Eigenschaften eines Produktes beschreibt ALFÖLDI (2006) als den *Eignungswert*, welcher auch als Nutz- oder Gebrauchswert bezeichnet wird.

⁵ Organoleptik ist stark subjektiv geprägt und ergibt eine Aussage zur Qualität ohne getestete Leistungsfähigkeit der Sinne des Probanden oder Prüfers. Dies entspricht eher dem Abschmecken, Ansehen und Erfühlen.

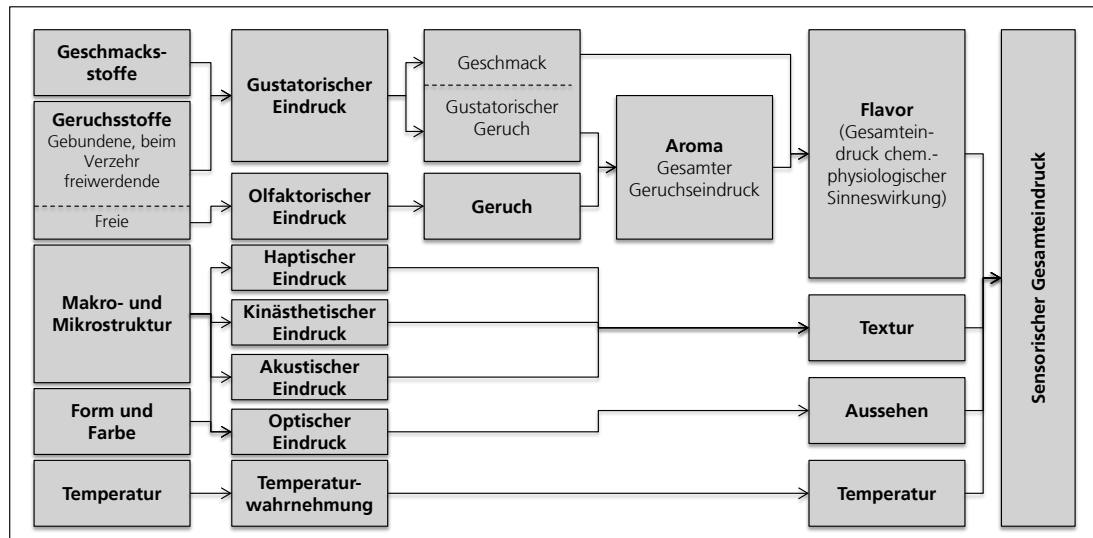


Abbildung 2.9: Terminologie der Sinnessensorik nach JÄGER (2004)

Nach LEITZMANN & SICHERT-OEVERMANN (1991) handelt es sich um die wichtigste Qualitätsbeurteilung aus Sicht von Erzeugern, Verarbeitern und Händlern. Je nach Interesse einer bestimmten Zielgruppe treten jedoch unterschiedliche Kriterien für die Bewertung in den Vordergrund. Diese Art von Qualität gilt als objektiv und bildet hauptsächlich die Grundlage von Normen, Gesetzen oder allg. Klassifizierungen (vgl. KOERBER (2012), MEIER-PLOEGER & VOGTMANN (1991)), wie die der Handelsklassen.

2.4.3 Qualitätsstudien für Lebensmittel

In der Vergangenheit wurden verschiedenste Untersuchungen zur Beeinflussung der Qualität von Lebensmitteln durch einen Verarbeitungsprozess durchgeführt. Das Kernprinzip dieser Untersuchung ist nahezu ausschließlich die Empirie. Es wird dabei jeweils der Einfluss eines bestimmten Parameters untersucht. Hierfür werden umfangreiche Versuchsreihen, bei denen ein Parameter immer in Nuancen verändert wird, durchgeführt. Die verarbeiteten Produkte werden nach der Veränderung im Prozess einem sog. Human Panel (vgl. auch ALFÖLDI (2006)) zur Beurteilung des Genusswertes nach standardisierten Kriterien vorgelegt. Diese Kriterien können aus der Terminologie der Sinnessensorik von JÄGER (2004) extrahiert werden. Sie entsprechen den Ausprägungen der Eigenschaften, die mit den Sinnen wahrgenommen werden können.

MORA ET AL. (2011) untersuchte bspw. den Einfluss des Luftfeuchteniveaus bei der Verarbeitung von Truthahnbrust. Das Ergebnis der Untersuchungen unterstreicht die Abhängigkeit zwischen Befeuchtungsgrad und Zähigkeit bzw. auch Krustenbildung bei der Verarbeitung mit der gleichen Temperatur. Unter trockenen Bedingungen war die Einwirkdauer im Vergleich zu den bedampften Verarbeitungsversuchen am höchsten. Die Saftigkeit,

das heißt, der Wassergehalt im Produkt, war erwartungsgemäß bei den bedampften Produkten höher. Da es zu einer geringeren Ausdampfung aus dem Lebensmittel kommt, wenn es in feuchter Umgebung verarbeitet wird, bleibt das Produkt an sich zarter. MORA ET AL. (2011) stellten heraus, dass dies auf die verschiedenen Zeitpunkte der Eiweißdenaturierung, welche durch den jeweiligen Prozess hervorgerufen wird, zurückzuführen ist. Sie schlagen vor, dass aus Qualitätssicht, in diesem Fall die Betrachtung des Genusswertes, das Niederdampfgaren eine sinnvolle Alternative für die industrielle Verarbeitung von Truthahn darstellt.

Auch bei GARCIA-SEGOVIA ET AL. (2007) können empirische Versuche nachgelesen werden. Es wurde untersucht, wie sich unterschiedliche Haltetemperaturen bei unterschiedlichen Einwirkdauern auf die Qualität des Produktes, in diesem Fall Rindfleisch, auswirken. Zudem werden verschiedene Verarbeitungsmethoden miteinander verglichen. Dazu zählten Garen, Vakuumgaren und Garen im abgeschlossenen System (Sous-Vide). Dabei wurden in erster Linie die Veränderungen der physikalischen Eigenschaften Textur und Farbe sowie Gewichtsverlust beim Garen zur Untersuchung herangezogen. Die Untersuchungen zeigten, dass sich die Garverluste nahezu linear zur Einwirkzeit verhalten. Sie werden größer bei höheren Haltetemperaturen. Zudem können Vorteile des Sous-Vide-Garens hinsichtlich der Produktqualität aufgezeigt werden.

Eine wissenschaftliche Durchdringung des Themas Qualitätsbeurteilung von Lebensmitteln, mit dem Ziel einer mathematischen Beschreibbarkeit der Zusammenhänge von Verarbeitungsprozess und Verarbeitungsergebnis, geht zurück auf die Arbeiten von Piekarski und Bognár, z.B. PIEKARSKI & ZACHARIAS (1981), BOGNÁR ET AL. (1983) oder BOGNÁR & PIEKARSKI (1985). Hier wurde erarbeitet, welchen Einfluss die Veränderung der Verarbeitungsparameter auf die Verarbeitungsqualität von Lebensmitteln hat. Als ein Beispiel für diesen Zusammenhang wurde der Begriff des Garegrades definiert. Im Folgenden soll daher dargelegt werden, wie dieser Zusammenhang herzustellen ist. In Bezug auf die vorliegende Arbeit und auf Grund des Vorhandenseins einer entsprechend aussagekräftigen empirischen Datenbasis über Garprozesse, wird im Weiteren zunächst lediglich die Auswirkung des Parameters Temperatur betrachtet. Die Bestimmung des Garegrades bezieht sich auf PIEKARSKI & ZACHARIAS (1981). Diese Berechnungsmethode basiert auf den sensorischen Beurteilungen des Geschmacks und der Konsistenz von Lebensmitteln in Abhängigkeit von Temperatur und Dauer einer Wärmebehandlung. Mit dieser Methode ist es möglich, den Garzustand zu jedem Zeitpunkt und bei jeder Lebensmitteltemperatur zu bestimmen.

2.4.3.1 Die Garkurve

Zunächst sind Garkurven für die entsprechenden Lebensmittel, als Grundlage der Bestimmung des Garegrades, empirisch zu ermitteln. Dabei ist die Garkurve eine stetige Kurve, in der über einen möglichst großen Temperaturbereich angegeben wird, wie lang ein Lebensmittel bei einer konstanten Temperatur gegart werden muss, um den Garzustand bzw. die gewünschte Qualität zu erreichen (PIEKARSKI & ZACHARIAS 1981). Dies geschieht laut PIEKARSKI & ZACHARIAS (1981) in folgenden Schritten:

1. Es wird das Lebensmittel bei unterschiedlichen Haltetemperaturen und unterschiedlichen Zeitintervallen gegart.
2. Es erfolgt eine sensorische Prüfung der Lebensmittel zu jedem Intervall und der dazugehörigen Temperatur.
3. Die Prüfgruppe (Panel) bewertet den Zustand des Gargutes von A (noch roh) bis E (übergar).
4. Die abgegebenen Urteile werden mittels Häufigkeitsanalyse ausgewertet, dabei wird der Schwerpunkt auf die „C-Urteile“ (gar) gelegt.
5. Die Ergebnisse werden in ein Diagramm abgetragen und eine Regressionsgerade zwischen den Punkten angenähert.
6. Mittels der gemessenen Temperaturverlaufskurve und der experimentell ermittelten Garkurve kann der ideale Verlauf iterativ angenähert werden.
7. Abschließend wird die Funktion nach der Formel 2.11 aufgestellt.

$$t_G = e^{a+b\vartheta} \quad (2.11)$$

mit:

t_G = Garzeit bis zum Garendpunkt

ϑ = konstante Temperatur im Lebensmittel

a = aus empirisch ermittelter Garkurve berechnete Konstante

b = vom Lebensmittel abhängige Faktoren

Da gemäß der Arrhenius Gleichung biologische und chemische Vorgänge, die auf thermischer Einwirkung beruhen, einer Exponentialfunktion folgen, kann auch für Garprozesse ein exponentieller Ansatz gewählt werden (PIEKARSKI & ZACHARIAS 1981). Dieser Ansatz (Formel 2.11) stellt zunächst lediglich die empirischen Zusammenhänge, welche zwischen wirkender Temperatur und Prozesszeit bis zum optimalen Garpunkt bestehen, dar. Ei-

ne kurze Zusammenfassung zur Ermittlung dieser sog. Garkurve ist in Abbildung 2.10 nachzuvollziehen.

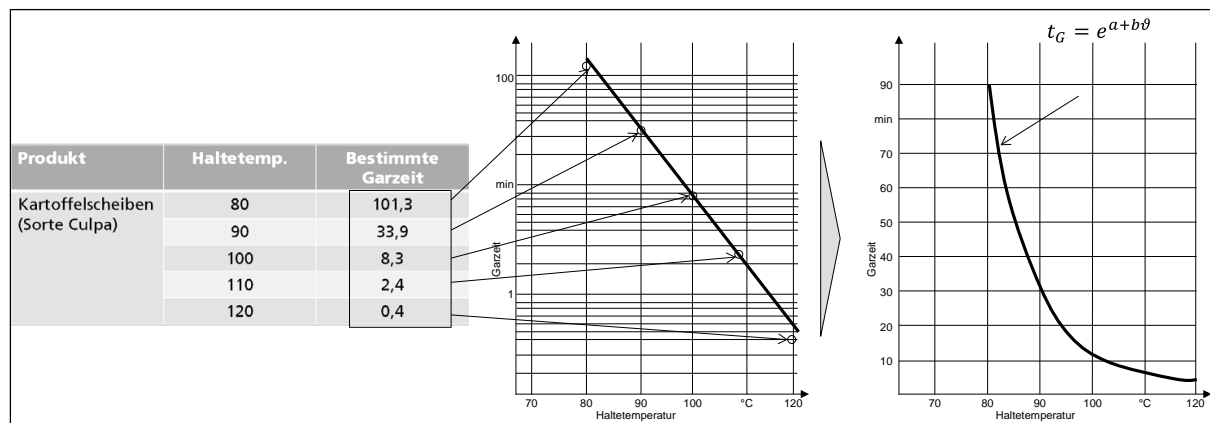


Abbildung 2.10: Garkurvenermittlung nach PIEKARSKI & ZACHARIAS (1981).

Die Tabelle zur Linken fasst die Schritte 1-4 zusammen und stellt die ermittelten Daten der *C-Urteile* dar. Gemäß der Punkte 5 und 6 entsteht die mittlere Darstellung im logarithmischen Maßstab. Mit der im Schritt 7 vorgeschlagenen Entwicklung einer Funktion mit exponentiellem Charakter, ergibt sich die Entsprechung der logarithmischen Darstellung im kartesischen Koordinatensystem, wie es zur Rechten abschließend dargestellt wird. Die Ermittlung der lebensmittelcharakteristischen Parameter a und b erfolgt dabei auf Basis der empirischen Kennwerte. Aus dem Zusammenhang der exponentiellen Funktion und der unmittelbaren Übertragbarkeit in den logarithmischen Zusammenhang können die Werte für a und b errechnet werden.

2.4.4 Der Garegrad

Der Garegrad G ist definiert als der Quotient aus tatsächlicher Wärmebehandlungszeit (entspricht hier der Einwirkzeit) t_e und Wärmebehandlungszeit bis zum Garendpunkt t_G bei konstanter Produkttemperatur (PIEKARSKI & ZACHARIAS 1981). Aus der Gleichung 2.11 ergibt sich somit:

$$G = \frac{t_e}{t_G(\vartheta_{\text{Lebensmittel}})} \quad (2.12)$$

Aus dieser Beziehung lassen sich bereits erste Aussagen zur Ergebnisqualität eines Lebensmittels ableiten. In PIEKARSKI & ZACHARIAS (1981) werden dazu folgende Bereiche definiert:

- $t_e = 0$ ist $G = 0 \Rightarrow$ das Lebensmittel ist roh

- $0 < t_e < t_G$ ist $0 < G < 1 \Rightarrow$ das Lebensmittel ist angegart
- $t_e = t_G$ ist $G = 1 \Rightarrow$ das Lebensmittel ist optimal gar
- $t_e > t_G$ ist $G > 1 \Rightarrow$ das Lebensmittel ist übergart

Die Formel 2.12 setzt voraus, dass die Temperatur im Lebensmittel die gesamte Zeit konstant ist. Der Garegrad hat somit einen linearen Verlauf. Dies bedeutet z.B., dass die halbe Zeit bis zum Punkt $G = 1$ einer konstanten Temperatur dieselben Auswirkungen ($G = 0,5$) hat wie die halbe Zeit bei einer anderen Temperatur. Somit ist es möglich, das Gargut stückweise fertig zu garen oder bei unterschiedlichen Temperaturen so zu garen, dass ebenfalls ein optimaler Garendpunkt erreicht wird (Formel 2.13). Das Fertiggaren bei unterschiedlichen Temperaturen ist bei einem stetigen Temperaturanstieg im Gargut der Fall, was zu den Formeln 2.14) bzw. 2.15 führt.

$$G = \sum_i \frac{t_{e_i}}{t_{G_i}} \quad (2.13)$$

$$G = \int_0^{t_e} \frac{dt}{t_G(\vartheta_{\text{Lebensmittel}}(t))} \quad (2.14)$$

$$G = \int_0^{t_e} e^{-a-b\vartheta_{\text{Lebensmittel}}(t)} dt \quad (2.15)$$

mit:

t_{e_i} = Wärmebehandlungszeit bei konstanter Temperatur ϑ_i

t_G = Garzeit bis zum Garendpunkt bei $\vartheta_i = \text{const}$

G_i = erzielter Garegradanteil während der Zeit t_{e_i} bei $\vartheta_i = \text{const}$

G = Garegrad während der gesamten Wärmebehandlung

2.4.5 Fazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in den lebensmittelrechtlichen Vorschriften die Qualitätsmerkmale Gesundheitswert und Eignungswert verwendet werden. Den sog. Genusswert, der die subjektiven Qualitätskriterien zusammenfasst, findet man ebenfalls, jedoch ist eine klare Benennung als Genusswert nicht verbreitet. Die Beschreibung der Wirkung von Verarbeitungsprozessen auf ein Lebensmittel und damit deren unmittelbarer Einfluss auf die Qualität des Produktes ist derzeit lediglich auf Studien begründet. Diese sind zudem teilweise in ihren Aussagen widersprüchlich. Diese Studien haben keinen Anspruch an die Objektivierung des Genusswertes. Positiv anzumerken sind die Arbeiten zum Garegrad. Diese stellen eine gute Grundlage für die Objektivierung der Lebensmittelqualität dar. Sie beruhen auf der empirischen Untersuchung, schaffen jedoch den Schritt zur

Formalisierung des Zusammenhangs in Form einer mathematischen Beschreibung. Eine unmittelbare Verwendung dieser Funktion für Produktionszwecke konnte durch Recherchen nicht aufgezeigt werden.

2.5 Kundenorientierung, Kundenfeedback

2.5.1 Kundenzufriedenheit

Die Erläuterungen zu den Partikularinteressen in Bezug auf Lebensmittelqualität und der dort angezeigten stärkeren Einflussnahme des Kundeninteresses auf die Wertschöpfungskette stellen eine Forderung hinsichtlich dessen, wie die Kundenmeinung abgefragt und nutzbar gemacht werden kann. Im Bereich der Kundenindividualisierung ist es im besonderen Maße wichtig, die Meinung des Kunden mit in den Produktionsprozess zu integrieren. Dies kann durch eine unternehmerische Kundenorientierung ermöglicht werden. Im Speziellen soll hier auf das Kundenfeedback eingegangen werden.

KAISER (2006) sieht die Kundenzufriedenheit als eines der entscheidenden Elemente einer markt- und kundenorientierten Unternehmensführung an. Die Konkurrenzsituation zwischen den Marktteilnehmern begünstigt die Situation für den Kunden. Durch die große Anzahl an Anbietern für gleichartige Produkte fällt es dem Kunden leichter, zu einem anderen Anbieter zu wechseln, falls eine Unzufriedenheit vorherrscht (SCHARNBACHER & KIEFER 2003).

Zufriedene Kunden hingegen zeigen eine höhere Wiederkauftrate, reagieren weniger preispfindlich, kaufen nicht nur vermehrt andere Produkte und Dienstleistungen des gleichen Unternehmens, sondern empfehlen diese auch weiter. Somit beeinflusst die Qualität der Kundenbeziehungen stark die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen auf dem Markt, stellen HINTERHUBER & MATZLER (2008) heraus. Je näher sich die eigenen Erwartungen des Kunden mit den subjektiv wahrgenommenen Leistungen eines Produkts oder einer Dienstleistung annähern, desto höher ist die Zufriedenheit, so SCHARNBACHER & KIEFER (2003). Durch eine erhöhte Kundenorientierung wird eine verbesserte Zufriedenheit beim Kunden erreicht. Dies bedeutet, dass auf Käufer individuell einzugehen und aus Erfahrungen mit Kunden zu lernen für ein Unternehmen immer wichtiger wird (SCHARNBACHER & KIEFER 2003). KAISER (2006) bekräftigt diese Aussage noch damit, dass sich das Unternehmen in die Lage des Kunden hineinversetzen muss, um auf Kundenbedürfnisse und Wünsche eingehen zu können.

Um den Kundenwunsch besser verstehen zu können und damit Bedürfnisse abzufragen,

bestehen verschiedene Möglichkeiten. In der sog. Post-Kauf-Phase bspw. bieten sich für einen unzufriedenen Kunden mehrere Handlungsmöglichkeiten zum Ausdrücken seiner Unzufriedenheit an. Dies birgt für ein Unternehmen eine Chance, dessen Bedürfnisse kennenzulernen. Entweder wechselt der Kunde den Anbieter oder drückt seine Unzufriedenheit in Form einer negativen Kunde-zu-Kunde-Kommunikation aus. Weiterhin kann er sich inaktiv verhalten oder eine Beschwerde gegenüber dem Unternehmen ausdrücken. Aus der Sicht des Anbieters ist die letzte Option die einzig wünschenswerte Reaktionsform. Dadurch bekommt das Unternehmen die Chance, auf die individuellen Wünsche des Kunden einzugehen und ihn zufrieden zu stellen (KRISTES 2012). Nach LOCH ET AL. (2009) benötigt es mehr Aufwand, neue Kunden zu gewinnen oder verlorene Kunden wiederholt zu begeistern als die bestehenden Kunden zu halten. Damit trägt die Kundenorientierung zur Aufrechterhaltung des Kundenstammes bei.

Ein bekanntes Modell, welches in stilisierter Form die Kundenzufriedenheit auswertbar macht, ist das *KANO-Modell* (KANO ET AL. 1984). Das Modell gliedert die Möglichkeiten zur Befriedung eines Kunden in drei Bereiche:

- die Basisfaktoren,
- die Leistungsfaktoren und
- die Begeisterungsfaktoren.

Die Abbildung 2.11 zeigt die Darstellungsform des Modells nach HINTERHUBER & MATZLER (2008). BERGER ET AL. (1993) zeigte auf, dass beim Abtragen der Kundenzufriedenheit über die Erwartungshaltung Grenzbereiche entsprechend den genannten Faktoren eingetragen werden können.

Dabei gelten folgende Erläuterungen für die einzelnen Faktoren: *Basisfaktoren* sind die Produkteigenschaften, deren Nichterfüllung Unzufriedenheit verursachen. Es sind Mindestanforderungen, die ein Kunde als selbstverständlich ansieht (bspw.: ein Kraftfahrzeug besitzt beim Neukauf eine Hupe). Werden diese erfüllt, führt es zwar zu keiner Steigerung der Kundenzufriedenheit, sind sie aber nicht erfüllt, kann im Nachgang von einer Unzufriedenheit des Kunden ausgegangen werden (HINTERHUBER & MATZLER 2008). *Leistungsfaktoren* sind vom Kunden ausdrücklich ausgesprochene Wünsche und Anforderungen (bspw.: ein Kraftfahrzeug soll ein Navigationssystem enthalten). Nach SCHÄPPI ET AL. (2005) sind diese leicht erfassbar. Sie rufen bei einem Kunden Zufriedenheit hervor, wenn seine Erwartungen übertroffen wurden. Liegen sie hinter den Erwartungen, sorgen sie beim Kunden für Unzufriedenheit (PIEHL 2013). KOPP (2009) stellt fest, dass diese Eigenschaften aus diesem Bereich genutzt werden, um sich gegenüber dem Wettbewerb

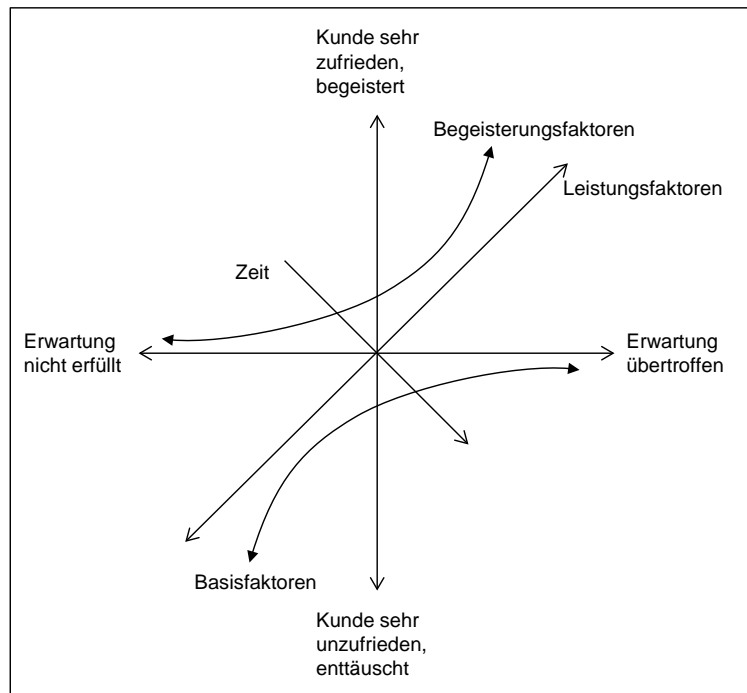


Abbildung 2.11: Das KANO-Modell der Kundenzufriedenheit nach HINTERHUBER & MATZLER (2008)

abzusetzen. *Begeisterungsfaktoren* werden vom Kunden als unerwartete Produktkriterien wahrgenommen (bspw.: nach dem Neuwagenkauf fällt dem Kunden ein spezielles Ausstattungsmerkmal positiv auf). Es sind Anforderungen, welche den Kunden überraschen. Sie haben einen hohen Einfluss auf die Zufriedenheit mit einem Produkt. Sind diese nicht vorhanden, wird dennoch keine Unzufriedenheit hervorgerufen (PIEHL 2013).

2.5.2 Kundenorientierung durch Kundenfeedback

Ein Mittel, um die Erwartungen des Kunden zu erheben, ist das *Befragen*. Hier soll nur noch auf die Möglichkeit eingegangen werden, Produkte durch das gezielte Verwenden von Feedbackinformationen zu beeinflussen.

In der Literatur tauchen häufig die Begriffe *Kundenfeedback* und *Beschwerdemanagement* zusammen auf. Eine Beschwerde stellt nach KRISTES (2012) in der Regel nichts anderes als negatives Kundenfeedback dar. Nach den Ausführungen von BARLOW & MÖLLER (2003) und KRISTES (2012) sind Beschwerden als „Geschenk“ zu betrachten, da ein Unternehmen bestenfalls über die eigenen Schwachstellen und Verbesserungspotentiale informiert wird.

Neuprodukt- oder Innovationsideen können aus Feedback genauso abgeleitet werden wie die reine Produktverbesserung an bereits vorhandenen Leistungsmerkmalen (KRISTES 2012). Dabei können auch überflüssige Leistungsmerkmale, die keinen Einfluss auf die

Kundenzufriedenheit haben, erkannt und reduziert werden (ISSEL 2011). Im Rahmen einer *qualitativen* Beschwerdeauswertung betreibt man eine systematische Ursachenanalyse. Auf dieser Basis werden dann mit Hilfe von Planungsinstrumenten Verbesserungsvorschläge entwickelt (STAUSS 2011). Bei der *quantitativen* Beschwerdeauswertung stehen die Überwachung des Umfangs, die Verteilung des Beschwerdeaufkommens und die Priorisierung der wahrgenommenen Probleme im Vordergrund.

Im Gegensatz zur Beschwerde wird ein positives Feedback oftmals gar nicht erhoben oder ausgewertet. STAUSS (2011) empfiehlt, sich auch mit dem Kundenlob zu beschäftigen, um herauszufinden, welche Kriterien beim Kunden die Zufriedenheiten so enorm beeinflussen. Er empfiehlt, diese Stärken mehr zu fördern oder auf weitere Produkte zu übertragen.

Um Kundenfeedback einzuholen, bieten sich Methoden wie z.B. Befragungen durch ein Call-Center (SCUPIN 2006), über Auswertungen von Reklamationen, mittels Marktforschung oder auch mit Hilfe von Fragebögen (HOLZER 2012) an. Da nicht alle Methoden für diese Arbeit relevant sind, beschränkt sich dieser Abschnitt nur auf zwei von ihnen. *Fragebögen* sind eine sehr häufige und in vielen Bereichen eingesetzte Feedbackmethode. Papierhafte Fragebögen sind nach heutigem Standard etwas in den Hintergrund getreten. Digitale Abfragen gestalten sich als komfortabler. Prinzipiell sollten sie knapp gestaltet sein, sodass der Befragte nicht durch den Umfang abgeschreckt ist. Fragebögen helfen, Informationen frühzeitig und gezielter zu erhalten (GARZALDEEN & MÜNZER 2003) oder diese auch nachgelagert zu einer Produkteinführung abzufragen. Bei der Gestaltung von Fragebögen bietet sich eine große Auswahl an Fragetypen an. Speziell Einstellungsfragen eignen sich zur Erhebung von Bewertung und Gewohnheiten der Befragten. Sie können in Form von Skalenfragen, Rating- oder Rankingverfahren vorkommen. Bei Skalenfragen und bei Ratingfragen hat der Befragte die Möglichkeit, seine Antwort auf einer vorgegebenen Skala einzustufen (STORFINGER & OPPER 2011). Die Anzahl der Stufen bleibt dem Ersteller freigestellt (GARZALDEEN & MÜNZER 2003).

Beim *Relevanz-Feedback-Verfahren* wird die Verbesserung durch die Interaktion mit dem Kunden geschaffen (ZEHENTNER 2000). Dabei bewertet die Person die Relevanz verschiedener Suchergebnisse. Durch Kennzeichnung mit *relevant* und *irrelevant* werden die zurückgelieferten Ergebnisse mit einem Relevanz-Wert versehen. Mit der gewonnenen Information werden neue, verbesserte Ergebnisse berechnet, die der Kunde wiederum neu bewerten kann. Dies kann beliebig oft wiederholt werden, bis das Gesamtergebnis einem angestrebten Optimum entspricht (UHL 2002).

2.5.3 Fazit

Es konnte dargelegt werden, dass Feedback ein geeignetes Mittel darstellt, die Bedürfnisse eines Kunden in Bezug auf die Ausprägung eines Produktes abzufragen. Dazu wurden grundsätzliche Möglichkeiten aufgezeigt, wie das Feedback erhoben werden kann und wie mit Daten umgegangen wird. Da Feedback eine Ausprägung eines Qualitätsmanagements darstellt, ist davon auszugehen, dass die erhobenen Daten auch in einen Produktionsprozess zurückfließen. Wie dies genau geschieht, konnten die Quellen nicht aufzeigen. Es wurden lediglich Hinweise darauf gegeben, dass es wichtig ist. Eine Vorschrift zur Quantifizierung von Feedback bezogen auf Verarbeitungsprozesse oder die Zuordnung der Aussage des Feedbacks auf einen bestimmten Parameter konnte nicht aufgezeigt werden. Die Literatur beschränkt sich in dieser Frage auf Aussagen der Art „fallabhängig, vom Unternehmen festzulegen“.

2.6 Ableiten des Handlungsbedarfes

Ausgehend vom vorgestellten Stand der Technik und Wissenschaft soll in diesem Abschnitt der offensichtliche Handlungsbedarf, welcher sich im Hinblick auf die Zielstellung der vorliegenden Arbeit ergibt, zusammengefasst werden.

Die aufgeführten Arbeiten haben alle ihre Berechtigungen in den einzelnen Gebieten der Wissenschaft oder speziell der Produktionstechnik. Eine Komposition der Gebiete PPS, Produktqualität speziell in der Lebensmittelproduktion und Feedbackwissenschaft konnte in der Form nicht gefunden werden.

Die Randbedingungen der betrachteten Produkte stellen die Fähigkeiten bestehender Ansätze auf die Probe. Die aufgezeigten Quellen in den verschiedenen Bereichen zeigen keine Lösungsansätze für die Planung von Prozessen mit sehr kurzen Realisierungshorizonten. Die Voraussetzung, auf Kundennachfrage einen vollständigen Planungslauf mit dem bereits vorliegenden Auftragsprogramm durchzuführen, gehört nicht zum Standardvorgehen in der PPS. Vielmehr werden Planungsläufe über längere Zeiträume durchgeführt und kurzfristige Änderungen durch die Planungsfähigkeiten der ausführenden Personen vorgenommen. Die Implementierung eines echtzeitnahen Planungssystems für die Termin- und Kapazitätsplanung stellt eine Herausforderung dar.

Um mit akzeptablem Rechenaufwand zu Lösungen dieses Scheduling-Problems zu kommen, ist ein Vorgehen zu definieren, welches auf die Herausforderungen der Lebensmittelverarbeitung ausgerichtet ist. Die Planung unter den besonderen Randbedingungen von Produkten

mit einem zeitabhängigen Qualitätsverhalten, wie Lebensmitteln, zeigt Potential, neue Planungsgrößen zu erschließen. So zum Beispiel die Qualität eines Produktes, welche sich in diesem Zusammenhang nicht zwangsläufig durch das Beherrschen der Verarbeitungsprozesse einstellt.

Die Ansätze der Chargenproduktion können im hier betrachteten Fall der kundenindividuellen gastronomischen Verarbeitung von Lebensmitteln nicht angewendet werden. Besteht die Anforderung, kundenindividuell und kurzfristig eine Lebensmittelverarbeitung zu bewältigen, deren oberstes Ziel es sein soll, die Qualitätsansprüche eines individuellen Kunden zu befriedigen, so ist die Kombination gleichartiger Produkte in Chargen, wie sie LÖDDING & WIENDAHL (2005) oder auch PHILIPP (2014) verwenden, nicht anwendbar. Lediglich eine parallele Verarbeitung in einem Prozessraum ist denkbar. Dafür ist das Planungssystem so zu gestalten, dass etwaige Wechselwirkungen der parallel verarbeiteten Produkte keine Auswirkungen auf die Ergebnisqualität haben.

In der Diskussion des Qualitätsbegriffes zeigt sich bereits, dass für die Verarbeitung von Lebensmitteln die Ausrichtung auf die produktionstechnische Auffassung von Qualität nicht ausreichend ist. Bei der Behandlung von Lebensmitteln ist davon auszugehen, dass die objektiven Parameter nicht zu einer optimalen Ergebnisqualität führen. Vielmehr ist der Kundeneindruck und der Kundenwunsch nach einer bestimmten Qualität maßgebend. Nach LINSS (2011) ist der Grad der Befriedigung der Kundenbedürfnisse einer der wichtigsten Faktoren der Gewinnerzielung. Die Schwierigkeit hierbei ist die Parametrierung eines subjektiven Parameters sowie die Nutzung dieser Informationen in der PPS. Um Qualität bewertbar zu machen, ist ein grundsätzliches Verständnis des Begriffes Qualität erforderlich. Dieses ist immer anwendungsspezifisch und wurde im Abschnitt 2.3 eingeführt. Für ein methodisches Vorgehen ist ein Grundverständnis im Anwendungsbereich erforderlich, welches im Abschnitt 2.4 dargelegt wurde.

In allen konsultierten Ausführungen gab es keinerlei Hinweise auf die Nutzung der Information über das zeitveränderliche Produktverhalten zur gezielten Verbesserung der Produktionsreihenfolge. Da nach den Worten von FEIGENBAUM (1951) Qualität das ist, was der Kunde als Qualität definiert, sollte es auch das Ziel sein, jedes Produkt in der bestmöglichen Qualität an den Kunden auszuliefern. Dazu ist mit Blick auf die jeweiligen Verarbeitungsschritte zu vermuten, dass es ein auf jedes Produkt p_i zugeschnittenes optimales Tupel an Prozessparametern gibt, mit denen es verarbeitet werden sollte. Die Schwierigkeit ist es, eine stetig differenzierbare Funktion $q : \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+ \times [0, 100] \rightarrow [0, 1]$ zu finden, die einem Produkt eine Qualität zuordnet und damit die Transienz abbildet. Hinweise dazu konnten jedoch nur ansatzweise gefunden werden.

Einzelne Aussagen hierzu beschreiben LAWRENCE ET AL. (2001), GARCIA-SEGOVIA ET AL. (2007) und MORA ET AL. (2011). Die Abstraktion dieser Information in Form eines mathematischen Zusammenhangs kann lediglich in Form des Garegrades abgeleitet werden und stellt somit den größten Handlungsbedarf dar.

Mit einer solchen Beschreibung wäre es möglich, für jedes Produkt in der Produktionsplanungsphase eine Qualität q_i vorherzusagen, mit der es dem Kunden geliefert wird. Damit lässt sich ein Grenzwert Q_0 bestimmen, ab dem ein bestelltes Produkt als nicht mehr qualitativ ausreichend gilt. Als Funktion ist ein stückweise stetig differenzierbarer Zusammenhang denkbar, welche genau ein Maximum bei den optimalen Parametern besitzt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich eine Forderung nach einem Ansatz zur Berücksichtigung der Qualität als Zielgröße in der PPS stellt. Damit sollen explizit für die individuelle Lebensmittelverarbeitung definierte Belegungspläne erzeugt werden können, welche eine bestmögliche Produktionsqualität erreichen. Implizit sollen daraus Informationen über das Steuern der Verarbeitungsprozesse (Parametereinstellungen, Einwirkzeiten o. ä.) ableitbar sein. Eine Ausrichtung auf einen spezifischen Kundenwunsch soll mit einfachen Überlegungen aufgezeigt werden.

3 Methode zur Integration des transienten Produktverhaltens in die Maschinenbelegungsplanung

3.1 Allgemeines

Dieses Kapitel beschreibt ein Konzept zur Integration des transienten Produktverhaltens eines Produktes in der Produktionsplanung. Im Speziellen werden Möglichkeiten zur Integration in die Maschinenbelegungsplanung beschrieben. Die hier adressierten transienten Prozesse wirken unmittelbar auf die Produktqualität, weshalb die Begriffe nahezu synonym Verwendung finden. Das Ziel der Integration dieses Verhaltens ist, wie bereits in Abschnitt 1.3 aufgezeigt, eine Verbesserung der Planungsergebnisse hinsichtlich der Erreichung einer kundenindividuellen Ergebnisqualität. Darauf aufbauend wird eine Ableitung von Prozessparametern aus dem Planungsergebnis ermöglicht. Die Parameter, welche das transiente Verhalten des Produktes und damit die Ergebnisqualität beeinflussen, werden für die Verbesserung der Prozesssteuerung genutzt werden.

Da sich innerhalb eines bestimmten Planungszeitraums direkte Auswirkungen auf die nächste Periode ergeben und dies unmittelbar zu einer Abweichung der anvisierten Qualität in der Verarbeitung eines Produktes führt, ist die Qualitätsplanung im Anschluss an eine zeitliche Belegungsplanung zielführend. Zur Steigerung ihrer Produktivität und zur Sicherung der Wirtschaftlichkeit der Verarbeitung kommen Unternehmen nicht umhin, Produktionsabläufe den Verarbeitungsanforderungen des geplanten Produktionsprogramms folgend bestmöglich anzupassen (WARNECKE 1988).

Nach HUBER (1995) kann eine Anpassung auf drei Planungsebenen vorgenommen werden. In einer langfristigen Betrachtung bietet bspw. die Restrukturierung einer Fertigung eine Eingriffsmöglichkeit. Die stärkste Durchgriffsmöglichkeit ist jedoch auch mit den erheblichsten Aufwänden verbunden. Dahingegen kann bei einer mittelfristigen Betrachtung, zum Beispiel durch Neubeschaffungen im Anlagenpark, die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens gesteigert werden. Mit dem Fokus auf die kurzfristige Ebene sind insbesondere Anpassungen von Arbeitsplänen sowie Produktionsprogrammen möglich. Dabei gilt, dass nur die Arbeitspläne und daraus resultierende Belegungspläne der Ressourcen zur Prozessoptimierung geeignet sind. Dies begründet sich darauf, dass es sich um die letzte Instanz der Planung handelt. Werden hier Eingriffsmöglichkeiten auf den Prozess einer Vorausplanung unterzogen und optimale Prozesssteuergrößen mit vorgegeben, kann anhand besser ausge-

steuerter Prozesse eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit erzielt werden. Die Anpassung der Produktionsprogramme gemäß HUBER (1995), also die Produktionsprogrammplanung im weiteren Sinne sowie die Maschinenbelegungsplanung im Detail, bilden den Ausgangspunkt für die hier vorgestellte Methode. Zur Verbesserung der Produktionsqualitäten sollen in diesem Vorgehen insbesondere die Produktionspläne spezifisch angepasst werden.

3.2 Ablauf

Die Abbildung 3.1 gibt einen Überblick über die auszuführenden Schritte, um eine Maschinenbelegungsplanung um ein transientes Produktverhalten zu erweitern. Im Speziellen wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit der zeitliche Verlauf der Produktqualität, der sich als Folge eines zeitlichen Produktverhaltens ergibt, in den Fokus gestellt. Hieraus wird deutlich, dass es sich bei der zu entwickelnden Methode um einen dreistufigen Ansatz handelt. Mit Blick auf eine weitere Präzisierung der Planungsergebnisse und die Ausrichtung des Qualitätsziels auf einen spezifischen Kundenwunsch ist die Phase der Berücksichtigung eines Kundenfeedbacks als Erweiterung anzusehen.

Die drei Stufen, welche im Nachfolgenden im Detail erläutert werden sollen, lauten:

- Terminierung nach logistischen Größen mit dem Ziel der Pufferfreiheit,
- Modellierung der Produktqualität durch ihre Beschreibung mit prozessualen Parametern,
- Erhebung von Feedback zur kundenspezifisch angepassten Qualitätsplanung.

Schritt eins fasst die methodischen Abläufe zusammen, welche erforderlich sind, um gemäß einer Terminplanung ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Im vorliegenden Fall soll der Fokus auf der Reduzierung der Pufferzeit liegen. Eine Definition von Nebenbedingungen ist in Abhängigkeit des Anwendungsfalls zu sehen. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel keine Angaben hierzu getroffen. Im nachfolgenden Kapitel ist ein spezifischer Anwendungsfall beschrieben. Dort werden Nebenbedingungen zwingend definiert.

Den Kern der vorliegenden Arbeit stellen die Schritte zwei bis vier dar. Hier werden die Arbeitsschritte beschrieben, die erforderlich sind, um ein prozessabhängiges Produktmodell zu entwickeln. Das Produktmodell stellt in der vorliegenden Arbeit eine vereinfachte Abbildung der im Produkt ablaufenden thermischen Prozesse dar, welche zu einer zeitabhängigen Veränderung (Transienz) des modellierten Produktes führen. Abgeschlossen wird die Entwicklung mit der Erarbeitung von Integrationsmöglichkeiten.

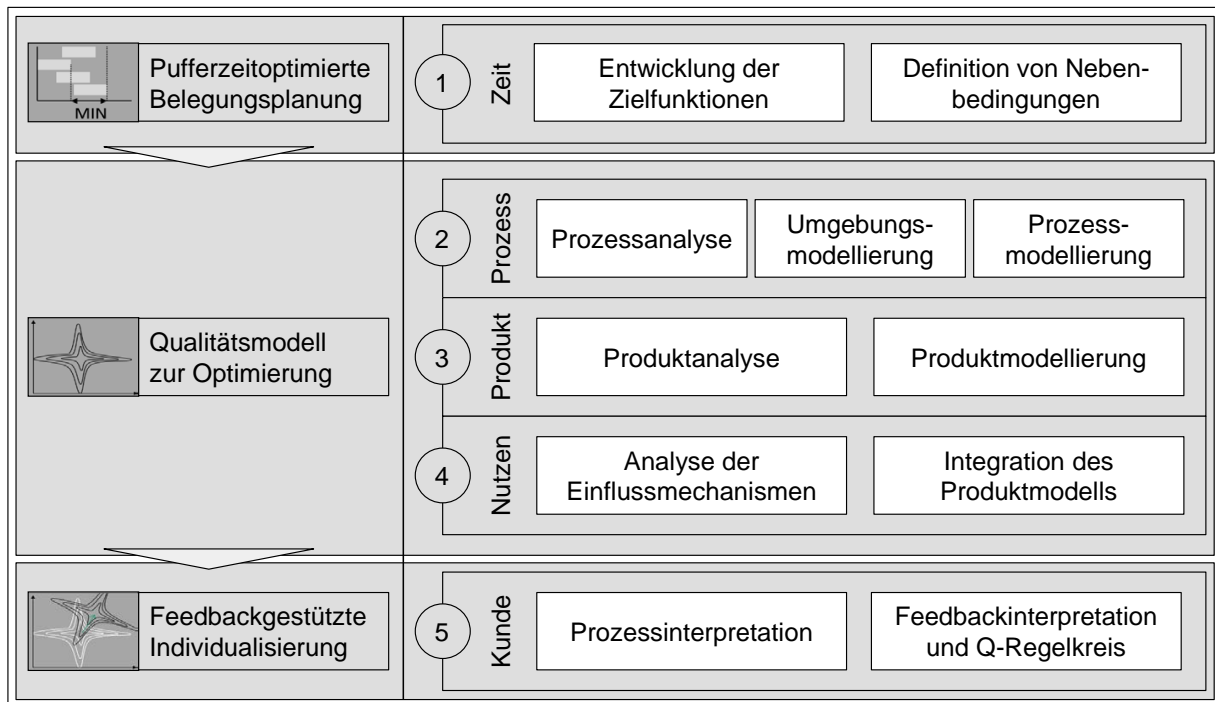


Abbildung 3.1: Ablauf der Entwicklungsmethode

Den Abschluss der Methode bildet die feedbackgestützte Individualisierung. Diese wird als Tool eingeführt, um die Meinung eines Kunden unmittelbar in den Verarbeitungsprozess einfließen zu lassen. Der Einfluss wird dabei auf den wirkenden Prozessparametern erreicht. Damit wird das Verarbeitungsergebnis in Nuancen angepasst und auf einen expliziten Kundenwunsch adaptiert. Die Darstellung der Verwendungsmöglichkeiten dieser Rückmeldungen im Produktionssteuerungsprozess schließt die Ausführungen zur Methode ab. Dazu wird in erster Linie ein geeignetes Fragebogenformat entworfen. Insbesondere die Interpretation der Antworten und deren Reintegration in die Stammdaten eines Auftrages bilden dabei die Herausforderung.

3.3 Pufferzeitoptimierte Belegungsplanung

3.3.1 Entwicklung der Zielfunktionen

Das Aufstellen einer Zielfunktion hinsichtlich der zeitlichen Planung bedarf der Beschreibung einiger Randbedingungen. Im Folgenden wird eine Modellierung der Auftragsituation und des Belegungsproblems durchgeführt (vgl. dazu auch WAGNER ET AL. (2013)). Dazu ist es notwendig, einige Begriffe zu definieren und Variable festzulegen.

Ein Auftrag A_j (engl. Job) enthält folgende Daten:

- Eine eindeutige Auftragsnummer $j \in \mathbb{N}$.
- Eine nichtleere Menge an Komponenten¹ $P_j = \{p_i\}$, die verarbeitet werden muss, um den Auftrag zu erfüllen. Im Sinne einer maximalen Individualisierung können durchaus zwei Komponenten p_k und p_l identisch sein. Da jede Komponente genau einem Auftrag zuzuordnen sein soll, gibt es im mathematischen Sinn eine umkehrbare Funktion $z : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$, die jeder Komponente einen Auftrag zuweist.
- Eine Menge an Anweisungen² $W_j = \{w_i\}$, wie die einzelnen Komponenten verarbeitet werden sollen, um den Anforderungen des Auftraggebers gerecht zu werden. Eine solche Anweisung wird als Tupel von relevanten Prozessparametern formuliert.
- Einen Wunschtermin $T_{\text{end},j}^* > 0$, zu welchem der Kunde den Auftrag j geliefert haben möchte. Für die Betrachtungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit sei $T_{\text{end},j}^*$ stets als eine stetige, positive Größe angenommen. Auch in den folgenden Darstellungen wird davon ausgegangen, dass der Zeitpunkt $T = 0$ immer so weit vor allen Zielterminen vorhandener Aufträge definiert wird, damit keine Prozesse mit negativer Startzeit entstehen können.

Zwei Aufträge A_j und A_k sind nur identisch, wenn $j = k$ gilt. In diesem Fall gilt aber auch $P_j = P_k$, $W_j = W_k$ und $T_{\text{end},j}^* = T_{\text{end},k}^*$.

Der Suchraum, also der Vorrat aller erteilten Aufträge, welcher für die Generierung einer optimalen Lösung zur Verfügung gestellt wird, soll so allgemeingültig wie möglich gestaltet sein.

Eingeplant werden sollen k Komponenten p_i , $i = 1, \dots, k$, die jeweils einem der $n \leq k$ Aufträge zugeordnet werden können. Jede Komponente hat eine geplante Startzeit $t_{\text{start},i}$. Diese Zeit definiert den zwingenden Startpunkt der Verarbeitung einer Komponente, um den geforderten Zieltermin $t_{\text{end},i}$ noch einhalten zu können. Die Endzeit ergibt sich aus der Startzeit addiert mit der Einwirkzeit, die zur Verarbeitung der Komponenten benötigt wird.

Gesucht werden die Startzeiten der Komponenten. Eine zulässige Lösung ist also ein k -dimensionaler Vektor $[t_{\text{start},1}, \dots, t_{\text{start},k}]$, welcher den problemspezifischen Nebenbedingungen gerecht wird. Es sollen die optimalen Startzeiten gefunden werden, also eine zulässige

¹ Komponenten sind als die zu verarbeitenden Bestandteile eines Jobs zu verstehen, welche hier als Teil-/Unteraufträge dieses Jobs behandelt werden. Jeder von ihnen kann zudem aus mehreren Arbeitsvorgängen bestehen.

² Diese ist zu vergleichen mit einer Arbeitsvorgangs-Folge

Lösung, welche die folgenden Zielfunktionen minimiert. Alle weiteren Größen werden als konstant angenommen oder sind nur von den Startzeiten abhängig.

In der zeitlichen Planungsstufe ist bereits darauf zu achten, eine Minimierung eines Qualitätsverlustes in Folge der ablaufenden transienten Vorgänge zu erreichen. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, als erstes Ziel die Minimierung der Liegezeiten (auch: Pufferzeiten) anzustreben. Es ist davon auszugehen, dass ablaufende Transformationsprozesse in der verfahrenstechnischen Industrie dazu führen, dass die Qualität der betrachteten Produkte differiert (WITT 2004). Diese Qualitätsschwankungen führen bei zu großen Differenzen zu Einbußen und Ausschuss. Als Pufferzeit $t_{\text{puffer},j}$, $j = 1, \dots, n$ eines Auftrages j wird die maximale Differenz der Endzeiten aller Komponenten p_i dieses Auftrages bezeichnet. Eine Pufferzeit bedeutet immer, dass eine Komponente auf eine andere warten muss und somit einen Qualitätsverlust erleidet.

Die Zielfunktion kann somit wie folgt beschrieben werden:

$$\min \left[\sum_{j=1}^n t_{\text{puffer},j} \right] = \min \left[\sum_{j=1}^n \left(\sum_{\{k|z(k)=j\}} \sum_{\substack{\{l|z(l)=j\} \\ k < l}} |t_{\text{end},k} - t_{\text{end},l}| \right) \right]. \quad (3.1)$$

Ebenso wie die Produkte besitzen die Aufträge Start- und Endzeiten, die sich mit

$$T_{\text{start},j} = \min_{z(i)=j} t_{\text{start},i}$$

$$T_{\text{end},j} = \max_{z(i)=j} t_{\text{end},i}$$

berechnen lassen. Der Kunde gibt bei der Erstellung des Auftrags j einen gewünschten Zieltermin $T_{\text{end},j}^*$ an. Dieser Zieltermin soll möglichst wenig von der geplanten Endzeit abweichen. Damit ergibt sich eine weitere Zielsetzung zu

$$\min \left[\sum_{j=1}^n T_{\text{warte},j} \right] = \min \left[\sum_{j=1}^n |T_{\text{end},j} - T_{\text{end},j}^*| \right]. \quad (3.2)$$

3.3.2 Definition von Nebenbedingungen

Zur genaueren Beschreibung des Zielsystems ist es erforderlich, auch dessen Nebenbedingungen zu kennen und mathematisch abzubilden. Die für die Ermittlung des Optimums erforderlichen Beschränkungen, welche sich in Nebenbedingungen bemerkbar machen, sollen an dieser Stelle jedoch nicht diskutiert werden. Da es sich bei den Nebenbedingungen in erster Linie um anwendungsspezifische Restriktionen handelt, ist dieser Punkt für die

Methode vorgesehen, eine allgemeingültige Auflistung wäre aber vermessen. Die Definition der Nebenbedingungen für einen konkreten Anwendungsfall kann dem Kapitel 4 entnommen werden.

3.4 Qualitätsmodell zur Optimierung

3.4.1 Allgemeines

Mit der zeitlichen Fixierung des Produktionsprogramms nach Abschnitt 3.3 ist die Grundlage geschaffen, um den Belegungsplan auch entsprechend der zu erreichenden Produktqualität zu verbessern. Um dies zu ermöglichen, ist zunächst erforderlich, die Qualität (subjektive Größe) als objektive Einflussgröße zu erfassen. In Abschnitt 2.4.3 ist gezeigt, wie ein Zusammenhang zwischen Produktionsprozess und resultierender Produktqualität in Abhängigkeit des transienten Produktverhaltens beschrieben werden kann. Als Grundlage für einen vorausgeplanten steuernden Eingriff in den Produktionsprozess ist ein Abbild dieses Verhaltens notwendig. Insbesondere betrifft dies die Modellierung der zeitabhängigen Prozesswerte, welche einen Einfluss auf das transiente Produktverhalten nehmen können. Als Beispiel sei hier die Temperatur oder die Luftfeuchte angeführt.

Dieses Abbild soll als sog. Produktmodell ausformuliert werden und das transiente Verhalten eines Produktes unter Einwirkung eines Verarbeitungsprozesses abbilden.

Auf Basis des Einwirkens von Prozessgrößen wie bspw. Temperatur lässt sich ableiten, dass ein grundsätzlich erlaubter Ansatz der eines (thermischen) Ersatzschaltbildes ist. Unter dieser Annahme lässt sich ein Produktmodell aufbauen, welches Aussagen über das Verhalten des Produktes im Verarbeitungsprozess sowie die dazu erforderlichen Prozessparameter erlaubt.

Durch den Wärmewiderstand³ und die Wärmekapazitäten⁴ im Lebensmittel können zeit-

³Bei einem Wärmewiderstand R_{th} handelt es sich um eine Größe zur Kennzeichnung des Wärmeübergangsverhaltens an Wänden oder durch diese hindurch, die in Anlehnung an den elektrischen Widerstand definiert wird. Dabei entspricht der Wärmestrom ϕ dem elektrischen Widerstand und die treibende Temperaturdifferenz der elektrischen Potentialdifferenz. Einheit: [K/W] (HERWIG 2000).

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\phi}$$

⁴Bei der Wärmekapazität handelt es sich um eine extensive Zustandsgröße, die in ihrer massebezogenen Form angibt, wie groß die Energiespeicherfähigkeit eines Fluids oder eines Körpers ist. Einheit: [J/KgK] (HERWIG 2000)

veränderliche Vorgänge, die qualitätsrelevant sind, beschrieben werden. Besonders bei großstückigen Lebensmitteln hinkt die Kerntemperatur der Prozesstemperatur hinterher (BOGNÁR & PIEKARSKI 1986). Deshalb kann die Garzeitveränderung (Gleichung 3.3) bzw. die Zeit bis zum Garendpunkt (Gleichung 2.11) laut BOGNÁR & PIEKARSKI (1986) nur vorausberechnet werden, falls:

- die Lebensmittelparameter (Wärmeübergangswiderstand, Leitwert, etc.),
- die Charakteristika des Prozesses und
- der Temperaturverlauf im Lebensmittel

bekannt sind. Aus diesen oben genannten Gründen wird in den folgenden Abschnitten ein Lebensmittelmodell und ein Umgebungsmodell erstellt, um den benötigten Kerntemperaturverlauf abbilden zu können.

3.4.2 Prozessanalyse

Für die hier vorgestellte Methode ist das Verfahren des Garens von besonderer Bedeutung. Daher soll gezielt darauf eingegangen werden. Unter dem Begriff *Garen* werden eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren verstanden. Diese wurden in der Vergangenheit hauptsächlich phänomenologisch beschrieben. Allgemein ist einem Lebensmittel zum Zweck des Garens und weiterer Verarbeitungsverfahren Energie zuzuführen. Dadurch wird in erster Linie ein Aktivierungsenergieniveau erreicht, welches zu lebensmittelkinetischen Reaktionen innerhalb des Gargutes führt. Diese Reaktionen haben Einfluss auf alle Erscheinungsformen (gemäß JÄGER (2004)) des Lebensmittels. Sowohl Farbe, Textur, Geschmack und Form können verändert werden. Des Weiteren hat der Garprozess entscheidenden Einfluss auf den Genuss und den Nährwert unmittelbar vor dem Verzehr (ANDREÄ ET AL. 2010). Der Energieeintrag in das Lebensmittel erfolgt durch Wärmeleitung⁵ bzw. durch Wärmestrahlung⁶. Eine Übersicht über die verschiedenen Garverfahren und die dazugehörige Art der Wärmeübertragung ist in Abbildung 3.2 zu sehen.

Die maßgeblichen auf das Verarbeitungsergebnis einwirkenden und beeinflussbaren Parameter im Garprozess sind die Temperatur ϑ und die Einwirkzeit t_e . Für wärmebedingte Effekte im Gargut muss eine bestimmte Temperaturbeaufschlagung gewährleistet sein, um die

⁵Die Wärmeleitung (Konvektion oder Wärmeleitung im Festkörper) ist ein Wärmetransportmechanismus, der in festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen auftritt. Energieträger sind hierbei Atome, Moleküle, Elektronen oder Photonen (BÖCKH & WETZEL 2011).

⁶Bei der Wärmestrahlung wird die Wärmeenergie mittels elektromagnetischen Wellen auf das Medium übertragen. Die Wärmeübertragung findet hier im Gegensatz zur Wärmeleitung ohne Materialtransport statt (BÖCKH & WETZEL 2011).

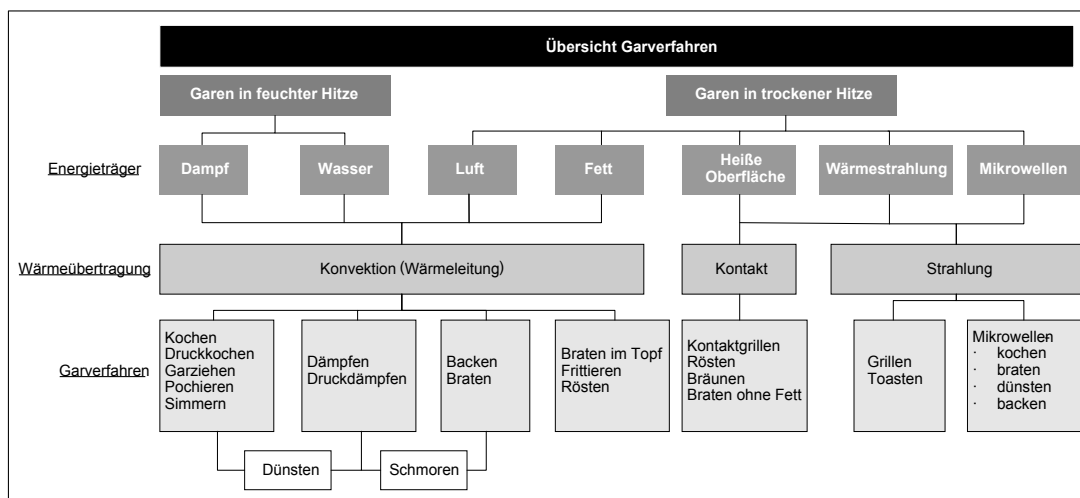


Abbildung 3.2: Übersicht über die verschiedenen Garverfahren (in Anlehnung an BOGNÁR (1987))

gewünschte Qualität zu erreichen. Andererseits darf auch ein gewisser Temperatureinfluss nicht überschritten werden, da sonst unerwünschte, qualitätsmindernde Effekte auftreten können (WESTPHAL ET AL. 1996). Es besteht beim Garen ein funktioneller Zusammenhang zwischen der Gartemperatur und -zeit. Die van-'t Hoff'schen Reaktionsgeschwindigkeit-Temperaturregel (RGT-Regel, Formel 3.3) beschreibt diesen Zusammenhang, dem auch Lebensmittel im Temperaturbereich um 100 °C unterliegen (BOGNÁR & PIEKARSKI 1986).

$$Q_{10} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{\frac{10K}{(T_2 - T_1)}} \quad (3.3)$$

Q_{10} ist der Faktor, um den die Reaktionsgeschwindigkeit steigt, wenn sich die Temperatur um 10 Kelvin erhöht. R_1 und R_2 sind dabei die Reaktionsgeschwindigkeiten. Das bedeutet, wie viele Teilchen pro Zeit in dieser Reaktion bei der entsprechenden Temperatur T_1 bzw. T_2 umgesetzt werden. Da diese Formel nur eine Abschätzung erlaubt (WESTPHAL ET AL. 1996), wurde die RGT-Regel zur Arrhenius-Gleichung (Formel 3.4) erweitert. Die Arrhenius-Gleichung beschreibt ebenfalls in einer Näherung die quantitativen Temperaturabhängigkeiten von physikalischen oder chemischen Prozessen, bei welchen eine Aktivierungsenergie zur Initiierung des Prozesses überwunden werden muss. Damit ist es möglich, eine Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k_v zu ermitteln, mit welcher die Geschwindigkeit einer konzentrationsabhängigen Reaktion diverser Stoffe berechnet werden kann. Die Konstante k_v ist konzentrationsunabhängig und rein von der Temperatur abhängig. Somit kann auch die Geschwindigkeit eines Garprozesses, welcher ebenfalls eine

thermisch abhängige Reaktion darstellt, berechnet werden.

$$k_v = k_0 \cdot e^{-\frac{E_{k_0}}{(R_{allg} \cdot T)}} \quad (3.4)$$

Zur Berechnung der Formel ist es erforderlich, die Aktionskonstante k_0 der an der Reakti-

mit:

k_v	=	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante
k_0	=	Aktionskonstante
E_{k_0}	=	Arrhenius'sche Aktivierungsenergie
R_{allg}	=	allg. Gaskonstante [8, 314 J · K ⁻¹ · Mol ⁻¹]
T	=	Temperatur

on beteiligten Komponenten zu kennen. Diese Konstante ist teilweise nur für bestimmte Abläufe des Garprozesses bekannt, bspw. für die Eiweißdenaturierung. Eine ganzheitliche Abbildung aller Stufen eines Garprozesses ist nicht gegeben. Mittels empirischer Untersuchungen können die erforderlichen Werte bestimmt werden. Derartige Untersuchungen sind nicht Bestandteil dieser Arbeit, wodurch diese Möglichkeit zur Ermittlung der Werte nicht gegeben ist. Daher werden im Folgenden Ergebnisse vergangener Versuchsreihen als Grundlage herangezogen, um mittels der Arrhenius-Gleichung zum Garegrad von Lebensmitteln zu gelangen.

3.4.3 Prozess- und Umgebungsmodellierung

Die Gesamtzeit beim Garen (bei Umgebungsdruck) setzt sich im Allgemeinen aus zwei Phasen zusammen, der sogenannten Steigzeit (Aufheizen der Anlage auf Betriebstemperatur $\vartheta_{Umgebung} \neq const.$) und der Haltezeit (konstante Prozesstemperatur $\vartheta_{Umgebung} = const.$). Der Index *Umgebung* ist in dieser Betrachtung als Umgebung des Produktes zu verstehen. Es handelt sich somit um die Bedingungen im Volumen der Prozesskammer. Zur Berücksichtigung der Heizkurve bei der Modellierung ist zunächst der Temperaturverlauf beim Aufheizen bzw. beim Abkühlen zu beschreiben. Mit Hilfe aufgezeichneter Kurven lässt sich je ein Verlauf modellieren, welcher die beiden Betriebsphasen der Anlage wiedergeben kann. Dabei können teilweise Vereinfachungen vorgenommen werden. Findet eine forcierte Erwärmung oder Abkühlung statt, folgt die Temperaturkurve innerhalb bestimmter Grenzen einem linearen Verhalten.

Handelt es sich zum Beispiel bei einem Aufwärmvorgang um initiiertes und durch Heizelemente getriebenes Verhalten, kann dieses Verhalten mit Hilfe der Gleichung 3.5 beschrieben werden. Im Gegensatz dazu gilt für den Abkühlvorgang (Gleichung 3.6), wenn er nicht durch aktive Kühlung unterstützt wird, dass er einem typischen exponentiellen Verlauf

folgt. Dies spiegelt sich in den nachfolgenden Gleichungsansätzen wider.

$$\vartheta_{Umgebung} = \Delta\vartheta_{Steig} \cdot t + \vartheta_{Start} \quad (3.5)$$

$$\vartheta_{Umgebung} = (\vartheta_{Start} - \vartheta_{End}) \cdot e^{\frac{-1}{\tau} \cdot t} + \vartheta_{End} \quad (3.6)$$

Für die vollständige Beschreibung eines Produktionsprozesses im Ofen, müssen die einzelnen Elemente des Gesamtprozesses analysiert werden. Das bedeutet, es bedarf einer Betrachtung der Vorgänge, die zu einer Temperaturänderung führen. Wenn davon ausgegangen wird, dass ein Planungsalgorithmus mit einer konstanten Temperatur über den kompletten Garzeitraum plant, kann festgestellt werden, dass eine Störung im Temperaturverlauf nur mit einem Bestückungsvorgang zusammenhängt. Ein Bestückungsvorgang kann sowohl Einbringen als auch Ausbringen eines Produktes in/aus der Prozesskammer sein. Dieser Vorgang läuft, mit Blick auf den Temperaturverlauf, wie folgt ab:

1. Öffnen der Anlagentür \Rightarrow Abkühlung
2. Bestücken des Ofens mit einem Produkt \Rightarrow Abkühlung
3. Schließen der Ofentür \Rightarrow Abkühlung bis Tür geschlossen
4. Einstellen der gewünschten Temperatur \Rightarrow Aufheizen

Der Zeitanteil für den Abkühlvorgang wird als ein Vorgang betrachtet. Dieser Vorgang ist anlagenspezifisch und kann durch eine Zeitkonstante $t_{Abkühl}$ repräsentiert werden. Mit diesen Erkenntnissen und den Gleichungen 3.5 bis 3.6 ergibt sich die abschnittsweise definierte Funktion für das Verhalten der Verarbeitungsanlage. Diese beruht wieder auf den thermodynamischen Phänomenen und ist wie folgt zusammenzufassen:

$$\vartheta_{Anlage}(t) = \begin{cases} \vartheta_{Umgebung} + (\vartheta_{Start} - \vartheta_{Umgebung}) \cdot e^{\frac{-1}{\tau} \cdot t} & | 0 \leq t \leq t_{Abkühl} \\ \Delta\vartheta_{Steig} \cdot t + \vartheta_{t=t_{Abkühl}} & | t_{Abkühl} < t \leq \frac{\vartheta_{End} - \vartheta_{t=t_{Abkühl}}}{\Delta\vartheta_{Steig}} \\ \vartheta_{End} & | t > \frac{\vartheta_{End} - \vartheta_{t=t_{Abkühl}}}{\Delta\vartheta_{Steig}} \end{cases} \quad (3.7)$$

mit:

- $\vartheta_{Anlage}(t)$ = Temperatur-Zeit-Verlauf einer modellierten Anlage
- $\vartheta_{Umgebung}$ = Temperatur der Umgebung, bspw. innerhalb eines Ofens
- ϑ_{Start} = Start-/Ausgangstemperatur des Produktes
- ϑ_{End} = End-/Zieltemperatur
- τ = Zeitkonstante des Temperiervorgangs
- $t_{Abkühl}$ = spezifische Zeit des Abkühlens während einer Bestückung

3.4.4 Produktanalyse

Die Produktanalyse verfolgt das Ziel, die grundlegende Basis für die nachfolgende Modellierung eines Produktes zu schaffen. Dabei handelt es sich in erster Linie um empirische Versuchsreihen, welche aufbereitet werden müssen, um die Grundlage für die Validierung eines späteren Modells darzustellen.

Das Vorgehen zur Bestimmung der Kriterien des Garegrades in diesem Schritt folgt den Ausführungen von PIEKARSKI & ZACHARIAS (1981). Im Abschnitt 2.4.3.1 wurde dies vorgestellt. Demnach sind Garversuche durchzuführen, um den Zusammenhang zwischen den Prozessparametern und der Verarbeitungsqualität herauszuarbeiten. Das Modell zur Sinnessensorik von JÄGER (2004) ist dafür im Sinne der Beschreibung des Genusswertes zu erweitern. Es zeigt sich, dass insbesondere ein transientes Produktverhalten bei der Bewertung der Qualität zu berücksichtigen ist. Zeit ist kein von den menschlichen Sinnen zu erfassender Parameter, dennoch soll die Qualität (hier ausgedrückt durch den Genusswert) in diesem Zusammenhang als zeit-veränderliche Größe betrachtet werden. Dazu ist in der Abbildung 3.3 eine Erweiterung der Ausführungen von Jäger (Abbildung 2.9) dargestellt. Die

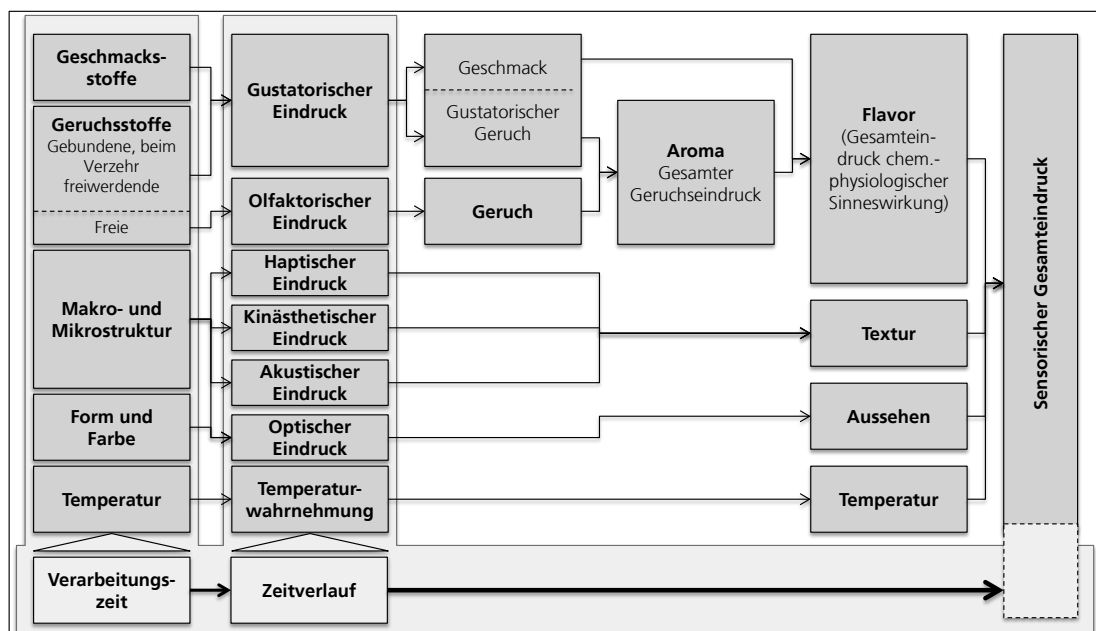


Abbildung 3.3: Erweiterte Sinnessensorik nach JÄGER (2004) (dunkel: Jäger; hell: Erweiterung um transientes Verhalten)

Produkte als solche werden im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich über den Genusswert hinsichtlich der Ergebnisqualität eingeordnet. Aus der Abbildung 3.3 geht bereits der wesentlich zu betrachtende Prozessparameter hervor. Da die Temperatur auch nach dieser Darstellung eine exponierte Rolle als Beeinflusser der Qualität in der Verarbeitung von Lebensmitteln spielt, soll im Weiteren deren Einfluss auf die Qualität modelliert werden.

Da sich auch der in Abschnitt 2.4.4 vorgestellte Garegrad im Wesentlichen darauf stützt, sollen im Weiteren nur noch die Einflüsse der Temperatur betrachtet werden, wenngleich das Vorgehen auch für bspw. die Luftfeuchte anwendbar ist. Geht man für ein Produkt davon aus, dass ein Garegrad $G = 1$ ein optimales Verarbeitungsergebnis widerspiegelt, kann dieses Maß auch als Repräsentant für Qualität gewählt werden. Im Folgenden ist aus diesem Grund das Ziel, den zeitlich veränderlichen (transienten) Temperaturverlauf im Verhältnis zur optimalen Einwirkzeit zu ermitteln. Damit erhält man einen funktionalen Zusammenhang für den Garegrad und somit, nach der genannten Festlegung, auch für die Qualität. Da diese Verhältnisgleichung (Formel 2.12) kein Maximum erreicht, sondern vielmehr einen unendlichen Verlauf aufweist, ist eine spezifische Anpassung vorzunehmen. Für die Verwendung in der Optimierung der Maschinenbelegungsplanung erscheint es sinnvoll, diesen Verlauf bis zum Verhältnis von $G = 1$ heranzuziehen und darüber hinaus davon auszugehen, dass für $G > 1$ die Produktqualität abnehmen wird.

3.4.5 Produktmodellierung

Zur Ermittlung des Temperaturverlaufs im Lebensmittel ist ein thermodynamisches Modell des Aufheizvorganges zu erstellen. Dafür werden einige Vorüberlegungen getroffen. Lebensmittel sind grundsätzlich als sehr unregelmäßige und damit geometrisch schwer beschreibbare Objekte anzusehen. In Bezug auf das Material ist eine breite Streuung hinsichtlich Inhomogenität nachweisbar. Es ist offensichtlich, dass bspw. Kartoffeln oder Gemüse im Allgemeinen eher aus einer homogenen Materialzusammensetzung bestehen. Betrachtet man jedoch eiweißhaltige Hauptspeisen, wie Fleisch, kann nicht mehr davon ausgegangen werden, dass das Produkt in einer isotropen Struktur zusammengesetzt ist. Es finden sich unterschiedliche Materialien innerhalb kleiner räumlicher Ausdehnung, welche insbesondere bei der Modellierung zu berücksichtigen sind. Beispielsweise ist bei Fleisch davon auszugehen, dass es neben dem eigentlichen Muskelgewebe zusätzlich Fett, Sehnen oder Knocheneinschlüsse besitzt. Für eine grundlegende Beschreibung eines Produktes seien im Folgenden einige Parameter genannt, welche für eine Ermittlung des Temperaturverlaufs im Lebensmittel erforderlich sind. Diese dienen zur Beschreibung des betrachteten Produktes. Weiterhin bieten die Eingangsparameter die Möglichkeit, eine Anpassung an verschiedene Lebensmittel mit ihren Form- oder Materialspezifika vorzunehmen. Diese Parameter sind:

- geometrische Form \Rightarrow Kugel bzw. Quader
- entsprechend der Form, die Ausmaße \Rightarrow Durchmesser in cm bzw. Höhe, Breite und Länge in cm

- Masse \Rightarrow in kg
- die spezifische Wärmeleitfähigkeit $\lambda \Rightarrow$ in W/mK
- die spezifische Wärmekapazität $c \Rightarrow$ in KJ/kgK
- den Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha \Rightarrow$ in W/m²K
- die empirisch zu ermittelnde Konstante a \Rightarrow siehe Garkurven
- den lebensmittelabhängigen Faktor b \Rightarrow siehe Garkurven
- die Lagertemperatur des Lebensmittels \Rightarrow in °C

Weitere Parameter des aufzubauenden Modells (z.B. Volumina, Oberflächen, Dichte) sind von diesen Werten abhängig und können daraus ermittelt werden.

In allgemeiner Betrachtung handelt es sich beim Kochen um einen instationären, thermodynamischen Prozess, welcher zu einem räumlich und zeitlich abhängigen Temperatureintrag in das Produkt führt. Dabei treten unterschiedliche Phänomene in Erscheinung. Zu nennen sind insbesondere die *Wärmeleitung* innerhalb des Produktes sowie der sog. *Konvektive Wärmeübergang* an der Grenzschicht zwischen dem Produkt und dem umgebenden Fluid.

Um zunächst alle diese Phänomene zu berücksichtigen, werden die grundsätzlichen Beschreibungen des raumfesten Mediums nach der Fourier'schen Differentialgleichung angewandt. Diese berücksichtigt zudem im allgemeingültigen Fall eine Materialvarianz im betrachteten Volumen. Die Zerlegung in infinitesimale Volumenelemente führt zu einer erheblichen Vergrößerung des zu berechnenden Lösungsraums, weshalb solche Probleme nach POLIFKE & KOPITZ (2009) praktisch mit aufwendigen numerischen Simulationen gelöst werden.

Diese Gleichung im Allgemeinen beschreibt das transiente Temperaturfeld in seiner Orts- und Materialabhängigkeit und ist nachfolgend aufgeführt.

$$\phi = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{\omega} \quad (3.8)$$

Da die geometrische Form, wie angedeutet, nicht trivial zu beschreiben ist, wird im Folgenden eine Vereinfachung für die Modellierung vorgenommen. Es werden die betrachteten Lebensmittel als geometrisch regelmäßige Körper betrachtet. Die Form sei dabei ein Quader oder eine Kugel. Hierfür existieren in der Thermodynamik bereits Lösungen, die bei POLIFKE & KOPITZ (2009) oder HERWIG (2000) nachgelesen werden können. Die Betrachtung als regelmäßige Körper ist zulässig, wenn eine Maximierung des einschließenden

mit:

ϕ	=	Wärmestrom
λ	=	spez. Wärmeleitwert
ρ	=	Dichte des Produktes
c	=	spez. Wärmekapazität
x, y, z	=	Ortskoordinaten
t	=	Zeit
T	=	Temperatur der Schicht
$\dot{\omega}$	=	Quelldichte, Maß der im Prozess freigesetzten Energie

Volumens vorgenommen wird. Daraus folgt, dass das überstehende Volumen im Vergleich zum eingeschlossenen Volumen als vernachlässigbar klein, in Bezug auf die Beeinflussung der thermodynamischen Effekte und Temperaturverläufe, anzusehen ist. Im Zuge der Berücksichtigung unterschiedlicher Materialien innerhalb eines Lebensmittels soll für die Modellierung eine Idealisierung der Betrachtung vorgenommen werden. Geht man davon aus, dass sich verschiedene Materialien mit unterschiedlichen Materialparametern innerhalb eines Lebensmittels finden lassen, ist es zielführend, diese als in je einem Volumen vereint anzunehmen. Da die örtliche Ermittlung und Verteilung der unterschiedlichen Materialien ausgeschlossen ist, sollen diese im Folgenden konzentriert werden. Die Betrachtung von konzentrierten und damit homogenen Materialvolumina führt im Weiteren zu einer Abstraktion in Form eines Schichtmodells. Dieses Schichtmodell bietet durch Reihenschaltung der Schichten sowohl die Möglichkeit der Simplifizierung auf die Betrachtung eines *einschichtigen* Modells (bspw. Kartoffel, idealisiertes Fleisch) als auch die Beschreibung komplexer geschichteter Lebensmittel (bspw. reales Fleisch, Rollbraten). Nimmt man nun als gegeben an, dass innerhalb einer Schicht die gleichen Materialparameter gelten, so kann eine Vereinfachung der Formel 3.8 vorgenommen werden. Unter Anwendung der Temperaturleitfähigkeit $a_{\vartheta} = \lambda/(\rho \cdot c)$ gilt in der Vereinfachung:

$$\frac{1}{a_{\vartheta}} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{\omega}}{\lambda} \quad (3.9)$$

Zudem gilt für Wärmeausgleichsvorgänge in der Schicht (ebene Platte) unter Annahme einer eindimensionalen Wärmeleitung (mit $A \gg r$) die Vereinfachung:

$$\frac{1}{a_{\vartheta}} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{\omega}}{\lambda} \quad (3.10)$$

Damit handelt es sich bei der Betrachtung des Temperaturfeldes lediglich noch um ein eindimensionales Problem. Zur Rückführung auf ein ortsunabhängiges Problem sei nun zusätzlich die Methode der Blockkapazität (vgl. POLIFKE & KOPITZ (2009)) angewandt. Diese Methode stellt eine Näherungslösung für diese Art der instationären Prozesse dar. Man

geht dabei davon aus, dass örtliche Temperaturunterschiede innerhalb eines wärmeleitenden Körpers im Vergleich zu einer charakteristischen Temperaturdifferenz ΔT vernachlässigbar klein bleiben.

$$|T(\vec{x}_1, t) - T(\vec{x}_2, t)| \ll \Delta T \quad \forall t, \vec{x}_1, \vec{x}_2 \quad (3.11)$$

Die Bezugstemperaturdifferenz ΔT kann dabei z.B. die Differenz zwischen der Anfangstemperatur $\vartheta_{Produkt}$ des Körpers und der Umgebungstemperatur $\vartheta_{Umgebung}$ sein. Bei instationären Wärmeübertragungsprozessen ist dann nur die Zeit- nicht aber die Ortsabhängigkeit der Temperatur T zu berücksichtigen:

$$T(\vec{x}, t) \approx T(t) \quad (3.12)$$

Diese Vereinfachung kann immer angewendet werden, wenn die Wärmeleitung im Körper sehr gut ist im Vergleich zur konvektiven Wärmeübertragung am Rand (POLIFKE & KOPITZ 2009). Dies gilt zum Beispiel bei kleinen Biot-Zahlen⁷. Unter Annahme dieser Vereinfachungen und der Bilanzierung des vollständigen Volumens V (anders als bei der Fourier'schen Betrachtung, welche Volumenelemente betrachtet) ergibt sich die Bilanzgleichung für das Temperaturfeld zu:

$$\phi = -\alpha \cdot A \cdot (T(t) - T_{Umgebung}) = c \cdot \rho \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} \quad (3.13)$$

Für die Modellierung des Temperaturverhaltens im Lebensmittel ist nachfolgend das bereits angedeutete Schichtmodell hergeleitet. Dieses soll in der allgemeinen Form Gültigkeit für jegliche Form einer Schicht besitzen. Das bedeutet, dass sowohl die Grenzschicht im konvektiven Wärmeübergang als auch jede beliebige Materialschicht damit repräsentiert werden kann. Je nach Detaillierungsgrad des Produktmodells (vgl. Abbildung 3.4) können mehrere Schichten in Reihe geschaltet werden. Die Anregung erfolgt jeweils durch den umgebenden Prozess und dessen Temperaturverlauf. In diesem thermodynamischen System wird in jeder Schicht die Wärmemenge $\int \phi dt$ gespeichert. Als Wärmestrom ϕ wird dabei die übertragene Wärmemenge je Zeiteinheit bezeichnet (VDI 2013, Teil B).

Der Eintrag von Wärmeenergie in einer Schicht i führt zur Änderung der inneren Energie dieser Schicht. Dies wiederum zieht eine Veränderung der Temperatur ϑ_i nach sich. Eine dadurch aufbauende Temperaturdifferenz zwischen zwei benachbarten Schichten $\vartheta_i > \vartheta_{i+1}$ führt zu einem Wärmestrom von Schicht i zu Schicht $i + 1$. Der Wärmespeicher einer Schicht kann über die Summe der Wärmeenergiemenge, die durch die Wärmekapazität C_{th}

⁷Die Biot-Zahl gibt den Zusammenhang zwischen Wärmeübergangskoeffizienten und Wärmeleitfähigkeiten an den thermischen Grenzschichten im Falle eines konvektiven Wärmeübergangs wieder. $Bi = \frac{\alpha \cdot A}{\lambda}$

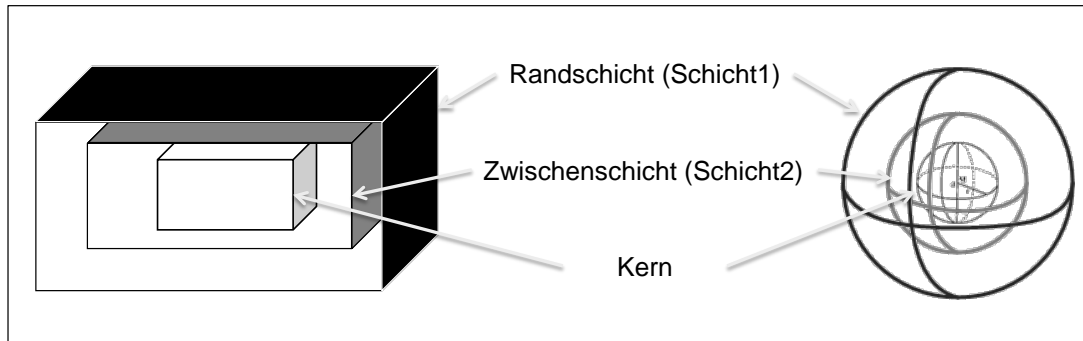


Abbildung 3.4: Geometrische Schichtmodelle für quader- und kugelförmige Lebensmittel

der Schichten maßgeblich beeinflusst wird, beschrieben werden:

$$\phi = C_{th} \cdot \int T \cdot dt = c \cdot m \cdot \int T \cdot dt \quad (3.14)$$

mit:

- ϕ = Wärmestrom
- c = spezifische Wärmekapazität
- C_{th} = thermische Wärmekapazität
- m = Masse der Schicht
- t = Zeit
- T = Temperatur der Schicht

Weiterhin setzt jede Schicht dem Wärmetransport des Wärmestromes ϕ von einer Schicht zur nächsten einen Wärmewiderstand R_{th} der Form 3.16 entgegen. Hierbei ist darauf zu achten, dass sich der Übergangswiderstand, welcher sich ausschließlich in der Grenzschicht zwischen Fluid und Produkt ergibt und der Wärmeleitwiderstand innerhalb der Schichten des Festkörpers unterschiedlich berechnen. Während der Grenzschichtwiderstand lediglich vom Übergangskoeffizienten α und der durchströmten Fläche abhängt und sich zu:

$$R_{th} = \frac{1}{\alpha \cdot A} \quad (3.15)$$

mit:

- α = Wärmeübergangskoeffizient
- A = durchströmte Fläche

ergibt, ist der Wärmeleitwiderstand vom Leitwert und von der gesamten Geometrie einer Schicht abhängig:

$$R_{th} = \frac{s}{\lambda \cdot A} \quad (3.16)$$

mit:

A = durchströmte Fläche

s = Dicke der Schicht

Gleichermaßen gilt jedoch, dass der Wärmewiderstand analog zum elektrischen Widerstand verwendet werden kann. Bei dieser Analogiebetrachtung entspricht der Wärmestrom ϕ dem elektrischen Strom und der Temperaturabfall $\Delta\vartheta$ dem Spannungsabfall am Widerstand. Aus dieser Erkenntnis folgt:

$$\phi_{Schicht\ i+1} = \frac{\Delta\vartheta_{Schicht\ i,\ i+1}}{R_{Schicht\ i}} \quad (3.17)$$

Die Ursache für den Wärmestrom ist eine Temperaturdifferenz zwischen Schicht i und Schicht $i + 1$ bzw. der Umgebungstemperatur $\vartheta_{Umgebung}$ und der Randschichttemperatur $\vartheta_{Schicht\ 1}$. Daraus lässt sich folgende Bilanzgleichung bilden:

$$\Delta\vartheta_{Schicht\ i,\ i+1} = \vartheta_{Schicht\ i} - \vartheta_{Schicht\ i+1} \quad (3.18)$$

Nachdem die Gleichung 3.14, aufgelöst nach dem Schichttemperaturunterschied, in den Bildbereich (3.19) transformiert werden kann, ist es möglich aus den Gleichungen 3.15 oder 3.16 bis 3.19 ein Blockschaltbild zu erstellen, welches eine Schicht repräsentiert.

$$\frac{1}{m \cdot c} \cdot \int \phi dt \Rightarrow \frac{\phi}{m \cdot c} \quad (3.19)$$

Dieses Blockschaltbild ist in Abbildung 3.5 zu sehen. Das Blockschaltbild repräsentiert

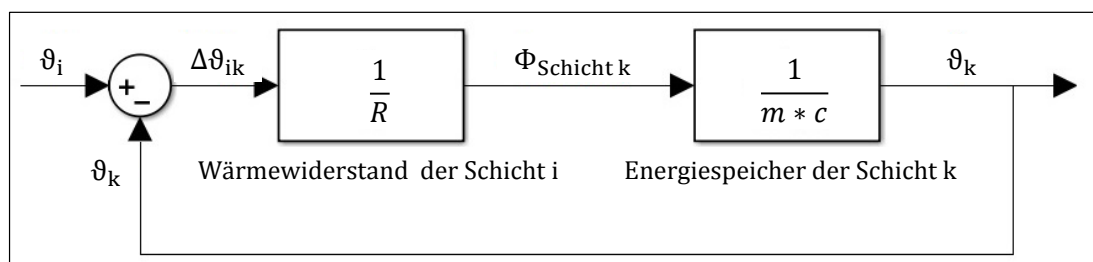


Abbildung 3.5: Blockschaltbild einer Schicht.

den beschriebenen Wärmewiderstand sowie den Energiespeicher in Form einer Wärmekapazität. Eine Prinzipskizze, welche die Grundlagen der Ausführungen zusammenfasst, ist in Abbildung 3.6 gezeigt. Die dadurch ermöglichte Modellierung eines Lebensmittels ist eine deutliche Vereinfachung mit Blick auf die ablaufenden lebensmittelphysiologischen Prozesse. In dieser Abstraktion ist auf die Abbildung von Nichtlinearitäten, welche auch unter dem Einfluss der Temperatur aufkommen, verzichtet worden.

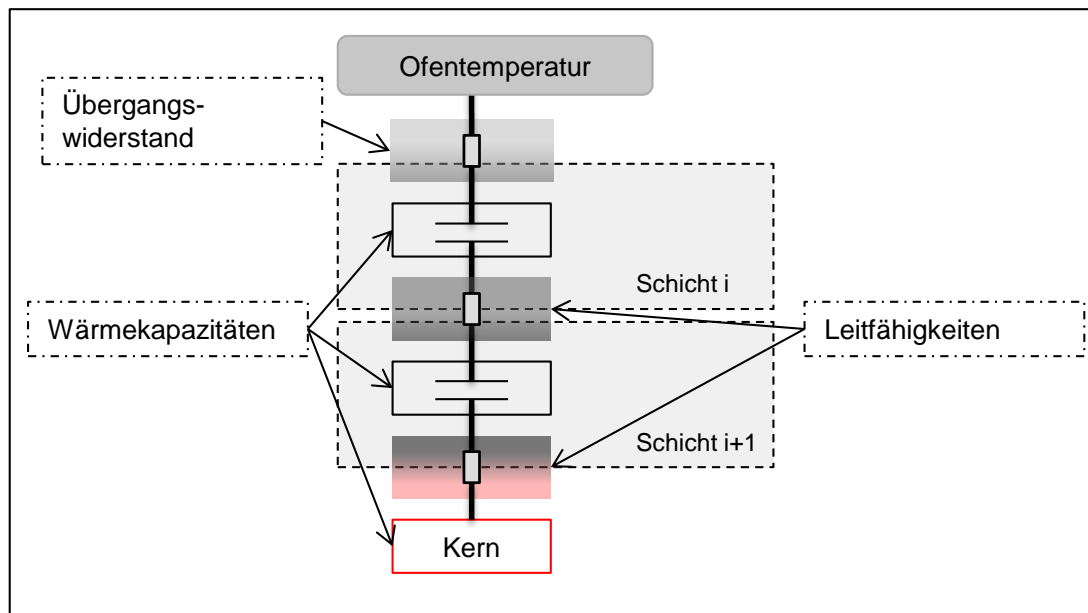


Abbildung 3.6: Prinzipskizze des Lebensmittelmodells.

Hier ist zu sehen, dass sich Lebensmittel auch aus mehreren Schichten kombinieren lassen. Im Ergebnis erhält man das Temperaturverhalten im Kern des Lebensmittels. Der Kern ist gemeinhin als ein schwerpunktzentraler Punkt innerhalb des betrachteten Produktes zu verstehen. Für die allgemeine Betrachtung ist der Kern als ein infinitesimal kleines Volumenelement im Zentrum des Produktes. Dieses Volumen ist mathematisch betrachtet das Element, welches den maximalen Abstand von allen Randvolumenelementen besitzt. Aus dem Wissen über das transiente Temperaturverhalten im Kern eines Produktes können, auch bei dieser vereinfachten Betrachtung, hinsichtlich der Verarbeitungsqualität Ableitungen getroffen werden. Diese auf die Einwirkdauer zurückführbaren Aussagen sind die Grundlage für eine Integration in einer Fertigungssteuerung.

3.4.6 Einfluss- und Integrationsmöglichkeiten zur Optimierung der Belegungsplanung

Mit den aufgestellten Funktionen kann der Kerntemperaturverlauf eines Produktes abgebildet werden. Damit sind die Voraussetzungen nach BOGNÁR & PIEKARSKI (1986)

erfüllt, um den Garezeitpunkt eines Lebensmittels vorausberechnen zu können. Wird der Garegrad (vgl. Abschnitt 2.4) als Qualitätsmaß betrachtet, ist mit dem aufgestellten Modell die Möglichkeit geschaffen, die Qualität zu ermitteln und über die Einwirkdauern gezielt einzustellen. Der Garegrad nach der Formel 2.12 besitzt auch bei einer Zeitverlaufsbeachtung keine Extremwerte. Vielmehr gibt das Verhältnis auch für nicht sinnvolle Kombinationen von Einwirkzeiten einen Wert für den Garegrad. Für die Anwendung in der Maschinenbelegungsplanung erscheint es zielführender, wenn man einen maximalen Wert einstellt. Für eine Optimierung im Sinne der Terminierung ist dies sogar zwingend erforderlich. Dieser kann erzeugt werden, indem man den Verlauf des Grafen des Garegrades (vgl. Abbildung 4.25) dahingehend interpretiert, dass er gleichermaßen eine Qualität des zu verarbeitenden Produktes wiedergibt. In dieser Arbeit sei die Qualität Q als eine einheitenlose Größe im Bereich $[0 \dots 1]$ (schlecht...sehr gut) festgelegt. Im Sinne dieser Qualitätsbetrachtung sei folgender Zusammenhang aus dem Garegrad abgeleitet:

$$G = \frac{t_e}{t_G(\vartheta)} = 1 \equiv Q = 1 \quad (3.20)$$

Der Grenzwert 1 gemäß dieser Formel lässt sich einstellen, indem man den Verlauf des Grafen am Schwellwert 1 spiegelt. Daraus ergeben sich drei Erkenntnisse. Da sich der Garegrad im Bereich $G < 1$ exponentiell entwickelt, steigt in diesem Bereich auch die Qualität exponentiell schnell an. An der Extremstelle $G = 1$ folgt der Garegrad seinem Verlauf, während die Qualität hier ebenfalls den Wert 1 annimmt und damit in ihrem Verlauf das Maximum erreicht. Im Abschnitt $G > 1$ steigt der Garegrad weiter an. Der Qualitätsverlauf hingegen sinkt gleichermaßen wieder ab. Dies ist dahingehend zu interpretieren, dass eine Einwirkzeit größer der optimalen Einwirkzeit zu einer abnehmenden Qualität führt. Das Verhältnis dieser Zeiten spiegelt dann gemäß PIEKARSKI & ZACHARIAS (1981) den übergaren Bereich wider. Aus diesen Erkenntnissen lässt sich ableiten, dass durch mehrere verschiedene Parametertupel, unter welchen sich der Garegrad von $G = 1$ einstellen lässt, auch ein optimales Verarbeitungsergebnis erreicht wird. Diese Flexibilität bedeutet einen neuen Freiheitsgrad für eine Belegungsplanung. Für die Darstellung des Garegrades hat dies jedoch auch Auswirkungen.

Man kann die Effekte zwei Arten des Einwirkens zuordnen. Zum einen handelt es sich um ein Steuern der Einwirkzeit t_e . Hierbei wird es möglich, selbst bei nicht optimalen Ausgangsparametern der Anlage ein bestmögliches Verarbeitungsergebnis des Produktes zu erzielen. Dies basiert auf der Variabilität der Prozessparameter, insbesondere der Adaptierbarkeit der Einwirkzeit. Ist die Ausgangstemperatur für das gewünschte Produkt zu niedrig, wird die Einwirkzeit erhöht und umgekehrt. Schematisch ist dieser Fall der Abbildung 3.7 zu entnehmen.

3 Methode zur Integration des transienten Produktverhaltens in die Maschinenbelegungsplanung

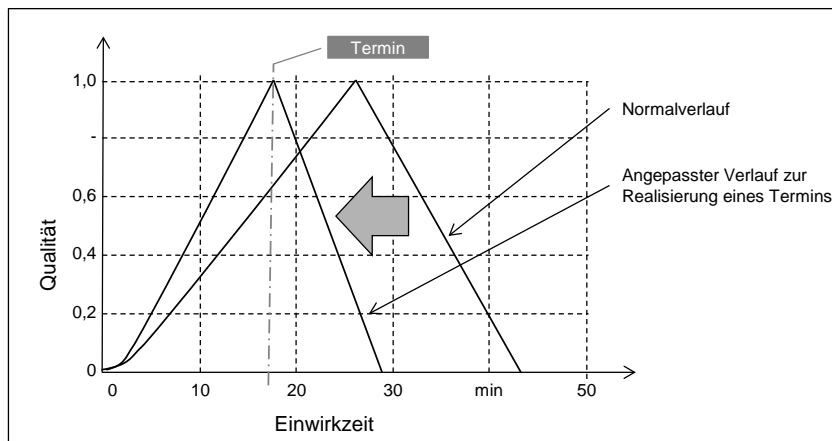


Abbildung 3.7: Verändern der Einwirkzeit

Zum anderen ist aufgrund der Zusammenhänge der Qualitätsfunktion die Möglichkeit gegeben, den Prozess als solchen in seinen Parametern anzupassen. Im Falle einer Verarbeitung verschiedener Produkte in einem Prozessraum (parallele Verarbeitung unter gleichen Prozessparametern) werden sich Wechselwirkungen zwischen den Produkten und deren Verarbeitungsparametern einstellen. Vergleicht man den Normalverlauf des Produktes in der Abbildung 3.8, so wird die Qualitätskurve durch Hinzunehmen eines weiteren Produktes (unterer Kreis, nach ca. 10 Minuten) abgeändert. Ein bereits eingeplantes Produkt kann durch den Einfluss eines neuen Produktes (parallele Verarbeitung, „Störung“) in seiner Parametereinstellung und damit im Fertigstellungstermin beeinträchtigt werden. Abbildung 3.8 zeigt dies durch ein Abknicken der ursprünglichen Qualitätskurve beim Auftreten einer Prozessveränderung.

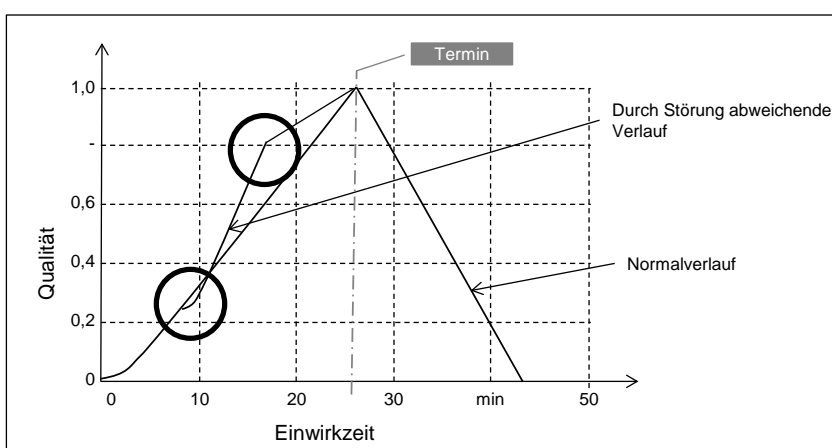


Abbildung 3.8: Steuerung der Prozesse bei Störungen

Das beschriebene Vorgehen ermöglicht jedoch in einem gewissen Umfang, auch unterschiedlich zu verarbeitende Produkte auf Basis ihrer Parameter aneinander anzupassen und dennoch die jeweils gewünschte Qualität einzustellen. Ist die Störung beendet, bspw. wenn

das die Parameter beeinflussende Produkt früher fertiggestellt werden konnte (oberer Kreis, nach ca. 18 Minuten), ist es auf Basis der Erkenntnisse aus dem Lebensmittelmodell möglich, die Prozessparameter so anzupassen, dass der ursprüngliche Zieltermin des Produktes unter Einhaltung des ursprünglichen Qualitätsniveaus eingestellt werden kann.

Das Ermitteln der Prozesswerte erfolgt in diesem Fall anhand der Temperatur-Qualitätsverläufe (Qualitätsprofile) der gleichzeitig zu verarbeitenden Produkte. Darin wird nach Kombinationen der Prozessparameter gesucht, welche der Qualitätsrandbedingung Q_{min} aller Produkte und damit dem Prozessergebnis genügen. Dieses Vorgehen erfolgt ähnlich der Terminplanung auf Basis eines Suchalgorithmus'. Der Pseudocode dafür ist Algorithmus 1 zu entnehmen.

Algorithmus 1 : Pseudocode "Qualitätsermittlung"

```

for  $i = 1$  to  $N_{Produkte}$  gleichzeitig im Ofen do
  Ermittle das Qualitätsprofil von  $i$  zum aktuellen Zeitpunkt  $t$ 
  Ermittle das Qualitätsprofil des neuen Produktes  $j$  mit seinem
  Standardparametersatz
  Berechne Qualitätswert  $Q_i(t)$ 
  while  $\frac{1}{N} \cdot \sum Q_i(t) + Q_j(t) \leq Q_{min}$  do
    Suche Prozesswertetupel bspw.:  $[\vartheta, LF, t_e] \iff \max Q_i(t) + Q_j(t)$ 
  end while
end for

```

Es ist jedoch der Fall, dass gerade der Bestand an notwendigen empirischen Erkenntnissen deutliche Lücken aufweist. Dies hat zur Folge, dass lediglich ausgewählte Produkte valide modelliert werden können. Prozessbedingt zeigt sich in vergleichbaren empirischen Ergebnissen, dass sich die Verläufe bis auf lebensmittelspezifische Nuancen in ihrem Verlauf ähneln. Daraus folgt, dass mit einer logisch aufgebauten stetigen Funktion, welche lebensmittelspezifika berücksichtigt, ein vereinfachtes Modell hergeleitet werden kann. Dieses ist für verschiedenste Produkte anwendbar. Im Folgenden wird eine solche Funktion eingeführt und begründet.

Vereinfachtes Qualitätsmodell Eine gewünschte Zielfunktion soll mit der Eingabe der Zubereitungsparameter die Qualität eines einzelnen Produktes wiedergeben können. Auch hier soll die Qualität als gültige Kennzahl $\in [0, 1]$ dargestellt sein. Demnach ist eine Funktion $q : \mathbb{R}^3 \rightarrow [0, 1]$ zu definieren. Dabei sind verarbeitungsrelevante Parameter zu berücksichtigen. In der hier eingeführten Funktion soll neben der bereits diskutierten *Temperatur* ϑ in $^{\circ}C$, zur Veranschaulichung der Mehrdimensionalität der Problemstellung ebenfalls die *Luftfeuchtigkeit* LF in $\%$ berücksichtigt werden. Für den Qualitätseinfluss der Luftfeuchte sind aktuell keine empirischen Untersuchungen vorhanden, welche eine

Darstellung in einem mathematischen Zusammenhang erlauben würden. Auf Basis des Sinnzusammenhangs, dass es einen optimalen Luftfeuchtegrad geben muss, bei dem sich eine optimale Produktqualität ergibt, wird im Folgenden die Annahme getroffen, dass sich ein zum Temperaturverhalten qualitativ vergleichbarer Verlauf einstellt.

Damit kann festgehalten werden, dass ein für die Verarbeitung produktspezifisches optimales Werteset existiert, welches bei der gesuchten Funktion an der Stelle $(\vartheta_{opt}, LF_{opt})$ einen Funktionswert besitzt, der die maximale Qualität $Q = 1$ zurückliefert. Damit gilt

$$q(\vartheta_{opt}, LF_{opt}) = 1. \quad (3.21)$$

Von diesem Maximum aus betrachtet, muss die Funktion in alle Richtungen streng monoton fallend sein, damit auch lokale Optima ausgeschlossen werden.

Mit diesen Zielkriterien und genannten Erfahrungswerten der Lebensmittelverarbeitung kann nun eine Funktion modelliert werden. Für diese gilt, dass zum einen Produkte, die nicht oder zu wenig gegart worden sind, mit einer schlechteren Qualität bewertet werden als solche, die zu stark gegart wurden. Diese Überlegung lässt sich damit begründen, dass es durchaus Lebensmittel gibt, deren Verzehr im rohen Zustand gesundheitsgefährdende Auswirkungen haben kann (z.B. Geflügelprodukte). Zusätzlich muss auch das vereinfachte Modell Aufwärmprozessen (speziell: Garprozessen) gerecht werden. Dafür wird der Anstieg zum Maximum exponentiell und der Abfall im Bereich $[\vartheta_{opt}, LF_{opt}; \vartheta_{\infty}, LF_{\infty}]$ logarithmisch erfolgen.

Mit den oben beschriebenen Parametern $(\vartheta, LF) =: (x_1, x_2) =: X$ ergibt sich eine stückweise stetig differenzierbare Funktion (WAGNER ET AL. 2014):

$$q_2(X) = \begin{cases} 0 & \text{für } q_2(X) < 0 \\ \frac{q_{2,1}(x_1) + q_{2,2}(x_2)}{2} & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.22)$$

mit den Funktionen

$$q_{2,i}(x_i) = \begin{cases} e^{\frac{x_i - x_{i,opt}}{cc_i}} & \text{für } x_i < x_{i,opt} \\ 1 - \ln\left(\frac{x_i - x_{i,opt}}{dd_i} + 1\right) & \text{sonst.} \end{cases} \quad (3.23)$$

Da q_2 eine zusammengesetzte Funktion ist, kommen hier zwei Stauchungsparameter $CC := (cc_1, cc_2)$ und $DD := (dd_1, dd_2)$ vor. Diese Werte können dazu genutzt werden, den berücksichtigten Verarbeitungsparametern unterschiedliche Gewichtungen zu verleihen. Damit wird erreicht, dass für empfindliche Produkte ein eher kleiner Akzeptanzbereich als bei

toleranteren Produkten eingestellt werden kann. Für verschiedenste Produkte abseits von Lebensmitteln sind weitere zusammengesetzte Funktionen möglich, wobei eine Begründung der jeweiligen Verläufe prozessabhängig zu liefern ist.

Die sich ergebende Funktion ist in Abbildung 3.9 graphisch dargestellt. Für die Demonstration der Funktion wurde $(\vartheta_{opt}, LF_{opt}) = (100, 50)$ gewählt. Die optimalen Werte der Prozessparameter, an denen sich das Maximum der Funktion ergibt, sind produktabhängig und können aus der Abbildung nicht allgemeingültig abgeleitet werden.

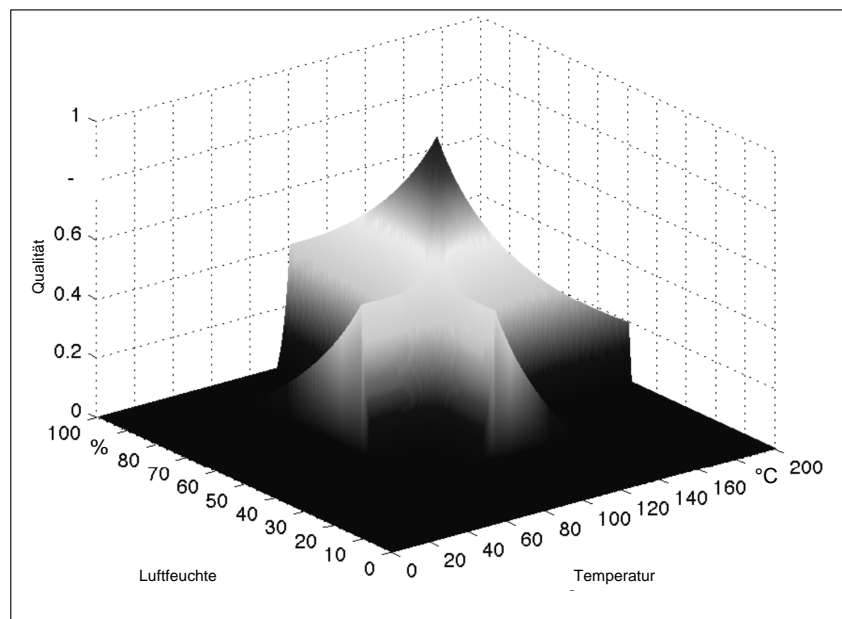


Abbildung 3.9: Dreidimensionale Darstellung einer vereinfachten Qualitätsfunktion

Die eingeführte Darstellung wird im Weiteren dafür verwendet, die Wirkungen des Kundenfeedbacks klarer darzulegen.

Für die Planung der Qualität schafft diese Funktion in erster Linie eine breite Einsatzfähigkeit für diverse Produkte und Produktgruppen. Zudem wird ein höheres Maß an Geschwindigkeit in der Ergebnisermittlung erreicht.

3.5 Feedbackgestützte Individualisierung

3.5.1 Allgemeines Vorgehen

Die Integration von Kundenfeedback in die Methode verfolgt das Ziel, die Individualisierung der einzelnen Aufträge zu ermöglichen. Zur Gewährleistung der Kundenzufriedenheit bei einer automatisierten Verarbeitung ist es notwendig, die Verarbeitung individuell nach dem Wunsch des Kunden zu gestalten. Zur Erreichung dieser Zielsetzung muss in einem

ersten Schritt eine Prozessinterpretation durchgeführt werden. Im Anschluss daran gilt es, die Rückmeldungen zu nutzen, um diese durch einen Qualitätsregelkreis in die Planung einzubeziehen.

3.5.2 Prozessinterpretation

Für die Umsetzung des individuellen Kundenwunsches gilt es, die jeweiligen Produktionsparameter in Abhängigkeit der gewünschten Produktqualität zu parametrieren. Im Speziellen müssen die maßgeblich auf den Genusswert wirkenden Prozessparameter durch ein Kundenfeedback beeinflusst werden. Dies hat kundenindividuell und bestellspezifisch zu erfolgen. Bestellspezifisch begründet sich darauf, dass ein Kunde das gleiche Produkt abhängig von der Bestellung auch mit unterschiedlichem Feedback versehen kann. Für die erste Bestellung eines Produktes durch einen bestimmten Kunden werden Verarbeitungsparameter herangezogen, mit denen ein Referenzzustand des Verarbeitungsergebnisses erreicht wird. Dazu kann erstmalig ein Feedback abgegeben werden. Anhand des Feedbacks werden die Verarbeitungsschritte einer Komponente bei ihrer nächsten Bestellung kundenindividuell beeinflusst. Generell wird im hier vorgestellten Konzept ein von der Bewertungsreihenfolge abhängiger Korrekturfaktor errechnet. In der Abbildung 3.10 ist der Gesamtprozess in Form eines Qualitätsregelkreises zusammengefasst dargestellt.

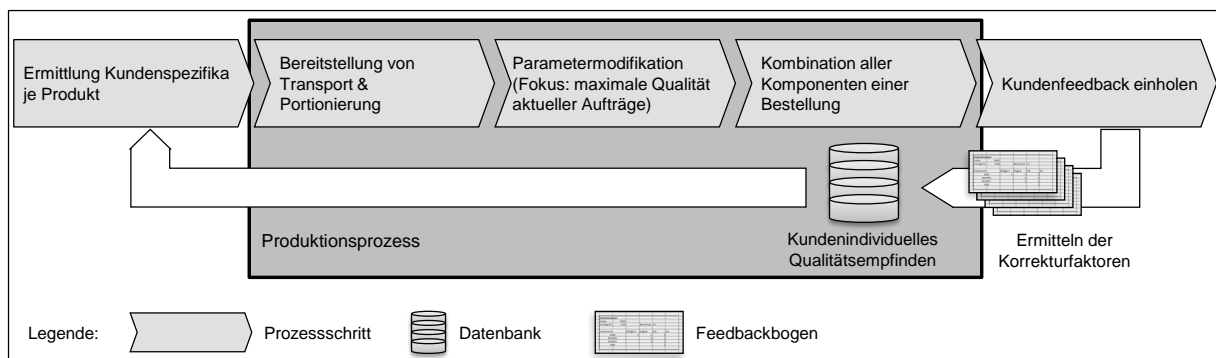


Abbildung 3.10: Modell des Qualitätsregelkreises unter Einbindung des Kunden zur Feedback-Erhebung

Das zu erhebende Feedback wird mittels eines Fragebogens mit den unter Abschnitt 2.5.2 vorgestellten Ratingfragen erhoben. Die Fragen sind so zu wählen, dass die notwendigen Prozessparameter daraus abgeleitet werden können. Auf dieser Basis kann auch die Beeinflussung der ablaufenden transienten Vorgänge und damit der Verarbeitungsqualität stattfinden. Im vorliegenden Fall, bei der Verarbeitung von Lebensmitteln, sind dies die Temperatur und die Einwirkzeit in der Verarbeitungsumgebung. Daraus werden Korrekturfaktoren KF für die zu verarbeitenden Komponenten ermittelt. Die Verwendung dieser Faktoren erfolgt dann entsprechend bei einer erneuten Bestellung einer Komponente durch

einen Kunden. Dann werden die Referenzprozesswerte so mit den Faktoren multiplikativ beaufschlagt, dass sich kundenindividuelle Prozesswerte ergeben. Mit diesen Werten ist gemäß der Vorgabe der eingeführten Qualitätsfunktion deren Optimum zu verschieben und bei der nachgelagerten terminlichen und qualitätsorientierten Einplanung zu berücksichtigen. Eine Prüfung auf Über- oder Unterschreiten bestimmter produktabhängiger Grenzen ist im Ablauf mit zu berücksichtigen.

3.5.3 Feedbackinterpretation und Qualitätsregelkreis

Wie schon im vorherigen Abschnitt erwähnt, wird anhand der Kundenbewertung ein Korrekturfaktor KF für den relevanten Prozesswert ermittelt. Die Abbildung 3.11 stellt den Ablauf zur Ermittlung der Faktoren dar. Dieses Diagramm ist analog zu dem Qualitätsregelkreis aus Abbildung 3.10 zu sehen. Mit der Bestellung eines Auftrages durch den Kunden erfolgt im Zuge der bereits eingeführten Planungsschritte die Überprüfung auf vorhandenes Feedback des bestellenden Kunden für das aktuelle Produkt. Im Zuge der Qualitätsplanung durch Steuerung der transienten Produktvorgänge, sprich der Auswahl der richtigen Prozessparameter, erfolgt die Anpassung der Qualitätsoptima durch das Beaufschlagen mit Korrekturfaktoren. Nach der Auftragsfreigabe erfolgt die Verarbeitung auf den zur Verfügung stehenden Anlagen. Auf den fertiggestellten Auftrag ist durch den Kunden erneutes Feedback abzugeben, welches die abgespeicherten Korrekturfaktoren adaptiert.

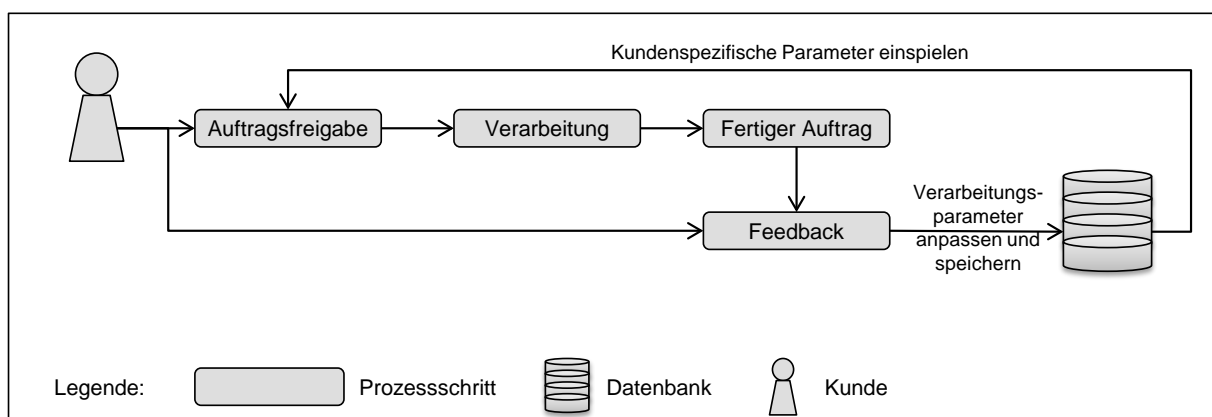


Abbildung 3.11: Qualitätsregelkreises zur Ermittlung von Korrekturfaktoren

Bereits bei der Gestaltung einer Bewertungsumgebung ist darauf zu achten, dass aufgrund der marginalen Anpassungen, die zu erwarten sind, auch die hinterlegten Bewertungsmaße sehr engmaschig sind oder bei kontinuierlicher Abfrage in einem geringen Anpassungsfenster liegen. Die Abfrage ist so zu gestalten, dass eine Verarbeitung hinsichtlich einer Kalkulation möglich ist. Der Wert einer Kundenrückmeldung soll nachfolgend als *Feedbackwert* bezeichnet werden. Eine massive Abweichung der Kundeneinschätzung von einem zu erwartenden

Urteil würde für das Feedback keine zielführenden Ergebnisse liefern. Zur Ermittlung des Korrekturfaktors auf Grundlage einer Kundenbewertung ist ein Ansatz zu wählen, welcher einerseits eine Relation zum Wertebereich der Abfrage und andererseits eine Normierung der realen Prozesswerte auf die Referenzprozesswerte zulässt. Als realer Prozesswert wird der während der Verarbeitung im Mittel erreichte Prozesswert bezeichnet. Dies ist erforderlich, da die Auswirkung eines Parameters nicht im vollen Umfang durch den bewertenden Kunden erfasst werden kann. Dies bedeutet, dass bspw. eine Temperatur, welche vom Kunden bewertet wird, nicht mehr in vollem Maße der einwirkenden Prozesstemperatur entspricht.

Ohne den Bezug auf den jeweiligen Prozessparameter kann der KF wie folgt ermittelt werden. Die Relationierung zum Wertebereich erfolgt durch die Differenzbildung des abgegebenen Feedbackwertes zum Mittelwert des Wertebereichs (MW_{WB}). Dadurch wird erreicht, dass sich der Korrekturfaktor alternierend auch einem kundenspezifischen Mittelwert annähern kann. Der Ansatz wird damit dem Einfluss von kundenabhängigen Schwankungen gerecht. Der Bezug zum Prozess ist im Folgenden herzustellen. Dies geschieht damit, dass der Korrekturfaktor zusätzlich mit dem auf den produktspezifischen Referenzwert des bewerteten Parameters normierten realen Prozesswert beaufschlagt wird. Die Referenz stellt dabei den kundenunabhängigen Parameterwert dar, welcher zur Erreichung eines optimalen Verarbeitungsergebnisses vorliegt. Die nachfolgenden Vorschriften stellen diese Aussagen als mathematische Beziehungen dar. Zeile eins (3.25) spiegelt die prozesswertunabhängige Ermittlung des KF dar. Während in Zeile zwei (3.26) die erste parameterabhängige Produktbewertung aufgezeigt ist, sieht man in Zeile drei (3.26) das darauffolgende Vorgehen zur Ermittlung der Korrekturfaktoren.

$$KF_{neu_i} = (MW_{WB} - Feedbackwert) \cdot KF_{neu_{i-1}} \quad (3.24)$$

$$KF_{neu_1} = \frac{Parameter_{Real_1} \cdot (MW_{WB} - Feedbackwert)}{Parameter_{Referenz}} \quad (3.25)$$

$$KF_{neu_i} = \frac{Parameter_{Real_i} \cdot (MW_{WB} - Feedbackwert) \cdot KF_{neu_{i-1}}}{Parameter_{Referenz}} \quad (3.26)$$

Die Auswirkung des Feedbackfaktors lässt sich am besten an einer Grafik verdeutlichen. Dazu ist es erforderlich, das Profilschaubild einer Qualitätsfunktion abzubilden (vgl. Abbildung 3.12). Von einem ermittelten optimalen Parametersatz, der das Qualitätsmaximum der Funktion darstellt, werden die Parameterverschiebungen durch das Beaufschlagen mit den Korrekturfaktoren KF hervorgerufen. Das eingezeichnete Kreuz verdeutlicht, dass insbesondere der eingestellte optimale Verarbeitungspunkt durch diese Beaufschlagung

mit:

- i = Laufindex der aktuellen Bewertung ($i := 1..∞$)
- KF_{neu_i} = Kundenspez. Faktor zur Beeinflussung eines Prozessparameters
- $KF_{neu_{i-1}}$ = Kundenspez. Faktor bei vorheriger Bewertung
- MW_{WB} = Mittelwert des Wertebereiches der Skala einer Ratingfrage
- Feedbackwert = Gewählter Wert im Wertebereich einer Ratingfrage
- Parameter_{Referenz} = Kundenunspezifischer Referenzwert des Prozessparameters
- Parameter_{Real} = Gemessener Wert des Prozessparameters

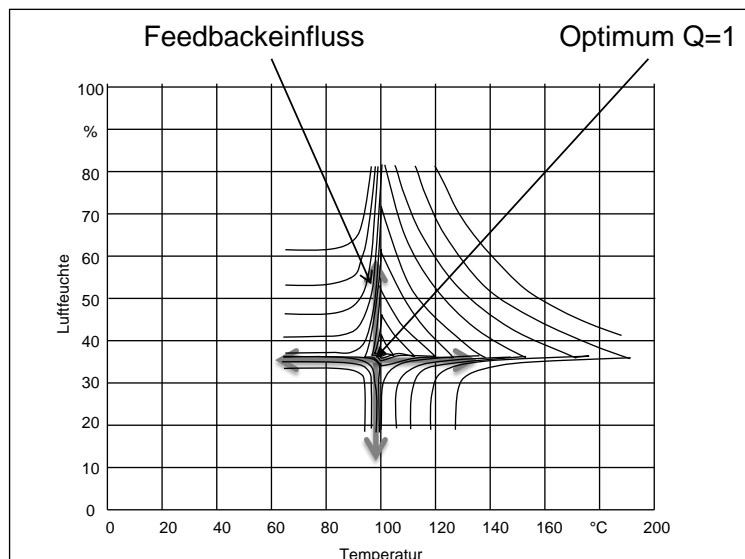


Abbildung 3.12: Auswirkung von Feedback auf eine beispielhafte Qualitätsfunktion

verschoben wird. Im Zuge der Verschiebung ändert sich jedoch nicht die Gestalt der Qualitätsfunktion. Vielmehr verschiebt sich diese in Gänze an das neue, kundenspezifische Optimum.

Zur Berücksichtigung von Unter- und Obergrenzen (UG , OG) eines Bewertungsfensters kann die Vorschrift wie folgt erweitert werden:

$$KF_{neu} = \begin{cases} \frac{Parameter_{UG}}{Parameter_{Standard}} \Leftrightarrow KF_{neu} \cdot Parameter_{Standard} \leq Parameter_{UG} \\ \frac{Parameter_{OG}}{Parameter_{Standard}} \Leftrightarrow KF_{neu} \cdot Parameter_{Standard} \geq Parameter_{OG} \end{cases} \quad (3.27)$$

Dies wird dazu genutzt, Rahmenbedingungen, die sich durch den Verarbeitungsprozess eines Produktes ergeben könnten, zu berücksichtigen. Sind bei der Maximierung des Individualisierungsgedanken Prozess-, Hygiene- oder Gesundheitsgrenzen zu beachten, so können dieses durch die Ober- und Untergrenzen in die Ermittlung der KF mit einfließen.

3.6 Fazit

Damit sind die drei Säulen zur qualitätsoptimierten Maschinenbelegungsplanung sowie der Integration des transienten Produktverhaltens vorgestellt. Die vorgestellte Methode zur Integration des transienten Produktverhaltens in die Maschinenbelegungsplanung ermöglicht es, ein Produktionsprogramm hinsichtlich seiner zeitlichen Puffer zu optimieren. Im Speziellen werden die Liegezeiten der Produkte für den Bereich der (System-)Gastronomie minimiert. Relevant ist dies insbesondere für die automatisierten Verarbeitung von Lebensmitteln. Die Neuartigkeit ist durch die Optimierung nach der Produktqualität, auf Basis des transienten Produktverhaltens, gekennzeichnet. Um die Qualität mathematisch bewertbar zu machen, wurde ein Produktmodell eingeführt, welches die Grundlage für eine Qualitätsoptimierung darstellt. Im dritten Schritt erfolgte die Vorstellung der Möglichkeit der Personifizierung eines Auftrages mittels Feedback. Das subjektive Qualitätsempfinden erhält somit Einzug in die Produktionsplanung. Besonders herauszustellen ist der Paradigmenwechsel, sodass der Kunde unmittelbar auf den Verarbeitungsprozess seiner Bestellung einwirken kann.

4 Umsetzung am Beispiel der automatisierten Lebensmittelverarbeitung

4.1 Allgemeines Vorgehen

Dieses Kapitel soll das vorher aufgezeigte Vorgehen für die Maschinenbelegungsplanung bei Prozessen zur Verarbeitung von Produkten mit zeitvarianten, transienten Produkteigenschaften am Beispiel demonstrieren. Das aufgezeigte Beispiel wurde im Rahmen des Verbundvorhabens „*FORFood - Ressourceneffizienz in der Lebensmittelherstellung, -verpackung und -distribution*“ (WAGNER (2012)) erarbeitet. Die Anwendung entspringt einem Szenario der automatisierten Zubereitung von Mahlzeiten für die Personalverpflegung eines Klinikums. Da es sich um ein fiktives Szenario handelt, beruhen die verwendeten Daten nicht auf tatsächlichen Produktionsdaten. Die Erhebung und Zusammenstellung der Daten ist somit synthetisch, folgt jedoch der statistischen Verteilung der Grundgesamtheit der Bestellungen und Aufträge im realen Produktionsumfeld einer Referenzküche. Diese sollen Ausgangspunkt für den untersuchten Anwendungsfall sein.

4.2 Der Anwendungsfall

Als Beispiel für die Adaption der Maschinenbelegungsplanung mit dem erweiterten Ziel der Vorausplanung der Produktqualität unter Berücksichtigung des transienten Produktverhaltens bietet sich die automatisierte Verarbeitung von Lebensmitteln an. In den vorangegangenen Kapiteln wurde bereits deutlich gemacht, dass es sich bei der Gemeinschaftsverpflegung um einen kostensensitiven Bereich innerhalb der Lebensmittelbranche handelt. Gerade im Umfeld der Zubereitung von Mahlzeiten, speziell bei individuellen Zubereitungen wie bspw. in der Diätetik, wird keine Automatisierungstechnik in Form von verketteten Anlagen, vergleichbar mit der Massenproduktion von Lebensmitteln in Großkonzernen, eingesetzt. Um der steigenden Nachfrage dennoch gerecht zu werden, wird im Vergleich sehr teuer und zeitintensiv manuell verarbeitet. Aus diesem Grund erscheint es zielführend, kostengünstige Automatisierungslösungen zu entwickeln, welche den Zubereitungsprozess von individuellen Mahlzeiten unterstützen. Im Rahmen des Forschungsprojektes FORFood wurde eine Machbarkeitsstudie für die Automatisierung dieses Produktionsbereiches durchgeführt. Auf der Testanlage kommt der in Kapitel 3 vorgestellte Planungsalgorithmus mit den Erweiterungen

zur Planung der Ergebnisqualität zum Einsatz. Die aufgebaute Versuchsanlage besteht aus den in Abbildung 4.1 angeführten Modulen, welche auch nachfolgend die Randbedingungen der Untersuchung definieren.

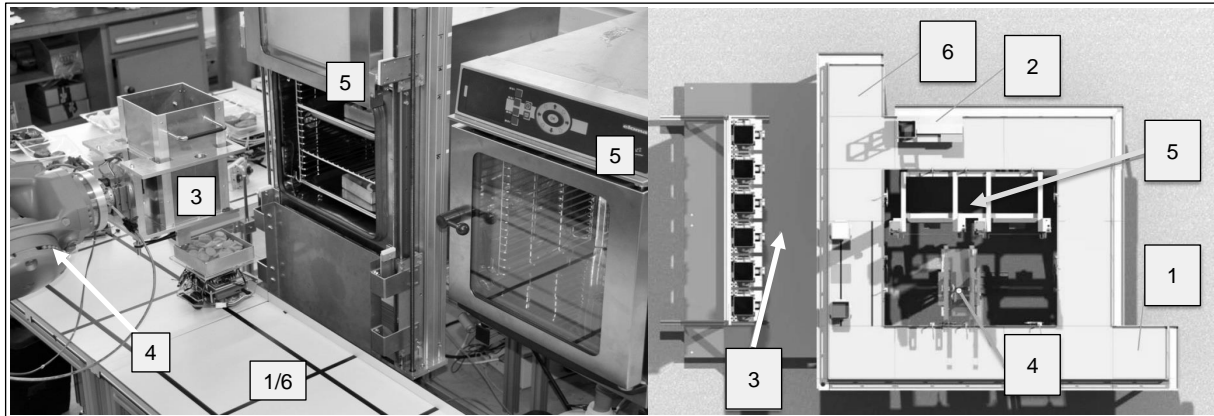


Abbildung 4.1: FORFood Demonstrationsanlage (links Ansicht der Umsetzungsplattform, rechts: schematische Draufsicht, mit Stationen)

Die Systemelemente des Demonstrators sind folgende:

1. Fahrbahn, speziell Ausgabepunkt
2. Lager für Transport-/Verarbeitungsbehälter
3. Produktlager, Vorratsbehältnisse
4. Zustelleinheit, realisiert mit einem Industrieroboter
5. Verarbeitungsmaschinen
6. Fahrbahn, speziell Haltepunkt für autonome Fahrzeuge.

Für die nachfolgenden, vergleichenden Untersuchungen wird das Belegungsproblem zunächst klassifiziert und die Struktur der verwendeten Planungsdaten dargelegt.

4.3 Einordnung als Maschinenbelegungsproblem und Aufbau der Planungsdaten

Das betrachtete Realisierungsszenario umfasst einen Maschinenpark von zwei Maschinen mit je fünf parallel zu belegenden Bearbeitungsplätzen. Es gibt also $r = 10$ Maschinen, wobei jeweils fünf die gleiche Art von Produkten bzgl. ihrer Zubereitungsparameter verarbeiten können und damit untereinander in starken Wechselwirkungen hinsichtlich dieser Prozessparameter stehen.

Bei genauerer Betrachtung ist auffällig, dass sich in der von GRAHAM ET AL. (1979) vorgestellten Notation $[\alpha_{Cha}|\beta_{Cha}|\gamma_{Cha}]$ keine offensichtliche Möglichkeit bietet, das gegebene Problem zu klassifizieren. Der Anwendungsfall kann jedoch in die von RIBAS ET AL. (2010) ausführlich vorgestellte Klasse der *Hybrid Flow Shop*-Probleme eingeordnet werden.

Diese Art von Problemen ist speziell dadurch gekennzeichnet, dass jeder Job eine Serie von $k \geq 2$ Arbeitsschritten durchlaufen muss. Jeder Arbeitsschritt k enthält $R^{(k)} \geq 1$ parallele Maschinen, wobei in mindestens einem Schritt $R^{(k)} > 1$ gelten muss. Grundsätzlich unterliegen alle der gleichen Bearbeitungsreihenfolge, wobei zuerst Schritt 1, dann Schritt 2 usw. folgen. Dabei kann ein Job beliebige Schritte auslassen, sofern er in mindestens einem bearbeitet wird. Im vorliegenden Fall sind in jedem Schritt fünf identische, parallel verarbeitende Maschinen vorhanden. Somit besitzt jeder Job j im k -ten Schritt die Bearbeitungszeit p_{j_k} . Die Bearbeitung von Job j im Schritt k wird dann als Operation O_{j_k} bezeichnet.

In dem gegebenen Optimierungsproblem gibt es $k = 3$ Arbeitsschritte. Der erste Schritt repräsentiert die Befüllung der Zutat auf das Transportsystem. Da es nur eine Befüllereinheit gibt, ist $R^{(1)} = 1$. Die weiteren Schritte symbolisieren die Verarbeitungsmaschinen (Heißluftdampfgerar HLD) mit je fünf Fächern in einem Prozessraum. Es gilt somit $R^{(2)} = R^{(3)} = 5$. Soll eine Zutat im ersten HLD gegart werden, so überspringt sie die zweite Stufe und umgekehrt. Die weiteren vorgesehenen Schritte des Prozesses betreffen den Materialfluss. Dieser unterliegt nicht der prozessabhängigen Ressourcenplanung und muss daher nicht in der Lösungsfindung berücksichtigt werden. Die Abbildung 4.2 verdeutlicht das zu optimierende Hybrid Flow Shop-Problem.

Um das Vorgehen zu testen, wurden drei Testszenarien erarbeitet, die einen Vergleich mit alternativ untersuchten Algorithmen ermöglichen sollen. Ausgehend von einer durchschnittlichen Einwirkzeit (hier: Garzeit) von vier Minuten und zehn zu belegenden Arbeitsplätzen ergibt sich eine theoretisch maximale Bearbeitungsgrenze von 150 Produkten pro Stunde. Die Szenarien decken jeweils ein 20-Minuten-Intervall ab. So kann ein stark überlastetes Szenario, bestehend aus 100 zu verarbeitenden Produkten in 20 Minuten (Szenario 1), ein theoretisch mögliches Grenzszenario mit 50 Produkten in 20 Minuten (Szenario 2) und ein Szenario unterhalb der theoretischen Grenze mit 35 Produkten in 20 Minuten (Szenario 3) generiert werden.

Die drei Szenarien werden zufällig erzeugt und gespeichert. Die Anzahl der Produkte pro Gericht (vergleichbar mit der Anzahl der Halbzeuge, die zu einem Produkt verarbeitet werden sollen) wird als normalverteilt über dem Intervall $[2, 4]$ angenommen. Die Garzeiten der einzelnen Produkte sind dabei über dem ganzzahligen Intervall $[2, 6]$ normalverteilt,

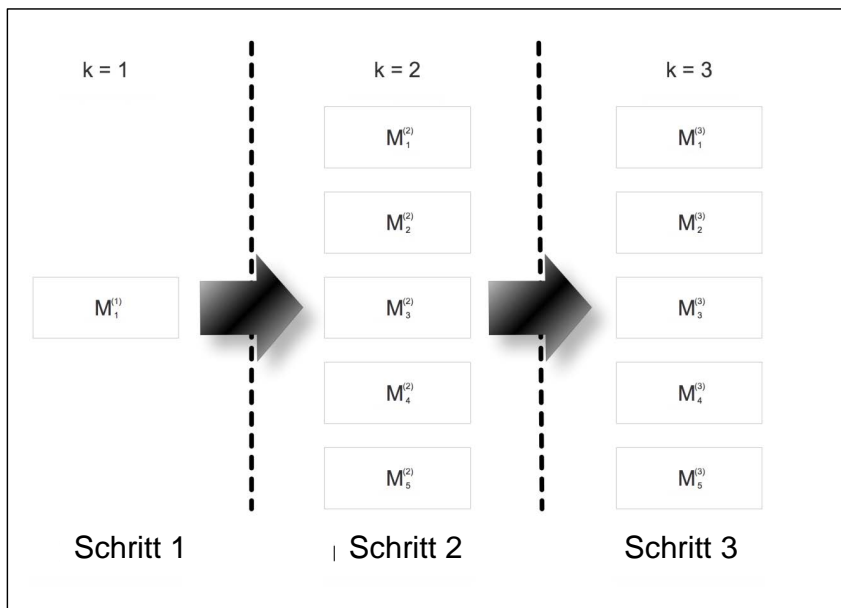


Abbildung 4.2: Abstrakte Darstellung als Hybrid Flow Shop-Problem

mit dem Mittelwert 4 und der Standardabweichung 1. Die Verteilung der Produkte auf die Maschinen sowie die der Zieltermine im Intervall $[10, 30]$ Minuten wird gleichverteilt erzeugt. Mit dieser Angabe wird definiert, dass frühestens nach 10 Minuten Bearbeitungszeit mit der Fertigstellung zu rechnen ist. Die erzeugten Daten entsprechen jeweils zufällig erstellten Kundenaufträgen. Diese werden aus einem vorhandenen Produktportfolio zu individuellen Mahlzeiten zusammengestellt. Durch die zufällige Erzeugung der Aufträge kann es vorkommen, dass wenig sinnvoll erscheinende Kombinationen innerhalb eines Auftrages zustande kommen. Als Beispiel sei hierfür genannt, dass ein aus vier Komponenten bestehender Auftrag durchaus auch vier Beilagen enthalten kann. Dies wird dem Gedanken einer vollständigen Individualisierung gerecht, wenngleich es bei genauer Betrachtung Kombinationen sind, welche man mit zusätzlichen Regeln unterbinden könnte.

Das Datenformat und die Formatierung für die nachfolgende Verarbeitung der Auftragsnummern ist in Abbildung 4.3 aufgezeigt.

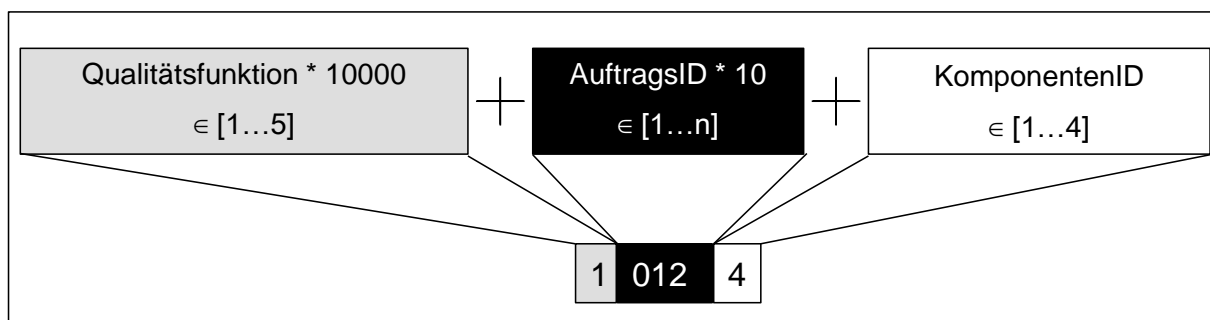


Abbildung 4.3: Formatierung und Codierungsschema der Auftragsdaten

Demnach gehören zu jedem Auftrag mindestens die Informationen über die Anzahl der Komponenten sowie eine Codierung für die zu verwendende Qualitätsfunktion. Dies wurde eingeführt, da eine planungsparallele Simulation aller benötigten Temperaturverläufe zu aufwendig wäre. Aus diesem Grund werden die produktspezifischen Qualitätsverläufe vorab angelegt und den Komponenten eines Auftrages zugeordnet. Jede Komponente/Zutat wird jeweils als ein Job behandelt. Den Zutaten sind neben den genannten Eigenschaften die Bearbeitungsdauer, der Fertigstellungstermin und die Maschinen, auf der sie verarbeitet werden können, zugeordnet.

Ein eingegangener Auftrag erhält für die interne Verarbeitung zusätzlich einen Status. Dieser folgt der Zustandsmaschine in Abbildung 4.4. Die Status, enthalten in den Knotenpunkten, entsprechen laufenden Nummern von null (neuer Auftrag) bis fünf (abgebrochener Auftrag). Die Kanten in der Darstellung zeigen jeweils den Akteur, der den Statuswechsel in der Demonstrationsanlage verursachen muss.

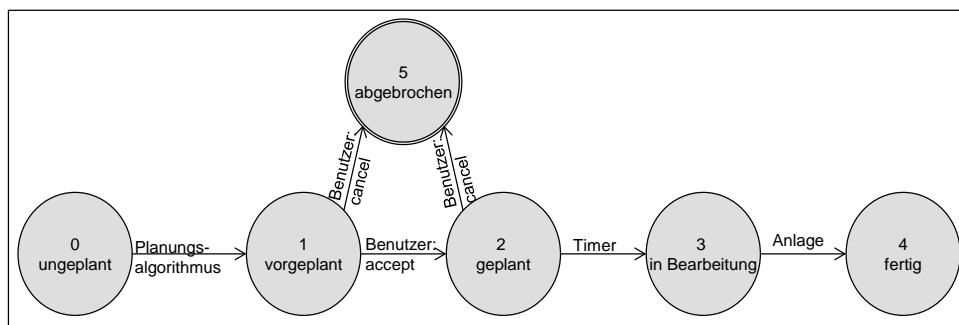


Abbildung 4.4: Zustandsmaschine der Auftragsplanung

4.4 Übersicht zur Implementierung des Planungssystems

Um die im Folgenden aufgestellten Produktmodelle und Erkenntnisse der Umgebungsmodellierung gemäß Kapitel 3 in der Anwendung untersuchen zu können, wurde ein Planungssystem implementiert. Einen Überblick über den Ablauf verdeutlicht Abbildung 4.5.

Das Planungssystem untergliedert sich in die drei behandelten Systemelemente Terminplanung, Qualitätsoptimierung und Kundenindividualisierung. Diese drei Phasen werden seriell durchlaufen. Dabei wird bei einem neuen Auftrag dessen Terminplanung vorgenommen. Diese unterteilt sich in zwei Stufen. In der ersten wird zunächst der Auftrag als nicht-trennbare Einheit betrachtet und in dieser Form losgelöst von den Anlagen in eine zeitliche Reihenfolge gebracht. Danach erfolgt das Einplanen dieser vorher geplanten Einheit auf die Anlagen. Ist der Auftrag terminiert, könnte er bei nicht gewählter Qualitätsoptimierung freigegeben und bearbeitet werden. Diese losgelöste Terminplanung ist erforderlich, da

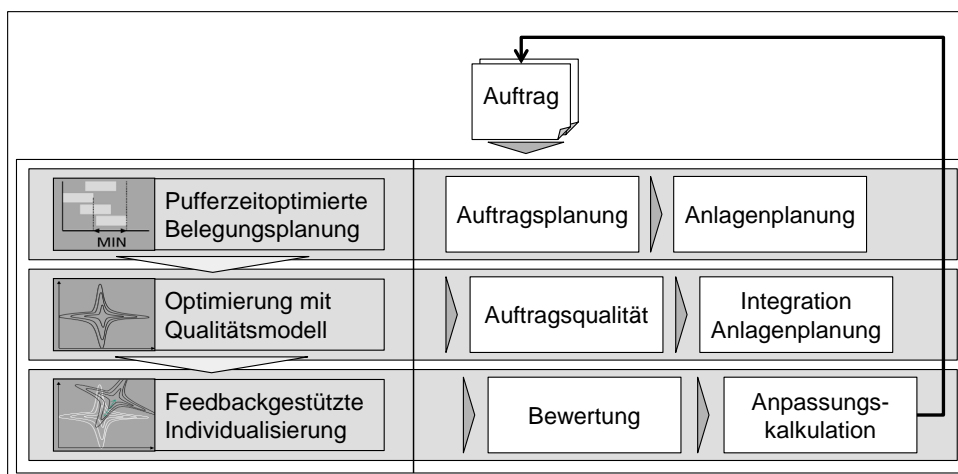


Abbildung 4.5: Ablauf des Planungssystems in der Demonstrationsanlage

die nachgelagerten Elemente als abwählbare Optionen gestaltet wurden. Begründet ist das damit, dass mit einem System die Vergleiche der unterschiedlichen Einflussnehmer bestimmt werden sollen. Ist die Qualitätsoptimierung gewählt, erfolgen die beiden Schritte zur Optimierung der Auftragsqualität und der Einordnung des qualitätsoptimierten Auftrages auf die vorhandenen Anlagen. Eine Kundenindividualisierung ist erst bei der zweiten Bestellung eines Produktes durch den gleichen Besteller (Kunden) möglich. Es werden in dem Fall zunächst das Kundenfeedback zu einem Produkt abgefragt und die Korrekturfaktoren ermittelt. Im zweiten Schritt erfolgt die Verschiebung des Qualitätsmodells gemäß Abschnitt 3.5.3.

4.5 Das zugrundeliegende Datenmodell

In der Anwendung ist es erforderlich, eine geeignete Datenstruktur zur Speicherung aller relevanten Produktionsdaten aufzubauen. Diese Struktur wird im vorliegenden Beispiel in einem Datenbanksystem auf Basis von SQL erstellt. Die Abbildung 4.6 zeigt die wesentlichen Datentabellen der aufgebauten Datenbankstruktur, die zur Speicherung und Bereitstellung aller erforderlichen Stammdaten eines Produktes notwendig sind. Eine detaillierte Darstellung der SQL-Datenstruktur ist im Anhang B nachzulesen.

Die Abhängigkeiten der Datentabellen folgen den Regeln einer SQL-Datenbank wie sie bspw. in LAUBE (2013) nachgelesen werden kann. Da es sich beim Datenbankdesign um einen Standardprozess handelt, sei hier lediglich die Struktur aufgezeigt und für detailliertere Informationen auf folgende Quellen verwiesen: LAUBE (2013), THROLL & BARTOSCH (2011) oder EMRICH (2013).

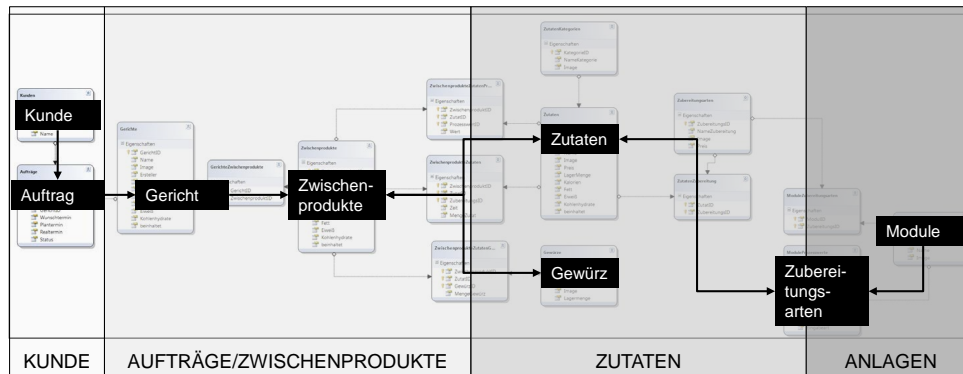


Abbildung 4.6: Umgesetztes Datenbankmodell

Mit diesen Vorüberlegungen und Einführungen sind die Grundlagen für das Anwenden der Methode gelegt.

4.6 Pufferzeitoptimierte Belegungsplanung

4.6.1 Nebenbedingungen des Szenarios

Abgesehen von den genannten Zielfunktionen (vgl. Abschnitt 3.3.1) existieren in dem hier betrachteten Anwendungsfall mehrere, durch technische Einschränkungen erzwungene, Nebenbedingungen. Die zur Zubereitung der Lebensmittel zur Verfügung stehenden HLD besitzen als Prozessparameter die Einwirkzeit t_e , eine einstellbare Temperatur ϑ sowie den veränderbaren Bedampfungsgrad LF .

Aus dem in Kapitel 3.3.1 erwähnten Prozesswertetupel wird im Anwendungsbeispiel somit das Wertetripel $w_i = (\vartheta_i^*, t_{e,i}^*, LF_i^*)$. Dieses Tripel definiert im Anwendungsfall implizit die Verarbeitungsstation, in der das Produkt p_i verarbeitet werden muss. Jeder HLD ist theoretisch in der Lage, die gleichen Werte der Temperatur und Luftfeuchte anzunehmen, jedoch im Sinne des Ressourcenbewusstseins und des Verhinderns eines permanenten Aufheiz- und Abkühlvorgangs sollen sich die Werte der HLD nur in einem bestimmten Intervall befinden.

$$HLD_1 : \vartheta = [80^\circ C \dots 120^\circ C]$$

$$LF = [30\% \dots 100\%]$$

$$HLD_2 : \vartheta = [\geq 120^\circ C]$$

$$LF = [\leq 30\%]$$

Jede dieser Anlagen enthält fünf Fächer, in denen die Produkte parallel gegart werden können. Allgemein lässt sich somit für R Maschinen mit einer bestimmten Anzahl Fa an

Fächern eine Funktion $b_r : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{N}$ mit $r = 1, \dots, R$ definieren, die zu jedem Zeitpunkt t angibt, wie viele Fächer im HLD r belegt sind. Als Nebenbedingung muss in diesem Spezialfall

$$b_r(t) \leq 5 \quad \forall t \in \mathbb{R}^+ \text{ und } r \in 1, 2 \quad (4.1)$$

gelten. Dies bedeutet, dass es keinen Zeitpunkt geben kann, an dem mehr als fünf Fächer in einer Maschine belegt sind. Da lebensmittelphysiologisch keine Abhängigkeiten zwischen den Ebenen bestehen, kann mit einem Maschinenpark von zwei mal fünf Anlagen geplant werden.

Durch den Einsatz eines einzigen Zustellmechanismus, welcher Produkte in oder aus den Anlagen befördert, ergibt sich als weitere Bedingung, dass die Start- und Endzeiten aller Produkte mindestens eine gewisse Konstante (hier: t_{ofen}) auseinander liegen müssen. Mit dieser Konstante wird die Zustellzeit für eine Produktkomponente repräsentiert. Es ergeben sich somit zusätzlich die folgenden Nebenbedingungen:

$$|t_{\text{start},i} - t_{\text{start},j}| \geq t_{\text{ofen}} \quad (4.2)$$

$$|t_{\text{end},i} - t_{\text{end},j}| \geq t_{\text{ofen}}. \quad (4.3)$$

Diese Nebenbedingungen beschränken die Minimierung der Pufferzeit nach unten. Mit der Anwendung der Formel 3.1 zeigt sich, dass die minimale Pufferzeit für ein Gericht mit zwei Zutaten $1 \cdot t_{\text{ofen}}$ ist. Ein Gericht mit drei Zutaten kann mit der minimalen Pufferzeit $4 \cdot t_{\text{ofen}}$ und eines mit vier Zutaten mit $10 \cdot t_{\text{ofen}}$ zubereitet werden.

Die letzte anwendungsbezogene Nebenbedingung ergibt sich aus einer Terminforderung, die der Kunde mit seiner Bestellung implizit abgibt. Zur Reduzierung der Liegezeiten ist es erforderlich, die Produktion der Bestellung nicht vor dem gewünschten Liefertermin fertiggestellt zu haben. Daraus folgt die letzte Nebenbedingung 4.4. Der gewünschte Zieltermin muss kleiner oder gleich dem tatsächlichen Zieltermin sein:

$$T_{\text{end},j}^* \leq T_{\text{end},j} \quad \forall j = 1..n. \quad (4.4)$$

4.6.2 Realisierung der Terminplanung

Der erste formale Schritt des Optimierungslaufs, die Auftragsplanung, berücksichtigt zunächst ausschließlich die Bearbeitungszeiten aller Komponenten eines Auftrages. Zunächst wird jeder Einzelauftrag für sich betrachtet. Die Komponenten werden in die für den Auftrag richtige Reihenfolge gebracht. Dafür werden die Komponenten zunächst entsprechend ihrer optimalen Verarbeitungsparameter den vorhandenen Maschinen zugeordnet. Anschließend

wird ausgehend von einer Rückwärtsterminierung jede Komponente so angeordnet, dass sie zum gewünschten Termin fertiggestellt werden kann. Die Zielgröße der Zeitoptimierung liegt hierbei nicht auf der Reduzierung der Durchlaufzeiten oder der maximalen Auslastung der Anlagen, sondern im Sinne der nachgelagerten Qualitätsoptimierung auf der bestmöglichen Einhaltung der Zieltermine (vgl. Formel 3.1). Dies ist für jeden Auftrag ein Indiz auf eine reduzierte Liegezeit, was einen positiven Effekt auf die Qualität jeder Komponente hat. Um die Randbedingungen des Anwendungsfalles zu berücksichtigen, wird eine Anpassung im Auftragsplan (auch: Auftragschedule) vorgenommen. Es werden aufgrund des einzelnen Bestückungsautomaten direkt aufeinanderfolgende Termine von Komponenten jeweils um mindestens eine Zeitscheibe der Länge $t_{\text{Verzögerung}} = 2 \dots t_{\text{ofen}}$ verschoben. Dabei entstehen signifikante Treppmuster in den Auftragsplänen, wie in Abbildung 4.7 nachvollzogen werden kann. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für einen Auftrag, welcher Komponenten in beiden Anlagen R_1 , R_2 eingeplant hat.

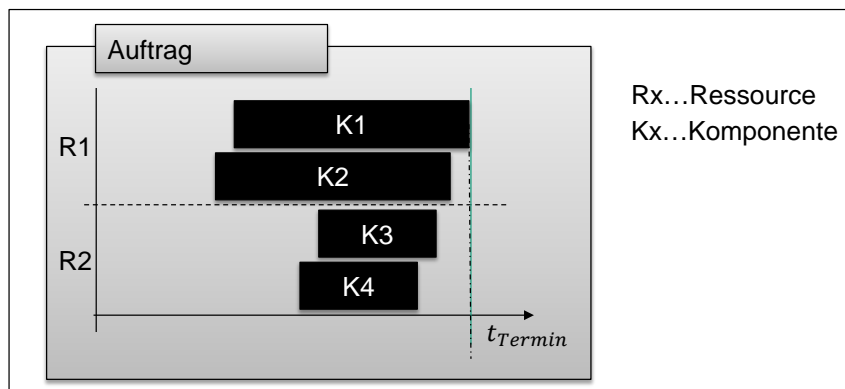


Abbildung 4.7: Treppenversatz der Aufträge aufgrund von Ressourcenbeschränkung

In der Summe des gesamten Auftragsvorrates betrachtet, wird im zweiten Schritt der sog. Anlagenschedule (vgl. Abbildung 4.8) erstellt. Die Integration eines Auftrags in den Anlagenplan erfolgt über die Angabe der Zielzeitscheibe des Auftrages. Der erzeugte Auftragschedule wird anschließend mittels Matrizenaddition in den Anlagenschedule eingefügt. Um dabei sicherzugehen, dass die Komponenten eines Auftrages zusammenbleiben, wird jeweils nach einer Lücke gesucht, die es ermöglicht, den vollständigen Auftragsplan auf die Anlagen einzuplanen. Es entsteht bei dieser abgewandelten Form einer Charge ein Zeitverlust, welcher sich negativ auf den Zieltermin auswirkt. Diese beiden Stufen werden so lange durchlaufen bis keine Aufträge mehr im Auftragsvorrat vorhanden sind. Für den Fall einer neuen Bestellung erfolgt die Einplanung nach dem gleichen Vorgehen.

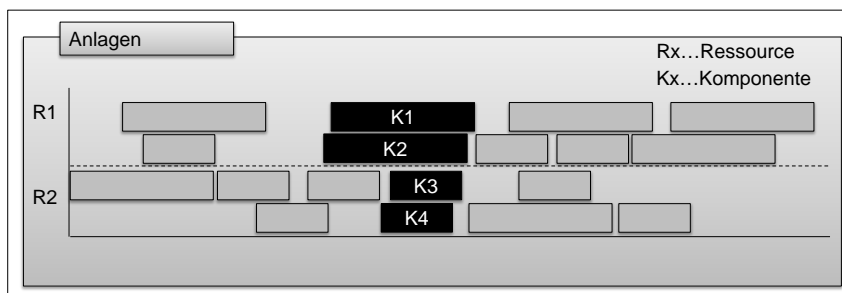


Abbildung 4.8: Ausgefüllter Anlagenplan (Ausschnitt)

4.6.3 Heuristikentwurf und Implementierung

4.6.3.1 Ablauf

Im Folgenden wird eine erste implementierte Heuristik beschrieben. Nach der Beschreibung der Funktionsweise folgt eine detaillierte Erläuterung der einzelnen Schritte. Im Anschluss wird auf die Realisierung im Code eingegangen. Der hier vorgestellte Planungsalgorithmus versucht die Verarbeitung der Gerichte mittels Priorisieren und Verschiebung so zu planen, dass die Zielfunktionen 3.1 und 3.2 minimiert und die Nebenbedingungen 4.1, 4.2, 4.3 und 4.4 eingehalten werden. Es wird nicht in mehreren Iterationen nach einem Optimum gesucht, sondern deterministisch eine Reihenfolge gebildet, in der alle Nebenbedingungen erfüllt sind. Diese Reihenfolge wird als die optimale Lösung ausgegeben.

In diesem Zusammenhang bedeutet *planen* das Setzen der Zeiten $t_{start,j}$. Alle anderen für die Zielfunktionen und Nebenbedingungen relevanten Zeiten, wie $t_{end,j}$, ergeben sich implizit.

Der Algorithmus besteht aus zwei Phasen. Als Eingabe werden die gewünschten Zielzeiten der Aufträge $T_{end,j}^*$ erwartet. Daraus ergibt sich ein erster Plan, welcher die Nebenbedingungen verletzt. Daraufhin werden die Zeiten so geplant, dass die Nebenbedingungen 4.2 und 4.3 eingehalten werden. Erst nach diesem Schritt wird die Bedingung 4.1 geprüft und gegebenenfalls durch Verschieben der Startzeiten der Produkte eingehalten. Die Abbildung 4.9 zeigt diesen Ablauf schematisch.

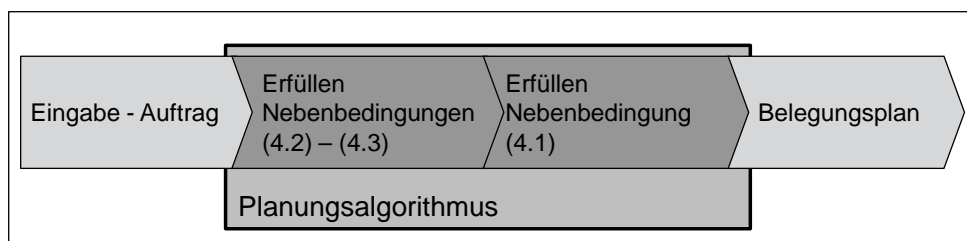


Abbildung 4.9: Verlauf des Planungsalgorithmus WAGNER & SCHLEIMER (2012)

4.6.3.2 Einhalten der Konstante t_{ofen}

Als Eingabe werden die n Aufträge mit den gewünschten Endzeiten $T_{\text{end},j}^*$ erwartet. Nach der Eingabe werden die Start- und Endzeiten so umgeplant, dass die Nebenbedingungen 4.2 und 4.3 erfüllt sind. Um diesen Nebenbedingungen Rechnung zu tragen, müssen die Start- bzw. Endzeiten aller Produkte, die gleichzeitig mit einem anderen Produkt p_i in oder aus dem HLD genommen werden, um t_{ofen} verschoben werden. Somit kann man die Startzeiten aller Produkte p_j , für die eine der Bedingungen 4.2 oder 4.3 nicht eingehalten wird, wie folgt neu berechnen

$$t_{\text{start},j} = t_{\text{start},j} + t_{\text{ofen}}. \quad (4.5)$$

Danach hat jedes der k Produkte eine nur einmal vorkommende Start- und Endzeit. Weiterhin ist garantiert, dass die Pufferzeit so klein wie möglich gehalten wird. Außerdem wird durch das zeitliche Verschieben nach hinten die Bedingung 4.4 erfüllt.

4.6.3.3 Einhalten der Fächeranzahl

Die ermittelten Daten werden an den Algorithmus weitergegeben. Dabei wird die Einhaltung der Nebenbedingung 4.1 geprüft. Ist dies nicht der Fall, werden die Aufträge so verschoben, dass die maximale Anzahl an Fächern nicht überschritten wird. Sollte zu einem Zeitpunkt t die Nebenbedingung 4.1 verletzt sein, wird die Startzeit der Produkte weiter verschoben. Um der Zielfunktion 3.1 gerecht zu werden, muss die Startzeit aller zu einem Auftrag gehörenden Produkte verschoben werden. Um wenig Zeit zu verlieren, wird hier die kleinste Zeit t_v gesucht, um die verschoben werden kann. Wenn nun der i -te Auftrag verschoben werden soll, ist t_v gleich der kleinsten Differenz aller Startzeiten der Produkte, die zu dem Auftrag i gehören und aller Endzeiten der Produkte, die nicht dem i -ten Auftrag zugeordnet werden, gleichzeitig jedoch mit den Produkten des i -ten Auftrages im HLD sind. Es gilt folglich:

$$t_v = \max_{z(j)=i} t_{\text{start},j} - \min_{p_k \text{ im Ofen}} t_{\text{end},i} + t_{\text{Ofen}} \quad (4.6)$$

und damit für die Startzeiten der Produkte

$$t_{\text{start},j} = t_{\text{start},j} + t_v \quad \forall j \text{ mit } z(j) = i. \quad (4.7)$$

Dadurch, dass die Startzeiten aller Produkte eines Auftrags um die gleiche Zeit verschoben werden, bleibt die Pufferzeit nach diesem Schritt unverändert.

4.6.3.4 Implementierung

Die oben beschriebene Heuristik arbeitet mit mehreren Feldern von Zeitinformationen, wie den Startzeiten oder den Endzeiten der Aufträge. Es wird immer die komplette Planung betrachtet und wenn nötig geändert. Bei jedem einzelnen Schritt, sei es eine Verschiebung oder eine Neuberechnung der Zeit, müssen alle abhängigen Variablen angepasst werden.

Der Pseudocode des Algorithmus wird in Algorithmus 2 dargestellt.

Algorithmus 2 : Pseudocode der Heuristik zur Terminierung

Initialisiere Variablen mit den gegebenen Daten

while $\exists i, j$ mit $|t_{\text{start},i} - t_{\text{start},j}| \geq t_{\text{ofen}} \vee |t_{\text{end},i} - t_{\text{start},j}| \geq t_{\text{end}}$ **do**

 Finde zu verschiebende Zutat p_j

$t_{\text{start},j} \leftarrow t_{\text{start},j} + t_{\text{ofen}}$

end while

while $b_r(t) < 5$ **do**

 Finde zu verschiebenden Auftrag i

 Berechne t_v nach 4.6

$t_{\text{start},j} \leftarrow t_{\text{start},j} + t_v \quad \forall j$ mit $z(j) = i$

end while

4.6.4 Weiterentwicklung der Heuristik

4.6.4.1 Angepasster Ablauf

Dieser Planungsalgorithmus sortiert alle Aufträge in einem einzigen Durchlauf. Die beiden Schritte des vorher beschriebenen Algorithmus werden zu einem zusammengefasst.

Der Algorithmus sortiert die Liste der Zutaten nach der Startzeit, sodass $t_{\text{start},1} \leq t_{\text{start},2} \leq \dots \leq t_{\text{start},k}$ gilt. Es wird nun immer das erste Element dieser Liste einsortiert, zuerst p_1 nachfolgend p_2 usw. bis zum Schluss p_k eingeordnet ist. Soll p_i eingeplant werden, wird zuerst geprüft, in welchem Fach das Produkt verarbeitet werden soll. Ist in dem in Frage kommenden HLD zum Zeitpunkt $t_{\text{start},i}$ mindestens ein Fach frei, so wird dieses ausgewählt. Sollte kein Fach frei sein, muss die Startzeit des Produktes verschoben werden. Dann wird

$$t_{\text{start},i} = \min_{p_j \text{ im Ofen}} t_{\text{end},j} + t_{\text{ofen}} \quad (4.8)$$

gesetzt. Es wird somit $t_{\text{start},i}$ mit der frühest möglichen Zeit, zu der ein Fach im Ofen frei wird, gleichgesetzt. Notwendig ist dies, da aufgrund der Nebenbedingung 4.3 ein Fach erst frei wird, wenn zusätzlich zur Einwirkzeit des Produktes noch die Zeit t_{ofen} verstreichen muss.

Wird nun ein freies Fach gefunden, so muss geprüft werden, ob die Einplanung des Produktes p_i an dieser Stelle nicht die Bedingung 4.3 verletzt, also ob der Zeitpunkt $t_{\text{end},i}$ nicht schon als Endzeitpunkt vergeben ist. Gilt also

$$\exists j < i \text{ mit } t_{\text{end},i} = t_{\text{end},j} \quad (4.9)$$

muss die Startzeit weiter um t_{ofen} verschoben werden, bis keine zwei Endzeitpunkte gleich sind. Wird ein Zeitpunkt gefunden, in dem das Produkt p_i eingeplant werden kann, so muss dieses Fach bis zum Zeitpunkt $t_{\text{end},i} + t_{\text{ofen}}$ besetzt werden. Alle anderen Fächer, die auch zur Zeit $t_{\text{start},i}$ frei sind, werden erst zum Zeitpunkt $t_{\text{start},i} + t_{\text{ofen}}$ freigegeben. Dies wird dadurch ermöglicht, dass kein Produkt mehr einsortiert werden muss, welches einen früheren Startzeitpunkt hat als $t_{\text{start},i}$. Dadurch wird außerdem garantiert, dass keine zwei Produkte zeitgleich in den Ofen müssen. Somit wird gleichzeitig die Nebenbedingung 4.2 eingehalten. Die Bedingungen 4.1 und 4.4 sind bei dieser Anpassung stets erfüllt.

4.6.4.2 Implementierung

Um die oben beschriebene Vorgehensweise zu realisieren, muss für jedes Fach bekannt sein, wann es besetzt werden kann. Dies wird durch eine $[R \times Fa]$ Matrix M beschrieben. Der Eintrag $M_{r,fa}$ beschreibt den Zeitpunkt, an dem das Fach fa im HLD r besetzt werden darf. Der Pseudocode dieser Heuristik wird in Algorithmus 3 dargestellt.

Algorithmus 3 : Pseudocode der überarbeiteten Heuristik

```

Initialisiere Fächer mit  $M_{r,fa} = 0$ 
Sortiere Zutaten nach ihrer Startzeit
for  $i = 1 \rightarrow k$  do
  if  $\exists f^*$  mit  $M_{r,fa^*} \leq t_{\text{start},i} \wedge \nexists j < i$  mit  $t_{\text{end},i} = t_{\text{end},j}$  then
     $M_{r,fa^*} \leftarrow t_{\text{end},i} + t_{\text{ofen}}$ 
     $M_{r,fa} \leftarrow t_{\text{start},i} + t_{\text{ofen}} \forall f$  mit  $M_{r,fa} \leq t_{\text{start},i}$ 
  else
    Berechne minimale Zeit  $t_{\text{start},i}$  nach 4.8 unter Einhaltung von 4.9
     $t_{\text{end},i} \leftarrow t_{\text{start},i} + t_{\text{zuber},i}^*$ 
    Finde  $f^*$  mit  $M_{r,fa^*} = t_{\text{start},i}$ 
     $M_{r,fa^*} \leftarrow t_{\text{end},i} + t_{\text{ofen}}$ 
     $M_{r,fa} \leftarrow t_{\text{start},i} + t_{\text{ofen}} \forall f$  mit  $M_{r,fa} \leq t_{\text{start},i}$ 
  end if
end for

```

Ist die terminliche Optimierung abgeschlossen, kann der Maschinenplan aus Sicht der angestrebten Qualitätswünsche optimiert werden. Zunächst soll jedoch das erläuterte Vorgehen durch einen Vergleich mit alternativen Lösungsmöglichkeiten validiert werden.

4.6.5 Algorithmenvergleich und Bewertung

Der hier aufgestellte Algorithmus zur terminlichen Planung von Einzelaufträgen in einem Umfeld der kundenindividuellen Lebensmittelverarbeitung muss genau genommen als eine Heuristik betrachtet werden. Im Vergleich dazu beschreibt ein Algorithmus das Vorgehen zur Strukturierung eines Sachverhaltes, während das Lösungsverhalten mit den verschiedenen Prioritätsregeln und Nebenbedingungen unter das einer Heuristik einzuordnen ist.

Alternativ dazu besteht die Möglichkeit, die Lösung mittels einer sog. *Metaheuristik* zu erarbeiten. Um den aufgezeigten Algorithmus mit heuristischem Grundkonzept, den sog. *Dispatching Rules*, für den praktischen Einsatz zu validieren und ihn gegenüber der Gestaltung einer Metaheuristik zu verifizieren, sollen im Folgenden zwei Vergleiche mit gängigen evolutionären Metaheuristiken vorgestellt werden.

Dazu werden zunächst die folgenden angepassten Metaheuristiken vorgestellt.

- Particle Swarm Optimierung (PSO)
- Differential Evolution Algorithmus (DE)

Anschließend werden die Versuchsergebnisse erläutert. Um die Grundtypen der Metaheuristiken nutzen zu können, werden diese auf den praktisch untersuchten Anwendungsfall angepasst. Die Anpassungen werden in 4.6.5.2 und 4.6.5.1 genauer beschrieben.

4.6.5.1 Angepasster Particle Swarm Algorithmus

Der *Particle Swarm Optimization*-Ansatz ist im Rahmen dieser Arbeit, soweit möglich, in seiner Grundform verwendet worden. Dies wurde durch die Verwendung von Straffunktionen realisiert. Als Strafterm (Residuum) konnte die Gesamtverletzung der Nebenbedingungen wie in Formel 4.13 gewählt werden. Somit gilt:

$$\xi(q_i(x)) = \frac{1}{g_{nb,\max}}.$$

Die Funktionen $\gamma(q_i(x))$ und $h(t)$ wurden konstant gleich 1 gesetzt. Da per Definition $g_{nb}(x) \geq 0 \forall nb = 1, \dots, NB$ gilt, war auch $q_{nb}(x) = g_{nb}(x) \forall nb = 1, \dots, NB$. Mit dieser Festlegung ergibt sich die verwendete Straffunktion zu:

$$F(x) = f(x) + g(x) = \sum_{j=1}^n t_{\text{puffer},j} + \sum_{j=1}^n T_{\text{warte},j} + \sum_{nb=1}^4 \frac{g_{nb}(x)}{g_{nb,\max}}. \quad (4.10)$$

Algorithmus 4 zeigt den Pseudocode des verwendeten Particle Swarm-Algorithmus.

Algorithmus 4 : Pseudocode Particle Swarm Optimization

Initialisiere den Schwarm nach Formel 2.6

while $t < t_{max}$ **do**

Bewerte den Schwarm nach der Formel 2.9 mit der Funktion 4.10

for $i = 1 \rightarrow Np$ **do** Passe die Position X_i nach der Formel 2.7 an

Bewerte das Mitglied nach der Formel 2.8 mit der Funktion 4.10

 Passe die Geschwindigkeit V_i nach der Formel 2.10 an **end for****end while**

4.6.5.2 Angepasste Differential Evolution Heuristik

Die vorgestellte Metaheuristik des Differential Evolution wird für den Vergleich soweit wie möglich in seiner Grundform belassen. Dafür ist es notwendig, die Zielfunktionen 3.1 und 3.2 zu einer Zielfunktion zu aggregieren. Dadurch lässt sich die zu optimierende Funktion (Fitnessfunktion) mit:

$$f(x) = \omega_1 \sum_{j=1}^n t_{\text{puffer},j} + \omega_2 \sum_{j=1}^n T_{\text{warte},j} \quad (4.11)$$

beschreiben. ω_1 und ω_2 sind dabei Gewichtungsfaktoren, welche die Wichtigkeit des jeweiligen Kriteriums widerspiegeln können. Hier wurde zur Gleichgewichtung $\omega_1 = \omega_2 = 1$ gewählt. Aufbauend auf der prinzipiellen Einführung des Differential Evolution Algorithmus (vgl. 2.2.3.1) ist im folgenden Algorithmus 5 der angepasste Pseudocode dargestellt. Die einzelnen Anpassungen betreffen insbesondere die Berücksichtigung der Nebenbedingungen sowie die Selektionsregel.

Algorithmus 5 : Pseudocode Differential Evolution

Initialisiere die Population nach Formel 2.2

Bewerte die Population mit den Funktionen 4.11 und 4.13

while $G < G_{max}$ **do** **for** $i = 1 \rightarrow Np$ **do** Erzeuge $p'_{i,G}$ nach Formel 2.3 und 2.4

Wähle das neue Populationsmitglied gemäß der Formel 4.14

end for**end while**

Die Nebenbedingungen $g_1(x), \dots, g_4(x)$ wurden entsprechend der Gleichungen 4.1 bis 4.4, wie nachfolgend dargestellt, definiert. Diese orientieren sich im Wesentlichen an den eingeführten technischen Randbedingungen des Szenarios.

$$\begin{aligned}
 g_1(x) &= \begin{cases} 0 & \text{falls } b_d(t) \leq 5 \\ 10 & \text{sonst} \end{cases} \\
 g_2(x) &= \sum_{i=1}^n g_{2,i} \text{ mit} \\
 g_{2,i}(x) &= \begin{cases} 0 & \text{falls } |t_{\text{start},i} - t_{\text{start},j}| \geq t_{\text{ofen}} \quad \forall i \neq j \\ 0,5 & \text{sonst} \end{cases} \\
 g_3(x) &= \sum_{i=1}^n g_{3,i} \text{ mit} \\
 g_{3,i}(x) &= \begin{cases} 0 & \text{falls } |t_{\text{end},i} - t_{\text{end},j}| \geq t_{\text{ofen}} \quad \forall i \neq j \\ 0,5 & \text{sonst} \end{cases} \\
 g_4(x) &= \sum_{i=1}^n g_{4,i} \text{ mit} \\
 g_{4,i}(x) &= \begin{cases} 0 & \text{falls } T_{\text{end},i}^* \leq T_{\text{end},i} \\ T_{\text{end},i}^* - T_{\text{end},i} & \text{sonst.} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

Jede Lösung x , welche die Bedingung 4.1 verletzt, liefert für g_1 den Wert 10. Alle anderen Gleichungen prüfen zunächst, wie viele Komponenten in der Lösung x die dazugehörige Bedingung verletzen und geben dann einen Gesamtwert zurück. Wie die Zielfunktionen wurden auch die Nebenbedingungen zu einem Wert zusammengefasst. Die Gesamtverletzung der Nebenbedingungen ergibt sich zu

$$g(x) = \sum_{c=1}^4 \frac{g_c(x)}{g_{c,\max}}, \tag{4.13}$$

wobei $g_{c,\max}$ den größten gefundenen Wert für g_c repräsentiert. Dieses Vorgehen erlaubt eine relative Bewertung der Nebenbedingungen.

Der implementierte Differential Evolution nutzt die zwei Funktionen 4.11 und 4.13, um die Populationsmitglieder miteinander zu vergleichen und zu entscheiden, welche übernommen werden. Die Selektionsregel (Formel 2.5), welche an alle Nebenbedingungen des Anwendungsfalls angepasst wurde, ist nachfolgend zusammengefasst.

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} p'_{i,G} & \text{falls} \\ x_{i,G} & \text{sonst} \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} \forall j \in \{1, \dots, l\} : g_j(p'_{i,G}) \leq 0 \wedge g_j(x_{i,G}) \leq 0 \\ \wedge \\ f(p'_{i,G}) \leq f(x_{i,G}) \end{array} \right. \\ \vee \\ \left\{ \begin{array}{l} \forall j \in \{1, \dots, l\} : g_j(p'_{i,G}) \leq 0 \\ \wedge \\ \exists j \in \{1, \dots, l\} : g_j(x_{i,G}) > 0 \end{array} \right. \\ \vee \\ \left\{ \begin{array}{l} \exists j \in \{1, \dots, l\} : g_j(p'_{i,G}) > 0 \\ \wedge \\ \forall j \in \{1, \dots, l\} : g'_j(p'_{i,G}) \leq g'_j(x_{i,G}) \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (4.14)$$

4.6.5.3 Auswahl des Algorithmus'

Zum Vergleich der vorgestellten Optimierungsverfahren sollen die eingeführten Testszenarien herangezogen werden. Vor dem eigentlichen Vergleich soll anhand eines Initialbeispiels (vgl. Tabelle 4.1) die Funktionsweise der Algorithmen aufgezeigt werden. Markante Verhaltensmuster lassen sich damit bereits aufzeigen und eine Nutzensaussage ableiten, bevor die Resultate der eigentlichen Testszenarien ausgewertet werden.

Kunde	Gericht	Termin	Zutat	Zeit	Temperatur	Luftfeuchte
1	Steak mit Kartoffeln und Broccoli	15:30 Uhr	Steak	6 min	200 °C	0 %
			Kartoffeln	4 min	120 °C	100 %
			Broccoli	3 min	100 °C	100 %
2	Schnitzel mit Pommes	15:31 Uhr	Schnitzel	5 min	180 °C	20 %
			Pommes	5 min	200 °C	10 %
3	Schnitzel mit Pommes und Soße	15:33 Uhr	Schnitzel	5 min	180 °C	20 %
			Pommes	5 min	200 °C	10 %
			Soße	4 min	170 °C	0 %
4	Hühnchen mit Reis	15:35 Uhr	Hühnchen	10 min	180 °C	20 %
			Reis	2 min	100 °C	100 %

Tabelle 4.1: Beispielbestellung

Unter der Annahme, dass vier Kunden jeweils ein Gericht beauftragen, stellt sich der Planungsumfang wie in Tabelle 4.1 dar. Gegeben ist das jeweilige Gericht, dessen Zutaten

und deren optimale Zubereitungsanweisung sowie der gewünschte Zieltermin. Zudem wird angenommen, dass es 15:00 Uhr ist. Damit werden genau vier Aufträge A_1 , A_2 , A_3 und A_4 erzeugt und abgeschickt.

Die Aufträge ergeben sich zu,

A_1 :

- Der Auftragsnummer 1
- Der Menge an Produkten $P_1 = \{p_1, p_2, p_3\}$
- Der Menge an Anweisungen $W_1 = \{(200, 0, 6), (120, 100, 4), (100, 100, 3)\}$
- Der Zielzeit $T_{\text{end},1}^* = 30$.

A_2 :

- Der Auftragsnummer 2
- Der Menge an Produkten $P_2 = \{p_4, p_5\}$
- Der Menge an Anweisungen $W_2 = \{(180, 20, 5), (200, 10, 5)\}$
- Der Zielzeit $T_{\text{end},2}^* = 31$.

A_3 :

- Der Auftragsnummer 3
- Der Menge an Produkten $P_3 = \{p_6, p_7, p_8\}$
- Der Menge an Anweisungen $W_3 = \{(180, 20, 5), (200, 10, 5), (170, 0, 4)\}$
- Der Zielzeit $T_{\text{end},3}^* = 33$.

A_4 :

- Der Auftragsnummer 4
- Der Menge an Produkten $P_4 = \{p_9, p_{10}\}$
- Der Menge an Anweisungen $W_4 = \{(180, 20, 10), (100, 100, 2)\}$
- Der Zielzeit $T_{\text{end},4}^* = 35$.

Es wird vorausgesetzt, dass der HLD 1 als Dämpfer und der HLD 2 als Heißluftofen genutzt wird. Die Referenzparameter des Dämpfers und die des Heißluftofens liegen bei $\vartheta_{\text{ref}}^{(1)} = 100^\circ\text{C}$, $LF_{\text{ref}}^{(1)} = 100\%$ bzw. $\vartheta_{\text{ref}}^{(2)} = 200^\circ\text{C}$, $LF_{\text{ref}}^{(2)} = 0\%$. Ein Gericht wird in dem Ofen zubereitet, bei dem die kleinste mittlere Abweichung der Prozesswerte erzielt wird.

Damit gilt, wenn r die Nummer des Ofens beschreibt

$$r(p_i) = \arg \min_k \left\{ \left| \vartheta_i^* - \vartheta_{\text{ref}}^{(k)} \right| + \left| LF_i^* - LF_{\text{ref}}^{(k)} \right| \right\}.$$

Daraus ergibt sich im Beispiel

$$r(p_j) = (2, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1).$$

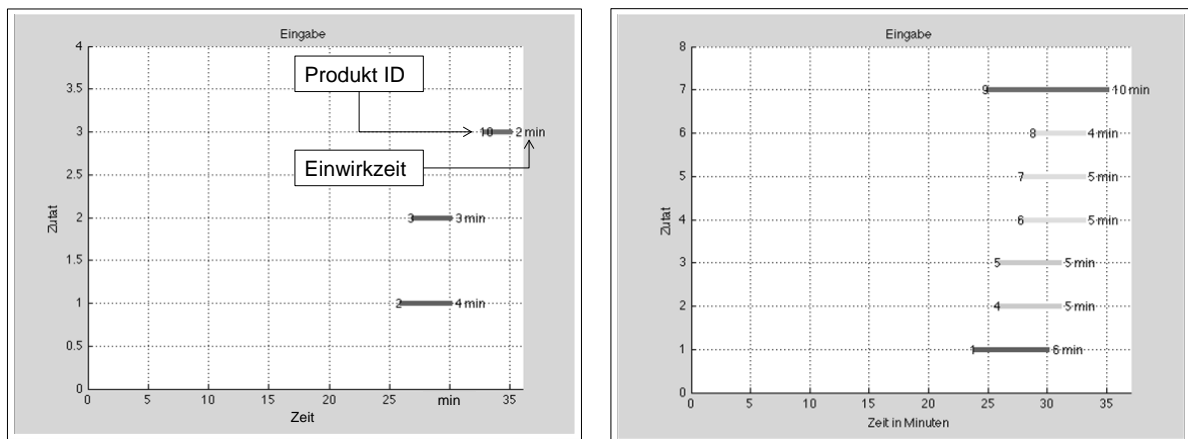
Diese Folge stellt somit die Initialisierung der Algorithmen für die Optimierung dar. Im Folgenden werden die Optimierung und deren Ergebnisse für die vorgestellten Verfahren gezeigt.

Ergebnisse der Heuristik Die erste Heuristik belegt mit den vorhandenen Daten zunächst weitere Variablen. Demzufolge werden die Vektoren der Start- und Endzeiten wie folgt besetzt:

$$t_{\text{start}} = (24, 26, 27, 26, 26, 28, 28, 29, 25, 33)$$

$$t_{\text{end}} = (30, 30, 30, 31, 31, 33, 33, 33, 35, 35).$$

Die Abbildung 4.10 zeigt die graphische Darstellung des initialen Zubereitungsplans. Bei der



(a) Planung Dämpfer (HLD 1)

(b) Planung Heißluftofen (HLD 2)

Abbildung 4.10: Ursprüngliche Planung der ersten Heuristik

initialen Zusammenstellung stellt sich eine Verletzung der Nebenbedingungen 4.2 und 4.3 ein. Daher werden, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, die Start- bzw. Endzeiten um t_{ofen} verschoben, bis die Nebenbedingungen eingehalten werden. Definiert man $t_{\text{ofen}} = 0.5$ min,

so liefert der Algorithmus nach dem ersten Schritt folgende Ergebnisse:

$$t_{\text{start}} = (24, 26.5, 28, 27, 27.5, 28.5, 29, 30.5, 25, 33.5)$$

$$t_{\text{end}} = (30, 30.5, 31, 32, 32.5, 33.5, 34, 34.5, 35, 35.5).$$

Die Abbildung 4.11 zeigt den neuen Plan in graphischer Form. Mit dieser neuen Planung

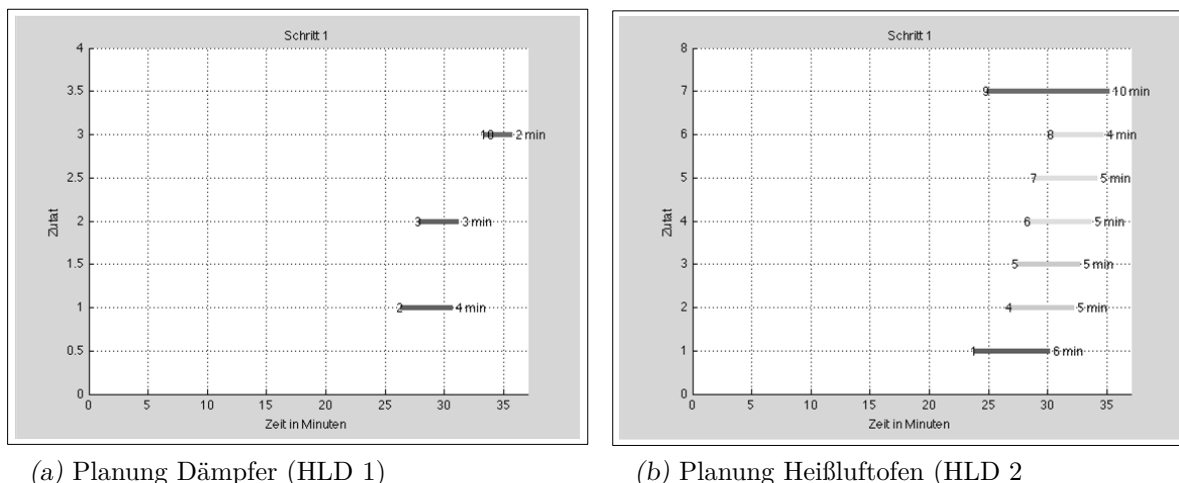


Abbildung 4.11: Planung der ersten Heuristik nach Schritt 1

sind die Nebenbedingungen 4.2 und 4.3 erfüllt. Auch die Bedingung 4.4 ist durch die Rechtsverschiebung erfüllt. Jedoch ist der Dampfgerar 2 überbelegt. Beim Einführen von p_7 wären hier sechs Produkte im Ofen. Damit ist die Nebenbedingung 4.1 verletzt. Aus diesem Grund muss der Algorithmus im zweiten Schritt weiter umplanen.

In diesem Fall wird der Auftrag verändert, der zuletzt eingegangen ist, hier A_4 . Der Vorteil davon ist, dass dem vierten Kunden direkt nach dem Eingang seiner Bestellung vermittelt werden kann, dass sein Wunschtermin nicht möglich ist. Es kann ein anderer Termin vorgeschlagen werden. Würde man die Verschiebung aller Gerichte erlauben, müssten die Kunden ständig über den Status ihrer Bestellung auf dem Laufenden gehalten werden.

Demzufolge werden die Startzeiten der Produkte p_9 und p_{10} nach den Formeln 4.6 und 4.7 verschoben. Als Ergebnis werden folgende Werte ermittelt:

$$t_{\text{start}} = (24, 26.5, 28, 27, 27.5, 28.5, 29, 30.5, 32.5, 41)$$

$$t_{\text{end}} = (30, 30.5, 31, 32, 32.5, 33.5, 34, 34.5, 42.5, 43).$$

Die Abbildung 4.12 zeigt den endgültigen Plan in graphischer Form.

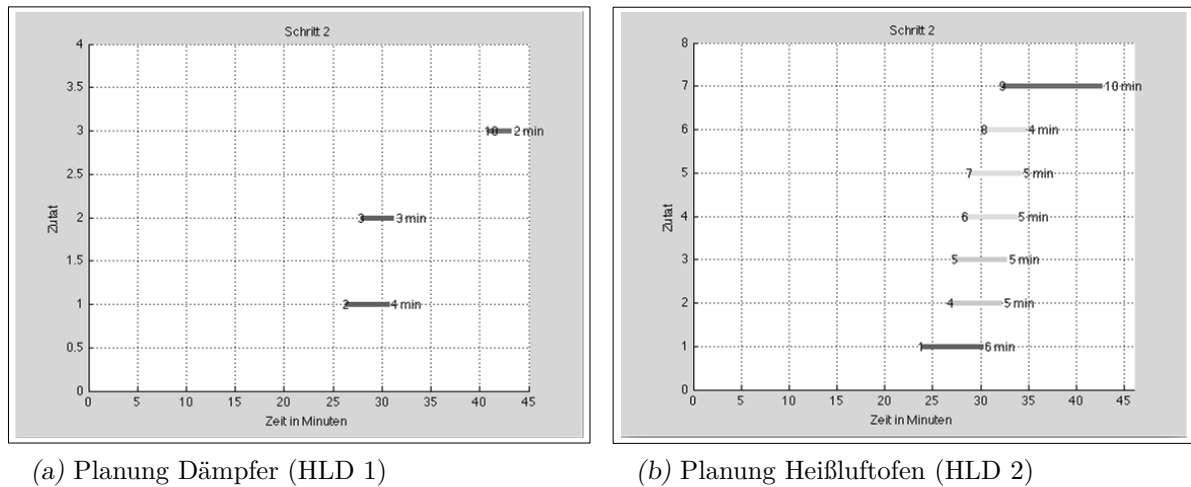


Abbildung 4.12: Planung der ersten Heuristik nach Schritt 2

Als Werte der Zielfunktionen und Nebenbedingungen ergeben sich mit dieser Belegung und der Notation aus Abschnitt 4.6.5.2:

$$f_1(x) = \sum_{i=j}^4 t_{\text{puffer},j} = 5$$

$$f_2(x) = \sum_{j=1}^n T_{\text{warte},j} = 11$$

$$g_1(x) = g_2(x) = g_3(x) = g_4(x) = 0$$

$$\Rightarrow f(x) = f_1(x) + f_2(x) = 16$$

$$g(x) = \sum_{nb=1}^4 \frac{g_{nb}(x)}{g_{nb,\max}} = 0.$$

Ergebnisse der weiterentwickelten Heuristik In der Weiterentwicklung müssen zuerst alle Gerichte nach ihrer Startzeit sortiert werden. Daraus ergibt sich

$$t_{\text{start}} = (24, 25, 26, 26, 26, 27, 28, 28, 29, 33).$$

Die Gerichte werden somit in der folgenden Reihenfolge eingeplant

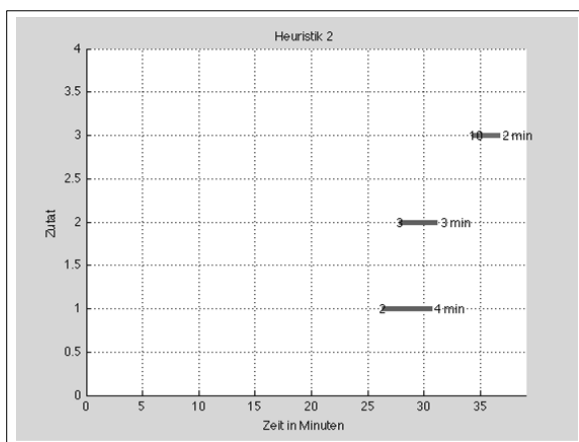
$$p_1 \rightarrow p_9 \rightarrow p_2 \rightarrow p_4 \rightarrow p_5 \rightarrow p_3 \rightarrow p_6 \rightarrow p_7 \rightarrow p_8 \rightarrow p_{10}.$$

Durch die Einplanung nach dem im Abschnitt 4.6.4 beschriebenen Verfahren resultieren die folgenden Werte:

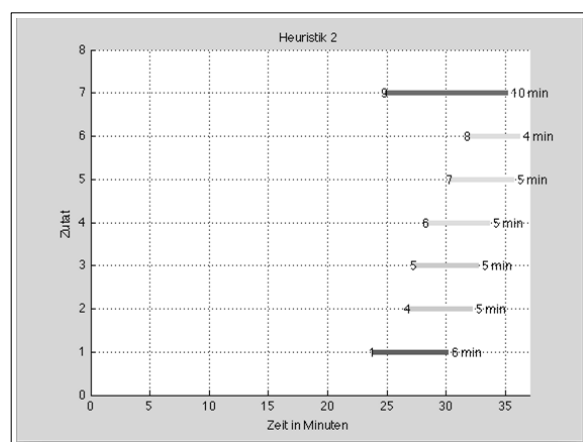
$$t_{\text{start}} = (24, 26.5, 28, 27, 27.5, 28.5, 30.5, 32, 25, 34.5)$$

$$t_{\text{end}} = (30, 30.5, 31, 32, 32.5, 33.5, 35.5, 36, 35, 36.5).$$

Diese Planung wird ebenfalls grafisch (Abbildung 4.13) und in Werten der Zielfunktion und der Nebenbedingungen nachfolgend aufgeführt.



(a) Planung Dampfgerar 1



(b) Planung Dampfgerar 2

Abbildung 4.13: Planung der zweiten Heuristik

$$f_1(x) = \sum_{i=j}^4 t_{\text{puffer},j} = 7$$

$$f_2(x) = \sum_{j=1}^n T_{\text{warte},j} = 6.5$$

$$g_1(x) = g_2(x) = g_3(x) = g_4(x) = 0$$

$$\Rightarrow f(x) = f_1(x) + f_2(x) = 13.5$$

$$g(x) = \sum_{nb=1}^4 \frac{g_{nb}(x)}{g_{nb,\text{max}}} = 0.$$

Dieses Beispiel lässt mehrere Unterschiede der zwei Heuristiken vermuten. Die zweite Heuristik liefert einen kleinen Wert für die Gesamtzielfunktion $f(x)$. Allerdings geschieht dies auf Kosten der Pufferzeit, die sich erheblich vergrößert. Außerdem erfüllen beide Algorithmen die Nebenbedingungen gleich gut. Des Weiteren unterscheiden sich beide Verfahren in der Laufzeit. Das erste Verfahren hat insgesamt 1.25 Sekunden benötigt,

um die vier Gerichte einzuplanen. Im Anwendungsfall ist es allerdings nur von Relevanz, wie lange es dauerte, das letzte Gericht in die schon vorhandene Planung, welche sich nicht mehr ändert, einzuarbeiten. Diese Zeit betrug 0.81 Sekunden. Die zweite Heuristik benötigte nur 0.01 Sekunden um alle Gerichte einzuplanen. Damit ist gezeigt, dass selbst bei kleinen Beispielen der Zeitunterschied beider Verfahren sehr groß ist. Ein Nachteil der zweiten Heuristik ist jedoch, dass immer alle Aufträge neu eingeplant werden. Dies ist zwar aufgrund der Geschwindigkeit ohne Weiteres möglich, jedoch wird es wahrscheinlich für die Kunden sehr ärgerlich, wenn sie bei jeder neu eingegangenen Bestellung eine Nachricht erhalten, dass sich ihre Mahlzeit ein weiteres Mal verschoben hat.

Ergebnisse des Differential Evolution Algorithmus Da Differential Evolution mit einstellbaren Parametern gestartet werden muss, wurden zunächst kurze Tests durchgeführt, um solche Parameter zu bestimmen, die bezüglich dieses Problems eine gute Optimierung ermöglichen. Dabei fiel sofort auf, dass dieser Algorithmus mit dem gegebenen Problem große Schwierigkeiten hatte. Bei sehr wenigen $n < 3$ Aufträgen waren die Ergebnisse von Differential Evolution noch sehr gut und es stellten sich $F = 0.7$, $Wk_{Cr} = 0.9$ und $Np = 100$ als die zu wählenden Parameter heraus. Schon bei dem gegebenen Beispiel hatte dieser Algorithmus Probleme. Nach 1000 Generationen wurde folgender Plan ausgegeben:

$$t_{\text{start}} = (35.6, 38.1, 39.6, 26.7, 27.2, 29, 28.5, 26.2, 30.2, 37.6)$$

$$t_{\text{end}} = (41.6, 42.1, 42.6, 31.7, 32.2, 34, 33.5, 30.2, 40.2, 39.6).$$

Es resultieren folgende Werte:

$$f_1(x) = \sum_{i=j}^4 t_{\text{puffer},j} = 6.9$$

$$f_2(x) = \sum_{j=1}^n T_{\text{warte},j} = 16$$

$$g_1(x) = g_2(x) = g_3(x) = g_4(x) = 0$$

$$\Rightarrow f(x) = f_1(x) + f_2(x) = 22.9 \quad g(x) = \sum_{nb=1}^4 \frac{g_{nb}(x)}{g_{nb,\text{max}}} = 0.$$

Diese Planung wird in der Abbildung 4.14 graphisch dargestellt. Im Verlauf des Optimierungsprozesses zeigt sich, dass der Algorithmus ab einer bestimmten Iteration nur noch sehr kleine Verbesserungen in Bezug auf die Reduzierung der Pufferzeiten liefert. Der Algorithmus läuft im untersuchten Fall in lokale Optima. Die Dauer der Optimierung

beträgt unter Anwendung des Differential Evolution Algorithmus' 143 Sekunden. Aufgrund der Zeitdauer und der recht geringen Erfolgsquote ist Differential Evolution auch in der angepassten Form nicht für die Optimierung unter den vorliegenden Randbedingungen anwendbar.

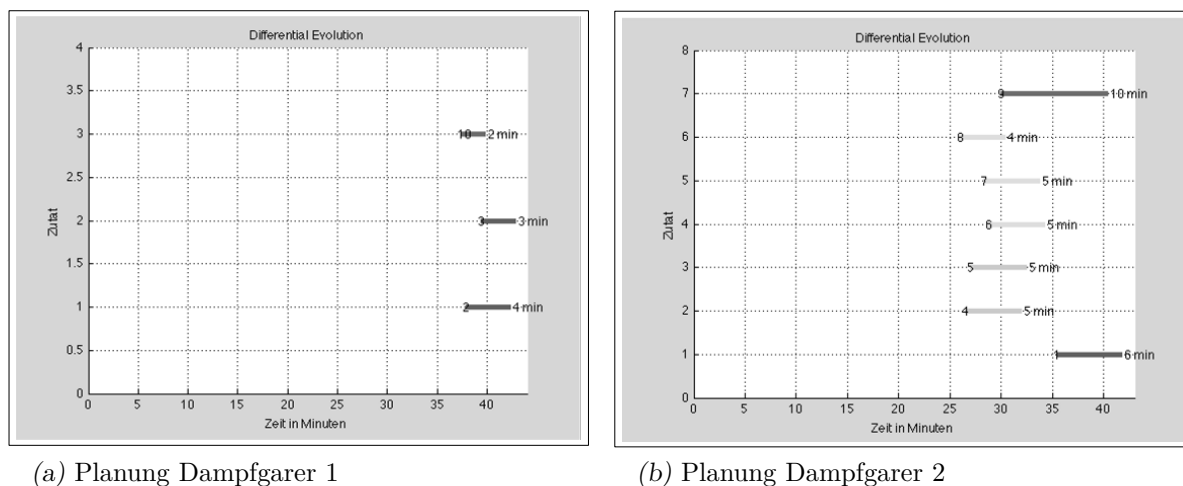


Abbildung 4.14: Planung des Differential Evolution

Ergebnis der Particle Swarm Optimization Bei Particle Swarm Optimization wurde ähnlich wie bei Differential Evolution verfahren. Bei diesem Verfahren konnten jedoch noch schwerwiegendere Unzulänglichkeiten als der Differential Evolution festgestellt werden. Nach einer sehr kurzen Zeit ist der gesamte Schwarm konvergiert und es fand keine Verbesserung mehr statt. Es wurde mit den Parametern $Np = 100$, $w = 0.9$, $c_1 = 1.5$ und $c_2 = 1.5$ gesucht. Als Nachbarschaft wurde die Start-Nachbarschaft gewählt. Da auch dieses Verfahren sehr lange braucht und noch dazu nicht in der Lage ist, die Nebenbedingungen zu erfüllen, ist es in der implementierten Form wie Differential Evolution ebenso nicht anwendbar für das gegebene Problem. Ein Durchlauf mit dem gegebenen Beispiel lieferte folgende Werte:

$$f_1(x) = \sum_{i=j}^4 t_{\text{puffer},j} = 40.2$$

$$f_2(x) = \sum_{j=1}^n T_{\text{warte},j} = 22.4$$

$$g_1(x) = 10 \quad g_2(x) = 2.8 \quad g_3(x) = 0.5 \quad g_4(x) = 7.3$$

$$\Rightarrow f(x) = f_1(x) + f_2(x) = 62.6 \quad g(x) = \sum_{nb=1}^4 \frac{g_{nb}(x)}{g_{nb,\max}} = 2.$$

4.6.5.4 Benchmark und Planungsergebnisse

Der Vergleich von Lösungsmöglichkeiten erfolgte auf der Basis der in Abschnitt 4.3 vorgestellten Datensets. Zunächst wurde jedoch das voran beschriebene Benchmark durchgeführt, um die Wahl des richtigen Algorithmus' zu begründen.

Die Ergebnisse der beiden metaheuristischen Verfahren waren aufgrund der stark einschränkenden Nebenbedingungen nicht zufriedenstellend. Darin ist begründet, dass für die weiteren Betrachtungen ausschließlich die heuristischen Verfahren Anwendung finden. Für den Algorithmenvergleich stehen für detaillierte Analysen die beiden beschriebenen Heuristiken zur Verfügung. Beide haben in erster Linie alle Nebenbedingungen erfüllt. Somit sind nur noch die Funktionswerte und die jeweiligen Laufzeiten der Verfahren von Relevanz.

Die Tabellen 4.2 und 4.3 zeigen die Optimierungsergebnisse der beiden Verfahren. Es sind jeweils die Rechenzeiten (t_{Gesamt}) und die Funktionswerte am Ende der Optimierung dargestellt. Zudem zeigt Tabelle 4.2 die Zeit, die von der ersten Heuristik benötigt wird, um den letzten Auftrag einzuplanen. Analog zum Vorgehen im Algorithmenvergleich werden die folgenden Funktionswerte $f_1(x)$, $f_2(x)$ und $f(x) = f_1(x) + f_2(x)$ als Sinnbild für die ermittelten Zielfunktionen festgehalten. Aus dieser Information lässt sich feststellen, inwieweit eine Zielgröße besser als die andere minimiert worden ist.

	t_{Gesamt}	Zeit letztes Gericht	$f_1(x)$ (3.1)	$f_2(x)$ (3.2)	$f(x)$
Szenario 1	11.71 s	0.73 s	391	873	1264
Szenario 2	2.98 s	0.41 s	113	168	281
Szenario 3	1.47 s	0.27 s	59.5	42	101.5

Tabelle 4.2: Ergebnisse Heuristik 1

	t_{Gesamt}	$f_1(x)$ (3.1)	$f_2(x)$ (3.2)	$f(x)$
Szenario 1	0.09 s	297.5	861.5	1159
Szenario 2	0.03 s	59	143	202
Szenario 3	0.02 s	40.5	54.5	95

Tabelle 4.3: Ergebnisse Heuristik 2

Das Ergebnis zeigt einen eklatanten Unterschied in der Laufzeit der beiden Verfahren. Bei der entwickelten Heuristik werden zwei Zeiten festgehalten. Es handelt sich dabei um die Gesamtlaufzeit des Benchmarks sowie die Zeit, die zur Einplanung des zuletzt bestellten Gerichts notwendig ist. In der Praxis bedeutet dies, dass lediglich ein Gericht in eine vorhandene Planung eingearbeitet werden muss. Trotz dieser Unterscheidung schneidet die

Heuristik hinsichtlich ihrer Laufzeit deutlich schlechter gegenüber der weiterentwickelten Heuristik ab.

Die Ergebnistabellen machen außerdem deutlich, dass die zweite Heuristik grundsätzlich kleinere Funktionswerte liefert. Dies ist insofern überraschend, da durch die Ergebnisse der Algorithmenauswahl (Abschnitt 4.6.5.3) die Vermutung aufkam, dass die entwickelte Heuristik die Pufferzeiten t_{Puffer} besser minimiert. Dies ist anscheinend nur bei einer kleinen Anzahl an Gerichten der Fall. Die minimale Pufferzeit wurde von der weiterentwickelten zweiten Heuristik in den Szenarien 2 und 3 nur angenähert.

Aus der Gesamtwarezeit der Kunden erkennt man, dass die umgesetzte Anlagentechnik, mit ihren Beschränkungen, einem Auftragsumfang von 100 Produkten und einer Durchlaufzeit von 20 Minuten nicht bewältigen könnte. Während sich die Wartezeit ($f_2(x)$) bei den Szenarien 2 und 3 bei beiden Algorithmen in Grenzen hält, übersteigt sie im Szenario 1 den Wert von 800 Zeiteinheiten deutlich. Dieses Ergebnis zeigt sich gleichermaßen bei den Betrachtungen der Lieferzeiten in Abbildung 4.16.

Es ist zu resümieren, dass im Allgemeinen die überarbeitete Heuristik die besten Ergebnisse liefert. Sie überzeugt außerdem durch eine geringe Laufzeit. Für die Praxis störend ist jedoch, dass sie stets alle Gerichte neu plant.

Die Ergebnisdarstellung als Gantt-Diagrammen ist der Abbildung 4.15 in einem Ausschnitt eines der Szenarien nach der Terminplanung zu entnehmen. Deutlich zu erkennen ist die anwendungsspezifische Verteilung einzelner Komponenten eines Auftrages in der beschriebenen treppenförmigen Anordnung. Die einzelnen Komponenten können anhand der abgetragenen ID einem Auftrag zugeordnet werden. Die Einwirkzeit auf die jeweilige Komponente ist den Zeitbalken zugeordnet.

Die Auswertung des Szenarios, bestehend aus 37 Produkten, welche auf insgesamt 12 Aufträge verteilt sind, macht folgende Kennzahlen deutlich: Der größte Lieferverzug, der sich einstellt, entspricht 82 Zeiteinheiten. Zwei der betrachteten Aufträge waren exakt zum Wunschtermin fertiggestellt. Daraus resultiert eine Liefertreue von 16,7 %. Die Darstellung der Lieferverzögerungen in Abbildung 4.16 erscheint zunächst als schlechtes Ergebnis.

Die sich darstellenden anwachsenden Verspätungen sind durch zwei Dinge zu begründen. Zum einen zwingt der Planungsalgorithmus das Auftragsprogramm in das Korsett der gravierenden Ressourcenbeschränkungen, die sich in Form der Nebenbedingungen ausdrücken. Zum anderen ist mit dem Wunsch, die Qualität der verarbeiteten Produkte zu maximieren, auch damit zu rechnen, dass die Liefertermine nur noch eine untergeordnete Rolle spielen. Die Nebenbedingung, dass frühestens nach dem Wunschtermin mit der Fertigstellung

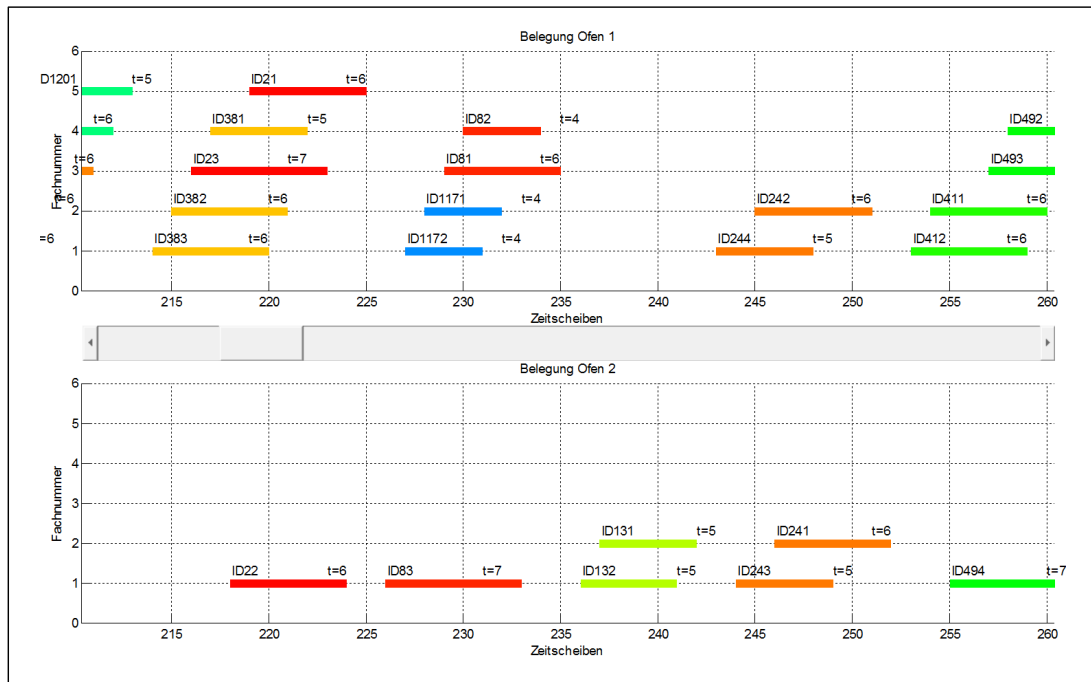


Abbildung 4.15: Belegungsdiagramm nach der Zeitoptimierung

zu rechnen ist, kann damit als bestätigt betrachtet werden. Anderenfalls würden sich negative Lieferverzögerungen einstellen. Eine Aussage zur Produktqualität ist in diesem Stadium der Planung noch nicht möglich. Erst im nachfolgenden Schritt der Planung werden die Qualitätsdaten der Produkte zur Optimierung herangezogen.

4.7 Optimierung mit Qualitätsmodell

4.7.1 Ablauf

Auch die Qualitätsoptimierung erfolgt in zwei vergleichbaren Schritten wie die Terminplanung (vgl. Abbildung 4.5). Zunächst erfolgt die Optimierung des neu einzuplanenden Auftrages (Auftragsqualität). Wurde für die parallel zu verarbeitenden Komponenten eines Auftrages eine bestmögliche Qualität ermittelt, wird dieses Konstrukt in Form von Verarbeitungsterminen in den Anlagenschedule integriert (Integration Anlagenplanung). Auch dabei wird nach den nachfolgend beschriebenen Schritten ein optimaler Termin und die optimale Parametereinstellung für die Anlage ermittelt.

Um diesen Schritt durchführen zu können, ist es wie in Kapitel 3 beschrieben erforderlich, sich auf qualitätsbestimmende Faktoren zu konzentrieren und über diese anhand einer Produktmodellierung die Veränderung der Belegungspläne durchzuführen. Im Folgenden soll dieses Vorgehen für die Lebensmittelverarbeitung aufgezeigt werden.

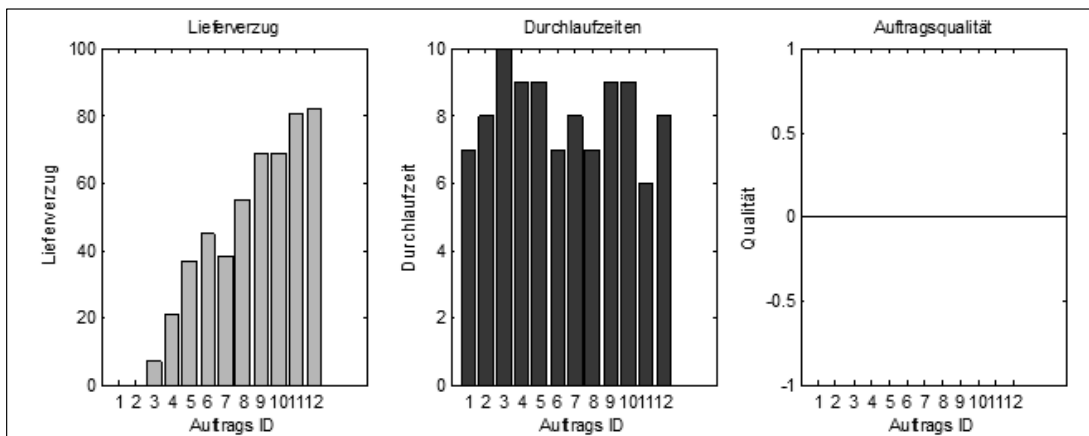


Abbildung 4.16: Lieferverzugsdarstellung der betrachteten Aufträge

Der Temperaturverlauf wird mit zwei Lebensmitteln simuliert. Abschließend werden Einsatzmöglichkeiten erläutert.

4.7.2 Prozess- und Produktmodellierung

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, können im HLD unterschiedliche Garverfahren eingestellt werden. Dies geschieht durch Kombination unterschiedlicher Temperatur- und Luftfeuchtigkeitseinstellungen. Eine Übersicht der unterschiedlichen Garverfahren und die dazugehörigen Temperatur-Luftfeuchtebereiche ist in Abbildung 4.17 zu sehen. Das Modell, welches nachfolgend beschrieben wird, bezieht sich auf den Bereich (Intensiv-)Dämpfen (siehe Abbildung 4.17).

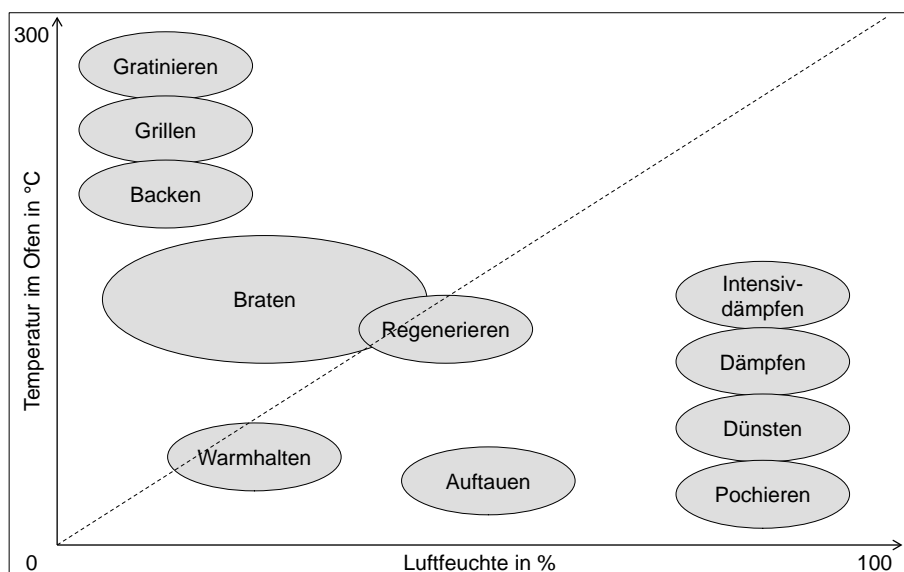


Abbildung 4.17: Garverfahren und die dazugehörigen Temperatur-Luftfeuchtebereiche. Grafik ist angelehnt an KEUSEN (2012).

In diesem Bereich findet eine Wärmeübertragung auf das Lebensmittel fast ausschließlich durch Konvektion (Wärmeleitung) statt (vgl. Abbildung 3.2). Eine etwaige Energieübertragung durch Wärmestrahlung wird vernachlässigt. Da im Intensiv-Dampfbereich mit keiner Austrocknung im Randbereich des Lebensmittels zu rechnen ist, können die Wärmeleitwiderstände und die Wärmeübergangskoeffizienten als konstant angenommen werden.

Gemäß des Vorgehens in Abschnitt 3.4.5 ist ein thermodynamisches Modell für das Lebensmittel aufzubauen. Zur Demonstration erfolgt dies im Folgenden in einer Detaillierung von drei zu simulierenden Schichten. Da sich die Temperaturverteilung innerhalb der Lebensmittel als inhomogen beschreiben lässt, wird zur Darstellung der verschiedenen Ebenen das Lebensmittel in drei geometrische Schichten (analog Abbildung 3.4) aufgeteilt. Somit kann aus jeder Schicht der Temperaturverlauf separat herausgelesen werden.

Der Wärmeübergangswiderstand, welcher sich zwischen der Umgebungstemperatur und der Randschicht einstellt, wird wie folgt beschrieben:

$$R_{Uebergang} = \frac{1}{\alpha \cdot A} \quad (4.15)$$

mit:

α = Wärmeübergangskoeffizient

A = Fläche

Der Wärmeübergangskoeffizient α vernachlässigt nach HERWIG (2000) alle Details des Temperaturfeldes in der direkten Produktumgebung. Diese müssen global im empirischen Faktor a enthalten sein. Dies bedeutet, der Wärmeübergangskoeffizient repräsentiert in diesem Modell das Garverfahren, denn er kann nur für spezifische physikalische Situationen angegeben werden (HERWIG 2000).

Um das Lebensmittelmodell in die erwähnten drei Schichten zu unterteilen, wird das in 3.4.5 eingeführte Blockschaltbild dreimal in Reihe geschaltet und mit der Ofentemperatur angeregt. Dieses Gesamtmodell ist in Abbildung 4.18 zu sehen.

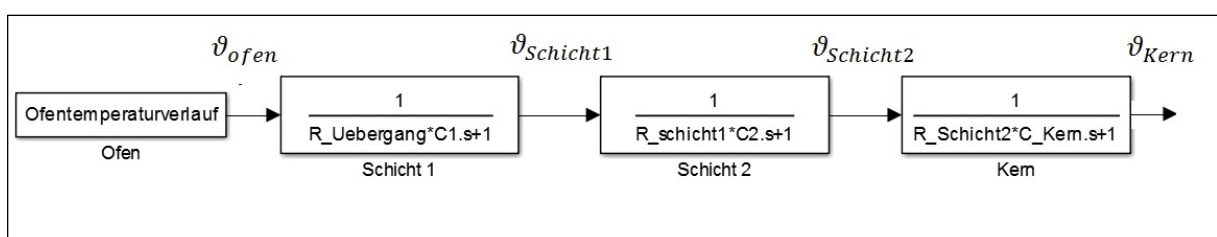


Abbildung 4.18: Blockschaltbild des Lebensmittels mit Übertragungsfunktion jeder Schicht.

Das Modell ist zusätzlich mit den entsprechenden Lebensmittelkonstanten näher zu beschreiben. Nach der Modellierung des verwendeten Ofens ist es möglich, den Temperaturverlauf im Kern des Gargutes zu simulieren und weitere Ableitungen hinsichtlich der Verwendung einer Repräsentanz von Qualität in der Maschinenbelegungsplanung zu treffen.

4.7.2.1 Modellierung eines Heißumluftdampfgarers

Wie in Abschnitt 3.4.3 beschrieben, sind die beiden Phasen Aufheizen und Abkühlen des verwendeten HLD genauer zu beschreiben. Die Ermittlung der sog. Steigzeit (Aufheizen des HLD auf Betriebstemperatur $\vartheta_{Ofen} \neq const.$) und der Haltezeit (konstante Temperatur im Ofen $\vartheta_{Ofen} = const.$) wurde durch Versuche gestützt. Im Ergebnis der Untersuchung zeigten sich Kurven wie in Abbildung 4.19 und 4.20 zu sehen.

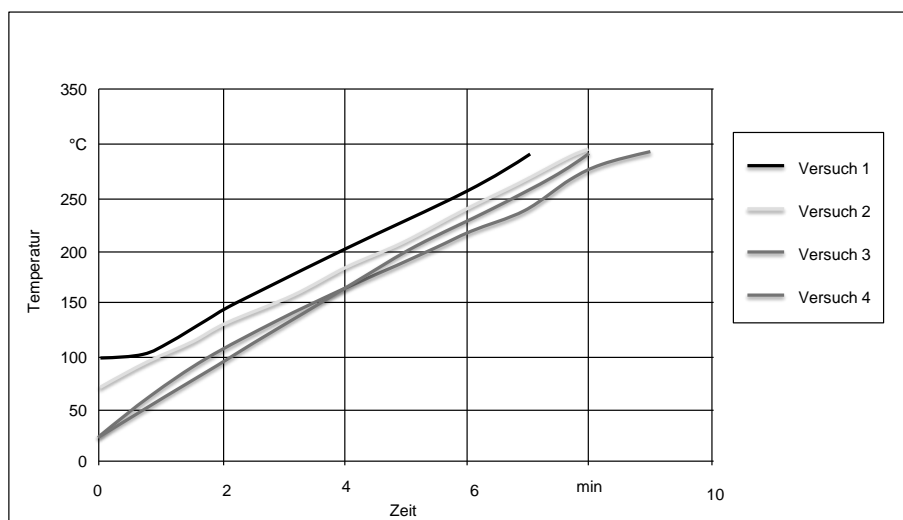


Abbildung 4.19: Aufheizkurve des Ofenraums bei verschiedenen Starttemperaturen

Das Aufheizen zeigt in erster Näherung einen linearen Verlauf, der sich nach der Formel 3.5 beschreiben lässt. Da die Steigungen der diversen Kurven nicht identisch sind, wurde aus den Steigungen der vier Kurven ein Mittelwert gebildet.

$$m_{ST} = \frac{\Delta\vartheta}{\Delta t} \quad (4.16)$$

$$\bar{m}_{ST} = \frac{m_{ST_1} + m_{ST_2} + m_{ST_3} + m_{ST_4}}{n}$$

$$\bar{m}_{ST} = \frac{27,28 \frac{^{\circ}C}{min} + 25,1 \frac{^{\circ}C}{min} + 33,4 \frac{^{\circ}C}{min} + 29,88 \frac{^{\circ}C}{min}}{4} = 28,91 \frac{^{\circ}C}{min} \quad (4.17)$$

Damit lässt sich nun die Aufheizkurve bilden.

$$\vartheta_{Ofen} = 28,91 \frac{^{\circ}C}{min} \cdot t + \vartheta_{Start} \quad (4.18)$$

Die Abkühlversuche wurden annähernd bei einer Temperatur von 232 °C begonnen. Der Ofen wurde bis auf 100 °C abgekühlt. Danach, in etwa ab Minute 13, wurde die Tür geöffnet, um die Abkühlung im Falle des Einbringens einer weiteren Komponente mit aufzuzeichnen.

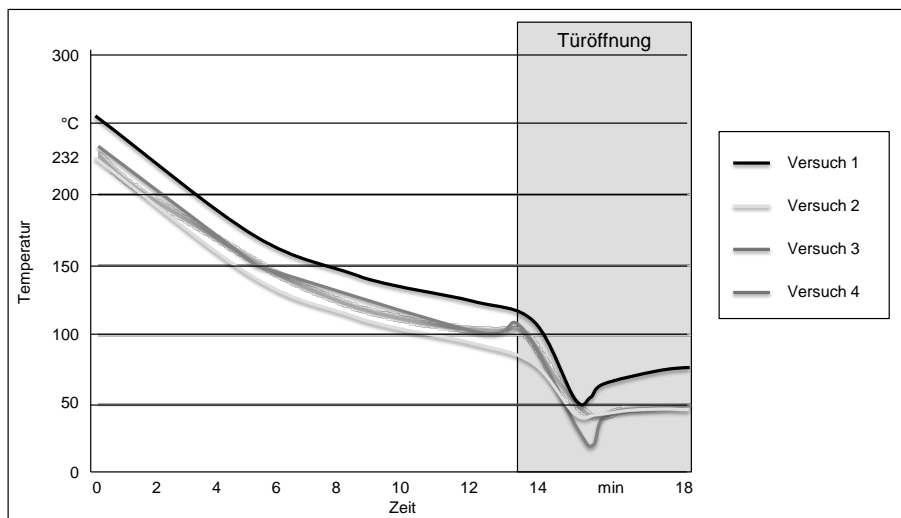


Abbildung 4.20: Abkühlkurve des Heißluftdämpfers von 232 °C auf 100 °C zzgl. Türöffnung

Aus Abbildung 4.20 wurde mit Hilfe der Annahme eines exponentiellen Abkühlvorgangs folgende Funktion erstellt:

$$\vartheta_{Ofen} = \vartheta_{End} + (\vartheta_{Start} - \vartheta_{End}) \cdot e^{\frac{-1}{\tau} \cdot t} \quad (4.19)$$

$$\text{mit } \tau = 5 \text{ min} \hat{=} 300 \text{ s}$$

Auch in der Anwendung gilt, dass zunächst eine zusammenhängende Prozesskurve des HLD zu erstellen ist, welche auch Störungen im Temperaturverlauf berücksichtigt. Solche Störungen sind, wie bereits in Abschnitt 3.4.3 angeführt, durch das Ein- oder Ausbringen eines Produktes gekennzeichnet. Hierbei muss der HLD geöffnet werden, was dazu führt, dass er einen Abkühlvorgang vollzieht. Dieser ist verursacht durch das Temperaturgefälle zwischen Garraum und Umgebung und verläuft nach dem typischen Verlauf seiner Abkühlkurve. Wie beschrieben, können die verschiedenen Phasen der Abkühlung zeitlich zu einem Prozess der Abkühlung zusammengefasst werden. Hierfür wird im Folgenden eine technologisch bedingte Zeitkonstante von $t_{Abkühl} = 2 \text{ min}$ angenommen.

Aus dem obigen Ablauf und den Gleichungen 4.18 bis 4.19 ergibt sich die abschnittsweise definierte Funktion des HLD wie folgt:

$$\vartheta_{Ofen}(t) = \begin{cases} \vartheta_{Umgebung} + (\vartheta_{Start} - \vartheta_{Umgebung}) \cdot e^{\frac{-1}{300} \cdot t}, & \text{für } 0 \leq t \leq 2 \text{ min} \\ 28,91 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}} \cdot t + \vartheta_{t=2 \text{ min}}, & \text{für } 2 \text{ min} < t \leq \frac{\vartheta_{Ende} - \vartheta_{t=2 \text{ min}}}{28,91 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}} \\ \vartheta_{End}, & \text{für } t > \frac{\vartheta_{End} - \vartheta_{t=2 \text{ min}}}{28,91 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}} \end{cases} .$$

Simuliert ergibt dies ein Verhalten der Art, wie es in Abbildung 4.21 dargestellt ist. Hier wird ein Bestückungsvorgang und das gleichzeitige Ändern der Temperatur von 85 °C auf 100 °C simuliert. Deutlich zu sehen ist der Abkühlvorgang, welcher über zwei Minuten andauert. Danach stellt sich der lineare Anstieg der Temperatur ein.

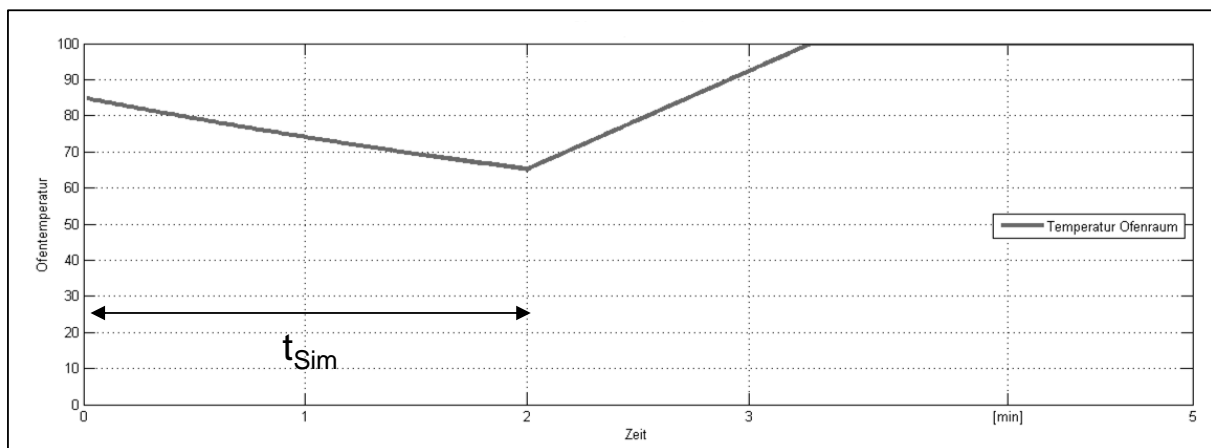


Abbildung 4.21: Temperaturverlauf bei der Simulation eines Produktwechsels

Diese ermittelte Funktion wird in der Simulation des Kerntemperaturverlaufs der Produkte in zwei Fälle unterschieden:

Fall 1: Ein Lebensmittel wird in den Ofen eingebracht, ohne das schon ein Produkt vorhanden ist. Hierfür werden lediglich der Temperaturanstieg und die Endtemperatur für die Simulation des Kerntemperaturverlaufes herangezogen.

Fall 2: Es befindet sich bereits Gargut im HLD. Dieses Gargut wird in seinem Garablauf durch das Öffnen der Ofentür gestört. Zudem kann eine Anpassung der Temperatur erfolgen, was dazu führt, dass eine erneute Simulation durchgeführt werden muss (siehe auch Kapitel 4.7.5.2). Hierfür wird der jeweils aktuelle Simulationsstand, also der komplette Temperaturverlauf des HLD, dem Modell übergeben. Dieser Fall ist auch in Abbildung 4.21 zu sehen. Falls die neue Temperatur kleiner als die alte Ofenraumtemperatur ist, wird bis zum Erreichen dieser Temperatur mit der ermittelten Funktion abgekühlt.

4.7.2.2 Lebensmittelkonstanten ausgewählter Produkte

Für den Anwendungsfall wurden zwei Lebensmittel (Schweineoberschale und Kartoffel) repräsentativ ausgewählt und deren Konstanten recherchiert. Die Materialkonstanten wurden aus ANDREÄ ET AL. (2010) übernommen. Diese werden nachfolgend aufgeführt. Zunächst sind die Simulationparameter einer Schweineoberschale dargelegt. Die geometrischen Ausmaße des Schweinefleisches wurden wie folgt definiert:

- Geometrie: Quader
- Höhe: 1,2 cm
- Breite: 7 cm
- Länge: 10 cm

Diese Dimensionierung entspricht etwa einem Stück mit einer Masse von 100 g.

Lebensmittelkonstanten Schweinefleisch	
spez. Wärmekapazität c	3,49 $\frac{kJ}{kgK}$
Wärmeleitfähigkeit λ	0,48 $\frac{W}{mK}$

Wie bereits erwähnt, repräsentiert der spezifische Wärmeübergangskoeffizient die Garmethode und kann laut SATTELMAYER & POLIFKE (2011) mit $\alpha = 200 \frac{W}{m^2K}$ angenommen werden. Um den Garegrad (Gleichung 2.11 bzw. 2.15) berechnen zu können, sind die lebensmittelspezifischen empirischen Konstanten a und b nötig. Diese Konstanten wurden aus dem Verlauf der vorhandenen Garkurve für Schweineoberschalen berechnet ANDREÄ ET AL. (2010). Daraus ergeben sich a zu 11,35 und b zu -0,0762. Die nötige Temperatur ist auf 20°C (Raumtemperatur) festgelegt worden.

Die zweite Zutat ist eine Sättigungsbeilage. Hier wird auf die empirisch vorhandenen Daten (vgl. ANDREÄ ET AL. (2010)) der Kartoffelsorte Culpa zurückgegriffen. Die geometrischen Maße werden wie folgt festgelegt:

- Geometrie: Kugel
- Durchmesser: 7 cm

Eine Kartoffel mit diesem Durchmesser hat in etwa das Gewicht von 150 g. Die Lebensmittelkonstanten werden ebenfalls aus ANDREÄ ET AL. (2010) herangezogen:

Lebensmittelkonstanten Kartoffel	
spez. Wärmekapazität c	$3,43 \frac{kJ}{kgK}$
Wärmeleitfähigkeit λ	$0,415 \frac{W}{mK}$

Der Wärmeübergangskoeffizient ist wie bei Schweinefleisch mit $\alpha = 200 \frac{W}{m^2K}$ angenommen. Die empirischen Garegradkonstanten a und b werden für die Kartoffel aus PIEKARSKI & ZACHARIAS (1981) übernommen. Dort werden die Parameter mit $a = 14,6$ und $b = -0,1243$ angegeben. Die Anfangstemperatur des Lebensmittels wird hier mit $15^\circ C$ festgesetzt. Die festgelegten Werte sowie die unter Abschnitt 3.4.5 aufgeführten Produktparameter dienen der Initialisierung des Lebensmittelmodells, welches durch das Drei-Schicht-Modell repräsentiert wird.

4.7.3 Ergebnisse der Simulation des Kerntemperaturverlaufs

Die Abbildungen 4.22 zeigen den Kerntemperaturverlauf der ausgewählten Beispielprodukte. Um mit einem gültigen Modell simulieren zu können, wurde der einwirkende Temperaturbereich, welcher vom HLD verursacht wird, auf $60^\circ C$ bis $110^\circ C$ eingeschränkt. Dieser Temperaturbereich wurde so gewählt, da bei Temperaturen unter $60^\circ C$ wichtige für die Garung notwendige lebensmittelkinetische Prozesse nicht stattfinden (WESTPHAL ET AL. 1996). Bei Temperaturen über $120^\circ C$ kommt es zur Austrocknung und später zur Krustenbildung in den Randschichten (WESTPHAL ET AL. 1996). Damit können sich die als konstant angenommenen Lebensmittelparameter (z.B. Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität) in einem nicht mehr tolerierbaren Maße verändern und das Simulationsergebnis verfälschen.

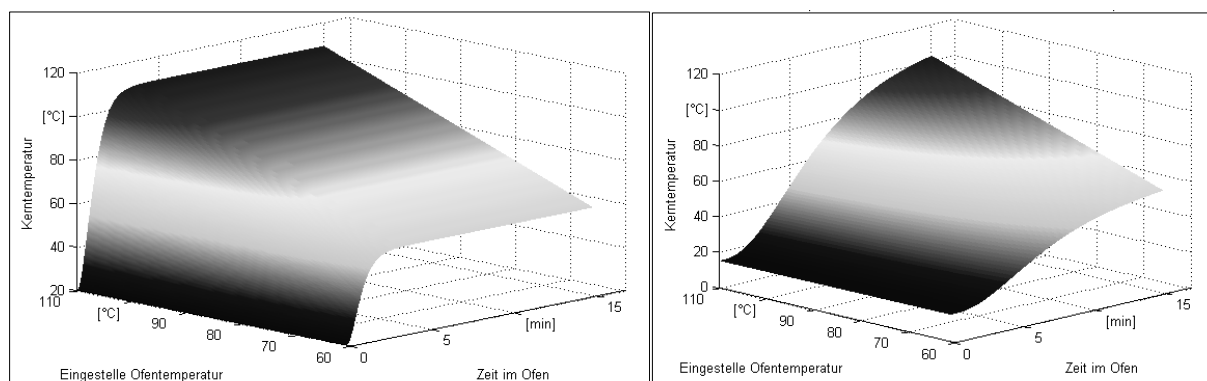


Abbildung 4.22: Temperaturverlauf von Schweinefleisch (links) und einer Kartoffel (rechts). Die Simulationszeit beträgt jeweils 15 min

Zur Validierung der Simulation ist in Abbildung 4.23 eine Gegenüberstellung des simulierten und eines bei BOGNÁR & PIEKARSKI (1985) gemessenen Kerntemperaturverlaufs der

Kartoffelsorte Culpa zu sehen. Dieser Vergleich ist als zulässig anzusehen, da auch die gemessene Kurve bei in einem Konvektionsdämpfer verarbeiteten Kartoffeln ermittelt wurde, der dem Modellierten ähnelt. Da die Ofenparameter wie bspw. die Ofenanstiegszeiten nicht exakt übereinstimmen, ist bei einer Kerntemperatur von z.B. 80 °C in der Simulation und der gemessenen Kurve eine Differenz von ca. drei Minuten festzustellen. Zudem kann die Zeitdifferenz mit der großen Toleranzbreite der lebensmitteltechnischen Daten, welche bei Naturprodukten vorhanden sind, begründet werden. Die charakteristischen Verläufe der beiden Kurven sind jedoch als identisch anzusehen. Damit ist das aufgebaute Lebensmittelmodell unter den genannten Randbedingungen als korrekt anzunehmen.

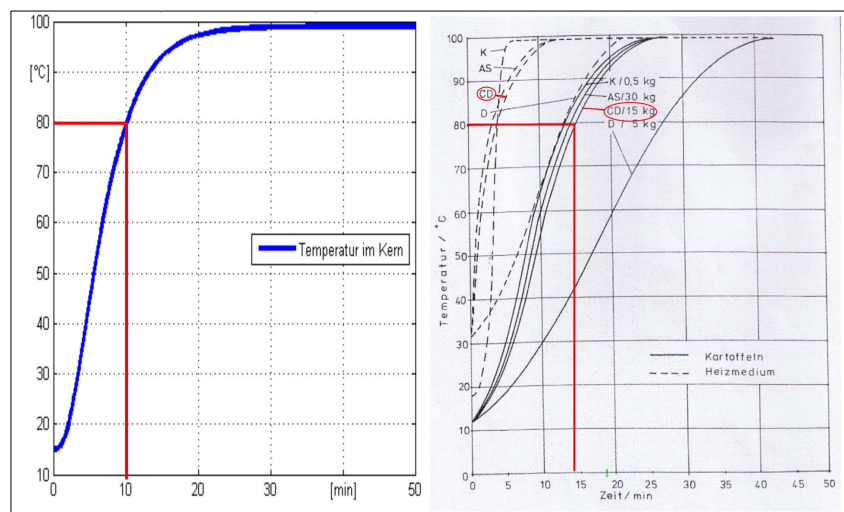


Abbildung 4.23: Vergleich zwischen simuliertem Verlauf (links) und real gemessenem Temperaturverlauf im Kern (vgl. BOGNÁR & PIEKARSKI (1985)) (rechts)

Der Kerntemperaturverlauf der modellierten Schweineoberschale bei einer Ofentemperatur von 100 °C ist in Abbildung 4.24 zu sehen. Diese zweidimensionale Darstellung spiegelt einen Schnitt durch den simulierten Temperaturverlauf (vgl. Abbildung 4.22) bei der genannten Temperatur wider. Der für thermische Prozesse typische PT_2 -Verlauf ist hierbei zu erkennen. Im Beispiel steigt die Temperatur sehr viel schneller als bei der in Abbildung 4.23 simulierten Kartoffel. Das Oberschalenstück ist bereits nach etwa 3 min auf seine Endtemperatur von 100 °C aufgeheizt. Dies hängt zum einen mit den unterschiedlichen Lebensmittelkenndaten, zum anderen auch mit der Dicke der Fleischscheibe, welche lediglich 1,2 cm beträgt (Kartoffeldurchmesser 7 cm), zusammen. Durch die geringe Höhe wird die Temperaturdifferenz zwischen Kern und Ofen schneller ausgeglichen. In der Literatur konnte kein gemessener Temperaturverlauf für Schweineoberschale gefunden werden, welcher unter gegebenen Randbedingungen eine direkte Gegenüberstellung zulässt. Der charakteristische Temperaturverlauf, welcher auch in ANDREÄ ET AL. (2010) mehrmals genannt ist, wird zur Bestätigung des Modells herangezogen.

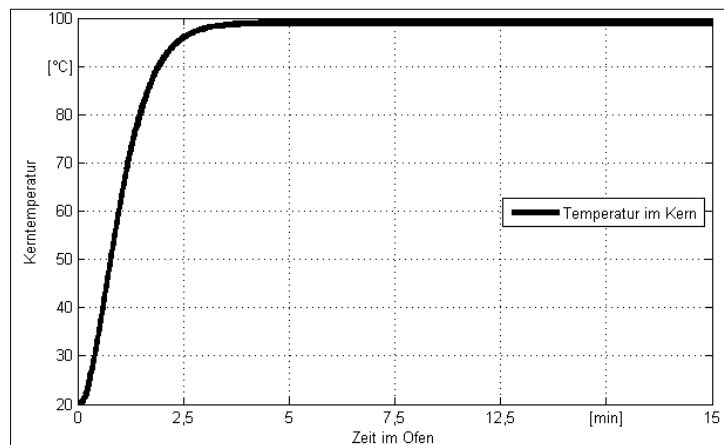


Abbildung 4.24: Kerntemperaturverlauf von Schweineoberschale

Mit den jeweils ermittelten Temperaturkennfeldern ist es nun möglich, die Kalkulation des Garegrades nach Formel 2.15 durchzuführen. Erfolgt dies, stellt sich ein Garegradverlauf für den kompletten Simulationsraum ein. Dies ist in Abbildung 4.25 zu sehen. Mit der Anwendung der Aussagen im Abschnitt 3.4.6 ist die Umrechnung des Garegrades auf die Qualität als stetige Größe im Bereich von $[0, 1]$ vorzunehmen.

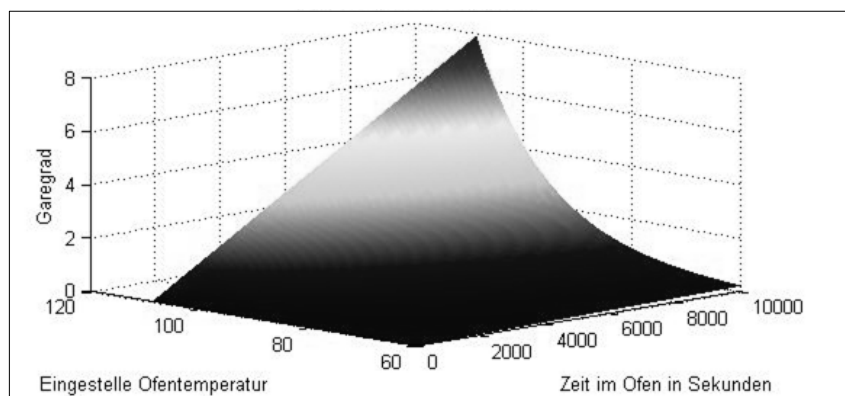


Abbildung 4.25: Garegradverlauf, ermittelt aus dem Kerntemperaturverlauf.

Mittels der Annahme, dass die Qualität im Punkt $G = 1$ ihren besten Wert erreicht, wird auf den Garegradverlauf die beschränkende Funktion angewendet, sodass alle Werte oberhalb $G = 1$ an dieser Kante gespiegelt werden. Somit wird erreicht, dass die Information an sich nicht verloren geht, sondern vielmehr dazu beiträgt, die als übergar zu interpretierenden Werte als Minderung in der Qualität zu berücksichtigen. Das Ergebnis kann Abbildung 4.26 entnommen werden.

4.7.4 Die Ermittlung eines optimalen Qualitätswertes

Die vorgestellten prinzipiellen Möglichkeiten des Einsatzes sollen in diesem Abschnitt anhand der Erläuterung des Planungsablaufes konkretisiert werden. Die Verläufe der Qua-

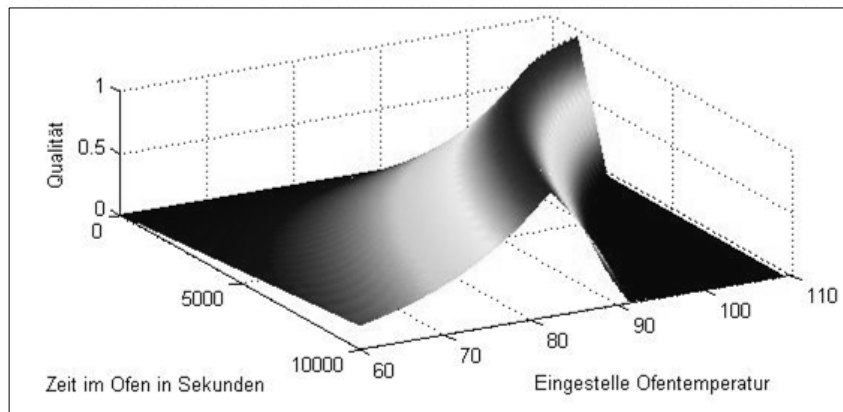


Abbildung 4.26: Qualitätsverlauf, ermittelt aus der Garegradkurve.

Qualitätskurven sind für den Planungsalgorithmus nicht ausreichend, um einen Auftragsplan erstellen oder optimieren zu können. In erster Linie ist ein Startwert der Qualität erforderlich. Eindeutiger ist jedoch ein Set an Prozessparametern, welche für diese Qualität ausschlaggebend sind. Damit ergibt sich ein Einstiegspunkt in die Qualitätskurve, von dem aus sowohl ein kundenindividuelles Optimum als auch ein Mindestqualitätsmaß für die parallele Verarbeitung mehrerer Produkte in der gleichen Prozesskammer erreicht werden kann. Diese Initialwerte für eine Planung wurden im vorliegenden Fall durch Experteninterviews erhoben. Gespräche mit Köchen, die einschätzen, unter welchen Bedingungen nach ihrem Dafürhalten die optimale Qualität für zu verarbeitende Produkte erreicht wird, stellen somit die Grundlage der Initialwerte für die ausgewählten Produkte dar. Tabelle 4.4 zeigt die gerundeten Mittelwerte aus diesen Interviews.

Da Köche nicht mit der hier verwendeten abstrakten und mathematisierten Form des Begriffes Qualität als objektivem Parameter arbeiten, gilt im Folgenden die Annahme, dass die aufgeführten Prozesswerte zu einer Qualität von $Q = 1$ führen. Damit ist erfüllt, dass die bestmögliche Qualität erreicht werden kann. Für den Planungsalgorithmus ist dies wichtig, da er im Gegensatz zur Sichtweise der Köche die Qualität aus den Garegradverläufen ermittelt und damit eine direkte Beziehung zu den jeweiligen Prozessparametern herstellt. Dieses Prozedere kann in beide Richtungen gerechnet werden, sodass anhand eines Prozesswerteverlaufs direkt auch auf Qualitäten geschlossen werden kann. Im Zuge der Verarbeitung von zwei Produkten in der gleichen Prozesskammer des HLD ist dies entscheidend. Da der Prozessraum lediglich eine Parametereinstellung zulässt, ist anhand der Qualitätsprofile zu entscheiden, ob Produkte miteinander verarbeitet werden können oder eine Terminverschiebung notwendig ist.

Nutzt man die in Abschnitt 3.4.6 eingeführte vereinfachte Qualitätsfunktion, lässt diese sich anhand der ermittelten Optima zusätzlich in ihrer logischen Stimmigkeit belegen.

Produkt	Zustand		Menge	Einwirkzeit	Verarbeitungstemperatur	Luftfeuchteinstellung
Kartoffel	frisch	Scheiben	250 g	00:30	99	100
		Würfel	250 g	00:30	99	100
		gestiftet (Pommes)	250 g	00:15	200	0
	TK	Scheiben	250 g	00:20	200	0
		Würfel	250 g	00:15	200	0
		gestiftet (Pommes)	250 g	00:15	200	0
Reis	roh	200 g	00:25	99	100	
	vorgekocht	200 g	00:25	99	100	
Brokkoli	frisch	Röschen	200 g	00:08	99	100
	TK	Röschen	200 g	00:10	99	100
Paprika	frisch	Würfel	200 g	00:10	200	0
		Streifen	200 g	00:10	200	0
	TK	Würfel	200 g			
Karotten	frisch	Streifen	200 g			
		Scheiben	200 g	00:10	99	100
		Würfel	200 g	00:10	99	100
	TK	Streifen/Julienne	100 g	00:05	99	100
		Scheiben	200 g	00:08	99	100
		Würfel	200 g	00:08	99	100
Hühnergeschmortes Hähnchenbrust	frisch, vorverarbeitet (gewürzt)	Streifen/Julienne	100 g	00:04	99	100
		frisch, vorverarbeitet (gewürzt)	200 g	00:20	200	0
Rumpsteak	frisch, vorverarbeitet (gewürzt)	300 g	00:10	200	0	
Sauce Hollandaise	Pulver	100 ml	00:10	130	30	
	frisch					
Bratensauce	Pulver	100 ml	00:10	130	30	
	frisch	100 ml	00:10	130	30	
Tomatensauce	Pulver	100 ml	00:10	130	30	
	frisch	100 ml	00:10	130	30	

Tabelle 4.4: Optimale Verarbeitungsparameter nach Experteninterview

Vergleicht man diese Funktion mit dem Qualitätsverlauf aus der Garegradermittlung, so ist festzustellen, dass der in Abbildung 4.26 sichtbare *Qualitätskamm* in der Funktion aus Abschnitt 3.4.6 auf ein Optimum zusammengefasst wurde. Dieses repräsentiert die Aussagen bspw. eines Kochs, der die optimalen Parameter für ein Produkt definiert.

4.7.5 Verwendung des Modells in der Maschinenbelegungsplanung

Wie in Abschnitt 3.4.6 erwähnt, stehen nun alle erforderlichen Informationen für das Vorberechnen von Garendzeitpunkten für ein Lebensmittel zur Verfügung. Grundsätzlich kann die gezielte Beeinflussung von Fertigstellungsterminen verbunden mit Angaben zu Prozessparametern vorgenommen werden. Zur Nutzung der Erkenntnisse in der Maschinenbelegungsplanung wurden entsprechend den vorgestellten zu unterscheidenden Fällen zwei Funktionen implementiert. Die erste Funktion, die in diesem Abschnitt erläutert wird, nimmt darauf Bezug, dass ein erstes ungegartes Lebensmittel (Garegrad=0) in den HLD eingebracht wird. Die zweite Funktion kann bei der Planung dazu verwendet werden, den Bearbeitungszeitpunkt eines Produktes entsprechend den parallel im HLD verarbeiteten Produkten hinsichtlich eines Qualitätsoptimums aller im HLD befindlichen Lebensmittel zu verändern.

4.7.5.1 Belegungsplanung zur erstmaligen Bestückung des Ofens

Jedes Produkt, bei dem die Zeit im Ofen geplant werden muss, besitzt einen bestimmten Fälligkeitstermin. Damit der Planungsalgorithmus darauf aufbauend einen Belegungsplan erstellen kann, muss die Bearbeitungszeit im Ofen bekannt sein, nach der das Produkt der gewünschten Qualitätsforderung entspricht. Die Funktion *firsttime1* simuliert dafür das Verhalten des Lebensmittels im Ofen bei unterschiedlichen Temperatur-Zeit-Belastungen und bestimmt mit Hilfe des Lebensmittelmodells und des Garegrades (Abschnitt 3.4.5 bzw. 2.4.4) die Qualität des Lebensmittels über den kompletten Simulationszeitraum in Abhängigkeit von der Zeit im Ofen und der Ofentemperatur. Die dadurch entstandene Qualitätsmatrix¹ (vgl. Abbildung 4.26) nutzt der Planungsalgorithmus, um ein für ihn optimales Temperatur-Zeit-Verhältnis zu ermitteln. Der interne Ablauf der Methode *firsttime1* ist im Anhang C als UML-Sequenzdiagramm dargestellt. Die Methode *Garegrad_firsttime*, welche als Unterprogramm der Funktion „*firsttime1*“ aufgerufen wird, berechnet in einem ersten Schritt aus dem Temperaturverlauf, welcher durch die Simulation entstanden ist (siehe auch Abschnitt 4.7.3), den Garegrad und erstellt daraus wiederum eine Garegradmatrix. Diese Matrix stellt den Garzustand in Abhängigkeit von der Ofentemperatur und der Zeit im Ofen dar.

Aus der von Algorithmus 6 erzeugten Qualitätsmatrix kann nun zu einer bestimmten Ofentemperatur der Qualitätsverlauf herausgelesen werden. Die eindimensionalen Qualitätsverläufe von Schweineoberschale und Kartoffel können der Abbildung 4.27 entnommen werden. Bei der Kartoffel (schwarze Kurve) beginnt der Qualitätsverlauf erst ab neun Minuten im Ofen anzusteigen. Dieses Verhalten begründet sich damit, dass unterhalb von neun Minuten die Kerntemperatur der Kartoffel noch zu niedrig ist, um eine erkennbare Reaktion zu verursachen. Bis die Kerntemperatur der Kartoffel 100 °C erreicht hat, dauert es etwa 18 Minuten. Der Temperaturanstieg spiegelt sich auch in dem exponentiellen Qualitätsanstieg zwischen der Minute neun und der Minute 18 wider. Ab Minute 18 steigt die Qualität linear an. Das Maximum der sensorischen Qualität erreicht die Kartoffel etwa nach 26 Minuten. Danach ist die Kartoffel im übergaren Bereich (Garegrad > 1) und deren Qualität fällt nahezu linear ab. Das Schweinefleisch (graue Kurve) hat einen schnelleren Temperaturanstieg im Kern, wodurch auch der Bereich bis zum linearen Qualitätsanstieg sehr kurz ist (etwa bis Minute drei). Die Zeit, welche die Oberschale benötigt, um ihr Qualitätsmaximum zu erreichen, liegt hier bei etwa 47 Minuten. Das erscheint viel, ist

¹Der Begriff Matrix wird in diesem Zusammenhang synonym für das Ergebnis aus der Simulationsumgebung verwendet. Da die Simulation des Modells auf Matrizen beruht, wird dieser Begriff mit dem jeweiligen Suffix der simulierten Variable (Garegrad, Qualität, Temperaturverlauf o. ä.) verwendet.

Algorithmus 6 : Pseudocode „Garegrad_firsttime“

```
for  $i = 1$  to  $\Delta T_{Tempbereich\ Ofen}$  do
  for  $t = 0$  to  $Simulationszeit$  do
    Garegrad mit Gleichung 2.15 berechnen  $\rightarrow$   $Garegradmatrix(i, t)$ 
  end for
  Garegrad wieder für nächsten Temperaturbereich auf  $G=0$ 
end for
Garegrad  $\rightarrow$  Qualität
optimale Qualität bei Garegrad=1
for  $i = 1$  to  $\Delta T_{Tempbereich\ Ofen}$  do
  for  $t = 0$  to  $Simulationszeit$  do
    if  $Garegradmatrix(i, t) \leq 1$  then
      Anstieg der Qualität bis  $Garegrad = 1$ 
    else if  $1 < Garegradmatrix(i, t) < 2$  then
      Qualitätsabfall bei  $1 < Garegrad < 2$ 
    else
      Qualität nur noch ein Bruchteil der optimalen Qualität
    end if
  end for
end for
```

aber mit der relativ geringen Temperatur und den Produktparametern des betrachteten Fleisches zu begründen.

Der Planungsalgorithmus nutzt im Folgenden diesen Qualitätsverlauf. Die Belegung des HLD wird dabei so geplant, dass beide Nahrungsmittel zum selben Zeitpunkt mit der jeweils für sich betrachteten optimalen Qualität fertiggestellt werden. In diesem Fall müsste die Kartoffel $\Delta t = 21\ min$ später in den Ofen eingebracht werden, um die optimale Qualität zum selben Fertigstellungszeitpunkt zu erreichen.

$$\Delta t = t_{QmaxSchwein} - t_{QmaxKartoffel} \quad (4.20)$$

$$\Delta t = 47\ min - 26\ min = 21\ min$$

In die Abbildung ist zur Demonstration beispielhaft eine Mindestqualitätsanforderung von 0,75 eingetragen. Für den Planungsalgorithmus teilten sich dadurch die Auswahlmöglichkeiten der Prozessparameter in einen zulässigen und einen nicht zulässigen Bereich.

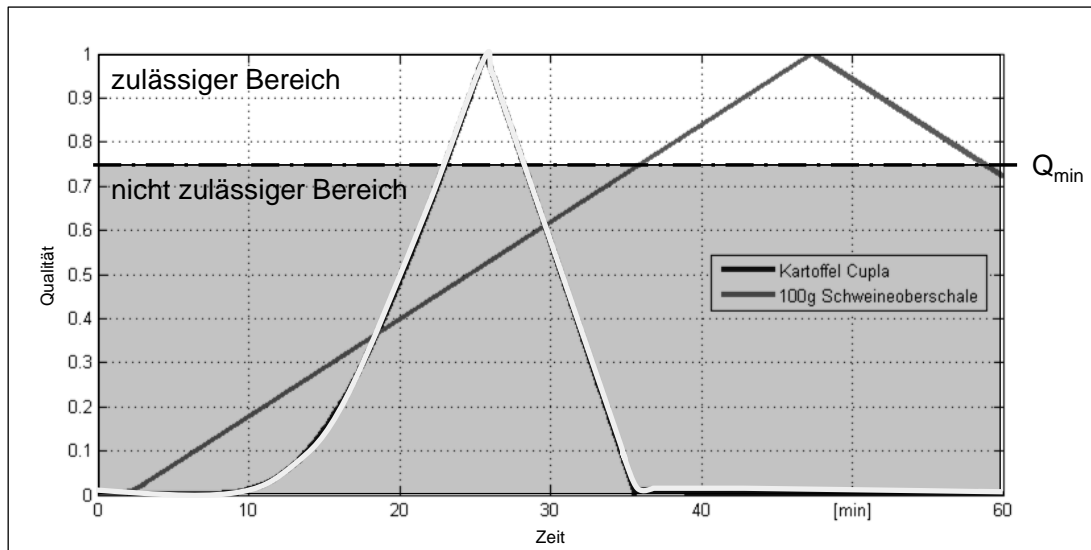


Abbildung 4.27: Qualitätsverlauf der Kartoffel und des Schweinefleisches bei 100 °C Ofentemperatur

4.7.5.2 Reaktionen auf Störungen im Garprozess

Befindet sich ein Produkt schon eine gewisse Zeit im Ofen ($Garegrad \neq 0$), kann es vorkommen, dass die Ofentemperatur geändert wird. Dies ist insbesondere der Fall, wenn ein weiteres Lebensmittel ($Garegrad = 0$) in den Ofen eingebracht wird, welches aus Termingründen eine höhere Ofentemperatur benötigt. Die Temperaturänderung wirkt sich als Störung auf den Qualitätsverlauf des bereits im Ofen befindlichen Produktes aus. Auf diese Eventualitäten nimmt die Funktion „*disturbance1*“, welche die Auswirkungen einer Störung simuliert, Bezug. Diese Funktion simuliert eine Temperaturänderung im Ofenraum und die Auswirkungen auf die im Ofen befindlichen Lebensmittel. Dazu werden der Zeitpunkt einer Störung und die aktuell eingestellte Ofentemperatur der Funktion übergeben. Ein Ablauf dieser Methode ist in Anhang C zu sehen.

Das Ergebnis ist eine Störmatrix, welche den Qualitätsverlauf im Lebensmittel bis zum Zeitpunkt der Störung enthält und einen Ausblick auf die Auswirkung einer Temperaturänderung gibt.

Nachfolgend wird beispielhaft eine Temperaturänderung und deren Auswirkungen auf die Qualität dargestellt. Es wird angenommen, dass sich eine Kartoffel und ein Stück Schweinefleisch bereits im Ofen befinden. Der Planungsalgorithmus sieht vor, dass beide Lebensmittel gleichzeitig in den Ofen gekommen sind und die Ofentemperatur 95 °C beträgt. In der 10. Minute soll der Ofen mit einem dritten Lebensmittel bestückt werden, dabei wäre eine Temperaturerhöhung auf 100 °C für das neue Lebensmittel von Vorteil. In Abbildung 4.28 ist der Kerntemperaturverlauf bei einer Änderung der Ofentemperatur dargestellt. Zur

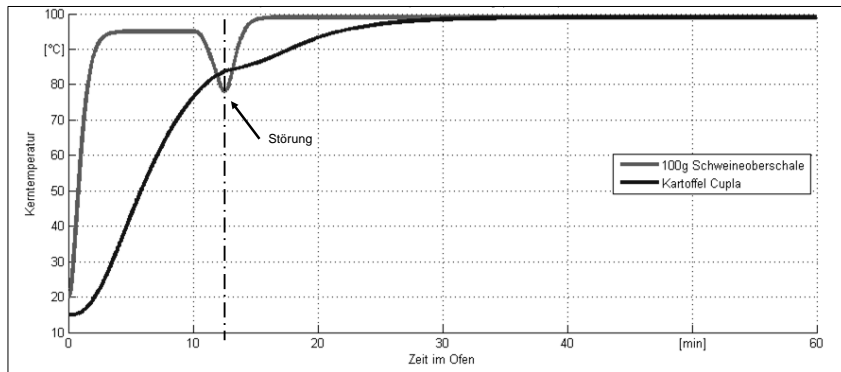


Abbildung 4.28: Kerntemperaturverlauf Kartoffel und Schweineoberschale bei Änderung der Ofentemperatur

Bestückung des Ofens mit dem neuen Lebensmittel ist die Ofentüre zu öffnen, wodurch die Temperatur kurzzeitig absinkt (siehe auch Kapitel 4.7.2.1). Die Auswirkungen auf die Kerntemperatur der bereits im Ofen befindlichen Lebensmittel sind in Abbildung 4.28 zwischen Minute 10 und Minute 15 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass das Schweinefleisch auf den Temperatureinbruch schneller reagiert als die Kartoffel, bei der kaum eine Reaktion sichtbar ist.

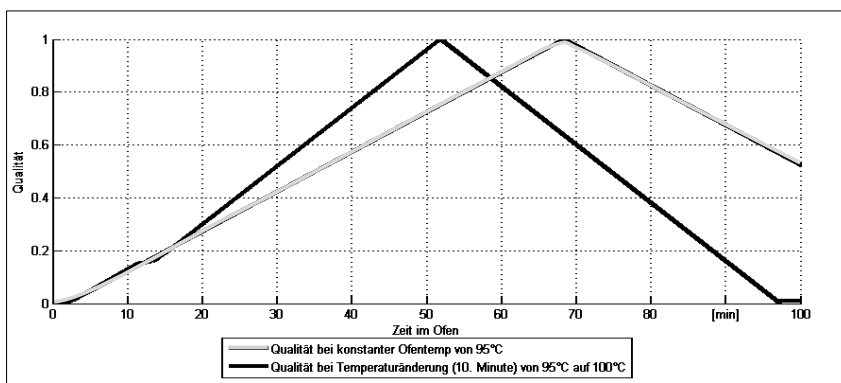


Abbildung 4.29: Auswirkung der Temperaturänderung auf die Qualität der Schweineoberschale

In Abbildung 4.29 und 4.30 sind die Auswirkungen der Temperatursteigerung auf die sensorische Qualität der im Ofen befindlichen Lebensmittel dargestellt. Würde auf das Schweinefleisch (Abbildung 4.29) über die komplette Garzeit, wie ursprünglich geplant, eine konstante Ofentemperatur von 95 °C einwirken, so hätte es sein Qualitätsmaximum nach etwa 68 Minuten erreicht. Eine Temperaturerhöhung um 5 K hätte zur Folge, dass das Fleischstück seine höchste Qualität ca. 16 Minuten früher (schwarze Kurve) erreicht. Nach den ursprünglichen 68 Minuten hätte es nur noch ca. 70 % der ursprünglichen Qualität. Die Kartoffel (Abb. 4.30) hätte ihr Qualitätsmaximum bei einer Gartemperatur von 95 °C nach ca. 34 Minuten erreicht. Eine Temperaturerhöhung hat hier zur Folge, dass sie 5

Minuten früher ihr sensorisches Qualitätsmaximum erreicht und nach 34 Minuten nur noch 60% des Qualitätsmaximums hat. Der Planungsalgorithmus entscheidet auf der Basis dieser Daten, ob die Auswirkungen auf die im Ofen befindlichen Lebensmittel in einem tolerierbaren Rahmen liegen oder ob die qualitätsmindernden Auswirkungen zu stark sind. Im oben dargestellten Fall wäre die Auswirkung auf die Qualität wohl zu stark und der Planungsalgorithmus müsste das dritte Lebensmittel anderweitig einplanen.

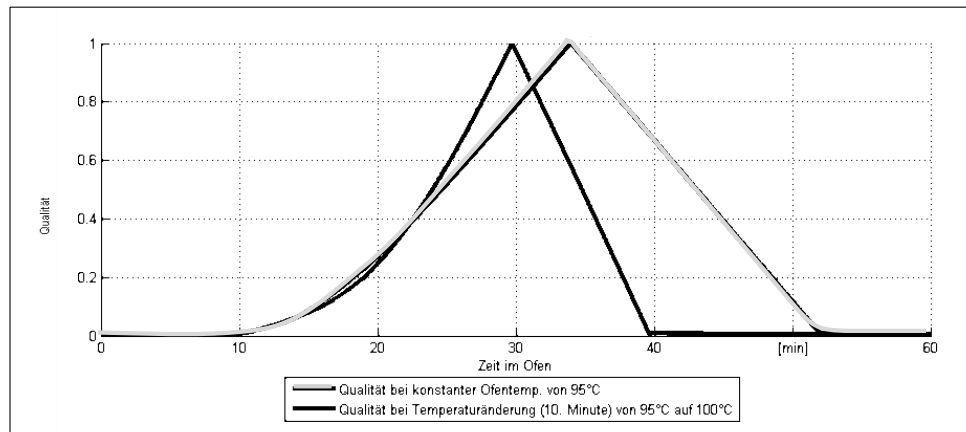


Abbildung 4.30: Auswirkung der Temperaturänderung auf die Qualität der Kartoffel

In Abbildung 4.31 sind die Auswirkungen mehrmaliger Temperaturänderungen während des Garprozesses zu sehen. In der 10. Minute wird die Temperatur von 95 °C auf 100 °C erhöht. Die Oberschale wird nun 30 Minuten lang bei 100 °C gegart, bevor die Temperatur auf 85 °C verringert wird (Minute 40). Diese Temperaturabsenkung hat zur Folge, dass sich der Garprozess verlangsamt, wodurch der ursprüngliche Fertigstellungstermin erreicht wird (Minute 68). Der Planungsalgorithmus hat somit die Möglichkeit, ein weiteres Lebensmittel, welches bspw. bei 100 °C eine Garzeit von 30 Minuten benötigt, in den Ofen zu geben und anschließend die Temperatur erneut abzusenken, sodass der ursprüngliche Termin ohne Qualitätseinbußen eingehalten werden kann.

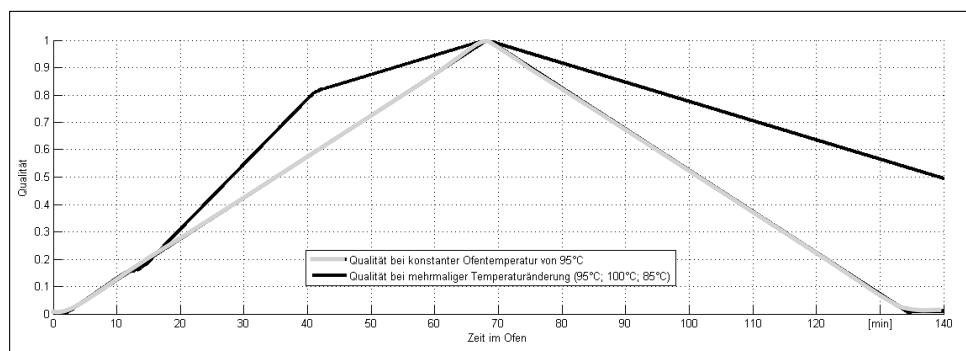


Abbildung 4.31: Mehrmalige Temperaturänderung (schwarze Kurve) im Vergleich mit Garung bei konstanter Temperatur (graue Kurve)

4.7.6 Auswirkung der Qualitätsbetrachtung auf das Planungsergebnis

Wie bereits in Abschnitt 4.6.5.4 für die reine Terminplanung dargestellt, soll hier anhand der Belegungsdiagramme und der Auswertung von Kenngrößen wie Lieferverzug, Termintreue und Qualität eine Bewertung vorgenommen werden. Die Abbildung 4.32 zeigt einen Ausschnitt des Belegungsdiagramms für einen Ofen.

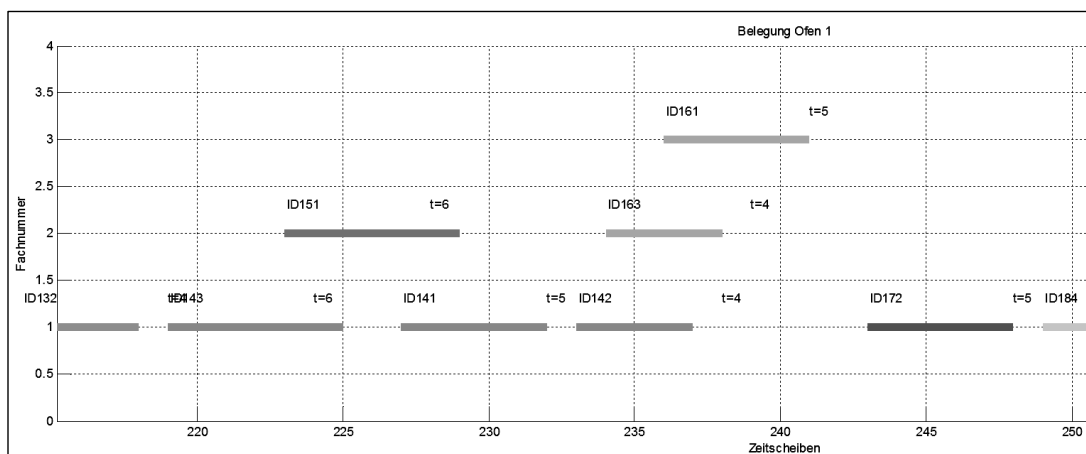


Abbildung 4.32: Auszug eines qualitätsoptimierten Maschinenbelegungsdiagramms (gleiche Eingangsdaten wie in Abbildung 4.15)

Aus dem Belegungsplan kann folgende Erkenntnis als charakteristisch für die Optimierung nach Qualität abgelesen werden. Werden Produkte anhand ihrer hinterlegten Qualitätsfunktionen gegeneinander verschoben, ist es möglich, dass im ungünstigsten Fall alle Komponenten einer Bestellung seriell auf einer Maschine verarbeitet werden müssen (vgl. ID141-ID143). Dies ist die Folge der unteren Schranke für die zu berücksichtigende Mindestqualität und des Suchalgorithmus' sowie dessen Art und Weise, nach einem freien Kapazitätsslot auf einer Anlage zu suchen. Die Zielfunktionen nach Abschnitt 3.3.1 werden an dieser Stelle in jedem Fall eingehalten. Dies wirkt sich jedoch negativ auf die Lieferverzögerungen und die Durchlaufzeit der einzelnen Aufträge aus. Diese werden im Vergleich zur reinen Zeitplanung länger. Die Kennzahl der Liefertreue bleibt bei einem Wert von 16,7 % gleich. Bei den Lieferverzögerungen wurde im ungünstigsten Fall ein maximaler Verzug von 114 Zeiteinheiten festgestellt. Positiv hervorzuheben ist jedoch, dass sich bei einer gewünschten Mindestqualität von 0,8 gemittelt über alle Aufträge eine durchschnittliche Qualität von 0,997 einstellt.

Der Abbildung 4.33 kann im Diagramm *Lieferverzug* entnommen werden, dass die späteren Aufträge auch einen größer werdenden Lieferverzug hinnehmen müssen. Dies ist darin begründet, dass innerhalb der geplanten Zeit zu viele Produkte gleichzeitig zu verarbeiten waren. Nimmt man ein reduziertes Szenario, bei welchem die Bestelltermine und die Zieltermine entsprechend großzügig verteilt sind, können hier bessere Ergebnisse erzielt

werden. Bei den Durchlaufzeiten, die sich aus dem Startzeitpunkt des ersten Produktes eines Auftrages bis zum Endtermin des letzten Produkts dieses Auftrags ergeben, ist zu sehen, dass es bei einigen Aufträgen aufgrund der Randbedingungen zu erheblichen Verzögerungen kommt. Dieser Fall tritt bspw. ein, wenn es, wie oben beschrieben, zu einer seriellen Verarbeitung der Produkte kommt, weil keine Kapazitäten mehr vorhanden sind oder die Qualitätsansprüche eine Parallelisierung auf einen Ofen nicht erlauben. Der gesamte Bearbeitungszeitraum für die 12 Aufträge, bestehend aus 37 Produkten, betrug insgesamt 17 Minuten.

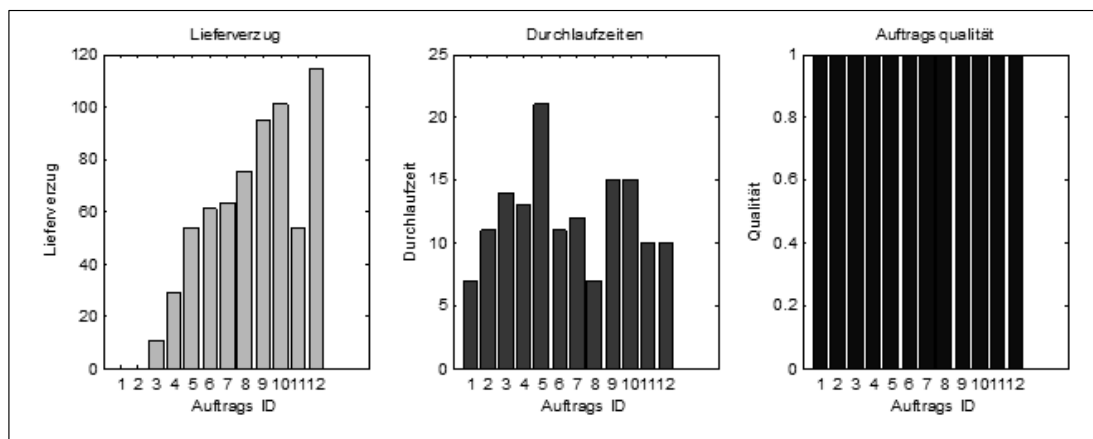


Abbildung 4.33: Lieferverzug, Durchlaufzeit und Qualität des qualitätsoptimierten Auftragsprogramms (gleiche Eingangsdaten wie in Abbildung 4.15)

Der Abbildung kann in der rechten Darstellung zusätzlich entnommen werden, dass eine Qualität je Auftrag ermittelt wird. Während des Planungsdurchlaufes wird hier jeweils darauf geachtet, dass die gewünschte Auftragsmindestqualität eingehalten wird. Dem Bild ist zu entnehmen, dass dies vollständig erfüllt ist. Es ist positiv hervorzuheben, dass über das gesamte Testszenario Qualitäten größer als 95 % eingestellt werden konnten.

4.8 Feedbackgestützte Individualisierung

4.8.1 Ablauf

Die Verbesserung des Gesamtergebnisses ist mit den vorangegangenen Beschreibungen sehr präzise auf die Produkte und deren Qualität ausgerichtet. Für eine stärkere Individualisierung des Verarbeitungsergebnisses wird das Kundenfeedback zur Beeinflussung der vorhandenen Qualitätsparameter angewendet. Nachfolgend ist die Umsetzung erläutert.

Das Kundenfeedback stellt sich als zweistufiges Vorgehen dar. Zunächst ist eine Bewertung durch einen Kunden abzugeben. Dies stellt die Basis für den zweiten Schritt, die

sog. Anpassungskalkulation, dar. Dabei werden während der Bestellung eines Produktes kundenspezifische Anpassungen der qualitätsbeeinflussenden Verarbeitungsparameter vorgenommen.

4.8.2 Integration in das bestehende Planungssystem

Zur Erhebung von Feedback für die Kundenindividualisierung einer Bestellung wurde im vorliegenden Fall ein Fragebogen (vgl. Abbildung 4.34) erstellt. Dessen Informationen lassen Rückschlüsse auf die spezifischen Wünsche des Kunden zu. Die Formulierung ist so gewählt, dass sie sich in den Sprachgebrauch des Kunden einfügt, ohne einen konkreten Parameter des Verarbeitungsprozesses abzufragen. Dies wurde so konzipiert, da Kenntnisse über die ablaufenden Verarbeitungsprozesse und deren Parameter bei Kunden nicht vorausgesetzt werden können.

The image shows a web-based feedback form titled "ZUTAT BEWERTEN:". It contains four sections, each with five radio buttons for selection:

- Temperatur:** viel zu kalt, zu kalt, optimal, zu heiß, viel zu heiß. The "optimal" button is selected.
- Dauer:** viel zu roh, zu roh, optimal, zu durch, viel zu durch. The "zu roh" button is selected.
- Luftfeuchtigkeit:** viel zu trocken, zu trocken, optimal, zu weich, viel zu weich. The "zu trocken" button is selected.
- Menge:** viel zu wenig, zu wenig, optimal, zu viel, viel zu viel. The "zu viel" button is selected.

At the bottom of the form is a button labeled "Bewertung abgeben".

Abbildung 4.34: Ansicht des Fragebogens

Aus den erhobenen Daten werden die in Abschnitt 3.5.3 eingeführten Korrekturfaktoren KF berechnet. Für die Realisierung wurde eine browserbasierte Oberfläche konzipiert, welche eine direkte Anbindung an das Planungssystem besitzt.

Um eine Integration zu ermöglichen, ist das in Abschnitt 4.5 vorgestellte Datenbankmodell um nachfolgende Tabellen zu erweitern:

- Tabelle mit Unter- und Obergrenzen zur Qualitätssicherung,

- Feedbacktabelle mit kundenindividuellen Korrekturfaktoren KF ,
- Tabelle der bereits bewerteten Zutaten.

In der Abbildung 4.35 sind die Definitionen der Tabellenspalten dargestellt.

	ZutatID	TempUG	TempOG	DauerUG	DauerOG
▶	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0
	3	170	230	8	12
	4	170	230	17	23
	5	170	230	10	14
	6	170	230	25	35
	7	85	115	21	29
	8	85	115	7	12
	9	85	115		

Abbildung 4.35: Definition der Tabelle mit den Unter- und Obergrenzen [Ausschnitt]

In einem ersten Schritt wurde die Tabelle der Grenzwerte für alle verwendeten Zutaten befüllt. Dazu wurde der optimale Referenzwert eines jeden Prozessparameters mit einer Hysterese von $\pm 15\%$ versehen. Zutaten, die nicht verarbeitet werden müssen, erhalten den Wert 0, sowohl bei der Untergrenze als auch bei der Obergrenze. Diese erste Tabelle ist eine reine Datentabelle, welche Produktdaten zur Verfügung stellt. Hier finden keine Berechnungen oder Manipulationen der enthaltenen Werte statt. Im Gegensatz dazu wird die Feedbacktabelle als dynamische Tabelle behandelt. In ihr wurden die nach Formel 3.27 ermittelten Korrekturfaktoren eingetragen.

Wie in allen bisher genutzten Datenbankzugriffen während der Termin- und Qualitätsplanung, erfolgt auch hier die Zuordnung und Identifizierung aller Datensätze durch die IDs der Kunden, Gerichte, Zwischenprodukte und Zutaten. Bewertet ein Kunde eine Zutat oder ein Zwischenprodukt zum ersten Mal, wird ein neuer Datensatz in dieser Tabelle erzeugt. Bei wiederholter Bewertung des gleichen Produktes durch den gleichen Kunden werden die alten Faktoren durch neue ersetzt.

Das Speichern der Information, ob eine Zutat eines Gerichtes bereits bewertet wurde, erfolgt in der dritten eingeführten Tabelle. In dieser Struktur werden einzelne Produkte in Beziehung zu ihrem Auftrag abgespeichert. Die Datensätze enthalten somit Informationen, welches Produkt aus welchem Auftrag bereits durch den bestellenden Kunden bewertet wurde. Damit wird sichergestellt, dass keine doppelte Bewertung eines Auftragsbestandteils erfolgt, was zu einer Mehrdeutigkeit des Kundenwunsches führen würde.

4.8.3 Realisierung einer Bewertungsoberfläche

Der in Abbildung 3.11 dargestellte Ablauf wurde softwaretechnisch realisiert. In diesem Demonstrator wurde der Kunde in die Lage versetzt, seine Bestellungen feingranular bis auf das einzelne Produkt zu bewerten. Somit ist die Anforderung einer vollständigen Individualisierung erfüllt.

4.8.3.1 Bewerten von Aufträgen und Einzelprodukten

Nach einer Benutzeranmeldung können auf Basis der Kundennummer die individuellen Bestellaufträge ausgelesen werden. Die Informationen über die Auftragsnummer, das Gericht, den Wunschtermin, den geplanten Termin sowie den Fertigstellungstermin (Realtermin) wurden in der Datenstruktur hinterlegt. Zusätzlich ist eine Statusinformation aus der Tabelle zu entnehmen. Die Auftragsnummer ist eine fortlaufende Nummer, die bei jeder Bestellung zu vergeben ist. Der Status ergibt sich aus der State-Machine, welche dem Planungssystem zugrunde liegt (vgl. Abbildung 4.4).

In der Ansicht des Bestellsystems wurde jeder fertiggestellte Auftrag mit einem Schalter *Bewerten* ergänzt (ähnlich der Abbildung 4.36). Durch Drücken des Buttons konnte der Kunde einen Auftrag auswählen und gelangte somit zu der Auflistung der Zutaten des Auftrages, wie Abbildung 4.36 zeigt. Der Button wurde nach erfolgter Bewertung des vollständigen Auftrages deaktiviert.



Abbildung 4.36: Screenshot der Zutatenansicht

Die Abbildung zeigt, dass zu jeder Zutat jeweils die ID, der Name und wie bei der Auftragsauswahl ein Bewerten-Schalter dargestellt werden konnte. Auch in dieser Anzeige

erscheint der Schalter nur bei noch nicht bewerteten Zutaten. Mit Betätigung dieses Schalters wird die Skalenabfrage (siehe Abbildung 4.34) für die jeweilige Zutat geöffnet und der Kunde kann sein Feedback erteilen.

Der Fragebogen ist so aufgebaut, dass jeder Auswahlmöglichkeit ein Wert hinterlegt ist. Dabei wurde dem mittleren Wert die eins zugeordnet. Die aufsteigenden und absteigenden Bewertungen lagen im vorliegenden Fall jeweils um 0,05 Skalenpunkte auseinander. Damit wurde gewährleistet, dass es trotz stark vom Optimum abweichender Bewertungen nicht zum Aufschaukeln der Korrekturfaktoren KF für einzelne Parameter kommen konnte. Diese Umsetzung sorgte dafür, dass der subjektive Eindruck eines Kunden in eine mathematisch nutzbare Größe übertragen wurde. Die in Abschnitt 3.5.3 aufgezeigte Berechnung der Faktoren erfolgte in einem weiteren Schritt, nachdem der Kunde seine Bewertung abgeschlossen hatte.

4.8.4 Test und Auswirkung auf die Qualitätsfunktion

In einem Test wurde die Funktionsfähigkeit des Moduls nachgewiesen. Dafür wurden für eine Referenzzutat kundenspezifische Prozesswerte festgelegt. Anschließend erfolgte der Test, wie viele Bewertungsversuche erforderlich sind, um die gewünschten Prozesswerte durch die Beaufschlagung mit den Korrekturfaktoren zu erreichen.

Hierfür wurde keine Panel-Untersuchung mit Verkostung durchgeführt, sondern die Verarbeitung anhand der Demonstrationsanlage simuliert und die Bewertung vorgenommen. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die Abgabe des Feedbacks im Sinne der Zielerreichung geleistet wurde. Für die Testdurchführung wurde von einer erstmaligen Zubereitung einer Zutat für einen Kunden ausgegangen. Damit erfolgte die nicht bewertete Verarbeitung mit den optimalen Prozesswerten für die jeweilige Zutat. Vor einer erneuten Bestellung ist das vergangene Verarbeitungsergebnis zu bewerten. Die daraus ermittelten Korrekturfaktoren werden für den Kunden hinterlegt.

Als Referenz wurde die Zutat Reis in einer Menge von 120 g gewählt. Als zu erreichende kundenindividuelle Wunschprozesswert wurden zufällige Werte, welche innerhalb der Unter- und Obergrenze (UG, OG) liegen, festgelegt. Zusätzlich wurde ein Akzeptanzbereich von $\epsilon = 2,5\%$ zugelassen. Die Ausgangssituation des Tests ist in Tabelle 4.5 dargestellt.

Um den Test durchzuführen, wurde ein zufälliges initiales Tupel an Produktionsparametern erstellt. Auf Basis dieser Werte wird das erste Feedback abgegeben. Wie bereits erwähnt, ist die Bewertung derart vorgenommen, dass jeweils eine Annäherung zum Wunschparameter stattfindet. Diese Simulation und Bewertung wurde so oft wiederholt, bis alle Parameter innerhalb des Toleranzbereichs lagen. Die Tabelle 4.6 zeigt die Veränderungen in den

Parameter	Referenz	Wunsch	Wunsch- ϵ	Wunsch+ ϵ	UG	OG
Temperatur	110 °C	100 °C	97,5 °C	102,5 °C	85 °C	115 °C
Kochdauer	21 min	26 min	25,35 min	26,65 min	21 min	29 min
Luftfeuchtigkeit	85 %	90 %	87,75 %	92,25 %	100 %	85 %
Menge	–	120 g	117 g	–	–	–

Tabelle 4.5: Ausgangssituation für Feedbacktest

Korrekturfaktoren bei Abgabe des Kundenfeedbacks. Die Erklärung der Ergebnisse soll am Beispiel des Parameters Masse (m [g]) vorgenommen werden.

Parameter	Referenz	Initial	Durchlauf 1		Durchlauf 2		Durchlauf 3	
			KF	KIVP	KF	KIVP	KF	KIVP
ϑ [°C]	110	110	0,85	93,5	0,935	102,85	0,88825	97,71
t [min]	21	21	1,1	23,1	1,21	25,41	1,21	25,41
LF [%]	85	85	1,05	89,25	1,05	89,25	1,05	89,25
m [g]	-	140	0,9	126	0,855	119,7	0,855	119,7

Tabelle 4.6: Testergebnisse für die Feedbacknutzung

Die Referenzwerte enthalten zunächst keine Angabe zur Masse, da keine Portionsgröße im System hinterlegt ist. Lediglich die Verarbeitungsparameter sind abgespeichert. Die bestellten 120 g Reis des Beispiels werden nach der Verarbeitung an den Kunden abgegeben. Geht man mit der Spalte *Initial* davon aus, dass die Temperatur ϑ bei der Abgabe an den Kunden den Wert 110 °C besaß, entspricht dies der Referenz. Für den Kunden ist dies jedoch vom Empfinden her zu heiß, was zu einem entsprechenden negativen Feedback bei der Temperatur führt. Die Spalte Durchlauf 1 zeigt den Korrekturfaktor und damit die neue Wunschtemperatur für die Verarbeitung von Reis bei einer erneuten Bestellung. Die Spalte Durchlauf 2 spiegelt diesen Fall einer erneuten Bestellung wider. Geht man davon aus, dass eine weitere Portion Reis für den agierenden Kunden mit den korrigierten Parametern auf Durchlauf 1 verarbeitet wird, erfolgt eine neuerliche Bewertung, die zu den Einträgen in dieser Spalte führt. Demnach ist der mit 93,5 °C verarbeitete Reis als zu kalt bewertet. Dadurch korrigiert sich der KIVP für die Temperatur auf 102,85 °C. Dieser Ablauf wiederholt sich mit jeder wiederholten Bestellung des gleichen Produktes.

Wie bereits in Abschnitt 3.5.3 beispielhaft gezeigt, erfolgt aufgrund der mathematischen Korrektur der Verarbeitungsparameter von Zutaten durch die Korrekturfaktoren eine Parameterverschiebung entlang der Koordinatenachsen. Je nach Kundenfeedback und damit entstehendem Faktor wird der Referenzwert einer Zutat angepasst und bei der erneuten Planung berücksichtigt. Die Abbildung 4.37 verdeutlicht dies am hier vorgestellten

Beispielprodukt Reis.

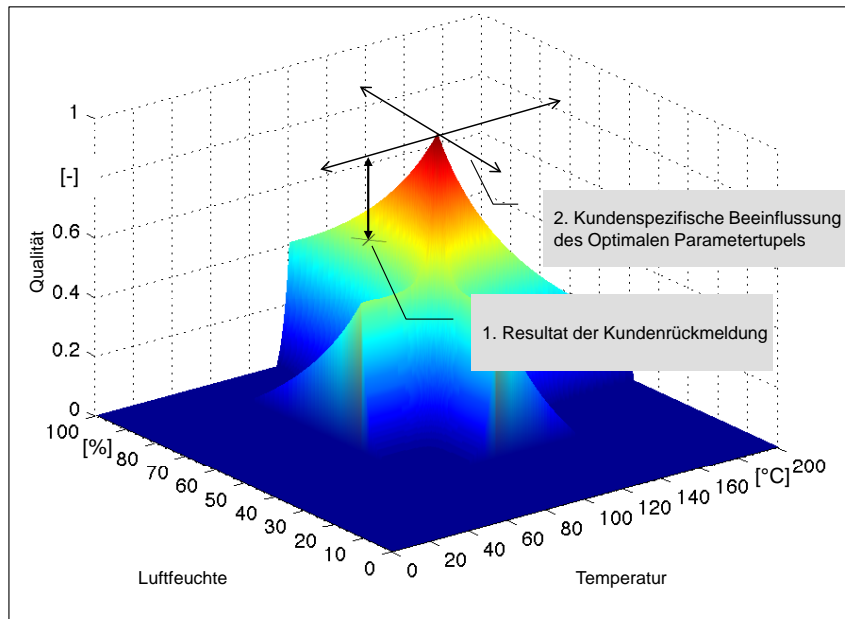


Abbildung 4.37: Parameterverschiebung durch Kundenfeedback am Beispiel Reis (Position und Lage des Maximum ist dabei kundenspezifisch)

4.8.5 Bewertung des Moduls

In diesem Beispiel waren drei Versuche nötig, um alle kundenindividuellen Faktoren an die Wunschwerte (innerhalb der Toleranzfelder) anzupassen. In der Abbildung 4.38 ist der Verlauf der Temperaturanpassung während des Tests dargestellt.

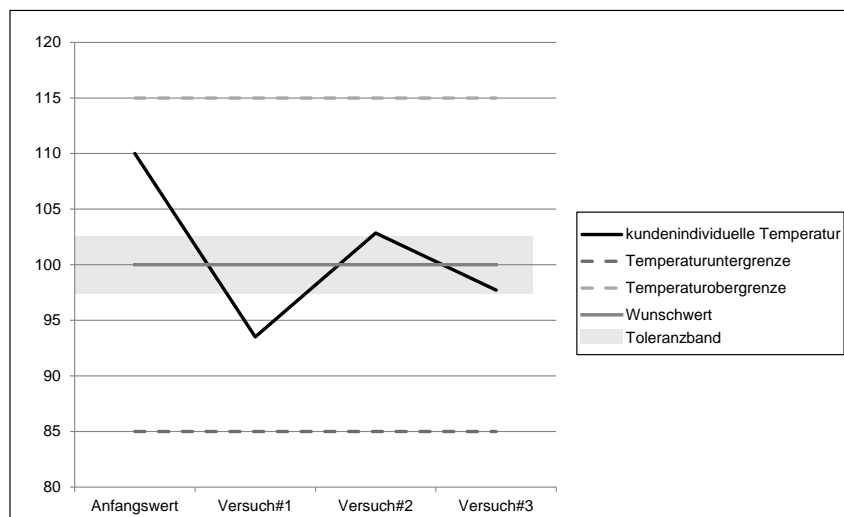


Abbildung 4.38: Verlauf der Temperaturanpassung während des Tests

Der Test zeigt, dass die Funktionalität des Moduls gegeben ist und eine Individualisierung der qualitätsbeeinflussenden Parameter durch Auswerten des Kundenfeedbacks möglich ist.

Durch diese Anknüpfung der Kundenmeinung an den tatsächlichen Produktionsprozess wird eine weitreichende Mitbestimmung ermöglicht. Dies entspricht den Vorstellungen von Kano, Juran oder auch Feigenbaum. Qualität wird zu dem, was der Kunde darunter versteht.

Bei allen Möglichkeiten, die das Modul eröffnet, muss auch kritisch erwähnt werden, dass es sich im aufgezeigten Fall um Naturprodukte handelt. Bei diesen kann nicht von einer gleichmäßigen Eingangsqualität ausgegangen werden. Damit ist es auch möglich, dass die Rückmeldung des Kunden bei der jeweils folgenden Verarbeitung des gleichen Produktes zu einer exakt kontraproduktiven Wirkung führt. Zur Vermeidung eines zu extremen Aufschaukelns dieses Verhaltens werden die erwähnten Unter- und Obergrenzen eingeführt. Dennoch können je nach Qualität des Ausgangsproduktes die individuell angepassten Prozessparameter zu einem falschen Ergebnis führen. Dies wirkt sich im Nachgang durch eine zu erwartende negative Bewertung auf die nachfolgende Zubereitung des gleichen Produktes wiederum negativ aus.

Die Nutzung des Kundenfeedbacks funktioniert jedoch nur, wenn gleichzeitig zur Produktionsinformation ein Nutzerprofil erstellt werden kann. Die Gefahr einer Profilierung einer Person hinsichtlich ihrer Vorlieben beim Lebensmittelkonsum ist dabei unmittelbar gegenwärtig. Ein solches Profil ist im Sinne der Speicherung von personenbezogenen Daten in jedem Fall kritisch zu hinterfragen.

Nichtsdestoweniger ist damit eine Möglichkeit geschaffen, entsprechend dem in Kapitel 2 vorgestellten KANO-Modell, sich auch in der Lebensmittelverarbeitung von Begeisterungsmerkmalen hin zu Basismerkmalen zu entwickeln. Durch das regelmäßige Bewerten einer Komponente kann es gelingen, die statische Beschreibung eines Produktes in diesem Modell in eine Verlaufsdarstellung zu überführen, um zu einem zukünftigen Zeitpunkt einen Kunden mit der Verarbeitung einer Komponente über seine Erwartungen hinaus zu überraschen.

5 Bewertung der wirtschaftlichen Relevanz

5.1 Allgemeines

Nach EHRENSPIEL (1998) bemisst sich der wirtschaftliche Erfolg eines Entwicklungsprozesses an den Parametern Funktionserfüllung, Kosten- und Termineinhaltung, die auch als „magisches Dreieck“ aus Qualität, Zeit und Kosten bezeichnet werden. Daraus resultiert, dass neue Methoden nur eingeführt werden sollten, wenn sie ganzheitlich über diese Bereiche Verbesserungen erwarten lassen. DÜRR (2013) führt an, dass der Nutzen einer IT-Unterstützung nur bedingt abgeschätzt werden kann und zumeist völlig unklar ist. Im Weiteren wird, da es sich bei dieser Arbeit um die Konzeption eines Algorithmus, also in der Implementierung um eine IT-Unterstützung handelt, von einem spezifischen Anwendungsgebiet ausgegangen. Die Lebensmittelverarbeitung im Allgemeinen bietet genau die vorgestellten Rahmenbedingungen und Anforderungen. Der Spezialfall der Automatisierung in der Gemeinschaftsverpflegung als Anwendungsfall (vgl. Abschnitt 4.2) soll im Folgenden einer Nutzenabschätzung unterzogen werden. Diese ist vorrangig auf einer Kostenabschätzung und einer Investitionsrechnung begründet.

5.2 Untersuchungsszenarien für die Gemeinschaftsverpflegung

Das vorgestellte Planungsverfahren als solches befähigt grundlegend die neuartige Kombination von Anlagentechnik aus Abbildung 4.1 zur automatisierten Herstellung kundenindividueller und mengenflexibler Mahlzeiten. Mit der Demonstrationsplattform (vgl. Abschnitt 4.2) kann gezeigt werden, dass eine automatisierte Verarbeitung von Lebensmitteln, welche sich an den Qualitätsforderungen für die zu verarbeiteten Produkte orientiert, für die Gemeinschaftsverpflegung umsetzbar ist. Der Algorithmus zur Belegungsplanung befähigt und unterstützt die Anlagentechnik bei der effizienten Auftragsabwicklung. Die Berücksichtigung der Qualitätsansprüche jedes einzelnen Produktes trägt dazu bei, auch das subjektive Qualitätsempfinden in Grenzen planbar zu gestalten.

Um den Nutzen der Anlage wirtschaftlich bewerten und vergleichen zu können, ist es sinnvoll, Szenarien zu definieren, welche durch eine solche neuartige Anlagentechnik realisiert werden können. Die Szenarien im untersuchten Fall genügen den in Tabelle 5.1 definierten Prämissen, welche damit die Bewertungsbasis bilden. Die Wirtschaftlichkeit im Sinne

einer Investitionsrechnung aufzubauen erscheint sinnvoll, da die Gesamtbetrachtung eine Anlagentechnik mit einbezieht.

Kenngröße	Wert
Jahreswochen	52 Wochen
Nettoarbeitsstunden pro MA	7,7 Stunden ¹
Netturlaub pro MA	29 Tage ¹
Bruttoarbeitslohn	2.166,18 €, Tarifgruppe E3, Stufe 4
Feiertage 2012	13 davon 12 unter der Woche, 1 am WE
Krankheitstage	12 Tage, empirisch
Ausbezahlte Monatslöhne	12,811
Sonderzuschläge für Sonn- und Feiertage	3,16 €/Stunde
Nachtzuschlag zwischen 22:00 Uhr 06:00 Uhr	2,52 €/Stunde
Anzahl der Speisen SZ 1.0i	1000 ²
Anzahl der Speisen SZ 1.x	200
Anzahl der Speisen SZ 2.0i	100
Anzahl der Speisen SZ 2.x	200
Nutzungsdauer in Jahren	5
Kalkulatorischer Zinssatz in %	10
Abschreibung	Linear ohne Restwert
Stromkosten in €/kWh	0,20
Beleuchtungskostenanteil an den Energiekosten in %	5

Tabelle 5.1: Prämissen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Szenarien sind so gestaltet, dass das oberste Ziel, die Sicherstellung einer Mitarbeiterverpflegung als 24-h-Serviceleistung, erreicht wird. Dafür sind neben einem vollständig manuellen Szenario verschieden stark ausgeprägte Automatisierungslösungen zum Vergleich konzipiert. Es wird nachfolgend dargelegt, welche Verfahrensschritte durch die Automatisierung verschiedener Bereiche nicht mehr kostenwirksam sind. Die Szenarien gliedern sich in sechs untersuchte Fälle. Die Nomenklatur, welche gewählt wurde, stellt die nachfolgende Tabelle 5.2 dar. Zur Erläuterung sei erwähnt, dass sich die Automatisierungsszenarien darin unterscheiden, dass Kosten für die Reinigung der in Anspruch genommenen Gegenstände (Bestecke, Geschirr u.ä.) vollständig (SZ *.1), teilweise (SZ *.2) oder gar nicht (SZ *.3) in der Kalkulation berücksichtigt werden.

¹ Angabe gemäß des TVöD vom 01.03.2012 - 31.12.2012 (KLENK 2012)

² Abschätzung und Ergebnis einer Befragung (MAYER 2012)

Handhabung	Szenario			
	Wochentag		Wochenende	
	IST (i)	SOLL (s)	IST (i)	SOLL (s)
Manuell	SZ 1.0i	SZ 1.0s	SZ 2.0i	SZ 2.0s
Automatisiert 1	-*-	SZ 1.1s	-*-	SZ 2.1s
Automatisiert 2	-*-	SZ 1.2s	-*-	SZ 2.2s
Automatisiert 3	-*-	SZ 1.3s	-*-	SZ 2.3s

Tabelle 5.2: Umsetzungsszenarien in der Klinikumgebung

5.3 Wirtschaftliche Bilanzierung

5.3.1 Methodische Datenerhebung

Zur Verbesserung einer Produktion bedarf es einer gründlichen und zielgerichteten Erfassung des IST-Zustandes (ERLACH 2010). Zum besseren monetären und zeitlichen Vergleich der manuellen mit den automatisierten Verarbeitungsprozessen wurde zunächst mittels einer klassischen Wertstromanalyse (vgl. ERLACH (2010) und KLEVERS (2007)) der aktuelle Produktionsfluss einer typischen Großküche aufgenommen. Zusätzlich wurden die Zeitanteile des Personals je Arbeitsschritt im Rahmen einer Multimomentenaufnahme (MMA) aufgenommen. Die MMA liefert die Grundlage für eine Abschätzung zeitlicher und damit monetärer Aufwände, welche in diesem Arbeitsumfeld entstehen. Mit diesen Informationen werden Vergleiche für die vorgestellten Szenarien angestellt.

Da es sich nicht um eine Betrachtung eines bestehenden Produktionssystems handelt, sind für die Bewertung zunächst Vergleichsdaten aufzunehmen, welche auf den heutigen manuellen Arbeitsschritten beruhen. Die Durchführung dieser Datenaufnahme wurde bei einem möglichen Anwender einer Automatisierungslösung, einem Klinikum, durchgeführt.

Wertstromanalyse In der Küche des betrachteten Klinikums wurde mittels einer Wertstromanalyse zunächst aufgezeichnet, wie die logistischen Beziehungen des Materialflusses derzeit sind. Nach ERLACH (2010) wird die Methode in vier Schritten ausgeführt.

- Produktfamilienbildung (PFB)
- Kundenbedarfsanalyse (KBA)
- Wertstromaufnahme
- Ableiten von Verbesserungspotentialen (hier nicht relevant und daher nicht erläutert)

Bei der PFB kommt es darauf an, ein gegebenes Produktspektrum in definierte Familien zu untergliedern und Produktionsabläufe auf einzelne Produktbestandteile abzubilden. Im untersuchten Fall wurde versucht, für eine vollständige Speisezubereitung eine Grundgesamtheit an Prozessen zu finden. Bei einer Orientierung an der Lebensmitteltechnologie können Analogien herangezogen werden. Hierzu können Verfahrensschritten bestimmte Ordnungsstufen zugewiesen werden (SCHWARZ ET AL. 2010). Diese Ordnungsstufen werden danach hierarchisch im Prozess durchlaufen (SCHWARZ ET AL. 2010). Einen Überblick über die verwendeten Ordnungsstufen und die zugeordneten Verfahrensschritte können der Tabelle 5.3 entnommen werden.

Ordnungsstufe	Verfahrensschritt	Definition
0	Verfahrensführung	Gesamtheit aller Arbeitsabläufe zum Zubereiten einer bestimmten Mahlzeit
1	Verfahrensfolge	Teilfunktion in der Verfahrensführung, separierter Arbeitsablauf
2	Verfahren	Untereinheit in der Verfahrensfolge, produktionsbezogene Herstellungsschritte
3	Verfahrensstufe	eine Funktion innerhalb eines Verfahrens zum Erzeugen von Zwischenprodukten
4	Grundverfahren	nicht teilbare Handlung bei der Verarbeitung einzelner Komponenten

Tabelle 5.3: Ordnungsschema der Verfahrenssystematik (nach SCHWARZ ET AL. (2010))

Zur Bestimmung der Verfahrensfolge mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit werden diese Verfahren weiter in die sog. Verfahrensführungsgrade detailliert (vgl. SCHWARZ ET AL. (2010)). Zur Konsolidierung dieser Informationen und der Zuordnung der Prozessschritte auf die untersuchten Produktfamilien wurden diese in der Produktfamilien-Matrix (nach ERLACH (2010)) vereinigt. Zudem wurde im Anwendungsfall darauf verzichtet, jeden Schritt im Einzelnen nachzuvollziehen und aufzunehmen. Vielmehr wurden vorbereitende Schritte konsolidiert in einen Gesamtschritt das *Vorbereiten*. Die weiteren Prozessschritte können anhand der Abbildung 5.1 nachvollzogen werden. Begleitende Prozesse wie das Spülen oder die Abrechnung wurden in der Prozesskette für die Zubereitung nicht mit aufgenommen. Dennoch spielen diese bei der Bewertung eine Rolle, da bspw. das Spülen einen erheblichen Arbeitsaufwand beansprucht. Um einen Vergleich mit einer Automatisierungslösung anstellen zu können, ist zu überlegen, welche Schritte durch eine Automatisierung

substituiert werden können. Die dafür bestimmten Prozessschritte sind in der Abbildung 5.1 hervorgehoben.

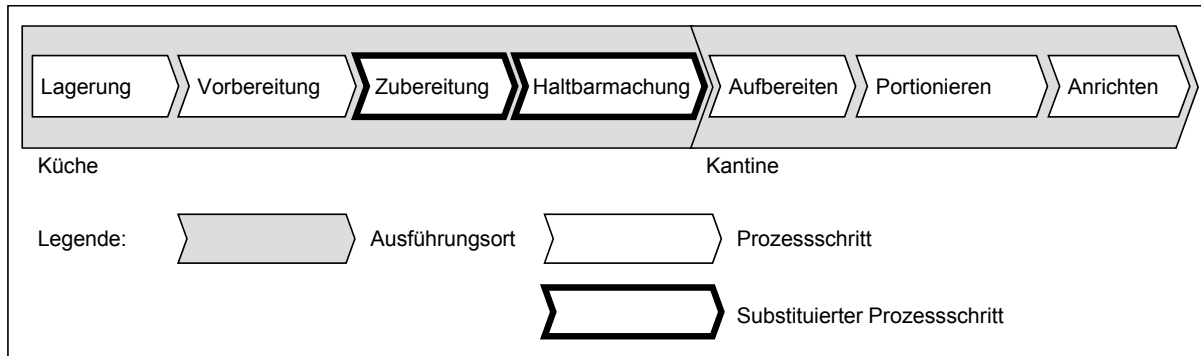


Abbildung 5.1: Prozesskette für die Zubereitung von Mahlzeiten

Mit Blick auf die in Abschnitt 5.2 eingeführten Szenarien für die Bewertungen können die erforderlichen Prozessschritte noch einem Ausführungsort zugeordnet werden. Dies ist erforderlich, um in einem späteren Schritt Rundgänge für die erforderlichen Beobachtungen richtig zu planen. Um zusätzliche Informationen im Wertstrom zu erheben, werden die folgenden nicht-wertschöpfenden Prozesse ergänzt, womit die Produktfamilienbildung abgeschlossen wird.

- Pause,
- nicht anwesend,
- Transport (Intralogistik) und
- Reinigung (Tellerwaschen, Geräte abreinigen).

Im Schritt der KBA soll festgestellt werden, auf welchen Kundenkreis die Anwendung ausgerichtet ist. Somit lassen sich für den speziellen Kundenkreis bestimmte Aussagen aus der nachfolgenden Wertstromaufnahme ableiten. Im vorliegenden Anwendungsfall sind zwei Kundenkreise denkbar. Dazu gehören zum einen Patienten, zum anderen die Belegschaft. Im Sinne der Beständigkeit der Nachfrage soll jedoch vorwiegend eine Bewertung im Sinne der Belegschaft durchgeführt werden.

Die nachfolgende Wertstromaufnahme schafft in erster Linie einen Überblick über die Zusammenhänge zwischen den vorherrschenden logistischen Abläufen und den theoretisch vorhandenen Prozessen im Großküchenalltag. Mit der Durchführung der Wertstromaufnahme werden zudem Stärken, aber auch Potentiale für den Personal- oder Materialeinsatz an gewissen Stationen des betrachteten Systems offensichtlich. Diese können mittels einer abschließenden Ableitung von Empfehlungen priorisiert und zum Abstellen oder Aus-

bauen plakativ herausgearbeitet werden. Im vorliegenden Fall wird die Methode jedoch ausschließlich dafür verwendet, die logistischen Abhängigkeiten aufzudecken. Das entstandene Materialflussdiagramm kann Abbildung 5.2 entnommen werden. Es besteht nach KLEVERS (2007) grundsätzlich aus den fünf unterschiedlichen Bereichen *Kunde*, *Prozesse* und *Materialfluss*, *Steuerung* und *Informationsfluss*, *Lieferanten* sowie *Kennzahlen* und *Zeiten*.

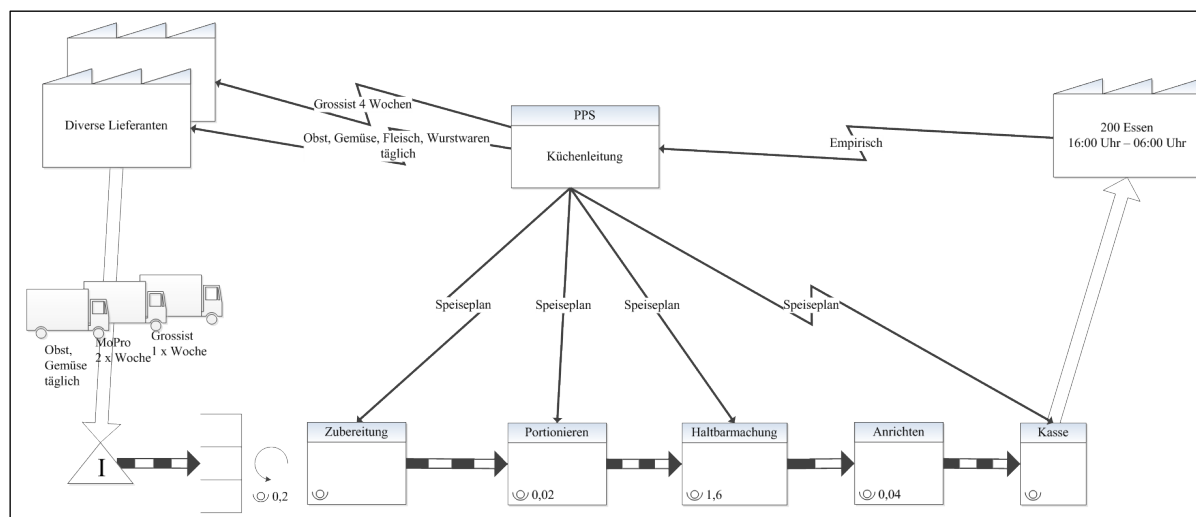


Abbildung 5.2: Wertstrom in der untersuchten Großküche (erbaut 1980-er Jahre)

Multimomentaufnahme (MMA) Neben dem Wissen über die Arbeits- und Materialflüsse ist es erforderlich, die Zeitanteile des Personals an den einzelnen Arbeitsstationen zu analysieren. Durch das Verfahren der Multimomentaufnahme, genauer dem Multimoment-Häufigkeits-Zählverfahren (HALLER-WEDEL 1985), können Aussagen zur Häufigkeit von unregelmäßig eintretenden Ereignissen getroffen werden. Da die Anwesenheit von Personal an bestimmten Orten zu bestimmten Zeitpunkten unter die unregelmäßig eintretenden Ereignisse gezählt werden kann, wurde dieses Verfahren hierfür herangezogen. Die nach HALLER-WEDEL (1985) geforderten Randbedingungen dieser Datenaufnahme wurde in der Analyse sichergestellt. Das Vorgehen zur Multimomentstudie kann REFA (1997) entnommen werden. Nach einer Zieldefinition auf die Ermittlung der Zeitanteile von wertschöpfenden und nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten bei der manuellen Lebensmittelzubereitung, welche als Grundlage für die Investitionsvergleichsrechnung mit einer vollautomatisierten Anlage dient, durchläuft das Verfahren weitere sieben Phasen. Die nachfolgende Abbildung zeigt diese in der Zusammenfassung.

Bei der Festlegung der Ablaufarten sieht das Vorgehen eine Gliederung des Beobachtungsablaufes vor. Dies wird anhand der eingeführten Produktfamilien vorgenommen. Dabei ist die einfachste Gliederungsmöglichkeit in den einzelnen Stationen die *Ja-Nein-Frage*

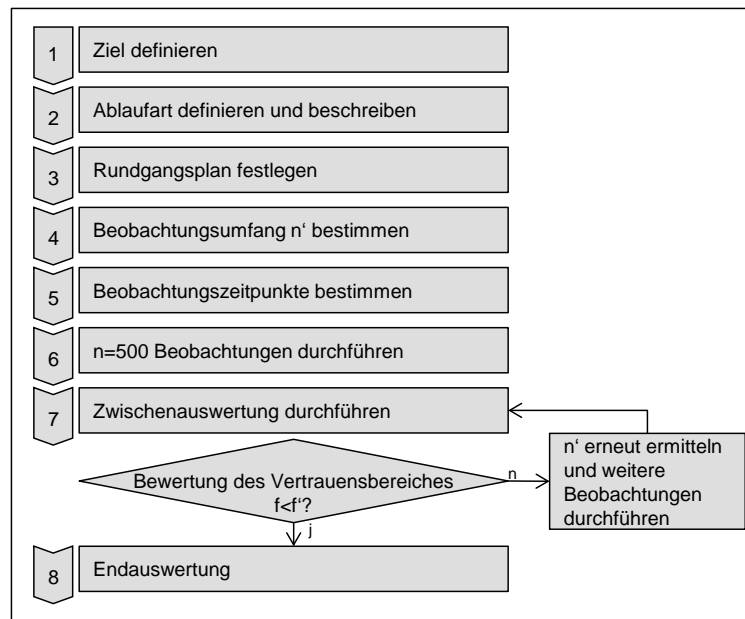


Abbildung 5.3: Ablaufphasen der MMA nach REFA (1997)

(REFA 1997). Angewandt auf den vorliegenden Fall kann dabei zum Beispiel in *tätig* und *nicht tätig* unterschieden werden.

Mit dem definierten Rundgangsplan wird sichergestellt, dass die Beobachtungsstandpunkte bei der Datenaufnahme statisch gegenüber den dynamischen Arbeitssystemen sind. Die Route der Beobachtungen wurde entlang des Wertstroms festgelegt.

Um die statistische Sicherheit der Aussagen zu gewährleisten, ist die Anzahl an Beobachtungen festzulegen. REFA (1997) empfiehlt hierbei die Ermittlung mittels einer Leitertafel (Nomogramm, vgl. Abbildung 5.4). Eine genaue Berechnungsvorschrift für die Anzahl an Beobachtungen führte HALLER-WEDEL (1985) ein:

$$n'_{Beo}(99,99994\%) = \frac{S \cdot p' \cdot (100 - p)}{f_v'^2} \quad (5.1)$$

mit:

- n'_{Beo} = Gesamtzahl der erforderlichen Notierungen
- p' = Erwartungswert
- f_v' = Gewünschter Vertrauensbereich
- S = Wert der Standardnormalverteilung bei 99,99994% = 3,84

Bei dem Wunsch nach einer statistischen Sicherheit von 99,99994 % innerhalb eines

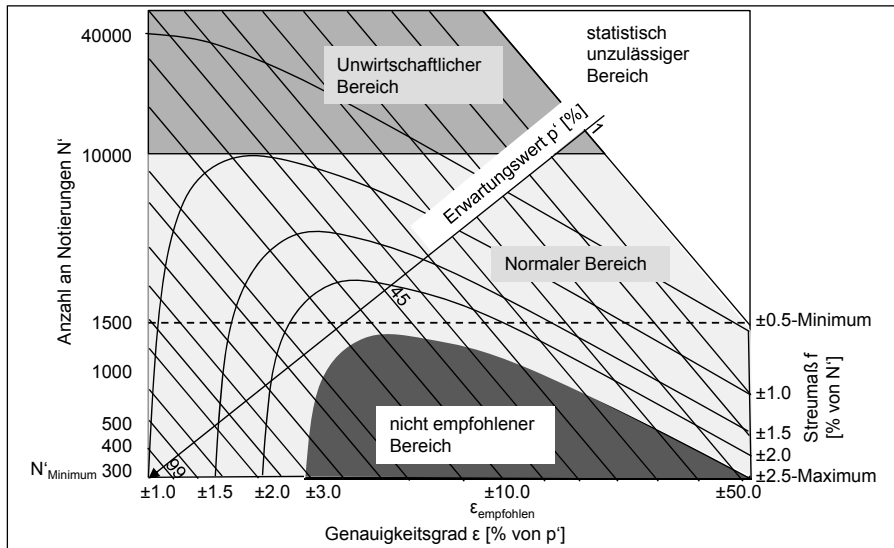


Abbildung 5.4: Nomogramm zur Ermittlung der statistischen Bemessungsgrößen (in Anlehnung an REFA (1997))

gewünschten Vertrauensbereiches³ von $f_v'^2 = 2,5 \%$ und unter der Annahme, dass alle beobachteten Mitarbeiter zu 80 % einer wertschöpfenden Tätigkeit nachgehen, ergibt sich folgendes Ergebnis für die Mindestanzahl an Beobachtungen:

$$n'_{Beo}(99,99994 \%) = \frac{3,84 \cdot 80 \% \cdot (100 - 80 \%)}{2,5 \%^2} = 983 \text{ Beobachtungen} \quad (5.2)$$

Mit Hilfe der tatsächlichen Dienstpläne an zwei ausgewählten Aufnahmetagen, welche als repräsentative Grundlage für die angestrebten Szenarien angesehen werden können, werden Beobachtungszeitpunkt und der Beobachtungsaufwand ermittelt. Mit der nachfolgenden Formel 5.3:

$$r_{BT} = \frac{R'}{B \cdot Ta} = \frac{n'_{Beo}}{n_R \cdot B \cdot Ta} = \frac{983}{29 \cdot 1 \cdot 2} \approx 17 \quad (5.3)$$

kann die Anzahl an Beobachtungsrundgängen r_{BT} ermittelt werden. Im vorliegenden Fall ergeben sich ca. 17 Rundgänge je Beobachtungstag. Damit folgt nach Formel 5.4 bei einer durchschnittlichen Dauer eines Rundgangs von acht Minuten ein Beobachtungsaufwand $t_{R'}$ von ca. 2,3 Stunden pro Tag.

$$t_{R'} = \frac{R' \cdot d_{R'}}{60} \quad (5.4)$$

³orientiert sich an dem Vorschlag in REFA (1997)

Für die Beobachtungstage ergeben sich noch spezifische Anpassungen an den Rundgängen, da gewisse Beobachtungspunkte in einzelnen Beobachtungszeitpunkten zusätzlich Berücksichtigung finden müssen (Erweiterung auf die Cafeteria). Die Tabelle 5.4 zeigt die Ergebnisse der tatsächlich durchgeführten Beobachtungen auf den Rundgängen mit der festgestellten Anzahl an Mitarbeitern, die entsprechend des Dienstplanes auf den jeweiligen Runden zu beobachten waren.

Samstag			Sonntag		
Rundgänge	Mitarbeiter	Beobachtungen	Rundgänge	Mitarbeiter	Beobachtungen
22	29	638	18	29	638
6	1	6	5	1	5
16	2	32	13	2	26
<i>Summe:</i>		679	<i>Summe:</i>		553

Tabelle 5.4: Anzahl der durchzuführenden Beobachtungen

Der Gesamtumfang der Beobachtungen beläuft sich damit auf 1232. Damit ist die gewünschte statistische Sicherheit gewährleistet.

Für das weitere richtige Vorgehen sieht REFA (1997) eine Zwischenauswertung vor. Diese soll sicherstellen, dass der angestrebte Vertrauensbereich erreicht wurde oder mit wie vielen zusätzlichen Beobachtungen erreicht werden kann. Mit der Formel 5.5 wird anhand der bereits aufgezeichneten Daten der aktuelle Vertrauensbereich ermittelt. Tabelle 5.5 zeigt die Ergebnisse der Zwischenauswertung mit dem damit erzielten Vertrauensbereich f_v sowie der notwendigen Anzahl an Beobachtungen n' für das Erreichen des angestrebten Vertrauensbereichs.

$$f_v = \sqrt{\lambda^2} \cdot \sqrt{\frac{p_{Beo} \cdot (100\% - p_{Beo})}{n_{Beo}}} \quad (5.5)$$

	n_{Beo}	p_{Beo}	f_v	n'_{Beo}
Wertschöpfende Tätigkeiten	548	79 %	3,0 %	1013
Nicht-wertschöpfende Tätigkeiten	144	21 %	3,0 %	1013
Summe	692	100 %		

Tabelle 5.5: Ergebnisse der Zwischenauswertung

Hieraus lässt sich ablesen, dass der Vertrauensbereich von $f_v = 2,5\%$ noch nicht erreicht werden konnte. Aus diesem Grund werden die tatsächlich durchzuführenden Beobachtungen n' errechnet. Mit dem geplanten Aufzeichnungsumfang von 1232 konnte davon ausgegangen

werden, dass sich das gewünschte Ergebnis einstellen würde, sodass die Studie wie geplant fortgeführt wurde.

Die Endauswertung bildet den Abschluss der Datenaufnahme und somit die Grundlage für die in Abschnitt 5.3.2 aufgebaute Erweiterungsinvestitionsrechnung. Dafür wurden die Zeitanteile der einzelnen Verfahrensschritte in der Zubereitung von Mahlzeiten ausgewertet. Diese Daten können der Abbildung 5.5 entnommen werden:

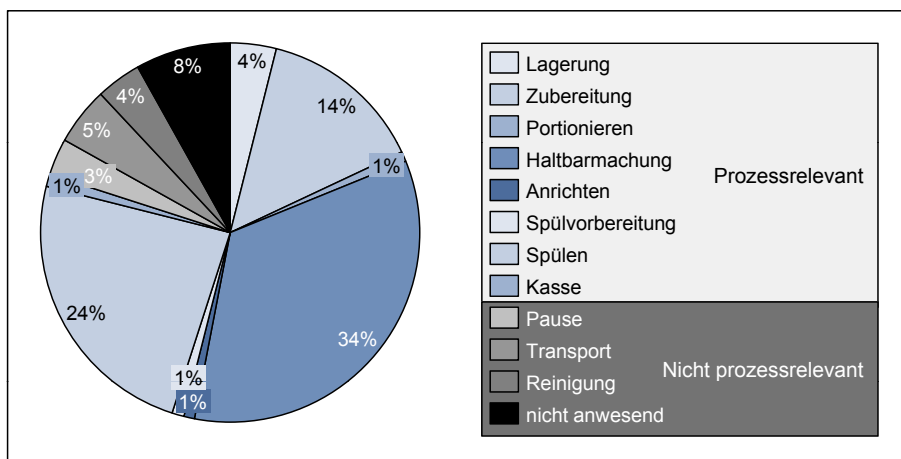


Abbildung 5.5: Ermittelte Zeitverteilung aller Tätigkeiten

Weitere Ergebnisse bezüglich genauer Beobachtungszahlen, Erwartungswerten der Tätigkeiten oder Vertrauensbereichen wurden entsprechend der Vorgaben von REFA (1997) durchgeführt und können im Detail der Tabelle 5.6 entnommen werden. Hier sind für jeden Verfahrensschritt die einzelnen Ergebnisse dargelegt.

Ablaufart	Beobachtungen	Anteil p_{Beo} in %	Vertrauensbereich f_v in %
Lagerung	48	3,95 %	1,10 %
Vorbereitung	0	0,00 %	0,00 %
Zubereitung	168	13,84 %	1,94 %
Haltbarmachung	423	34,84 %	2,68 %
Spülen	289	23,81 %	2,40 %
Aufbereiten	0	0,00 %	0,00 %
Portionieren	5	0,41 %	0,36 %
Anrichten	10	0,82 %	0,51 %
Kasse	10	0,82 %	0,51 %
Spülvorbereitung	10	0,82 %	0,51 %
Summe Prozessrelevanter Tätigkeiten	963	79,32 %	2,28 %
Pause	42	3,46 %	1,03 %
Nicht anwesend	101	8,32 %	1,55 %
Transport	59	4,86 %	1,21 %
Reinigung	49	4,04 %	1,11 %
Summe Nicht Prozessrelevanter Tätigkeiten	251	20,68 %	2,28 %
Summe	1214	100 %	

Tabelle 5.6: Ergebnisse der Multimomentenaufnahme

Abschließend soll noch kurz auf die Güte der Daten eingegangen werden. Der erreichte Vertrauensbereich von $\pm 2,28 \%$ bestätigt die Aussagekraft der Aufnahme. Für die prozess-

relevanten Tätigkeiten bedeutet dies, dass mit 95 %-iger Sicherheit 76,71 %-81,29 % aller aufgezeichneten Tätigkeiten zu den relevanten Tätigkeiten gezählt werden können.

5.3.2 Investitionsvergleichsrechnung

ERMSCHEL ET AL. (2013) schreiben, dass sich eine Investition als eine Reihe von Zahlungen gestaltet, welche mit einer Auszahlung beginnt und über die Investitionsdauer zu Einzahlungsüberschüssen führt. In diesem Sinne soll in diesem Abschnitt ermittelt werden, welches Umsetzungsszenario für den Betreiber am wirtschaftlichsten erscheint. Die Unterscheidung nach den vorgestellten Szenarien (Tabelle 5.2) zielt darauf ab, eine verlängerte (wochen-tags) bzw. eine lückenlose (wochenends) Verpflegungsmöglichkeit für das Personal eines Klinikums zu schaffen. Bei der Investitionsrechnung kann nach ERMSCHEL ET AL. (2013) in bilanzierbare und nicht bilanzierbare Investitionen unterschieden werden. Diese lassen sich dann ggf. weiter untergliedern. Dem gegenüber besteht eine alternative Zuordnung in *wirkungsbezogene*, *objektbezogene* und *sonstige* Investitionen. Je nach betrachtetem Szenario liegen Unterarten dieser beiden Gliederungsmöglichkeiten zugrunde. Beispielhaft sollen das Szenario SZ 1.0s sowie die Szenarien SZ 2.xs zugeordnet werden. Da SZ 1.0s vorsieht, die manuelle Zubereitungszeit in den Nachtzeiten mithilfe der Automatisierungslösung zu ergänzen, wird hier von einer Erweiterungsinvestition gesprochen. Im Gegensatz dazu werden in den Szenarien SZ 2.xs die manuellen Prozesse vollständig abgelöst und durch eine anlagentechnische Lösung ersetzt. In diesem Fall kann die Betrachtung den wirkungsbezogenen Ersatzinvestitionen zugeordnet werden. Für beide Fälle zeigt die folgende Systematik (Abbildung 5.6) noch einmal den Zusammenhang.

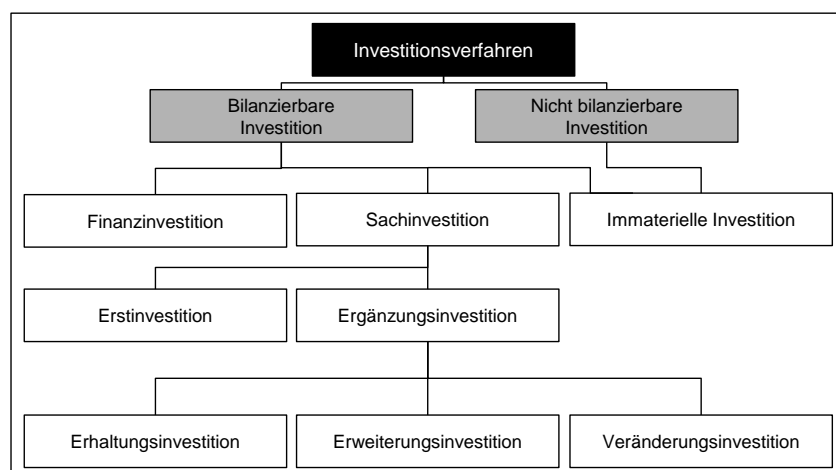


Abbildung 5.6: Einordnung der Investitionsentscheidungsverfahren

POGGENSEE (2009) beschreibt Investitionen als in hohem Maße kapitalbindend und langfristig orientiert. Aus diesem Grund ist es für Betreiber wichtig, eine sorgfältige Investitionsplanung durchzuführen, bevor es zur Kaufentscheidung kommt. Dafür stehen

prinzipielle Investitionsrechenverfahren zur Verfügung, welche auch hier nachfolgend dazu dienen sollen, die Wirtschaftlichkeit einer Investition zu beurteilen. Eine Systematisierung kann HAUNERDINGER & PROBST (2006) entnommen werden. Die Abbildung 5.7 zeigt in Anlehnung an die Darstellung von HAUNERDINGER & PROBST (2006) die Einordnung des für den Anwendungsfall ausgewählten statischen Verfahrens der Kostenvergleichsrechnung. Diese Methode wird trotz ihrer in POGGENSEE (2009) genannten Nachteile nach OLFERT & REICHEL (2009) in 46 % der Unternehmen genutzt und soll daher auch hier Anwendung finden.

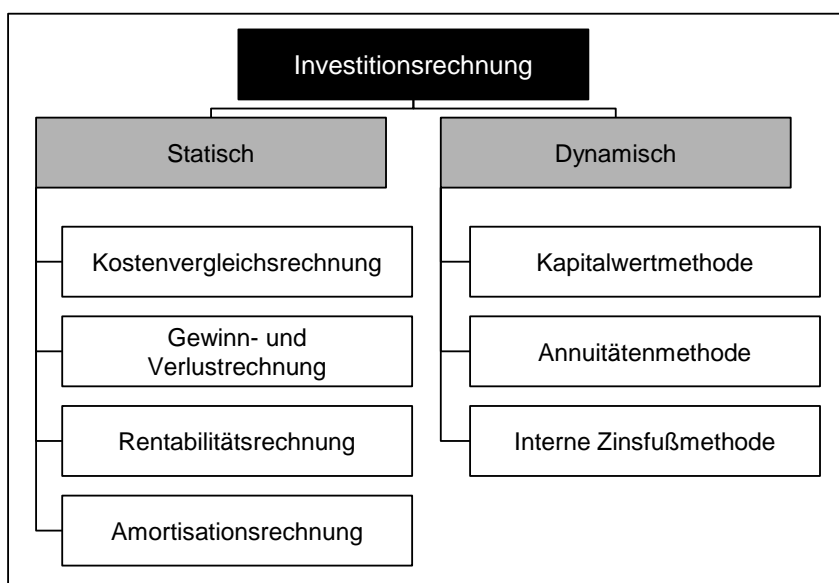


Abbildung 5.7: Methoden der Investitionsrechnung nach HAUNERDINGER & PROBST (2006)

Die statischen Verfahren berücksichtigen Kosten und Leistungen, welche innerhalb einer Investitionsperiode zu einem unbestimmten Zeitpunkt auftreten. Da die Investitionsalternativen als unabhängig und gleichrangig betrachtet werden, kann die Kostenvergleichsrechnung Anwendung finden. Dies wird zudem gestützt, da auch der Bedarf und damit die Nachfrage an Verpflegungsmitteln im betrachteten Fall als statisch anzunehmen sind.

Bei der Kostenvergleichsrechnung ist die Hauptaussage, die Vorteilhaftigkeit einer Ersatzinvestition oder mehrerer Erweiterungsinvestitionen zu beurteilen (NEY 2006). Die Grundaussage ist also, es ist diejenige Alternative zu bevorzugen, welche die geringsten Kosten verursacht (ERMSCHEL ET AL. 2013).

Dabei werden jeweils die Summen der fixen und variablen Gesamtkosten miteinander verglichen (siehe Formel 5.6).

$$K_A = K_{A_{fix}} + K_{A_{var}} \ll K_{B_{fix}} + K_{B_{var}} = K_B \quad (5.6)$$

Die *fixen Kosten* K_{fix} sind dabei klassisch keinem Produkt zuzuordnen, sondern fallen stets als Gemeinkosten an. Sie werden über einen zu ermittelnden Schlüssel den Kostenträgern zugewiesen. Charakteristisch ist die Langfristigkeit dieser Kosten. Typische fixe Kosten sind Beträge aus Wartungsverträgen oder ähnlichem. Im Sinne der Kostenvergleichsrechnung sollen hier zusätzlich Löhne, Mieten und auch kalkulatorische Abschreibungen (AfA) (gemäß Formel 5.7) und Zinsen Berücksichtigung finden. Detaillierte Beschreibungen der einzelnen Komponenten und deren Zusammenhänge können bspw. in OLFERT (2010) nachgelesen werden. Daran angeknüpft soll für die Kalkulation davon ausgegangen werden, dass sich bei einem nachfolgenden Ersatz der Anlage kein Wiederverkaufserlös (Restwert) ergibt. Somit setzt sich die Abschreibung wie folgt zusammen:

$$\text{AfA} = \frac{\text{Anschaffungskosten [€]} - \text{Restwert [€]}}{\text{Nutzungsdauer [Jahre]}} \quad (5.7)$$

Für den kalkulatorischen Zins⁴, auch *Opportunitätskosten* genannt, ergibt sich folgende Berechnungsvorschrift:

$$\begin{aligned} \text{kalk. Zins} &\cong K_{\text{opportun}} = \emptyset \text{ gebundenes Kapital} \cdot \text{Zinssatz} \\ &= \frac{\text{Anschaffungskosten [€]} + \text{Restwert [€]}}{2} \cdot \text{Zinssatz} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Unter den *variablen Kosten* K_{var} werden alle Kostenanteile subsumiert, welche sich an der Höhe der Beschäftigung, der Menge oder der erbrachten Leistung bemessen lassen. Diese Kosten können direkt einem Produkt zugeordnet werden. Beispielhaft seien hier Energiekosten, Materialkosten oder Betriebskosten angeführt. Für das Anwendungsbeispiel wird ermittelt, worin sich eine manuelle von einer vollautomatischen Mahlzeitenproduktion unterscheidet. Aus diesem Grund sind zunächst relevante Kosten zu ermitteln. Der Tabelle 5.7 kann entnommen werden, welche Kostenanteile - verglichen zwischen manueller und automatischer Zubereitung - als relevant und irrelevant eingestuft wurden. Zudem ist ersichtlich, dass speziell in der Kostenverteilung der Automatisierungslösung einige Abweichungen im Vergleich zum IST-Zustand zu erwarten sind. Eine besonders auffällige Veränderung ist dabei in den Personalkosten zu erwarten. Die Betrachtung *Manuell* zielt darauf ab, dass die gewünschten Szenarien ebenfalls nicht vollständig dem IST-Stand entsprechen. Die Zielszenarien des manuellen Betriebes sind daher analog auf der Basis der

⁴Entgangener Zinsertrag, der hätte erwirtschaftet werden können, wenn man die Investition nicht getätigt, sondern den Betrag zum marktüblichen Zins angelegt hätte (LIEB 1996). Dabei wird das in einer Zeitperiode gebundene Kapital mit einem marktüblichen Zins beaufschlagt.

Zeitanteile hochzurechnen und in der Analyse zu betrachten.

Weiterhin ist festzustellen, dass nicht mehr alle Kosten in die Investitionsplanung einfließen. Vorrangig hängt das damit zusammen, dass sich die Aufwendungen zwischen den Alternativen nicht unterscheiden. So sind beispielhaft die Materialkosten für die Zubereitung eines definierten Gerichtes gleich und müssen für eine Investitionsentscheidung nicht mit berücksichtigt werden. PLINKE & RESE (2006) geben jedoch zu bedenken, dass diese für das interne Rechnungswesen eines Unternehmens durchaus relevant seien und dort in jedem Fall Berücksichtigung finden sollten.

Kosten	Betrachtung	erwartete Kostenentwicklung	
		Manuell	Automatisch
Material	nein	↔	↔
öffentliche Abgaben	nein	↔	↔
Personalkosten	ja	↑	↓
Dienstleistungskosten(hier: Energie)	ja	↔	↓
kalk. Kosten	ja	↔	↑

Tabelle 5.7: Betrachtete Kostenstruktur der Differenzkostenanalyse

Erläuterung:

↑ Es wird eine Erhöhung erwartet

↓ Es wird eine Verminderung erwartet

↔ Keine Änderung bei Umstellung

Personalkostenermittlung: KEUN & PROT (2008) und HENTZE & KEHRES (2008) ist zu entnehmen, dass sich die Hauptkosten eines Klinikums im Allgemeinen auf die Personalkosten aggregieren lassen. Demnach ist davon auszugehen, dass etwa 65-68 % der Gesamtkosten einer Klinik auf die Personalkosten entfallen. Dieser relative Bezug kann damit auch gleichermaßen für den Anteil an allen Kosten in der Küche angenommen werden. Zudem ist in LIEB (1996) im Detail nachzulesen, dass in einer Krankenhausküche die Personalkosten zwischen 45-65 % der Gesamtkosten der Speisenversorgung ausmachen. Diese Personalkostenintensität wird sich auch in der nachfolgenden Betrachtung bemerkbar machen. Auf Basis der in Tabelle 5.1 dargelegten Berechnungsprämissen ergeben sich für die zu erfassenden Szenarien (Tabelle 5.2) unterschiedliche Summen an Personalkosten, welche auf der Anzahl sog. Vollkostenstellen beruhen. Diese werden in der Tabelle 5.8 zusammengefasst dargestellt. Es fällt auf, dass das Sollszenario SZ 2.0s überproportional hohe Kosten verursacht. Dies hängt damit zusammen, dass neben einer Erhöhung der

Standardarbeitsleistung von 7,7 h auf 24 h, die mehrgeleisteten Zeiten als Wochenend- und Nachtschichten zu kalkulieren sind.

Personalkosten Soll-Szenario 1.0		
	Küche	Kantine
Anzahl der VK's	2,3	2,3
Summe	4,6	
Personalkosten [€/Jahr]	131.150,05	
Personalkosten Ist-Szenario 2.0		
	Küche	Kantine
Anzahl der VK's	0,9	1,8
Summe	2,7	
Personalkosten [€/Jahr]	76.882,05	
Personalkosten Soll-Szenario 2.0		
	Küche	Kantine
Anzahl der VK's	2,7	5,6
Summe	8,3	
Personalkosten [€/Jahr]	241.470,48	

Tabelle 5.8: Ermittelte Personalkosten je Szenario

Die ermittelten Zeitanteile aus Abbildung 5.5 werden herangezogen, um die dafür aufgebrauchten äquivalenten Personalkostenaufwände hochrechnen zu können. Dabei wird, ausgehend von den in Tabelle 5.8 aufgeführten Gesamtbeträgen, die Auswirkung auf jeden Verfahrensschritt umgelegt. In der unterbewerteten Betrachtung ist verständlich, dass allein durch die Substitution von Prozessschritten (gemäß Abbildung 5.1) Personalkosten eingespart werden können. Jedoch ist im Sinne der Kostenvergleichsrechnung aufzuzeigen, dass die tatsächlichen Kosten durch eine Investition in eine neue Anlagentechnik gegenüber der Personalkostenersparnis in einem wirtschaftlichen Verhältnis stehen.

Sachkostenermittlung Zur richtigen Ermittlung der Nebenkosten wurden zusätzlich Energiedaten des vorhandenen Kantinenbetriebes herangezogen. Die einzelnen Kostpunkte der Sachkosten werden in der Betrachtung zunächst verursachungsgemäß für die Szenarien ermittelt. Dies bedeutet, dass sie entsprechend der Mahlzeitenherstellung und der Ausbringmengen der Küche und Kantine unterschiedlich schwer ins Gewicht fallen. Speziell bei den Energiekosten entfallen gemäß TÄSCHNER (2008) ca. 5 % der Energiekosten auf Beleuchtungskosten. Diese wurden in der Kostenaufstellung gesondert ermittelt, da diese wiederum nicht abhängig von den Ausbringmengen, sondern vielmehr von der Nutzungsdauer und dem Nutzungszeitpunkt sind. Im nächsten Schritt werden die szenarienbezogenen,

erweiterten Arbeitszeiten mit den anfallenden Kosten hinterlegt, um für die nachfolgende Kalkulation der automatisierten Herstellung herangezogen zu werden. Für die Energiekosten der automatischen Herstellung werden die Leistungswerte und die Wirkungszeiten der Anlagentechnik bestimmt. Die Mischkostenverteilung kann der Tabelle 5.9 entnommen werden.

Posten	Szenarien					
	SZ 1.0i	SZ 1.0s	SZ 1.x	SZ 2.0i	SZ 2.0s	SZ 2.x
Energie	126.058 €	25.212 €	8.678 €	5.042 €	10.085 €	5.951 €
Beleuchtung	5.227 €	7.318 €	7.318 €	1.673 €	5.018 €	5.018 €
Heizung	5.769 €	1.154 €	1.154 €	231 €	462 €	462 €
Reinigung	17.308 €	3.462 €	3.462 €	692 €	1385 €	1385 €
Wartung	23.077 €	4.615 €	4.615 €	923 €	1.846 €	1.846 €
Summe	177.439 €	41.761 €	25.227 €	8.561 €	18.796 €	14.662 €

Tabelle 5.9: Ermittlung der Dienstleistungskosten €/Jahr

Zusammenfassend können der Tabelle 5.10 die Abschätzungen der Sachkosten entnommen werden. Diese setzen sich aus Analgenkosten und Materialkosten für den Aufbau zusammen. Kalkulatorisch wurden die Abschreibungskosten ermittelt und mit berücksichtigt. Wie bereits angedeutet, wurden die Energiekosten auf Basis der maximalen Lastdaten errechnet.

5.3.3 Zusammenfassung und Bewertung

Das Kapitel zielt darauf ab, den betriebswirtschaftlichen Vergleich einer manuellen mit einer automatisierten Mahlzeitenherstellung, welche auf Basis des vorher beschriebenen Planungsverfahrens realisierbar ist, zu ermöglichen. Hierfür wurde mittels definiertem Vorgehen die Verfahrensfolge analysiert und in eine automatisierte Umgebung überführt. Mittels MMA wurden Zeitanteile für die Einzelprozesse erhoben. Das Einsparpotential für die maschinelle Lösung kann anhand der entfallenden Prozessschritte ermittelt werden. Mit diesen Erkenntnissen und den üblichen Kostensätzen im betrachteten Bereich wurden die Personalkosten für definierte Szenarien ermittelt. Zudem wurden die Sachkostenanteile sowie die Energie- und Dienstleistungskosten kalkuliert. Für die Szenarien mit Take-Away-Ansatz (SZ 2.3) wurden zudem noch die Materialaufwände für die Verpackungen und gleichermaßen die reduzierten Spülkosten kalkuliert. Die Tabelle 5.11 zeigt die errechneten Werte noch einmal im Überblick.

Besonders auffällig sind die Ersparnisse innerhalb der Personalkosten. Dies ist jedoch auch leicht nachvollziehbar, da sich hier der größte Kostenfaktor innerhalb einer Küche verbirgt. Insbesondere ist dies auch der Stellhebel für die Argumentation für eine

Komponente	Beschreibung	SZ 1.0s	SZ 2.0s
Allgemeine Angaben	Preis [€/kWh]	0,2	0,2
	Betriebsstunden [h/Woche]	70	48
	Laufleistung [Woche]	52	52
	Abschreibungsdauer [Jahre]	5	5
	Anschaffungskosten (AK) [€]	6.000	6.000
HLD	Umbaukosten [€]	2.000	2.000
	HLD [Anzahl]	2	2
	Leistung [kW/HLD]	5,9	5,9
	Kosten bei kontinuierlicher Höchstleistung [€]	8.590,40	5.890,56
	kalk. Abschreibung je HLD [€/Jahr]	3.200	3.200
Waage	AK [€]	5.000	5.000
	Leistung [kW]	0,12	0,12
	Kosten bei kontinuierlicher Höchstleistung [€]	87,36	59,9
	kalk. Abschreibung [€]	1.000	1.000
Magazin	AK [€]	10.000	10.000
	kalk. Abschreibung [€]	2.000	2.000
	AK Tischplatten [€]	4.416,39	4.416,39
Tischplatten & Tischgestell	kalk. Abschreibung [€]	883,28	883,28
	AK Tischgestell [€]	906,23	906,23
	kalk. Abschreibung	181,25	181,25
	AK [€]	638,68	638,68
Roboter	Roboter [Anzahl]	5	5
	Roboterkosten [€]	3.193,40	3.193,40
	kalk. Abschreibung [€]	638,68	638,68
Zustelleinheit	AK [€]	4.000,00	4.000,00
	kalk. Abschreibung [€]	800	800
Summe AK [€]		39.516,02	39.516,02
Summe kalk. Zinsen [€]		1.975,80	1.975,80
Summe kalk. Abschreibungen [€]		14.457,92	14.457,92

Tabelle 5.10: Gegenüberstellung der Sachkosten der Sollszenarien

Automation im Bereich der Gemeinschaftsverpflegung. Weiterhin fällt bei den Werten auf, dass sich insbesondere in den Wochenendbetrachtungen (SZ 2.x, mit $x \in [0 \dots 3]$) die Sach- und Dienstleistungskosten negativ gegenüber dem Ist-Zustand darstellen. Dies ist auf die Berücksichtigung der AfA-Kosten für die Investitionen und die etwas höheren Dienstleistungskosten durch den vermehrten Einsatz von Anlagentechnik zurückzuführen.

Die Kostenanalyse macht deutlich, dass mit Hilfe einer Automatisierung verschiedener Bereiche der Prozesskette bereits hohe Kosteneinsparungen möglich sind. Damit wären auch neue Investitionen zu argumentieren.

Im Ergebnis lässt sich ableiten, dass sich auch mit einer entsprechenden einmaligen Anschaffung neuer Anlagentechnik die Erweiterung der Verpflegungszeiten gegenüber der Ausdehnung mittels Personaleinsatz jederzeit rentiert. Auf Basis der Zahlen lässt sich zeigen, dass bereits mit den Sollszenarien (SZ x.1, mit $x \in [1 \dots 2]$) nach weniger als zwei Jahren eine Amortisation gegenüber der personellen Lösung zu erreichen ist. Weitet man

	Basis SZ 1.0s	SOLL SZ 1.1	SZ 1.2	SZ 1.3	IST SZ 2.0i	SOLL SZ 2.0s	SZ 2.1	SZ 2.2	SZ 2.3
Summe Personalkosten in €	131.150,05	39.107,35	14.130,50	6.805,97	76.882,05	241.470,48	72.003,55	26.016,75	12.531,00
Differenz		92.042,70	117.019,55	124.344,07			169.466,92	215.453,72	228.939,47
Summe Sachkosten in €	0,00	25.111,49	25.111,49	31.872,79	0,00	0,00	16.433,73	16.433,73	19.138,25
Summe Dienstleistungskosten in €	41.760,49	16.548,95	16.548,95	16.548,95	8.561,19	18.795,10	14.660,95	14.660,95	14.660,95
Summe Sachkosten und DL-Kosten	41.760,49	41.660,44	41.660,44	48.421,74	8.561,19	18.795,10	31.094,68	31.094,68	33.799,20
Differenz		100,05	100,05	-6.661,25			-12.299,57	-12.299,57	-15.004,09
Summe aller Kosten	172.910,54	80.767,78	55.790,94	55.227,71	85.443,23	260.265,58	103.098,23	57.111,43	46.330,20

Tabelle 5.11: Zusammenfassung der Kostenkalkulation in €/Jahr

die Betrachtung bis auf die maximale Take-Away-Lösung (SZ2.3) aus, so rechnet sich die Wochenversorgung bereits nach ca. vier Monaten. Die Wochenendvariante, aufgrund der höheren Zuschläge für Wochenendarbeit für Mitarbeiter, erreicht diesen Status nach zwei Monaten. Die Abbildung 5.8 zeigt die absoluten Kosten der Wochenendszenarien sowie die relative Ersparnis zwischen manueller und vollautomatisierte Umsetzung.

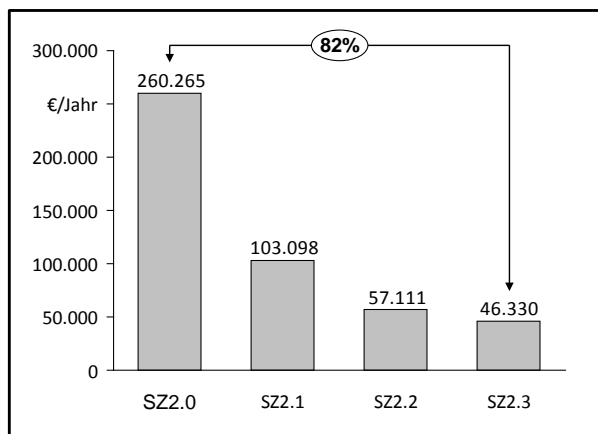


Abbildung 5.8: Kostenvergleich zwischen den Wochenendszenarien

Diese Werte stimmen an sich nur, wenn auch die kalkulierten Ausbringungsmengen realisiert werden. Man kann somit festhalten, dass die kundenindividuelle, qualitätsoptimierte Mahlzeitenproduktion, welche durch die dargestellte Anlagentechnik in Verbindung mit dem in dieser Arbeit entwickelten Planungs- und Steuerungsvorgehen möglich wird, für den Einsatz in einer vergleichbaren Mitarbeiterverpflegung im Bereich der Gemeinschaftsverpflegung empfehlenswert ist. Dabei ist anzumerken, dass die vorliegende Kalkulation zunächst für den konkreten Fall mit der entsprechend vorgestellten Anlagentechnik Gültigkeit besitzt. Dennoch bleibt festzuhalten, dass aufgrund der Betrachtungen in den verschiedenen Szenarien diese Empfehlung etwas verallgemeinert werden kann. Zudem ist an den kalkulatorischen Ergebnissen festzustellen, dass selbst bei einem Fehler von 100%, angenommen auf die Szenarien SZ x.1 (mit $x \in [1 \dots 2]$) immer noch ein Kostenvorteil zu erreichen ist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Automatisierungsbedarf für die (System-)Gastronomie im Bereich der Ernährungsindustrie konnte dargelegt werden. Die erhöhte Nachfrage an individualisierten Produkten in der Ernährungsindustrie, vorrangig veranlasst durch demografische Veränderungen, zwingt die Produzenten dazu über Automatisierungslösungen nachzudenken. Die Herausforderung der Reduzierung von Ausschuss, die in der manuellen Verarbeitung nachweislich vorliegt, ist im Einklang mit dieser Forderung dargestellt worden. Gilt die Automatisierung als das Mittel der Wahl, konnte die Forderung nach dem Erreichen eines subjektiv geprägten Qualitätsempfindens herausgestellt werden. Der sensorische Eindruck für Lebensmittel ist ein von den menschlichen Sinnen abhängiger und damit eine stark individuelle Größe. Die Abbildung dieser Qualität und die Möglichkeit, diese individuell zu manipulieren und in einem Maschinenbelegungsplaner zu integrieren, wurde anhand eines methodischen Vorgehens wissenschaftlich dargelegt.

Zur effizienten Erfüllung der Kundeninteressen in der Produktion wurde die Verarbeitungsqualität als neues Zielkriterium für eine Planungsaufgabe eingeführt. Dabei wurden die typischen logistischen Kenngrößen zunächst außen vor gelassen, um den konkreten Einfluss der Qualität zu untersuchen. Für eine planungstechnische Berücksichtigung des Faktors Qualität konnte im Rahmen der Arbeit eine Methode beschrieben werden, die es erlaubt, aus einem gegebenen Prozess ein unterstützendes Produktmodell zu generieren, welches sehr prozessnah das Maschinenbelegungsproblem verbessern kann. Der Forderung von WIEN-DAHL (2004) nach einer Vorverlagerung der Qualitätsbetrachtung kann damit entsprochen werden. Um eine maximale Zufriedenheit beim Konsumenten zu erlangen, wurde in der vorliegenden Arbeit zusätzlich die Rückkopplung mit Hilfe von Kundenfeedback dargelegt und in das Planungssystem mit integriert. Aufbauend auf diesen beiden Komponenten wurde erläutert, wie ein qualitätsorientierter Prozessparameterverlauf eingestellt werden kann.

Am dargestellten neuartigen Anwendungsfall und an dessen Umsetzung, in Form eines Forschungsdemonstrators, konnte der Nachweis geführt werden, dass auf die Prozesssteuerung mit Fokus auf die Ergebnisqualität eines Produktes bereits im Planungsschritt zielführend Einfluss genommen werden kann. Das Verkürzen des Planungshorizontes im Anwendungsfall auf ca. 20 Minuten macht eine Annäherung von eigentlicher Belegungsplanung und typischerweise verzögerter Prozesssteuerung deutlich.

Es lassen sich folgende Aussagen im Ergebnis formulieren:

- Die Produktqualität kann als Zielgröße einer Maschinenbelegungsplanung formuliert werden.
- Die Produktqualität ist Ausdruck der Zusammenhänge zwischen prozessbedingter Verarbeitungsqualität und wirkenden Prozessgrößen. Wenn die Abhängigkeiten und Randbedingungen klar beschreibbaren Kenngrößen entsprechen, kann ein Modell des Produktes erstellt werden.
- Die Maschinenbelegungsplanung eines individuellen Produktes kann unter Einbeziehen dessen modellhafter Beschreibung verbessert werden.
- Ein Kunde kann den Verarbeitungsprozess individualisieren. Dafür kann Kundenfeedback eine Möglichkeit sein.

Es kann demzufolge festgehalten werden, dass in der konventionellen Produktionsplanung nicht nur durch Hinzufügen verbesserter Algorithmen Potentiale gehoben werden können. Auch die veränderte Sicht auf die Problemstellung sowie die Anpassung des Fokus bei den Planungszielgrößen kann hierbei Verbesserungen bringen. Schließlich kann postuliert werden, dass gerade bei der kundenindividuellen Produktion die Anforderungen des Kunden die Produktionsschritte beeinflussen sollen. In einem Umfeld wie der Lebensmittelverarbeitung sollte dieser Einfluss bis auf die tatsächliche Prozesssteuerung Auswirkungen haben. Eine sehr prozessnahe Berücksichtigung von Kundenwünschen bietet dabei die Chance die besten Ergebnisse im Sinne des Kunden zu erreichen. Das Anwendungsbeispiel zeigt auf, dass der vorgestellte Algorithmus in einer Neukomposition von Anlagentechnik für die Automatisierung im Bereich der Gemeinschaftsverpflegung dienlich ist, um dem nachfragenden Kundenkreis individuelle, qualitätsoptimierte Speisen anzubieten.

Hierbei ist zu erwähnen, dass eine Anwendung lediglich für Bereiche anzuraten ist, bei denen der Kunde eine gewisse Vorstellung für die ablaufenden Prozesse entwickeln kann. Andererseits könnte die ungünstige Auswahl von Parametern oder auch, wie aufgezeigt, das bewusste Fehlverhalten bei der Abgabe des Kundenfeedbacks zu negativen Ergebnissen führen. Durch Fachpersonal ist es möglich, Qualitätsempfinden auch in höher komplexen als dem vorgestellten Anwendungsfall einzusetzen. Hierfür wäre in Zukunft darüber nachzudenken, wie die Modellierung von Produkten durch die wirkenden prozessualen Parameter angepasst werden kann.

Die Anwendungen gehen dabei vor allem in die Bereiche der Produkte, bei welchen die Produktqualität eine zeitliche Abhängigkeit, die sogenannte Transienz, aufweist. Dies sind bspw. die mit Kunstharz gebundenen Kohlefaser-Verbundmaterialien (auch Pre-Pregs) aus

den Bereichen der Luft- und Raumfahrt. Auch das Planen von Aufträgen in der Petrochemie oder innerhalb von Gießereien wäre denkbar. Auch hier besitzen die zu verarbeitenden Materialien eine zeitveränderliche Qualität, um bspw. die richtigen Eigenschaften bei Misch-, Trocknungs- oder Aushärteprozessen einzustellen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Vorschlag erarbeitet, wie auf Basis von Qualitätsmodellen und zusätzlichem Einbeziehen von personenbezogenen Daten die Produktion individualisiert werden kann.

Zukünftige Arbeiten können dazu dienen, das Vorhandensein von Produktmodellen auf Basis von validen empirischen Daten sicherzustellen. Die Erstellung von Modellen für Produkte mit stark subjektiv geprägter Bewertung erscheint als folgerichtiger Schritt für die weitere Verbesserung der Planungsergebnisse. Durch weitere Versuchsreihen könnte hier die Datenbasis und damit die Anzahl unterschiedlicher Produktmodelle auf mehrere, auch komplexer strukturierte Lebensmittel vergrößert werden.

Anhang

A Betreute Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden in den Jahren von 2012 bis 2014 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen der qualitätsoptimierten Maschinenbelegungsplanung untersucht wurden und deren Ergebnisse in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

- Schleimer, Tim: Entwurf und Vergleich eines Planungsalgorithmus zur Produktionsplanung unter speziellen Anforderungen (Masterarbeit, Universität der Bundeswehr München, abgegeben im Juni 2012)
- Mayr, Michael: Wirtschaftlichkeitsbewertung einer automatisierten Lebensmittelverarbeitung (Bachelorarbeit, Hochschule München, abgegeben im August 2012)
- Seeberger, Tobias: Untersuchung prozessnaher Einflussmöglichkeiten auf die Maschinenbelegungsplanung (Bachelorarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im Januar 2014)
- Michailov, Michael: Nutzungsmöglichkeiten von Kundenfeedback für die Verbesserung der Produktionssteuerung in der individuellen Produktion (Bachelorarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im April 2014)

B Datenbankstruktur im Umsetzungsbeispiel

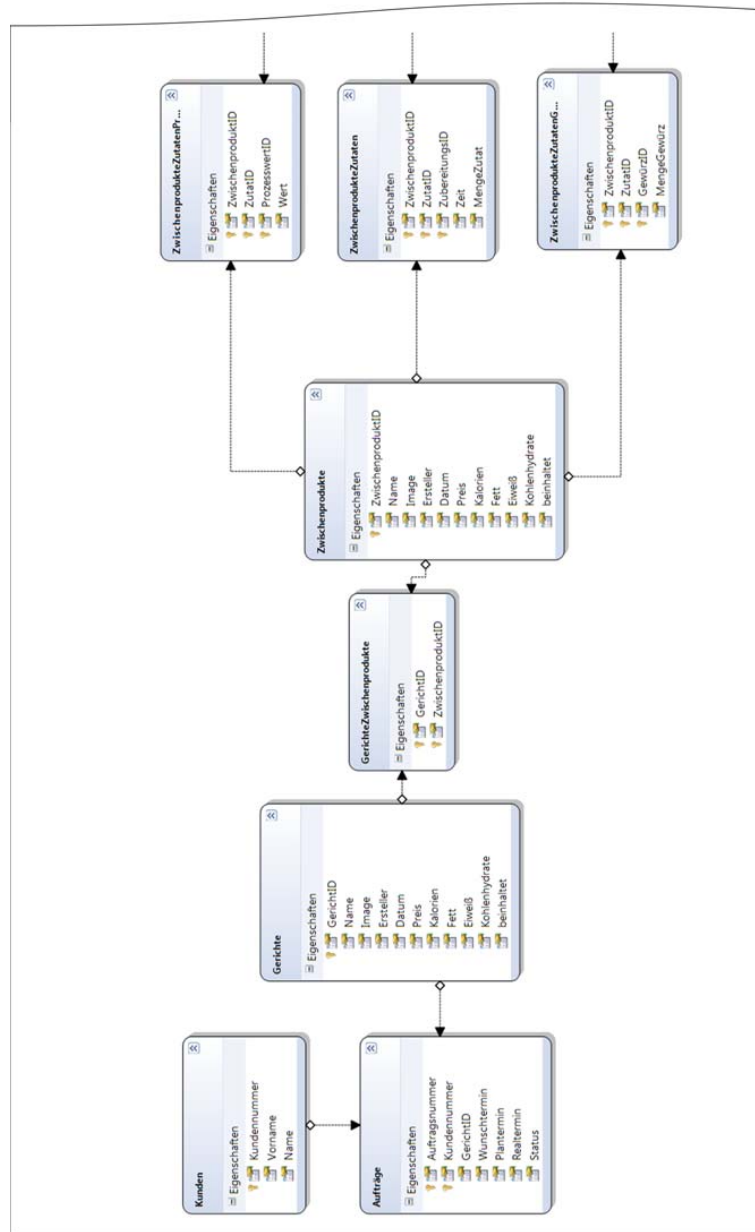


Abbildung B.1: Umgesetztes Datenbankmodell Teil 1

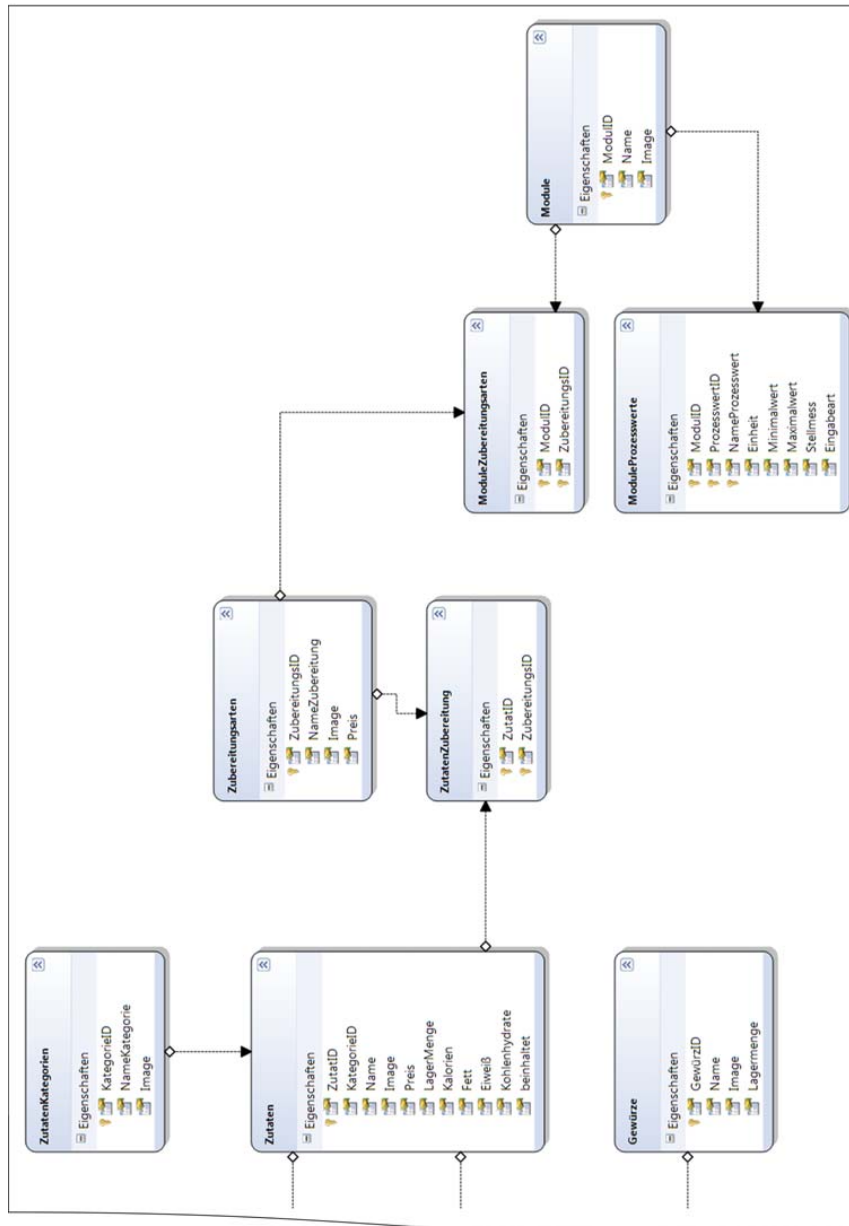


Abbildung B.2: Umgesetztes Datenbankmodell Teil 2

C Ablaufdiagramme der implementierten Methoden

C.1 Die Methode „fristime1“

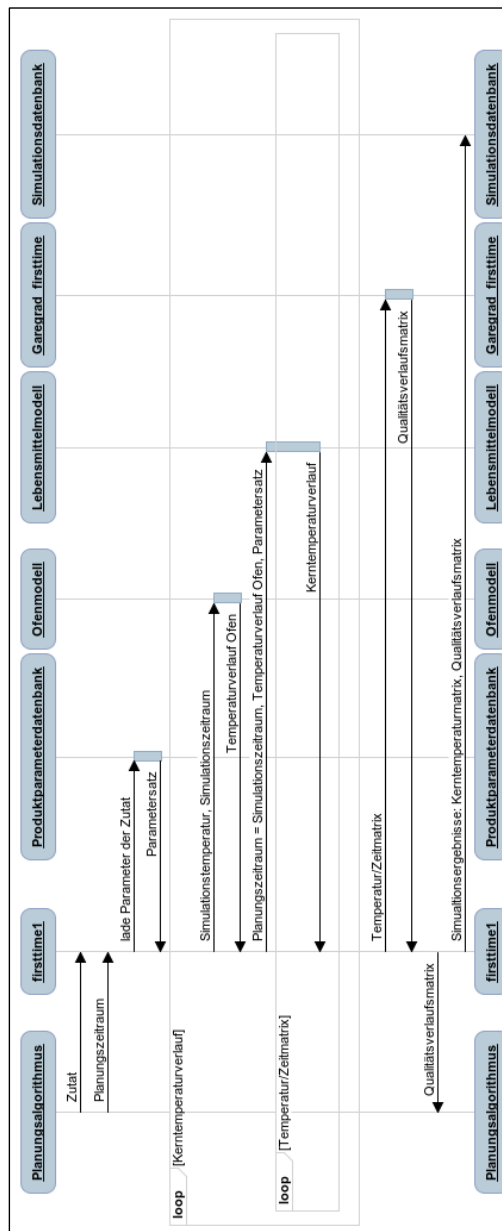


Abbildung C.1: UML-Sequenzdiagramm der Funktion „fristime1“.

C.2 Die Methode „disturbance1“

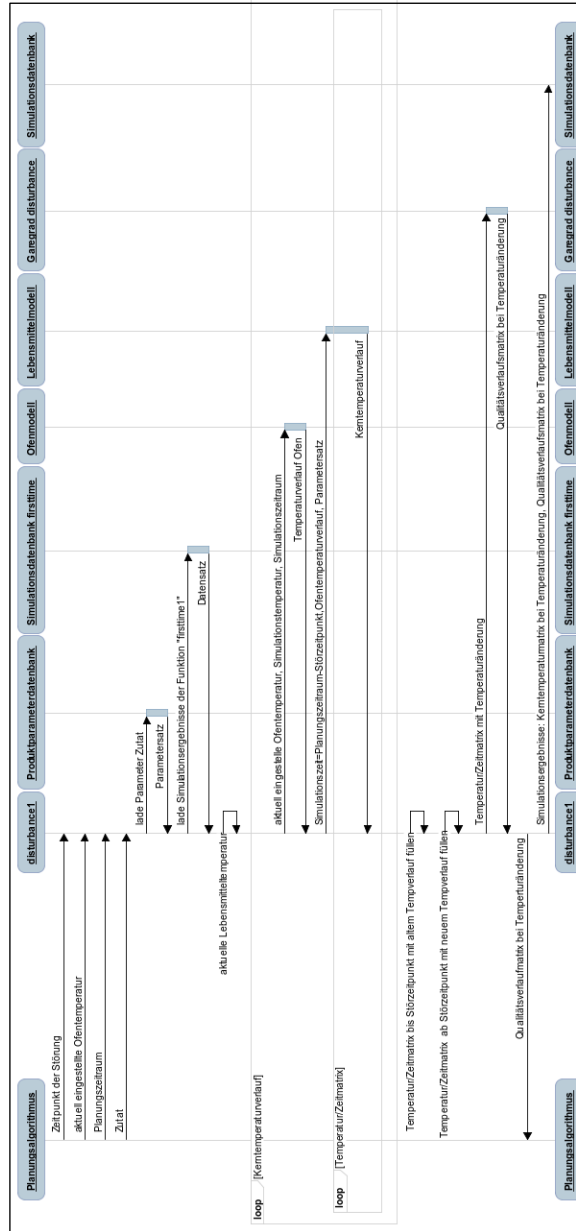


Abbildung C.2: UML-Sequenzdiagramm der Funktion „disturbance1“.

Literaturverzeichnis

[ABELE & REINHART 2011]

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser, Carl 2011.

[ALFÖLDI 2006]

Alföldi, T. (Hrsg.): Qualität und Sicherheit von Bioprodukten. 6. Frick and Frankfurt a.M and Wien: Forschungsinstitut für Biologischen Landbau (FiBL) and Forschungsinstitut für Biologischen Landbau Deutschland and Forschungsinstitut für Biologischen Landbau Österreich 2006.

[ANDREÄ ET AL. 2010]

Andreä, J.; Baier, E.; Bölts, M.; Bognár, A.; Dickau, T.; Gillmann, P.-O.; Gomm, U.; Kindermann, M.; Klingshirn, A.; Krine, C.; Leicht-Eckhardt, E.; Lichtenberg, W.; Naumann, G.; Prange, A.; Preuße, H.; Rapp, H.; Schlich, M.; Stamminger, R.; Tauschner, B.; Wentzlaff Günter; Wichmann-Schauer, H.: Lebensmittelverarbeitung im Haushalt, AID/ hrsg. vom AID-Infodienst Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft e.V., Band 3953. Bonn: AID-Infodienst 2010.

[BANNAT ET AL. 2011]

Bannat, A.; Bautze, T.; Beetz, M.; Blume, J.; Diepold, K.; Ertelt, C.; Geiger, F.; Gmeiner, T.; Gyger, T.; Knoll, A.; Lau, C.; Lenz, C.; Ostgathe, M.; Reinhart, G.; Roesel, W.; Ruehr, T.; Schuboe, A.; Shea, K.; Stork genannt Wersborg, Ingo; Stork, S.; Tekouo, W.; Wallhoff, F.; Wiesbeck, M.; Zaeh, M. F.: Artificial Cognition in Production Systems. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering 8 (2011) 1, S. 148–174.

[BARLOW & MÖLLER 2003]

Barlow, J.; Möller, C.: Eine Beschwerde ist ein Geschenk. Der Kunde als Consultant (Redline Wirtschaft bei moderne industrie). 1. Auflage. moderne industrie 2003.

[BARRANTES 2003]

Barrantes, L.: Einsatzmöglichkeiten der FMEA zur Planung und Steuerung von Kooperationen. Berlin: Tenea 2003.

[BERGER ET AL. 1993]

Berger, C.; Blauth, R.; Boger, D.; Bolster, C.; Burchill, G.; DuMouchel: Kano's Methods for Understanding Customer-defined Quality. Center for Quality Management Journal 4 (1993) Fall, S. 3–36, <http://wenku.baidu.com/view/b2977a8ecc22bcd126ff0c7b.html>.

[BERTLING 2011]

Bertling, L.: Wichtige Bestimmungen des Lebensmittelrechts für Gastronomie und Gemeinschaftsverpflegung. AID/ hrsg. vom AID-Infodienst Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft e.V., 7. Auflage. Bonn: AID 2011.

[BLÖMER 1999]

Blömer, F.: Produktionsplanung und -steuerung in der chemischen Industrie: Ressourceneinsatzplanung von Batchprozessen auf Mehrzweckanlagen: Zugl.: ., Diss., 1999. Gabler Edition Wissenschaft : Produktion und Logistik. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl 1999.

[BÖCKH & WETZEL 2011]

Böckh, P. v.; Wetzel, T.: Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis ; [Extras im Web]. Springer-Lehrbuch, 4. Auflage. Berlin and Heidelberg: Springer 2011.

[BOGNÁR 1987]

Bognár, A.: Garmethoden im Haushalt. Nahrung-Ernährung-Gesundheit 5 (1987) 10, S. 703–717.

[BOGNÁR & PIEKARSKI 1985]

Bognár, A.; Piekarski, J.: Garen von Lebensmitteln in Wasserdampf. Ernährungs-Umschau 32 (1985) 8, S. 259–265.

[BOGNÁR & PIEKARSKI 1986]

Bognár, A.; Piekarski, J.: Einfluß der Gartemperatur auf die Garzeit und die Qualität von Lebensmitteln - Garen in Wasser und Wasserdampf. Hauswirtschaft und Wissenschaft 34 (1986) 6, S. 301–319.

[BOGNÁR ET AL. 1983]

Bognár, A.; Piekarski, J.; Zacharias, R.: Dämpfen und Druckdämpfen von Lebensmitteln. 1.Mitteilung: Dämpfen von Lebensmitteln. Hauswirtschaft und Wissenschaft 31 (1983) 4, S. 175–189.

[BRAUN & DIRSCHAUER 2005]

Braun, B.; Dirschauer, C.: Küche und Technik: Handbuch für gewerbliche Küchen, AID/

hrsg. vom AID-Infodienst Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft e.V., Band 3825. Bonn: AID-Infodienst 2005.

[BÜCHER 1910]

Bücher, K. W.: Gesetz der Massenproduktion, 1910, <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/1033/gesetz-der-massenproduktion-v5.html>.

[COATES 1995]

Coates, J.: Customization promises sharp competitive edge. *Research Technology Management* 38 (1995) 6, S. 6–7.

[CZOGALLA 2010]

Czogalla, J.: *Particle Swarm Optimization for Scheduling Problems*. Shaker Verlag 2010.

[DAPD 2012]

dapd: Aigner verteidigt Massenproduktion der Lebensmittel in Deutschland, 2012, <http://www.epochtimes.de/Aigner-verteidigt-Massenproduktion-der-Lebensmittel-in-Deutschland-a850900.html>.

[DOMSCHKE ET AL. 1997]

Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S.: *Produktionsplanung: Ablauforganisatorische Aspekte ; mit 48 Tabellen*. Springer-Lehrbuch. Berlin [u.a.]: Springer 1997.

[DÜRR 2013]

Dürr, P.: *Modell zur Bewertung der Effizienz der IT-Unterstützung im Auftragsabwicklungsprozess von produzierenden KMU*, Band 16. Stuttgart: Fraunhofer-Verl 2013.

[EHRENSPIEL 1998]

Ehrlenspiel, K.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. VDI-Buch, 2. Auflage. Berlin: Springer 1998.

[EMRICH 2013]

Emrich, M.: *Datenbanken & SQL für Einsteiger: Datenbankdesign und MySQL in der Praxis*. 3. Auflage. CreateSpace Independent Publishing Platform 2013.

[ERLACH 2010]

Erlach, K.: *Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik*. Wertstromdesign (2010).

[ERMSCHEL ET AL. 2013]

Ermschel, U.; Möbius, C.; Wengert, H. M.: Investition und Finanzierung. Berlin [u.a.]: Springer Gabler 2013.

[EU PARLAMENT 2002]

EU Parlament: Verordnung zur Lebensmittelsicherheit, 2002.

[EVERSHEIM 1996]

Eversheim, W. (Hrsg.): Hütte - Produktion und Management: "Betriebshütte". 7. Auflage. Berlin u.a.: Springer 1996.

[FEIGENBAUM 1951]

Feigenbaum, A. V.: Quality control: principles, practice and administration: an industrial management tool for improving product quality and design and for reducing operating costs and losses. McGraw-Hill industrial organization and management series. McGraw-Hill 1951.

[GANTT 1903]

Gantt, H. L.: A graphical daily balance in manufacture. In: ASME (Hrsg.): Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. Saratoga 1903, Band 24, S. 1322–1336.

[GARCIA-SEGOVIA ET AL. 2007]

Garcia-Segovia, P.; Andres-Bello, A.; Martinez-Monzo, J.: Effect of cooking method on mechanical properties, color and structure of beef muscle. Journal of Food Engineering 80 (2007), S. 813–821.

[GARVIN 1984]

Garvin, D. A.: What Does 'Product Quality' Really Mean? MIT Sloan Management Review 26 (1984) 1.

[GARZALDEEN & MÜNZER 2003]

Garzaldeen, B.; Münzer, S.: Online-Feedback und Auswertung für E-Learning. In: Bode, A.; Desel, J.; Rathmeyer, S.; Wessner, M. (Hrsg.): DeLFI 2003: Die 1. e-Learning Fachtagung Informatik. Bonn: Gesellschaft für Informatik 2003. S. 270–279.

[GLASER 1995]

Glaser, M.: Wahrgenommene Produktqualität -Kritische Bestandsaufnahme zur marketingorientierten Qualitätsforschung. der markt 34 (1995) 1, S. 13–21, <http://dx.doi.org/10.1007/BF03031959>.

[GRAHAM ET AL. 1979]

Graham, R. L.; Lawler, E. L.; Lenstra, J. K.; Rinnooy Kan, A. H. G.: Optimization and Approximation in deterministic Sequencing and Scheduling: A Survey. *Annals Disc. Math.* 5 (1979), S. 287–326.

[GÜNTHER & TEMPELMEIER 2000]

Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: *Produktion und Logistik*. Springer-Lehrbuch, vierte, neubearbeitete und erweiterte auflage Auflage. Berlin and Heidelberg: Springer 2000, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-09468-6>.

[HAENEL 1976]

Haenel, H.: *Ernährungsbericht 1976, 1976*.

[HALL & SRISKANDARAJAH 1996]

Hall, N. G.; Sriskandarajah, C.: A Survey of machine scheduling problems with blocking and no-wait in process. *Operations Research* 44 (1996) 3, S. 510–525.

[HALLER-WEDEL 1985]

Haller-Wedel, E.: *Das Multimoment - Verfahren in Theorie und Praxis*. Hanser Fachbuchverlag 1985.

[HAMPICH 2006]

Hampich, W.: *Schulverpflegung: Ernährungswissenschaftliche Grundlagen, Verpflegungskonzepte, Kostenvergleiche und Businessplan*. 2006.

[HAUNERDINGER & PROBST 2006]

Haunerding, M.; Probst, H.-J.: *Finanz- und Liquiditätsplanung: In kleinen und mittleren Unternehmen*. München: Rudolf Haufe Verlag 2006.

[HENTZE & KEHRES 2008]

Hentze, J.; Kehres, E.: *Kosten- und Leistungsrechnung in Krankenhäusern: Systematische Einführung*. Stuttgart: Kohlhammer 2008.

[HERWIG 2000]

Herwig, H.: *Wärmeübertragung A - Z: Systematische und ausführliche Erläuterungen wichtiger Größen und Konzepte*. VDI-Buch. Berlin [u.a.]: Springer 2000.

[HINTERHUBER & MATZLER 2008]

Hinterhuber, H. H.; Matzler, K.: *Kundenorientierte Unternehmensführung: Kundenorientierung - Kundenzufriedenheit - Kundenbindung*. Gabler Verlag 2008.

[HOLBROOK & CORFMAN 1985]

Holbrook, M. B.; Corfman, K. P.: quality and value in the consumption experience phaedrus rides again. In: Jacoby, J.; Olsen, J. C. (Hrsg.): Perceived Quality. Toronto: Lexington Books and LexingtonBooks 1985, S. 31–57.

[HOLZER 2012]

Holzer, P.: Kreativitätstechniken zur Ideenfindung. 1. Auflage. Bachelor + Master Publishing 2012.

[HUBER 1995]

Huber, A.: Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung, Forschungsberichte iwB, Band 83. Berlin [u.a.]: Springer 1995.

[ISHIDA & UNIVERSITY OF LINCOLN 2007]

Ishida; University of Lincoln: Untersuchung über die Auswirkung der Automatisierung in der Lebensmittelindustrie, 2007, http://www.ishida.de/feedback/UOL_FinalReportDE.pdf.

[ISSEL 2011]

Issel, S.: Was ist Servicequalität und wie kann man sie messen? München: Grin Verlag GmbH 2011.

[JÄGER 2004]

Jäger, S.: Absatzsysteme für Mass Customization: Am Beispiel individualisierter Lebensmittelprodukte. 1. Auflage. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. 2004.

[JELLINEK 1981]

Jellinek, G.: Sensorische Lebensmittelprüfung: Lehrbuch für d. Praxis. Pattensen: Siegfried 1981.

[JONES 2004]

Jones, P.: Flight catering. 2. Auflage. Oxford [England] and Burlington and MA: Elsevier Butterworth-Heinemann 2004.

[KAISER 2006]

Kaiser, M.-O.: Kundenzufriedenheit kompakt: Leitfaden für dauerhafte Wettbewerbsvorteile, Management und Wirtschaft Praxis, Band 77. Berlin: Schmidt 2006.

[KANO ET AL. 1984]

Kano, N.; SERAKU, N.; TAKAHASHI, F.; TSUJI, S.-i.: Attractive Quality and Must-Be Quality. Journal of the Japanese Society for Quality Control 14 (1984) 2, S. 147–156, <http://ci.nii.ac.jp/naid/110003158895/en/>.

[KARIMI & HASEBE 1995]

Karimi, I. A.; Hasebe, S.: Chemical batch process scheduling. In: Rutan, S.; Walczak, B. (Hrsg.): Adaption of simulated annealing to chemical optimization problems. Elsevier 1995, Data Handling in Science and Technology, Band 15, S. 181–203.

[KEUN & PROTT 2008]

Keun, F.; Prott, R.: Einführung in die Krankenhaus-Kostenrechnung: Anpassung an neue Rahmenbedingungen. Wiesbaden: Gabler 2008.

[KEUSEN 2012]

Keusen, D.: Qualität gegarter Speisen: Präsentation beim Arbeitsgruppentreffen der Arbeitskreise im Forschungsverbund FORFood, 2012.

[KLADROBA 2013]

Kladroba, A.: FuE-Aufwendungen der Wirtschaft mit Rekordsteigerungen. Wissenschaftsstatistik im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft (2013) Februar, S. 1–6.

[KLADROBA & STENKE 2012]

Kladroba, A.; Stenke, G.: FuE-Datenreport 2012: Analyse und Vergleiche, 2012.

[KLENK 2012]

Klenk, M.: oeffentlicher-dienst.info, 2012, www.oeffentlicher-dienst.info.

[KLETTI & SCHUMACHER 2011]

Kletti, J.; Schumacher, J.: Die perfekte Produktion: Manufacturing Excellence durch Short Interval Technik (SIT). Berlin [u.a.]: Springer 2011.

[KLEVERS 2007]

Klevers, T.: Wertstrom-Mapping und Wertstrom-Design: Verschwendung erkennen - Wertschöpfung steigern. Landsberg am Lech: mi 2007.

[KOERBER 2012]

Koerber, K. W. v.: Vollwert-Ernährung: Konzeption einer zeitgemäßen und nachhaltigen Ernährung; 63 Tabellen und 16 Übersichten. 11. Auflage. Stuttgart: Haug 2012.

[KOPP 2009]

Kopp, O.: Kundenzufriedenheit im internationalen B2C-Bereich: Performancevergleich bei Landesgesellschaften am Beispiel der XYZ AG. 1. Auflage. Diplomica Verlag 2009.

[KRAMER & TWIGG 1970]

Kramer, A.; Twigg, B. A.: Quality Control for the food Industry: Fundamentals. 3. Auflage. Connecticut: AVI Pub. Co. 1970.

[KRANERT ET AL. 2012]

Kranert, M.; Hafner, G.; Barabosz, J.; Schuller, H.; Leverenz, D.; Kölbig, A.; Schneider, F.; Lebersorger, S.; Scherhauser, S.: Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittelmengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutschland, 2012.

[KRISTES 2012]

Kristes, D.: Produktbezogenes Beschwerdemanagement: Konzeption eines qualitätsorientierten Gestaltungsmodells zur Auslegung der internen Beschwerdemanagementaktivitäten. 1. Auflage. Apprimus Verlag 2012.

[KUDVA ET AL. 1994]

Kudva, G.; Elkamel, A.; Pekny, J. F.; Reklaitis, G. V.: Heuristic algorithm for scheduling batch and semi-continuous plants with production deadlines, intermediate storage limitations and equipment changeover costs. Computers & Chemical Engineering 18 (1994) 9, S. 859–875.

[LAARHOVEN & AARTS 1987]

Laarhoven, P. J. M.; Aarts, E. H. L.: Simulated Annealing: Theory and Applications. Mathematics and Its Applications. D. Reidel 1987.

[LAUBE 2013]

Laube, M.: Einstieg in SQL: Verstehen einsetzen nachschlagen. Galileo Computing. Bonn: Galileo Press 2013.

[LAWRENCE ET AL. 2001]

Lawrence, T. E.; King, D. A.; Obuz, E.; Yancey, E. J.; Dikeman, M. E.: Evaluation of electric belt grill, forced-air convection oven, and electric broiler cookery methods for beef tenderness research. Meat Science 58 (2001), S. 239–246.

[LEISTEN 1985]

Leisten, R.: Die Einbeziehung beschränkter Zwischenlager in die Auftragsreihenfolgeplanung bei Reihenfertigung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1985, <https://www.uni-due.de/opm/publikationen.php>.

[LEISTEN 1990]

Leisten, R.: Flowshop Sequencing Problems with Limited Buffer Storage. International Journal of Production Research 1990 (1990) 28, S. 2085–2100.

[LEITZMANN & SICHERT-OEVERMANN 1991]

Leitzmann, C.; Sichert-Oevermann, W.: Lebensmittelqualität und Lebensmittelwahl nach Wertstufen. In: Meier-Ploeger, A.; Vogtmann, H. (Hrsg.): Lebensmittelqualität, ganzheitliche Methoden und Konzepte. Karlsruhe: C.F. Müller 1991, Alternative Konzepte, Band 66, S. 44–66.

[LIEB 1996]

Lieb, N.: Speisenversorgung im Krankenhaus: Kochen oder kochen lassen, Band 503. Renningen-Malmsheim: expert-Verl 1996.

[LIESEGANG 1993]

Liesegang, D. G.: Lagerhaltung. In: Wittmann, W.; Kern, W.; Köhler, R. (Hrsg.): Handwörterbuch der Betriebswirtschaft. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1993, Band 1, S. 2507–2516.

[LINDEMANN ET AL. 2006]

Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F.: Individualisierte Produkte: Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin [u.a.]: Springer 2006.

[LINSS 2011]

Linß, G.: Qualitätsmanagement für Ingenieure: Mit 186 Tabellen sowie einer CD-ROM, u.a. mit "Qualitätsmanagement-Handbuch", Glossar, zahlreichen Tools und Funktionen. 3. Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig 2011.

[LOCH ET AL. 2009]

Loch, C. H.; Chick, S. E.; Huchzermeier, A.: Managementqualität und Wettbewerbsfähigkeit: Was Manager vom Industrial Excellence Award lernen können. Berlin [u.a.]: Springer 2009.

[LÖDDING & WIENDAHL 2005]

Lödding, H.; Wiendahl, H.-P.: Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration: Univ., Habil.-Schr.–Hannover, 2004. Berlin: Springer 2005.

[LÜTKE ENTRUP ET AL. 2005]

Lütke Entrup, M.; Grunow, M.; Günther, H.-O.; Seiler, T.; van Beek, P.: An Milp Modelling Approach for Shelf Life Integrated Planning in Yoghurt Production. In: Fleuren, H.; den Hertog, D.; Kort, P. (Hrsg.): Operations Research Proceedings 2004. Springer Berlin Heidelberg 2005, Operations Research Proceedings, Band 2004, S. 67–75, http://dx.doi.org/10.1007/3-540-27679-3_9.

[MAYER 2012]

Mayer, M.: Szenariendefinition für die Automatisierte Küche, 2012.

[MCCORMICK ET AL. 1989]

McCormick, S. T.; Pinedo, M. L.; Shenker, S.; Wolf, B.: Sequencing in an assembly line with blocking to minimize cycle time. Operations Research (1989) 37, S. 93–95, <http://people.commerce.ubc.ca/faculty/mccormick/SeqAssLineWBlockingCycTime.pdf>.

[MEIER-PLOEGER & VOGTMANN 1991]

Meier-Ploeger, A.; Vogtmann, H. (Hrsg.): Lebensmittelqualität, ganzheitliche Methoden und Konzepte, Alternative Konzepte, Band 66. 2. Auflage. Karlsruhe: C.F. Müller 1991.

[MICHELS 2012]

Michels, P.: Lebensmittelqualität aus Verbrauchersicht, 2012.

[MITTEN 1970]

Mitten, L. G.: Branch-And-Bound Methods: General Formulation and Properties. Operations Research 18 (1970) 1, S. 24–34, <http://www.jstor.org/stable/168660>.

[MORA ET AL. 2011]

Mora, B.; Curti, E.; Vittadini, E.; Barbanti, D.: Effect of different air/steam convection cooking methods on turkey breast meat: Physical characterization, water status and sensory properties. Meat Science 88 (2011), S. 489–497.

[NELDER & MEAD 1965]

Nelder, J. A.; Mead, R.: A Simplex Method for Function Minimization. Computer Journal (1965) 7, S. 308–313.

[NEUMANN & MORLOCK 2002]

Neumann, K.; Morlock, M.: Operations Research 2. Auflage. Hanser Fachbuch 2002.

[NEY 2006]

Ney, M.: Wirtschaftlichkeit von Interaktionsplattformen: Effizienz und Effektivität an der Schnittstelle zum Kunden. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl 2006.

[NYHUIS ET AL. 2008]

Nyhuis, P.; Heinen, T.; Reinhart, G.; Rimpau, C.; Abele, E.; Wörn, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme : Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 1/2, S. 85–91.

[OLFERT 2010]

Olfert, K.: Kostenrechnung. 16. Auflage. Herne: Kiehl 2010.

[OLFERT & REICHEL 2009]

Olfert, K.; Reichel, C.: Investition. Ludwigshafen (Rhein): Kiehl 2009.

[OLSEN & JACOBY 1972]

Olsen, J. C.; Jacoby, J.: Cue Utilization of the Quality Perception Process: A Cognitive Model and an Empirical Test. In: Venkatesan, M. (Hrsg.): Proceedings of the Third Annual Conference of the Association for Consumer Research. Chicago and IL: University of Chicago 1972, S. 167–179, <http://www.acrwebsite.org/search/view-conference-proceedings.aspx?Id=11997>.

[PANWALKAR & ISKANDER 1977]

Panwalkar, S. S.; Iskander, W.: A Survey of Scheduling Rules. Operations Research 25 (1977) 1, S. 45–61.

[PAPADIMITRIOU & KANELLAKIS 1980]

Papadimitriou, C. H.; Kanellakis, P. C.: Flowshop Scheduling with Limited Temporary Storage. Journal of the ACM 27 (1980) 3, S. 533–549, <http://doi.acm.org/10.1145/322203.322213>.

[PAPAGEORGIU & PANTELIDES 1996]

Papageorgiou, L. G.; Pantelides, C. C.: Optimal Campaign Planning/Scheduling of Multipurpose Batch/Semicontinuous Plants. 1. Mathematical Formulation. Industrial & Engineering Chemistry Research 35 (1996) 2, S. 488–509.

[PARLAMENT VON GROSSBRITANNIEN 1887]

Parlament von Großbritannien: Merchandise Marks Act, 1887.

[PHILIPP 2014]

Philipp, T.: RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen, Forschungsberichte iw b, Band 282. München: Utz 2014.

[PIEHL 2013]

Piehl, S.: Beschreibung des wirtschaftswissenschaftlichen Status quo zur Kundenzufriedenheit. Grin Verlag GmbH 2013.

[PIEKARSKI & ZACHARIAS 1981]

Piekarski, J.; Zacharias, R.: Kriterien zur Bestimmung des Garegrades von Lebensmitteln, Band 29. 1981.

[PILLER 2006]

Piller, F. T.: Mass customization: Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter. Gabler Edition Wissenschaft, 4. Auflage. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. 2006.

[PINE 1999]

Pine, B. J.: Mass customization: The new frontier in business competition. Boston and Mass and London: Harvard Business School and McGraw-Hill 1999.

[PINEDO 2012]

Pinedo, M. L.: Scheduling: Theory algorithms and systems. New York: Springer 2012.

[PLINKE & RESE 2006]

Plinke, W.; Rese, M.: Industrielle Kostenrechnung: Eine Einführung. Berlin [u.a.]: Springer 2006.

[POGGENSEE 2009]

Poggensee, K.: Investitionsrechnung: Grundlagen Aufgaben Lösungen. Wiesbaden: Gabler 2009.

[POLIFKE & KOPITZ 2009]

Polifke, W.; Kopitz, J.: Wärmeübertragung: Grundlagen analytische und numerische Methoden. München [u.a.]: Pearson Studium 2009.

[PRASCH 2010]

Prasch, M. G.: Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage. Utz-Verlag 2010, <http://www.iwb.mw.tum.de/iwbmedia/Prasch.pdf>.

[REEVES & BEDNAR 1994]

Reeves, C. A.; Bednar, D. A.: DEFINING QUALITY: ALTERNATIVES AND IMPLICATIONS. *Academy of Management Review* 19 (1994) 3, S. 419–445.

[REFA 1997]

REFA: Methodenlehre der Betriebsorganisation. München: Hanser 1997.

[REINHART & ZÄH 2003]

Reinhart, G.; Zäh, M. F.: Marktchance Individualisierung. Berlin: Springer 2003.

[RIBAS ET AL. 2010]

Ribas, I.; Leisten, R.; Framinan, J. M.: Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective. *Computers & Operations Research* 37 (2010), S. 1439–1454.

[RILEY & JURAN 1999]

Riley, J. F.; Juran, J. M.: *Juran's Quality Handbook (5th Ed.) // The quality improvement process*. New York: McGraw-Hill 1999.

[SALVIS AG 2009]

Salvis AG: Küchenorganisation: Küchenfachlicher Leitfaden, 2009.

[SATTELMAYER & POLIFKE 2011]

Sattelmayer, T. D.-I.; Polifke, W. P.: Aufgabensammlung zur Übung Wärme- und Stoffübertragung: Teil 1: Wärmeübertragung, 2011.

[SAWIK 1993]

Sawik, T. J.: A scheduling algorithm for flexible flow lines with limited intermediate buffers. *Applied Stochastic Models and Data Analysis* 9 (1993) 2, S. 127–138, <http://dx.doi.org/10.1002/asm.3150090206>.

[SCHÄPPI ET AL. 2005]

Schäppi, B.; Andreasen, M.; Kirchgeorg, M.; Radermacher, F. J.: *Handbuch Produktentwicklung*. München [u.a.]: Hanser 2005.

[SCHARNBACHER & KIEFER 2003]

Scharnbacher, K.; Kiefer, G.: *Kundenzufriedenheit: Analyse Messbarkeit und Zertifizierung*. Managementwissen für Studium und Praxis, online-ausg Auflage. München: Oldenbourg 2003.

[SCHONER 2008]

Schoner, P.: Operative Produktionsplanung in der verfahrenstechnischen Industrie. Kassel: Kassel Univ. Press 2008.

[SCHOTH ET AL. 2012]

Schoth, A.; Schmidt, C.; Bauhoff, F.: Reorganisation der PPS. In: Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Grundlagen der PPS. Berlin: Springer Vieweg 2012, Produktionsplanung und -steuerung, Band 1, S. 306–331.

[SCHUH 2006]

Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte, VDI-Buch, Berlin: Springer 2006.

[SCHUH & GIERTH 2006]

Schuh, G.; Gierth, A.: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung: Aachener PPS-Modell. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Berlin: Springer 2006. VDI-Buch, S. 11–27.

[SCHUH & STICH 2012]

Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Grundlagen der PPS, Produktionsplanung und -steuerung, Band 1. 4. Auflage. Berlin: Springer Vieweg 2012.

[SCHWARZ ET AL. 2010]

Schwarz, P.; Lemme, M.; Wagner, A.: Großküchen: Planung - Entwurf - Einrichtung. 5. Auflage. Huss-Medien 2010.

[SCHWINDT & TRAUTMANN 2000]

Schwindt, C.; Trautmann, N.: Batch scheduling in process industries: an application of resource-constrained project scheduling. OR-Spektrum 22 (2000) 4, S. 501–524, <http://dx.doi.org/10.1007/s002910000042>.

[SCUPIN 2006]

Scupin, Y.: Call-Center-Management und Mitarbeiterzufriedenheit: Eine kausalanalytische Untersuchung. SpringerLink : Bücher. Wiesbaden: DUV 2006.

[SHEWHART 1980]

Shewhart, W. A.: Economic control of quality of manufactured product. Milwaukee and Wis: American Society for Quality 1980.

[SIMPSON & ABAKAROV 2009]

Simpson, R.; Abakarov, A.: Optimal Scheduling of canned food plants including simultaneous sterilization. *Journal of Food Engineering* 90 (2009), S. 53–59.

[SPIEGEL-ONLINE 2008]

Spiegel-Online: Dreist, Dreister, Deutschland - 125 Jahre Made in Germany, 2008, <http://einestages.spiegel.de/s/tb/25406/1/made-in-germany-vom-stigma-zumqualitaetssiegel.html>.

[SPIEGEL-ONLINE 2014]

Spiegel-Online: Fast jeder Vierte meidet bestimmte Lebensmittel, 2014, <http://www.spiegel.de/gesundheit/ernaehrung/gluten-laktose-histamin-23-prozent-klagen-ueber-unvertraeglichkeiten-a-975015.html>.

[STAUSS 2011]

Stauß, B.: Feedbackmanagement. In: Hippner, H.; Hubrich, B.; Wilde, K. D. (Hrsg.): *Grundlagen des CRM*. Wiesbaden: Gabler 2011, S. 441–473.

[STECCA 2014]

Stecca, G.: Scheduling. In: Laperrière, L.; Reinhart, G. (Hrsg.): *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin [u.a.]: Springer 2014, S. 1092–1095.

[STEENKAMP 1989]

Steenkamp, J.-B.: *Product quality: An investigation into the concept and how it is perceived by consumers*. Assen (Niederlande): Van Gorcum 1989.

[STEINMEIER 2014]

Steinmeier, B.: *Optimierung der wahrgenommenen Produktqualität aus Konsumentensicht*. 1. Auflage. Apprimus Verlag 2014.

[STORFINGER & OPPER 2011]

Storfinger, N.; Opper, M.: *Datenbasierte Indikatoren für potenziell abweichendes Interviewerverhalten*, 2011, <http://hdl.handle.net/10419/74452>.

[STOWASSER ET AL. 1991]

Stowasser, J. M.; Petschenig, M.; Skutsch, F.: *Der Kleine Stowasser: Lateinisch-Deutsches Schulwörterbuch*. 3. Auflage. Oldenbourg Wissenschaftsverlag 1991.

[STRECKER ET AL. 1996]

Strecker, O.; Pottebaum, P.; Reichert, J.: Marketing in der Agrar- und Ernährungswirtschaft: Grundlagen, Strategien, Maßnahmen. 3. Auflage. Frankfurt am Main: VerlagsUnion Agrar [u.a.] 1996.

[TÄSCHNER 2008]

Täschner, I.: Erdgas in der Gastronomie, 2008.

[THROLL & BARTOSCH 2011]

Throll, M.; Bartosch, O.: Einstieg in SQL: Verstehen einsetzen nachschlagen ; [mit Praxisbeispielen Aufgaben und Übungen ; SQL-Syntax von MySQL MS Access PostgreSQL MS SQL Server Base Oracle DB SQLite und Firebird ; inkl. Referenzkarte mit SQL-Syntax]. Galileo Computing. Bonn: Galileo Press 2011.

[TRAUTMANN 2001]

Trautmann, N.: Anlagenbelegungsplanung in der Prozessindustrie (Produktion und Logistik). 1. Auflage. Deutscher Universitäts-Verlag 2001.

[UHL 2002]

Uhl, M.: Feedback-Bypass: Ein neues Verfahren zur Interaktiven Ähnlichkeitssuche: Multimediale Ähnlichkeitssuche. Dissertation, Fachhochschule Saarbrücken, Saarbrücken, 2002, <https://www.yumpu.com/de/s/Uac7X3VowqUraY75>.

[VDI 2013]

VDI: Wärmeatlas, VDI-Buch, Band 11. Berlin [u.a.]: Springer 2013.

[WAGNER 2012]

Wagner, M.: Forschungsverbund FORFood <http://www.forfood.de/projekte/teilprojekt-2>, 2012, <http://www.forfood.de/projekte/teilprojekt-2>.

[WAGNER & SCHLEIMER 2012]

Wagner, M.; Schleimer, T.: Nachhaltige Lebensmittelverarbeitung: Mit effizienter Produktionssteuerung Ressourcen schonen. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 9, S. 598–602, [http://www.werkstattstechnik.de/wt/article.php?data\[article_id\]=69007&keep_alive=yes&pos=](http://www.werkstattstechnik.de/wt/article.php?data[article_id]=69007&keep_alive=yes&pos=).

[WAGNER ET AL. 2013]

Wagner, M.; Götz, G.; Reinhart, G.: Planung der Maschinenbelegung unter Berücksichtigung der Verarbeitungsqualität: Herausforderungen und Ansätze für die Auftragsrei-

henfolgebildung bei der Verarbeitung bedingt pufferbarer Güter. ZWF 108 (2013), S. 535–540.

[WAGNER ET AL. 2014]

Wagner, M.; Schleimer, T.; Seeberger, T.; Reinhart, G.: Product-Quality Based Scheduling of Automated Food Processing. Advanced Materials Research 1018 (2014), S. 563–570.

[WARNECKE 1988]

Warnecke, H.-J.: Grundlegende Gesetzmäßigkeiten in der Produktion. In: Fertigungstechnisches Kolloquium FTK '88. Berlin [u.a.]: Springer-Verlag 1988. S. 23–31.

[WEINBERG 1973]

Weinberg, F.: Branch and bound: Eine Einführung. Lecture notes in economics and mathematical systems. Springer-Verlag 1973.

[WELT 2008]

Welt: Untersuchung zur Stellung der deutschen Wirtschaft in 6 wichtigen Wirtschaftsnationen. Die Welt (2008) Okt 2008, S. 10.

[WERNER 2008]

Werner, H.: Studie zur Automatisierung in der Lebensmittelindustrie: Bedürfnisorientierte Lösungen sind gefragt!, 2008, http://a-pet-pe.de/fileadmin/user_upload/nh_verpackungen/dokumente/plattform/Neuigkeiten/ishida-marktstudie.pdf.

[WESTPHAL ET AL. 1996]

Westphal, G.; Buhr, H.; Otto, H.: Reaktionskinetik in Lebensmitteln. Berlin and New York: Springer 1996.

[WIENDAHL 1997]

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure: Mit 2 Tabellen. Hanser Lehrbuch, 4. Auflage. München [u.a.]: Hanser 1997.

[WIENDAHL 2004]

Wiendahl, H.-P.: Variantenbeherrschung in der Montage: Konzept und Praxis der flexiblen Produktionseinstufe. Engineering online library. Berlin [u.a.]: Springer 2004.

[WIENDAHL 2010]

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Auflage. München: Carl Hanser 2010.

[WILSON 2003]

Wilson, J. M.: Gantt charts: A centenary appreciation. *European Journal of Operational Research* 149 (2003) 2, S. 430–437.

[WIMMER 1975]

Wimmer, F.: Das Qualitätsurteil des Konsumenten: theoretische Grundlagen und empirische Ergebnisse. *Gesellschaftsforschung und Gesellschaftspolitik*. Herbert Lang 1975.

[WITT 2004]

Witt, A.: Produktionsplanung und -steuerung in der Stahlindustrie: Ressourceneinsatzplanung mit Berücksichtigung von Fälligkeitsterminen und beschränkten Zwischenlagerkapazitäten. Tenea Wissenschaft. Berlin: Tenea 2004.

[WITTROCK 1988]

Wittrock, R. J.: An Adaptable Scheduling Algorithm for Flexible Flow Lines. *Operations Research* 36 (1988) 3, S. 445–453.

[ZEHENTNER 2000]

Zehentner, J.: Data Mining - Knowledge Discovery in Databases: Data Mining im WWW. Dissertation, Technische Universität München, München, 2000, <http://wwwbayer.in.tum.de/lehre/SS2000/ausarbeitung4a.pdf>.