IGF-Forschungsvorhaben 15865 N/1

-Schlussbericht-

Forschungsthema

Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise zur Produktionsnivellierung der variantenreichen Kleinserienfertigung

Durchführende Forschungsstelle

Forschungsstelle	Technische Universität Dortmund Lehrstuhl für Arbeits- und Produktionssysteme Leonhard-Euler-Straße 5 44227 Dortmund
Leiter der Forschungsstelle	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse
Projektleiter	Dipl.-Wirt.-Ing. Fabian Bohnen

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 15865 N/1 der Forschungsvereinigung Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik (GVB) e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Weitere Informationen zum Projekt befinden sich im Internet unter:

www.aps.mb.tu-dortmund.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I

Abbildungsverzeichnis III

Tabellenverzeichnis VI

Abkürzungsverzeichnis VII

1 Einleitung 1

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung 1

1.2 Zielsetzung 2

1.3 Aufbau der Ausarbeitung 2

2 Stand der Technik 4

2.1 Charakteristika der Kleinserienfertigung 4

2.2 Produktionsnivellierung als Kernelement der Lean Production 7

2.2.1 Anwendungsvoraussetzungen 12

2.2.2 Vorgehensweise konventioneller Nivellierungsansätze 12

2.3 Gruppentechnologie und Produktfamilienbildung 16

2.3.1 Klassifizierungssysteme 18

2.3.2 Fertigungsanalytische Verfahren 19

2.3.3 Clusteranalytische Verfahren 20

2.3.4 Methoden der Künstlichen Intelligenz 22

2.4 Konkretisierung der Problemstellung und Ableitung des Forschungsbedarfs 23

3 Systematische Vorgehensweise zur Produktionsnivellierung in der variantenreichen Kleinserienfertigung 25

3.1 Analyse der Eingangsgrößen und Erstellung des Nivellierungsmodells . 26

3.1.1 Wertstrom- und Kundenabrufanalyse 26

3.1.2 Nivellierungsmodellerstellung 29

3.2 Produktfamilienbildung zur Nivellierung 30

3.2.1 Präzisierung der Untersuchungsfragestellung 31

3.2.2 Auswahl geeigneter Gruppierungskriterien 32

3.2.3 Datenaufbereitung 34

3.2.4 Festlegung des Proximitätsmaßes 35

3.2.5 Gruppierungsverfahren 38

3.2.6 Bewertung der Gruppierungsalternativen 43

3.3 Erstellung des Nivellierungsmusters auf Produktfamilienbasis 47

3.3.1 ABC/XYZ-Analyse 48
3.3.2 Reihenfolgefestlegung 49
3.3.3 EFEI-Berechnung 52
3.3.4 Berechnung von Kapazitätszeitfenstern 53
3.3.5 Musteroptimierung 54
3.4 Umsetzung, Monitoring und kontinuierliche Verbesserung 55
3.4.1 Auswahl eines Steuerungsverfahrens 56
3.4.2 Erkennung von Abweichungen und kontinuierliche Verbesserung 57
4 Softwareauswahl und Programmiertechnische Umsetzung 60
4.1 Auswahl der Softwareumgebung 60
4.1.1 Spezifische Anforderungen an die Softwareumgebung 60
4.1.2 Mögliche Softwareumgebungsalternativen 61
4.1.3 Wahl einer Softwareumgebung 63
4.2 Programmiertechnische Umsetzung 63
4.2.1 Produktfamilienbildung 64
4.2.2 Nivellierungsmustererstellung 67
5 Validierung 71
5.1 Analyse der Eingangsgrößen und Nivellierungsmodellerstellung 71
5.2 Produktfamilienbildung 71
5.3 Nivellierungsmustererstellung 75
5.4 Zusammenfassung 78
6 Schlussbetrachtung 79
7 Literaturverzeichnis 81
8 Anhang A – Auswertung der Empirischen Erhebung 90
9 Anhang B – Kennzahlenkatalog 101
10 Anhang D – Anleitung zur Verwendung des Softwaredemonstrators 103

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Aufbau der Ausarbeitung 3
Abbildung 2.1: Klassifizierung der Fertigungsarten entsprechend Auflagenhöhe und Wiederholhäufigkeit (in Anlehnung an Lödding 2008, S. 97) 4
Abbildung 2.2: Einschätzung der Variantenvielfalt (VVF) des Produktspektrums im Unternehmen (Ergebnis einer Online-Umfrage, an der 106 Unternehmensvertreter aus verschiedenen Branchen teilgenommen haben) 6
Abbildung 2.3: Formen der Materialflusskomplexität (Lödding 2008, S. 105) 7
Abbildung 2.4: Morphologisches Merkmalsschema zur Charakterisierung der Kleinserienfertigung 7
Abbildung 2.5: Elemente des Toyota Produktionssystems (Liker 2006, S. 33) 8
Abbildung 2.6: Harmonisierung von Produktionsvolumen und -mix durch Produktionsnivellierung 10
Abbildung 2.7: Heijunka-Board für 3 Erzeugnisvarianten(exemplarisch) (Rother, Harris, Womack 2004, S. 68) 11
Abbildung 2.8: Einteilung des Tagesproduktionsprogrammes in Pitchintervalle (in Anlehnung an Smalley 2005 , S. 37) 14
Abbildung 2.9: Nivellierung und Glättung des Produktionsprogramms (in Anlehnung an Takeda 2004, S. 49) 14
Abbildung 2.10: Methodik zur Nivellierung von Wertströmen in der Automobilsteuergerätefertigung (Wuthnow 2010. S. 97) 15
Abbildung 2.11:Definitionen zum Begriffsfeld der Teilefamilie (Martin 1989, S. 20 ....) 17
Abbildung 2.12: Werkstückbeschreibendes Klassifizierungssystem (Opitz 1968)..... 18
Abbildung 2.13: Blockdiagonale Sortierung einer Werkstückbetriebsmittel-Matrix (in Anlehnung an Deuse 1998, S. 11) 20
Abbildung 2.14: Gliederung der Clusteranalyseverfahren entsprechend ihrer Gruppierungsweise (in Anlehnung an Backhaus u. a. 2006, S. 511) 21
Abbildung 2.15: Beurteilung des Grades, zu dem die Variantenvielfalt Probleme bei der PPS verursacht (Ergebnis einer Online-Umfrage, an der 106 Unternehmensvertreter aus verschiedenen Branchen teilgenommen haben) 23
Abbildung 3.1: Systematische Vorgehensweise zur Nivellierung in der Kleinserie 25
Abbildung 3.2: Grundlegende Symbole der Wertstromanalyse (in Anlehnung an Rother, Shook 2000) 27
Abbildung 3.3: Elemente des Nivellierungsmodells (in Anlehnung an Buhl u. a. 2009, S. 20) 29
Abbildung 3.4: Ablaufschema zur Durchführung einer Clusteranalyse (in Anlehnung an Deuse 1998, S. 50; Steinhausen, Langer 1977, S. 19)..... 30

Abbildung 3.5: Mögliche Kriterien zur Bildung von Produktfamilien (basierend auf Choobineh, Nare 1999, S. 322; Heinz, Hebbeler 1990, S. 18; Lee, Chen 1997, S. 1125; Lee, Fischer 1999, S. 200; Lee-Post 2000, S. 794; Tönshoff, Rotzoll, Verweij 1997, S. 96) 33
Abbildung 3.6: Bewertung von Kriterien zur Bildung von Produktfamilien zu Nivellierungszwecken (Ergebnis einer Online-Umfrage, an der 106 Unternehmensvertreter aus verschiedenen Branchen teilgenommen haben) 33
Abbildung 3.7: Beispielhafte Rohdatenmatrix (in Anlehnung an Backhaus u. a. 2006, S. 493) 34
Abbildung 3.8: Skalierung von Variablen (in Anlehnung an Deuse 1998, S. 53) 35
Abbildung 3.9: Aufbau einer Distanz oder Ähnlichkeitsmatrix (in Anlehnung an Backhaus u. a. 2006, S. 493) 36
Abbildung 3.10: Kombinationsmöglichkeiten binärer Variablen (Backhaus u. a. 2006, S. 495) 36
Abbildung 3.11: Ablaufschema und Distanzberechnung hierarchisch-agglomerativer Verfahren (basierend auf Backhaus u. a. 2006, S. 515ff) 39
Abbildung 3.12: Charakterisierung ausgewählter hierachisch-agglomerativer Algorithmen (in Anlehnung an Backhaus u. a. 2006, S. 528) 40
Abbildung 3.13: Ablaufschema eines Austauschalgorithmus 41
Abbildung 3.14: Gruppierungsalgorithmus mit evolutionärer Optimierung der Variablengewichtung (Ablaufschema) 42
Abbildung 3.15: Beispielhaftes Nivellierungsmuster auf Basis von Produktfamilien (in Anlehnung an Deuse, Birkmann, Harms 2007, S. 46) 48
Abbildung 3.16: ABC-/XYZ-Analyse zur Identifizierung von Nivellierungsfamilien 49
Abbildung 3.17: Aufbau einer symmetrischen Rüstmatrix auf Produktfamilienbasis .. 50
Abbildung 3.18: Ablaufschema 2-opt Verfahren 51
Abbildung 3.19: Rüstlückenermittlung 52
Abbildung 3.20: Heuristik zur Nivellierungsmusteroptimierung 55
Abbildung 3.21: Verfahrensprinzip der Kanban-Steuerung (Lödding 2008, S. 178) ... 56
Abbildung 3.22: Verfahrensprinzip der CONWIP-Steuerung (Lödding 2008, S. 328..) 57
Abbildung 3.23 Nivellierungsmuster als Zielzustand (in Anlehnung an Rother 2009, S. 104) 58
Abbildung 3.24: Mögliche Kriterien zur Erkennung von Abweichungen (in Anlehnung an Buhl u. a. 2009, S. 22) 58
Abbildung 4.1: Zusammenfassung möglicher Softwareumgebungsalternativen 63
Abbildung 4.2: Programmaufbau Erzeugung und Bewertung von Gruppierungsalternativen mit Complete-Linkage-Algorithmus 64
Abbildung 4.3: Einlesen der Daten 65

Abbildung 4.4: Ausgabe der Ergebnisse 66
Abbildung 4.5: Programmaufbau zum Erzeugen der Partition für die Nivellierungsmustererstellung 67
Abbildung 4.6: ABC-/XYZ-Analyse und Nivellierungsfamilienauswahl 68
Abbildung 4.7: Reihenfolgefestlegung 69
Abbildung 4.8: EFEI-Berechnung und Mustererstellung 69
Abbildung 5.1:Auszug aus der Rohdatenmatrix (0 = Komponente wird nicht verbaut; 1= Komponente wird verbaut) 72
Abbildung 5.2:Verlauf des Wünschbarkeitsindex (W) und der einzelnen Wünschbarkeitsfunktionen (w_1 - w_4) in Abhängigkeit der Partitionsgröße (k) 73
Abbildung 5.3:Vergleich der Gruppierungsergebnisse konventioneller Clusteralgorithmen und des Gruppierungsverfahrens mit Optimierung der Variablengewichtung mit Hilfe evolutionärer Strategien 74
Abbildung 5.4:Anteile der Nivellierungsfamilien am Produktionsvolumen 75
Abbildung 5.5: Nivellierungsmuster für eine Arbeitswoche (EFEI = 2 Schichten) 76
Abbildung 5.6: Aufteilung der Nivellierungsfamilien im Nivellierungsmuster zur Ausnutzung der verbleibenden Rüstlücke (Musteroptimierung) 77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Definitionen des Begriffs der Produktionsnivellierung 9
Tabelle 2.2: Zusammenfassung weiterer Klassifizierungssysteme (basierend auf Deuse 1998, S. 8) 19
Tabelle 3.1: Wesentliche im Rahmen der Wertstromanalyse verwendete Kennzahlen (basierend auf Erlach 2007, S. 59ff; Rother, Shook 2000, S. 19ff)..... 28
Tabelle 3.2: Auswahl einiger wichtiger Ähnlichkeits- und Distanzfunktionen für binäre Variablen (Steinhausen, Langer 1977, S. 55)..... 37
Tabelle 3.3: Kennzahlen zur Erfassung von Terminabweichungen (basierend auf Lödding 2008, S. 29ff) 59
Tabelle 5.1: Kapazitätsbedarfe für die Nivellierungsfamilien 75

Abkürzungsverzeichnis

$\vec{\alpha}$	Vektor der Variablengewichtung
α_i	Gewichtung der Variable i
μ	Iterationsschrittindex
AS	Anzahl der verfügbaren Schichten je Monat
$C^{(k)}$	Partition einer Menge, Partitionsgröße k
CFA	Component Flow Analysis
Conwip	constant work in process
CRAN	Comprehensive R Archive Network
$d(X_j, X_l)$	Distanz zwischen den Objekten j und l
DCA	Direct Clustering Algorithm
EFEI	Every Family Every Interval
$EFEI_{th}$	Theoretisch möglicher EFEI-Wert
EG	Erfüllungsgrad Gesamtmenge
EGM_i	Mengenerfüllungsgrad
EGRM	Erfüllungsgrad geplante Reihenfolge und Menge
EPEI	Every Part Every Interval
lc_{th}	Anzahl der theoretisch möglichen Nivellierungszyklen je Monat
k	Partitionsgröße
k_{max}	Maximal gewünschte Partitionsgröße
k_{SG}	Obere Spezifikationsgrenze für die Partitionsgröße
KE	Anteil des Nettokapazitätsangebotes für die Fertigung von Exotenfamilien
KRG	Gesamtkapazitätsbedarf für Nivellierungsfamilien
KR_i	Je Nivellierungszyklus benötigte Fertigungszeit für Nivellierungsfamilie i
kr_l	Monatlich benötigte Fertigungszeiten
KVP	Kontinuierlichen Verbesserungsprozesses
L_1-Norm	City-Block-Metric
L_2-Norm	Euklidische-Distanz
m	Anzahl Nivellierungsfamilien
MAA	Mittlere absolute Abweichung
n_w	Intraclusterdistanz
NG	Nivellierungsgüte
NGK	Nettokapazitätsangebot
p	Anzahl der Variablen
PDCA-Methode	Plan-Do-Check-Act-Methode
PFA	Production Flow Analysis
PM_i	Planvolumen je Nivellierungsfamilie
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
r	Minkowski-Konstante
r_{ij}	Elemente der Rüstmatrix, Rüstzeit von Familien i zu Familie j
R	Rüstmatrix
RD	Reihenfolgedisziplin
RF_i	Reihenfolgekontrollfakor

RL_g	Gesamtrüstlücke
RL_V	Verbleibende Rüstlücke
ROC	Rank Order Clustering
RZ	Nivellierungszyklus
$s(X_j, X_l)$	Ähnlichkeit zwischen den Objekten j und l
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
TPS	Toyota Produktionssystem
TSP	Traveling Salesman Problem
VBA	Visual Basic for Applications
W	Wünschbarkeitsindex
w_1	Wünschbarkeitsfunktion zur Bewertung der Gruppenhomogenität
w_2	Wünschbarkeitsfunktion zur Bewertung der Partitionsgröße
w_3	Wünschbarkeitsfunktion zur Bewertung der Produktfamiliengröße
w_4	Wünschbarkeitsfunktion zur Gewichtung sehr kleiner Produktfamilien
ZE_p	Pauschales Zeitfenster für Exotenfamilien im Nivellierungsmuster
ZF_i	Zeitfenster für Nivellierungsfamilie i im Nivellierungsmuster

1 Einleitung

Produzierende Unternehmen sehen sich gegenwärtig mit der Herausforderung konfrontiert, individuelle Kundenwünsche zu befriedigen und zugleich eine optimale Kapazitätsauslastung zu realisieren. Im Zuge der Globalisierung und des Wandels von Verkäufer- zu Käufermärkten ist ein neuer Grundtrend der Kundennachfrage zu verzeichnen. Gefordert werden individuelle Lösungen zu Preisen der Massenproduktion, wodurch sich die Anzahl der zu fertigenden Erzeugnisvarianten signifikant erhöht, jedoch Absatz- und Produktionsmenge je Erzeugnisvariante einen fallenden Verlauf aufweisen.

Um am Markt trotzdem eine möglichst kurze Lieferzeit garantieren zu können, sind Unternehmen gezwungen, entweder große Endproduktbestände oder erhebliche Stillstandzeiten der Anlagen durch vermehrte Umrüstvorgänge zwischen den Varianten in Kauf zu nehmen. Um trotz steigender Variantenvielfalt möglichst kurze Lieferzeiten und zudem eine wirtschaftliche Fertigung garantieren zu können, hat sich die Produktionsnivellierung als Methode der Produktionsplanung bewährt. Ziel der Produktionsnivellierung ist eine bezüglich Produktionsvolumen und -mix ausgeglichene und harmonisierte Fertigung. Dies wird realisiert, indem Kundennachfrage und Produktion entkoppelt werden und alle Erzeugnisvarianten in kleinen Losen und festgelegter Reihenfolge in einem sich zyklisch wiederholenden Intervall gefertigt werden. Der auf diese Weise entstehende Fertigungsrythmus wird auch als Nivellierungsmuster bezeichnet und führt zu einer gleichmäßig ausgelasteten und zugleich reaktionsfähigen Produktion. Ein wesentlicher Vorteil des Ansatzes der Produktionsnivellierung ist somit die Reduktion von Variabilität im Produktionsplan, wodurch es wiederum möglich wird, Bestände zu reduzieren und gleichzeitig eine hohe Liefertreue zu erzielen.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Seinen Ursprung hat der Ansatz der Produktionsnivellierung im Toyota Produktionssystem und wird daher auch den Methoden der sog. Lean Production zugeordnet. Aufgrund seiner nachgewiesenen Erfolge dient das Toyota Produktionssystem produzierenden Unternehmen in Europa und Nordamerika im Bereich der Produktionsorganisation als Leitbild und wird in der Wissenschaft als Studienobjekt genutzt. Die Nivellierung wird ursprünglich für die Großserienfertigung von Automobilen entwickelt, d. h. für eine Fertigungsform, die sich durch eine verhältnismäßig geringe Variantenvielfalt, hohe Stückzahlen und vergleichsweise geringe Schwankungen der Kundenabrufe auszeichnet. Aus diesem Grund stellt gegenwärtig die Großserienfertigung das primäre Anwendungsgebiet konventioneller Nivellierungsansätze dar. In diesem Bereich kann die Produktionsnivellierung bereits als Stand der Technik bezeichnet werden.

Eine direkte Übertragung konventioneller Nivellierungsansätze auf den Anwendungsbereich der Kleinserienfertigung kann auf Grund der dort i. d. R. vorzufindenden hohen Variantenvielfalt in Verbindung mit geringen Stückzahlen und stark schwankenden Kundenabrufen nicht ohne weiteres erfolgen. Es ist daher Kleinserienfertigern nicht möglich, die Potenziale einer nivellierten Produktion zu nutzen. Vielmehr bewirkt die hohe Variantenvielfalt in der Klein-

serienfertigung, dass durch die unterschiedlichen Arbeitsinhalte, Prozesszeiten und häufiges Umrüsten der Anlagen zwischen Erzeugnisvarianten das Produktionsprogramm die zur Verfügung stehenden Kapazitäten häufig nicht optimal auslastet werden.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieses IGF-Forschungsvorhabens ist die Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise zur Produktionsnivellierung in der variantenreichen Kleinserienfertigung, bei der die Rahmenbedingungen zur Umsetzung konventioneller Nivellierungsansätze i. d. R. nicht vorliegen. Hierbei wird ein Lösungsansatz verfolgt, der sich aus zwei wesentlichen Schritten zusammensetzt. Im ersten Schritt wird das variantenreiche Produktspektrum mit Hilfe gruppentechnologischer Verfahren in eine handhabbare Anzahl von Produktfamilien zerlegt. Basierend auf diesen Produktfamilien wird im zweiten Schritt ein Nivellierungsmuster generiert. An Stelle einer Fertigung einer jeden Erzeugnisvariante in einem sich zyklisch wiederholenden Intervall wird dabei das Ziel eines entsprechenden Fertigungsrhythmus auf Produktfamilienebene verfolgt.

Das primär angestrebte Forschungsergebnis stellt somit eine systematische Vorgehensweise zur Produktionsnivellierung in der variantenreichen Kleinserienfertigung dar, deren Kern die beiden zuvor beschriebenen Schritte bilden. Es wird darüber hinaus sowohl für die Produktfamilienbildung als auch für die Nivellierungsmustererstellung eine formalisierte Darstellungsweise in algorithmischer Form und deren programmiertechnische Umsetzung in Form eines Softwaredemonstrators angestrebt. Dies setzt eine systematische Aufbereitung der für die Produktfamilienbildung und die Nivellierungsmustererstellung relevanten Einflussgrößen voraus. Es ist zudem davon auszugehen, dass es sich bei der Produktfamilienbildung um eine komplexe, multivariate Problemstellung handelt, die die Bewertung und den Vergleich einer Vielzahl alternativer Lösungsmöglichkeiten erfordert. Für eine formalisierte, programmiertechnisch umsetzbare Vorgehensweise zur Produktfamilienbildung bedarf es daher der Entwicklung einer entsprechend geeigneten Bewertungsfunktion. Um die Anwendbarkeit der systematischen Vorgehensweise und des darauf basierenden Softwaredemonstrators zu validieren, wird im Rahmen des Forschungsvorhabens zudem eine Erprobung und Erstanwendung des Demonstrators angestrebt.

1.3 Aufbau der Ausarbeitung

Der Aufbau der vorliegenden Ausarbeitung orientiert sich an der zuvor spezifizierten Zielsetzung und ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Als Grundlage dient eine Aufbereitung des Stands der Technik in den für das Forschungsvorhaben relevanten Themenbereichen. In diesem Kontext erfolgen zunächst eine Charakterisierung der Kleinserienfertigung (Unterkapitel 2.1) sowie die Aufbereitung der Grundlagen im Bereich der Produktionsnivellierung (Unterkapitel 2.2) und der Gruppentechnologie (Unterkapitel 2.3). Basierend darauf wird in Unterkapitel 2.4 die Problemstellung konkretisiert und der spezifische Forschungsbedarf abgeleitet. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte systematische Vorgehensweise zur Nivellierung in der Kleinserie wird in Kapitel 3 beschrieben. Hierbei wird explizit auf die Analyse der

Eingangsgrößen (Unterkapitel 3.1), die Produktfamilienbildung zu Nivellierungszwecken (Unterkapitel 3.2), die Nivellierungsmustererstellung (Unterkapitel 3.3) und Aspekte der Umsetzung (Unterkapitel 3.4) eingegangen. Kapitel 4 widmet sich der programmiertechnischen Umsetzung, wobei die Produktfamilienbildung und Nivellierungsmusterstellung separat betrachtet werden. Die zu Validierungszwecken durchgeführte Erprobung und Erstanwendung der entwickelten Vorgehensweise und des darauf basierenden Softwaredemonstrators werden in Kapitel 5 dargestellt. Danach werden im Zuge einer Schlussbetrachtung (Kapitel 6) die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst, kritisch gewürdigt und es erfolgt ein Ausblick auf anknüpfende Forschungsfragen.

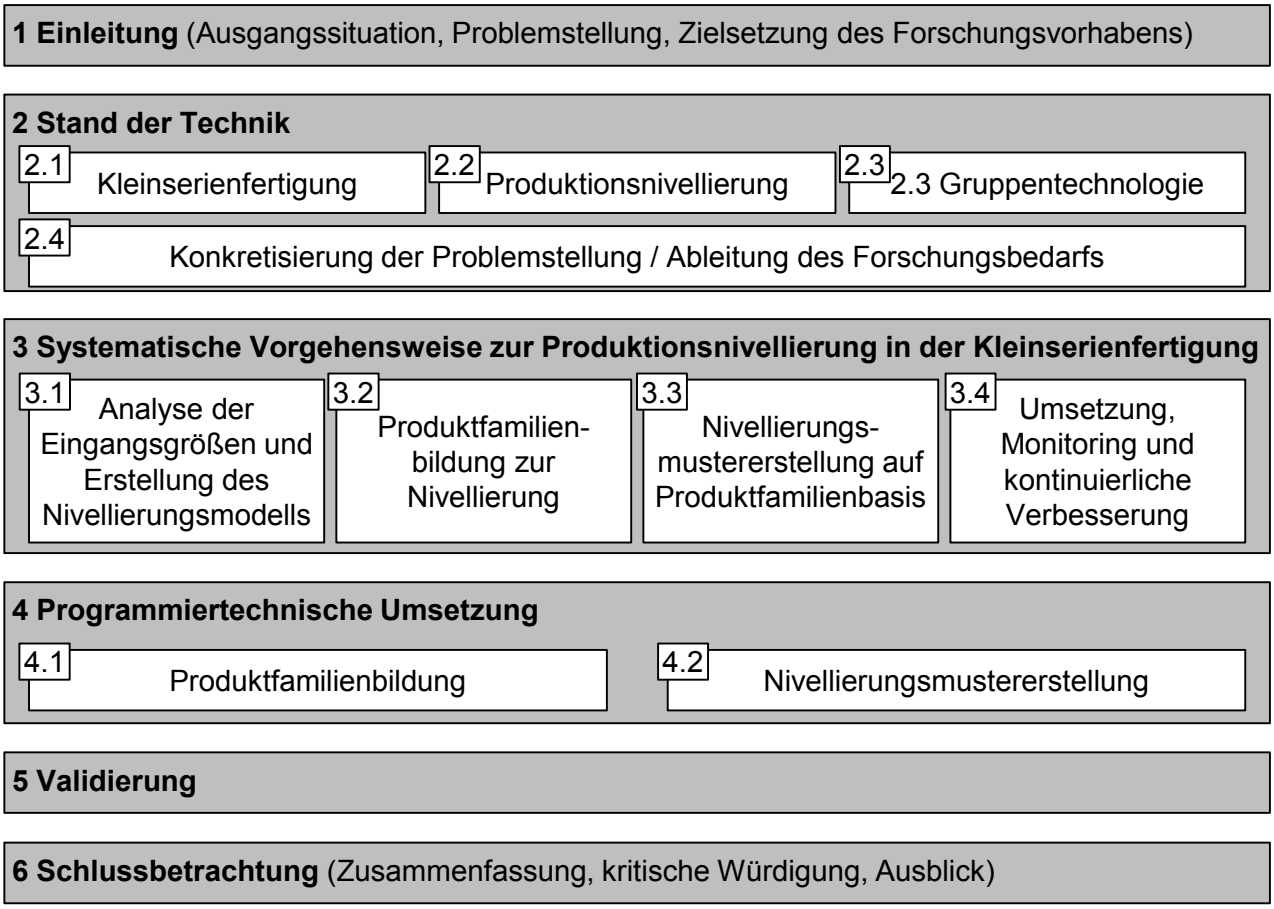


Abbildung 1.1: Aufbau der Ausarbeitung

2 Stand der Technik

Mit dem Ziel die Problemstellung zu konkretisieren und Defizite des aktuellen Wissensstandes aufzuzeigen, wird in den nachfolgenden Unterkapiteln bezogen auf die im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung relevanten Themenbereiche der Stand der Technik beschrieben. Hierbei werden wesentliche Charakteristika der variantenreichen Kleinserienfertigung (Unterkapitel 2.1), zentrale Aspekte der Produktionsnivellierung (Unterkapitel 2.2) sowie die Grundlagen und Verfahren der Gruppentechnologie (Unterkapitel 2.3) betrachtet. Auf der Basis dieser Ausführungen wird in Unterkapitel 2.4 der der vorliegenden Ausarbeitung zu Grunde liegende Forschungsbedarf abgeleitet und die Problemstellung konkretisiert.

2.1 Charakteristika der Kleinserienfertigung

Die Kleinserienfertigung stellt eine Fertigungsart dar, die sich durch eine vergleichsweise geringe durchschnittliche Auflagenhöhe (Losgröße) in Verbindung mit einer geringen durchschnittlichen Wiederholhäufigkeit der Erzeugnisse auszeichnet, wobei i. d. R. kundenauftragsbezogen gefertigt wird (Lödding 2008, S. 97). Die Wiederholhäufigkeit bezeichnet dabei die Anzahl der Fertigungslose einer Erzeugnisvariante pro Jahr (vgl. Eversheim 1989, S. 11). In Abbildung 2.1 ist die Kleinserienfertigung anderen Fertigungsarten anhand der Kriterien Auflagenhöhe und Wiederholhäufigkeit gegenübergestellt. Hierbei sind die angegebenen Grenzwerte für Auflagenhöhe und Wiederholhäufigkeit lediglich als grobe Richtwerte anzusehen, die der Orientierung dienen (Luczak, Eversheim 2001, S. 86f).

Einmalfertigung	Einzel- und Kleinserienfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung
Auflagenhöhe gering; keine Wiederholung	Auflagenhöhe < 50; Wiederholhäufigkeit < 12	Auflagenhöhe > 50; Wiederholhäufigkeit < 24	Sehr große Auflagenhöhe; Fertigung unterbrochen

Abbildung 2.1: Klassifizierung der Fertigungsarten entsprechend Auflagenhöhe und Wiederholhäufigkeit (in Anlehnung an Lödding 2008, S. 97)

Weitere Merkmale, die neben der Fertigungsart zur Klassifizierung einer Fertigung genutzt werden können und nachfolgend betrachtet werden, sind das Fertigungsprinzip, der Teilefluss, die Variantenanzahl, die Materialflusskomplexität sowie die Kunden- und Kapazitätsbedarfsschwankungen. Die Ausprägungen dieser Merkmale sind stark vom Anwendungskontext abhängig. Dennoch ist es größtenteils möglich, der Kleinserienfertigung anwendungskontextneutral spezifische Merkmalsausprägungen zuzuordnen.

Das Fertigungsprinzip stellt ein Klassifizierungsmerkmal dar, das die räumliche Struktur einer Fertigung abbildet (Wiendahl 2010, S. 30f). Unterschieden wird diesbezüglich zwischen Verrichtungs-, Fließ-, Insel-, Baustellen- und Werkbankprinzip (ebd.). Beim Verrichtungsprinzip, auch als Werkstattprinzip bezeichnet, werden gleichartige Arbeitssysteme räumlich zu

Werkstätten zusammengefasst und die Erzeugnisse i. d. R. in Losen von Werkstatt zu Werkstatt transportiert (ebd.). Im Gegensatz dazu werden beim Fließprinzip die Arbeitssysteme entsprechend des Materialflusses der Erzeugnisse angeordnet und die Erzeugnisse nach dem Ende der im Regelfall getakteten Bearbeitung in einem Arbeitssystem an das nächste weitergegeben (Wiendahl 2010, S. 30f). Das Inselprinzip wird zwischen Verrichtungs- und Fließprinzip eingeordnet. Zwar werden die Arbeitssysteme materialflussorientiert angeordnet, allerdings zeichnen sich Fertigungsinseln verglichen mit Fließfertigungssystemen durch einen geringeren Automatisierungsgrad und eine höhere Kapazitätsflexibilität aus, da die Ausbringung über die Arbeitszeit und die Anzahl der Mitarbeiter im System geregelt werden kann (Wiendahl 2010, S. 32ff). Bei der Baustellenfertigung werden die Arbeitssysteme zu dem zu fertigenden Erzeugnis gebracht, wohingegen bei der Werkbankfertigung ein Erzeugnis ggf. komplett auf einer Werkbank hergestellt wird (Wiendahl 2010, S. 32f). In der Kleinserienfertigung ist davon auszugehen, dass primär das Verrichtungsprinzip zum Einsatz kommt (Lödding 2008, S. 97; Weber, Kabst 2006, S. 120).

Hinsichtlich des Teileflusses wird grundsätzlich zwischen losweisem Transport, Einzelstückfluss, überlappender Fertigung und Chargenfertigung differenziert (Lödding 2008, S. 98ff). Kennzeichnend für den losweisen Transport ist, dass zunächst alle Erzeugnisse eines Loses in einem Arbeitssystem bearbeitet werden und erst im Anschluss das komplette Los zum nachfolgenden Arbeitssystem transportiert wird (Lödding 2008, S. 98). Im Unterschied dazu erfolgt der Transport zwischen den Arbeitssystemen beim Einzelstückfluss stückweise, d. h. ein Erzeugnis wird idealerweise direkt nach Abschluss der Bearbeitung in einem Arbeitssystem zum nachfolgenden Arbeitssystem transportiert (Lödding 2008, S. 99). Die überlappende Fertigung stellt eine Mischform von losweisem Transport und Einzelstückfluss dar, bei der der Transport zwischen Arbeitssystemen in Teilmengen eines Loses erfolgt (Lödding 2008, S. 101). Bei der Chargenfertigung werden hingegen mehrere Lose, bspw. bedingt durch technologische Restriktionen, gemeinsam bearbeitet (Lödding 2008, S. 102). Da wie o. a. in der Kleinserienfertigung die verrichtungsorientierte Fertigungsstrukturierung dominiert, ist dort entsprechend vorwiegend von losweisem Transport oder überlappender Fertigung auszugehen.

Die Variantenanzahl repräsentiert die Anzahl der herzustellenden Erzeugnisvarianten. Der Begriff Variante bezeichnet allgemein „Gegenstände ähnlicher Form und/oder Funktion mit einem in der Regel hohen Anteil identischer Gruppen oder Teile“ (DIN 2002, S. 15). Eine Variante eines Erzeugnisses stellt demnach ein Erzeugnis ähnlicher Form und/oder Funktion mit einem hohen Anteil identischer Gruppen oder Teile dar, das Unterschiede in mindestens einer funktionellen oder strukturellen Merkmalsausprägung aufweist (vgl. Firchau u. a. 2002, S. 11f). Angesichts der allgemeinen Tendenzen zur Diversifizierung des Produktspektrums, um individuellen Kundenwünschen auch in Nischenmärkten gerecht zu werden, ist bezogen auf alle Fertigungsarten eine steigende Variantenvielfalt festzustellen (Große-Heitmeyer, Wiendahl 2004, S. 3f).

Insbesondere die Kleinserienfertigung zeichnet sich durch eine hohe Variantenvielfalt aus. Hierauf weisen auch die Ergebnisse einer empirischen Erhebung zum Themenkomplex der

Produktionsnivellierung hin, die am Lehrstuhl für Arbeits- und Produktionssysteme der Technischen Universität Dortmund in Form einer Online-Umfrage durchgeführt wurde. An der Erhebung beteiligten sich insgesamt 106 Vertreter vorwiegend deutscher Unternehmen verschiedener Branchen der produzierenden Industrie. Wie Abbildung 2.2 zu entnehmen ist, beurteilt ein großer Anteil der Vertreter von Unternehmen, die sich der Kleinserienfertigung zuordnen, die Variantenvielfalt ihres Produktspektrums als hoch bzw. sehr hoch. Weitere Details zu der durchgeführten Erhebung sind dem Anhang der vorliegenden Ausarbeitung zu entnehmen (Anhang A).

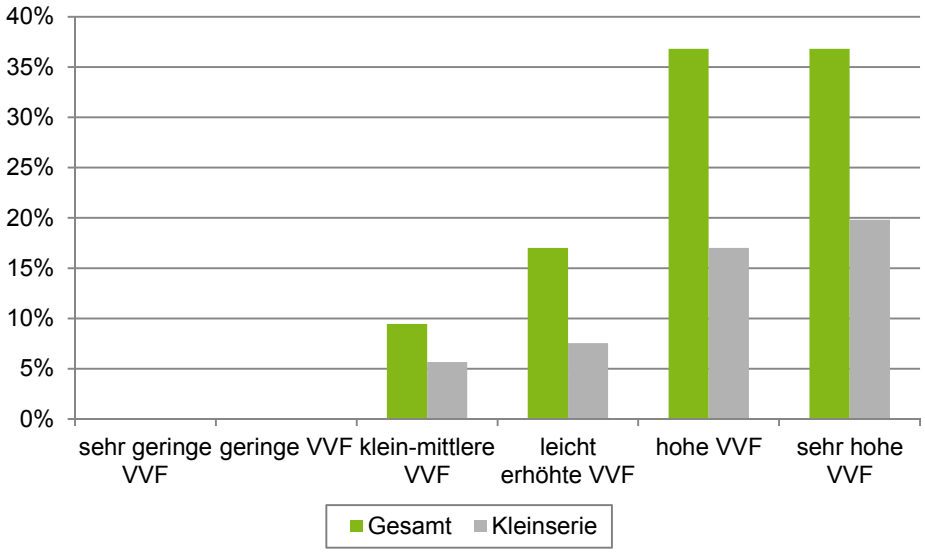


Abbildung 2.2: Einschätzung der Variantenvielfalt (VVF) des Produktspektrums im Unternehmen (Ergebnis einer Online-Umfrage, an der 106 Unternehmensvertreter aus verschiedenen Branchen teilgenommen haben)

Zwar können die Umfrageergebnisse auf Grund des vorliegenden Stichprobenumfangs (d. h. der Anzahl an der Umfrage der beteiligten Unternehmensvertreter) kein repräsentatives Abbild der produzierenden Industrie in Deutschland erzeugen, sie können jedoch zumindest als Indikator gewertet werden.

Hinsichtlich der Materialflusskomplexität wird zwischen linearem Materialfluss und komplexem Materialfluss ohne und mit Rückflüssen unterschieden (vgl. Abbildung 2.3). Die Materialflusskomplexität korreliert eng mit der Variantenanzahl (Lödding 2008, S. 104). So ist mit steigender Variantenvielfalt auch von einer steigenden Anzahl möglicher Vorgänger und Nachfolger eines Arbeitssystems und einer größeren Anzahl von Rückflüssen auszugehen (ebd.). Somit zeichnet sich die Kleinserienfertigung i. d. R. durch komplexe Materialflüsse ggf. mit Rückflüssen aus.

Als letztes Merkmal zur Charakterisierung der Kleinserienfertigung werden die Schwankungen des Kunden- und Kapazitätsbedarfs betrachtet. Angesichts der Tatsache, dass wie bereits erwähnt in der Kleinserienfertigung Erzeugnisse im Regelfall kundenauftragsbezogen mit einer geringen Wiederholhäufigkeit und in hoher Variantenvielfalt hergestellt werden, ist von einer hohen Schwankung der Kundenabrufe auszugehen. Diese bewirkt wiederum eine ebenfalls hohe Schwankung des Kapazitätsbedarfs. Vor diesem Hintergrund wird die Relevanz von

Ansätzen zur Harmonisierung der Kapazitätsauslastung, wie bspw. der Produktionsnivellierung, im Bereich der Kleinserienfertigung offensichtlich.

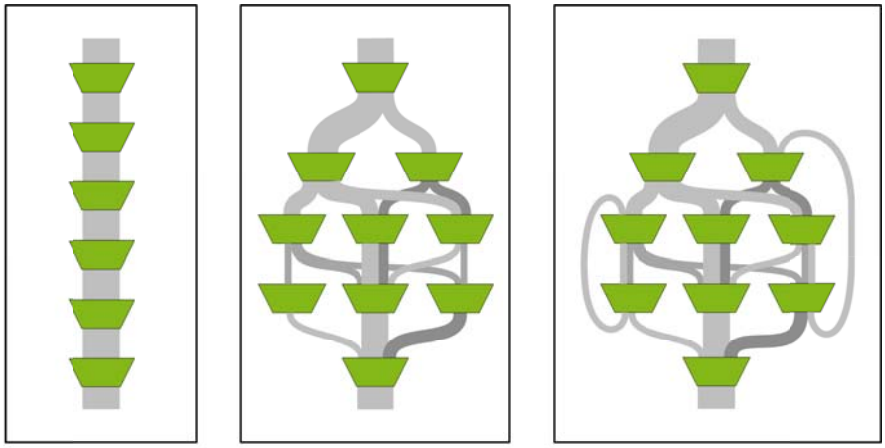


Abbildung 2.3: Formen der Materialflusskomplexität (Lödding 2008, S. 105)

Die Ergebnisse der im Verlauf dieses Unterkapitels durchgeführten Charakterisierung der Kleinserienfertigung sind in Form eines morphologischen Merkmalsschemas in Abbildung 2.4 zusammengefasst.

Merkmal	**Ausprägung**				
Fertigungsprinzip	Baustellen-prinzip	Werkbank-prinzip	Verrichtungs-prinzip	Inselprinzip	Fließprinzip
Teilefluss	Einzelstückfluss	Losweiser Transport	Überlappende Fertigung	Chargenfertigung	
Variantenanzahl	gering	mittel	Hoch		
Materialflusskomplexität	Linearer Materialfluss	Komplexer Materialfluss ohne Rückflüsse	Komplexer Materialfluss mit Rückflüssen		
Kunden- und Kapazitäts-bedarfsschwankungen	gering	mittel	hoch		

= in der Kleinserienfertigung vorwiegend vorzufinden

Abbildung 2.4: Morphologisches Merkmalsschema zur Charakterisierung der Kleinserienfertigung

2.2 Produktionsnivellierung als Kernelement der Lean Production

Die Produktionsnivellierung (japan. heijunka) stellt ein Kernelement der unter dem Begriff Lean Production bekannten Form der Produktionsorganisation nach dem Vorbild des Toyota Produktionssystems (TPS) dar (Liker 2004, S. 32; Monden 1983, S. 6; Womack, Jones, Roos 1992, S. 158). Ziel der Lean Production bzw. des TPS ist die Eliminierung jeglicher Art von Produktivitätsverlusten, um die vom Kunden geforderte Qualität, geringstmögliche Gesamtkosten, kürzest mögliche Durchlaufzeiten bei gleichzeitig hoher Arbeitssicherheit und Arbeitsmoti-

vation zu realisieren (Liker 2004, S. 32). Quellen derartiger Verluste sind Verschwendung (japan. muda), Überlastung von Mitarbeitern und/oder Betriebsmitteln (japan. muri) und Ungleichmäßigkeit (japan. mura) (Liker 2004, S. 114). Verschwendung kann dabei in Form von Überproduktion, Wartezeiten, unnötigem Transport, Überbearbeitung, Beständen, unnötigen Bewegungen, Fehlern und Ausschuss sowie ungenutztem Kreativitätspotenzial der Mitarbeiter auftreten (Liker 2004, S. 28f; Ohno 1993, S. 46). Neben der Produktionsnivellierung und der Reduzierung von Verschwendung setzt sich das TPS aus weiteren Elementen bzw. Prinzipien zusammen, die Abbildung 2.5 zu entnehmen sind und an dieser Stelle nicht vertiefend betrachtet werden. Als weitere Methode des TPS wird in Abschnitt 3.1.1 die sog. Wertstromanalysemethodik betrachtet. Für den weiteren Verlauf der Ausarbeitung stellt der Wertstrom einen zentralen Begriff dar, unter dem sämtliche wertschöpfende und nicht wertschöpfende Aktivitäten zu verstehen sind, die für den Fluss eines Produktes vom Produktkonzept bis zum (End-)Kunden erforderlich sind (Rother, Shook 2000, S. 3; Jones, Womack 2002, S. 1).

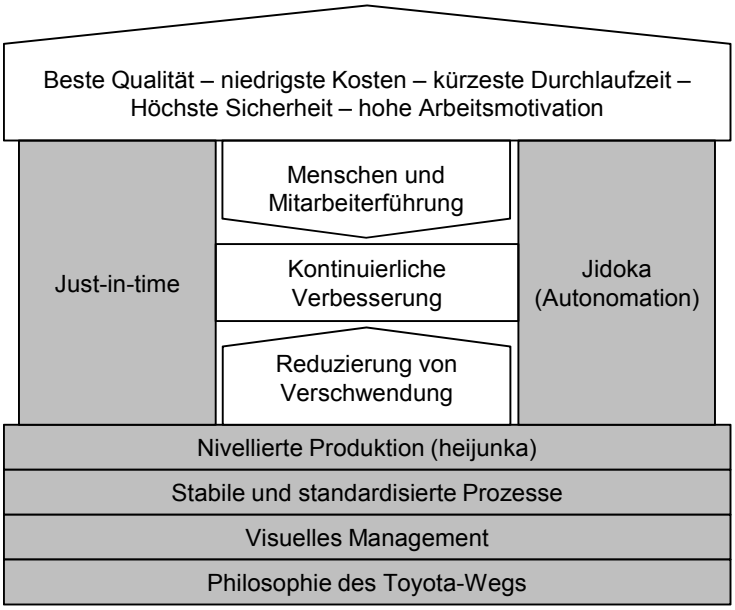


Abbildung 2.5: Elemente des Toyota Produktionssystems (Liker 2006, S. 33)

Der Begriff der Produktionsnivellierung (in der englischsprachigen Literatur als production leveling oder production smoothing bezeichnet) wird in der Literatur nicht einheitlich verwendet. Einige Begriffsdefinitionen sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Während Monden (1983, S. 55) in der Produktionsnivellierung ein Werkzeug zur Anpassung der Produktion an die schwankende Kundennachfrage sieht, liegt einem Großteil der in der Literatur zu findenden Definitionen ein Begriffsverständnis zu Grunde, nach dem die Nivellierung das Harmonisieren von Produktionsvolumen und -mix umfasst (vgl. z. B. Liker 2004, S. 116; Dennis 2007, S. 83). Im Unterschied dazu differenzieren (Takeda 2004, S. 44) und (Syska 2006, S. 55) zwischen der Nivellierung und dem Begriff der Glättung. Während die Nivellierung das Aufteilen des Gesamtvolumens auf Tagesmengen bezeichnet, zielt die Glättung auf die Aufteilung dieser Tagesmengen in weitere Teilmengen ab.

Tabelle 2.1: Definitionen des Begriffs der Produktionsnivellierung

Definition	Quelle
In sum heijunka is a production planning method in which the (typically mixed) sequence of items (in Toyota's case, body types) to be produced during a given day are determined, taking into account process loads and capacities, as well as external demand.	(Coleman, Vaghefi 1994, S. 31f)
Production leveling or heijunka means distributing the production volume and mix evenly over time.	(Dennis 2007, S. 83)
The lean production practice that protects the producer from variability in the sequence of jobs to be processed is heijunka, in which production is scheduled such that the production line produces the same sequence of products throughout a given time period, with that sequence alternating between demanding and less demanding products.	(Hüttmeir u. a. 2009, S. 501)
Perhaps part of the problem is that when Toyota uses the term heijunka it means two different, but related, things. One is the leveling of production by volume. The other is leveling production by product type or mix.	(Jones 2006, S. 29)
Heijunka is the leveling of production by both volume and product mix.	(Liker 2004, S. 116)
At Toyota, the means for adapting production to variable demand is called production smoothing.	(Monden 1983, S. 55)
Heijunka verlangt eine Zusammenstellung des täglichen Produktionsprogramms, welche die gleichmäßige Auslastung bzw. Arbeitsverteilung auf die produzierenden Bereiche zum Ziel hat. Gemeint ist der gleichmäßige und sequentielle Fertigungsfluss, dem eine gleichmäßige, mittlere Verteilung von ausstattungsreichen (und damit montagezeit-aufwendigen) und ausstattungsarmen Fahrzeugen zugrunde liegt.	(Oeltjenbruns 2000, S. 50)
Mit der Methodik der Produktionsnivellierung (Jap.: Heijunka) werden Produktionsbereiche und deren Logistik geglättet. […] Die Produktionsmengen und -varianten werden gleichmäßig auf kleinere Zeiträume verteilt, z. B. die Produktion einer Variante von einmal wöchentlich oder monatlich auf einmal täglich umgestellt.	(Schürle 2009, S. 248ff)
Durch Vermeidung von Mura (hier diskontinuierliche Fertigung und ungleichmäßiger Produktionsfluß) sollen in allen Bearbeitungsstufen pro Zeiteinheit immer jeweils gleiche Teilmengen bearbeitet werden. […] Die ausgeglichene Produktion - in Japan als Heijunka bezeichnet - wird durch den Einsatz von Kanban begünstigt, damit nur die Menge und die Art von Teilen produziert wird, die im nachfolgenden Prozeß unmittelbar verbaut werden sollen.	(Shingo 1992, S. 254)
Es [Produktionsnivellierung] ist ein Instrument zur Harmonisierung des Produktionsflusses im Sinne eines mengenmäßigen Produktionsausgleichs, ohne dies auf dem Rücken der nachgelagerten Stellen im Produktionsprozess oder des Kunden auszutragen. […] Grundsätzlich erfolgt das Harmonisieren einer Produktion in zwei wesentlichen Stufen: • Nivellieren der Produktionsmenge auf Tagesmengen • Glätten der Produktion in der Erhöhung der Anzahl der Zyklen je Tag mit dem Ziel der Einzelstückfertigung	(Syska 2006, S. 55)
Nivellieren bedeutet, die Gesamtstückzahlen für ein bestimmtes Produkt in Tagesmengen einzuteilen. Glätten bedeutet, diese Tagesmengen in weitere Teilmengen zu zerlegen.	(Takeda 2004, S. 44)
Die Nivellierung ist ein Verfahren, das abhängig von Kapazitätsbedarf und -nachfrage das Produktionsvolumen und den -mix gleichmäßig innerhalb eines definierten Zeitraums verteilt.	(Wuthnow 2010, S. 26)

In Anlehnung an die in der Literatur vorwiegend zu findende Definition wird im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung die Produktionsnivellierung als eine Methode verstanden, die auf eine Harmonisierung der Produktion hinsichtlich Produktionsmenge sowie -mix und somit auf eine möglichst gleichmäßige Kapazitätsauslastung abzielt. Realisiert wird dies, indem Produktion (d. h. Fertigungsaufträge) und Kundenabrufe voneinander entkoppelt werden und das Produktionsvolumen gleichmäßig verteilt in möglichst konstantem Mix gefertigt wird (Liker 2004, S. 116ff; Lippolt, Furmans 2008, S. 12f; Schürle 2009, S. 251; Wuthnow, Deuse 2009b, S. 229). Auf diese Weise wird jede Erzeugnisvariante in einem sich zyklisch wiederholenden Muster, dem sog. Nivellierungsmuster, produziert (Hüttmeir u. a. 2009, S. 501; McKellen 2004,

S. 14; Rother 2009, S. 102). Aus der Frequenz, in der sich das Nivellierungsmuster wiederholt, ergibt sich die Kennzahl EPEI (Every Part Every Interval), in der sich gleichzeitig Losgrößen und die Reaktionsfähigkeit des Produktionssystems widerspiegeln (Schürle 2009, S. 251; Rother, Harris, Womack 2004, S. 67). Das Prinzip der Nivellierung verdeutlicht Abbildung 2.6 exemplarisch anhand des Vergleichs einer nicht nivellierten und einer hinsichtlich Produktionsvolumen und -mix harmonisierten Fertigung.

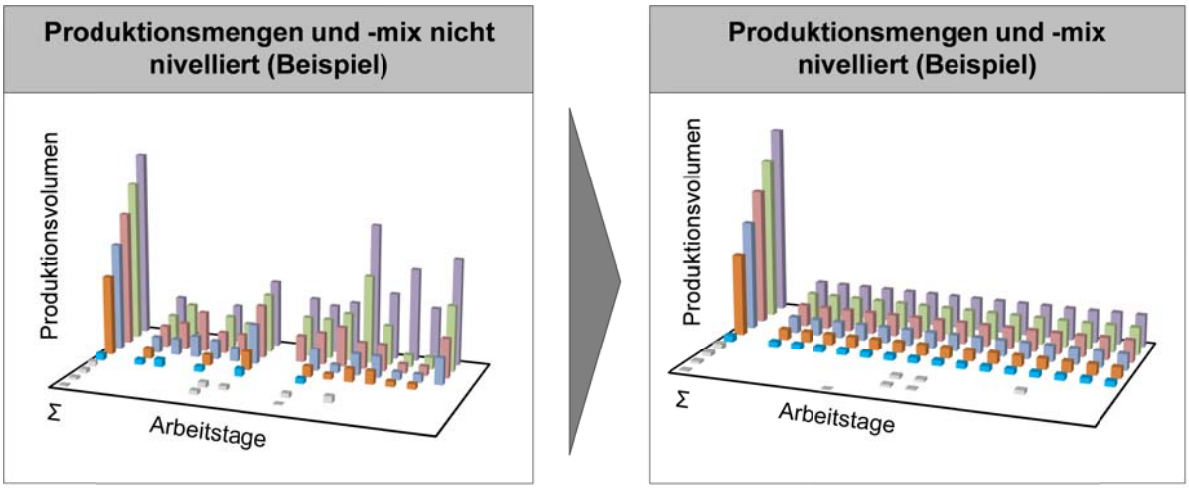


Abbildung 2.6: Harmonisierung von Produktionsvolumen und -mix durch Produktionsnivellierung

Bezogen auf die zuvor angeführten Quellen für Produktivitätsverluste wird durch die Nivellierung vor allem die Ungleichmäßigkeit, d. h. Variabilität in Form von Schwankungen des Kapazitätsbedarfs reduziert bzw. idealerweise eliminiert, was wiederum eine grundlegende Voraussetzung zur Reduzierung von Überlastung und Verschwendung ist (Dennis 2007, S. 25; Liker 2004, S. 115; Ohno 1993, S. 155; Slomp, Bokhorst, Germs 2009, S. 586). Es wird ein ausgeglichenes Arbeitspensum sämtlicher Produktions- und Logistikprozesse angestrebt (Coleman, Vaghefi 1994, S. 31; Deuse, Stausberg, Wischniewski 2007, S. 292; Hüttmeir u. a. 2009, S. 502). Durch die Produktionsnivellierung ist es somit möglich, Verschwendung in Form von unter- bzw. überbeanspruchten Kapazitäten zu vermeiden (Oeltjenbruns 2000, S. 51; Liker 2004, S. 118f; McKellen 2004, S. 14). Damit können zur Deckung evtl. auftretender Bedarfsspitzen vorgehaltene Sicherheiten in Form von Ersatzkapazitäten und/oder Sicherheitsbeständen, die ein Risiko in Form von potenziell nicht verkauften Gütern mit sich bringen, reduziert bzw. eliminiert werden (Furmans 2005, S. 243; Liker 2004, S. 116).

Darüber hinaus wirkt die Produktionsnivellierung dem Bullwhip-Effekt entgegen, der sich in aufschaukelnden Bestell- und Bestandsmengen entlang der Supply Chain äußert (Furmans 2005, S. 243; Ohno 1993, S. 155f; Park 1993, S. 16; Reinhart u. a. 2010, S. 357: Womack, Jones, Roos 1992, S. 159). Zusammen mit den im Zuge der Nivellierung tendenziell kleiner werdenden Losen reduzieren sich zudem Durchlaufzeiten und Umlaufbestände (Coleman, Vaghefi 1994, S. 32f; Dennis 2007, S. 83; McKellen 2004, S. 14; Park 1993, S. 15). Gleichzeitig erhöht sich die Reaktivität des Produktionssystems, d. h. die Fähigkeit kurzfristig auf Kundenabrufe reagieren zu können (Dennis 2007, S. 73; Rother 2009, S. 100; Syska 2006, S. 57). Des Weiteren wird durch die Produktionsnivellierung die Einführung weiterer Methoden

der Lean Production erleichtert und zudem die Transparenz der Produktionsplanung und -steuerung erhöht (Dennis 2007, S. 73; Schürle 2009, S. 248; Syska 2006, S. 57).

Trotz dieser positiven Effekte ist die Produktionsnivellierung nicht mit dem Ideal einer verschwendungsfreien, komplett bedarfsgesteuerten Produktion gleichzusetzen. Die im Zuge der Nivellierung angestrebte Entkopplung von Kundenabrufen und Produktion erfolgt im Regelfall mit Hilfe eines Supermarktes, der wiederum mit Beständen verbunden ist und eine Form von Verschwendung darstellt (Liker 2004, S. 121; Smalley 2005, S. 14; Oeltjenbruns 2000, S. 51). Diesbezüglich ist allerdings anzumerken, dass es sich um einen kontrollierten Bestand handelt, dessen Existenz mit den zuvor angeführten positiven Effekten einer nivellierten Fertigung gerechtfertigt werden kann.

Als Hilfsmittel zur operativen Umsetzung von Nivellierungsansätzen wird oftmals eine sog. Heijunka-Box, auch bezeichnet als Ausgleichskasten, Heijunka-Tafel oder Heijunka-Board verwendet (Rother, Harris, Womack 2004, S. 68; Smalley 2005, S. 39). Die Heijunka-Box dient der Visualisierung der Produktionsprogrammplanung (Dennis 2007, S. 85; Schürle 2009, S. 252). Abbildung 2.7 zeigt exemplarisch eine Heijunka-Box für eine Fertigung mit drei Erzeugnisvarianten. Die oberste Zeile der Heijunka-Box ist mit Produktionszeitintervallen beschriftet, darunter ist für jede Erzeugnisvariante eine Zeile angeordnet. Je Zeitintervall ist jeder Erzeugnisvariante in der entsprechenden Zeile ein Ablagefach zugeordnet. In die Fächer werden entsprechend des Nivellierungsmusters Fertigungsaufträge für eine Schicht physisch einsortiert (Schürle 2009, S. 250). Zur Einlastung der Aufträge werden diese vom jeweiligen Produktionsverantwortlichen aus der Heijunka-Box entnommen (ebd.).

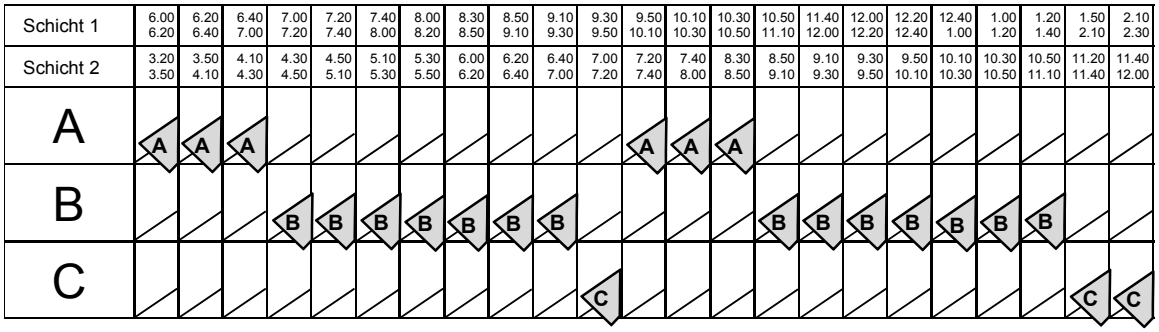


Abbildung 2.7: Heijunka-Board für 3 Erzeugnisvarianten(exemplarisch) (Rother, Harris, Womack 2004, S. 68)

Durch die Heijunka-Box wird auf einfache Art und Weise visualisiert, welche Erzeugnisvariante zu welchem Zeitpunkt zu produzieren ist. Entwickelt wurde dieses Konzept bei Toyota, wo es ursprünglich zur Planung und Steuerung von Instandhaltungsarbeiten eingesetzt wurde (Smalley 2005, S. 39). Oftmals wird das Hilfsmittel der Heijunka-Box mit einer Kanban-Steuerung kombiniert (Dennis 2007, S. 85), deren genaue Funktionsweise in Abschnitt 0 im Kontext der Ausführungen zur Umsetzung des Nivellierungsmusters beschrieben wird. In den nachfolgenden Abschnitten werden zunächst wesentliche Anwendungsvoraussetzungen für konventionelle Nivellierungsansätze und im Anschluss in der Literatur zu findende Vorgehensweisen zur Nivellierung betrachtet.

2.2.1 Anwendungsvoraussetzungen

Wie bereits erwähnt werden im Zuge der Nivellierung Produktion und Kundenabrufe entkoppelt. Hierzu wird i. d. R. ein definierter Entkopplungspufferbestand benötigt, der somit eine erste zentrale Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung darstellt (Liker 2004, S. 121; Lippolt, Furmans 2008, S. 13). Da die Nivellierung eine Produktion in kleinen Losen anstrebt, ist deren Realisierbarkeit insbesondere durch kurze Rüstzeiten eine weitere zentrale Anwendungsvoraussetzung (Zäh, Aull 2006, S. 686; Monden 1983, S. 8; Shingo 1992, S. 249; Ohno 1993, S. 124; Syska 2006, S. 56). Darüber hinaus empfehlen Coleman, Vaghefi (1994, S. 32) den Einsatz eines wirkungsvollen Qualitätssicherungssystems, da die bereits angeführte Kleinlosigkeit qualitätssichernden Lern- und Trainingseffekten z. T. entgegenwirkt. Diesem Argument ist entgegenzuhalten, dass durch die Produktionsnivellierung eine Überlastung von Mensch und Maschine vermieden wird, was sich wiederum positiv auf die Produktqualität auswirkt. Zudem begünstigt die Fertigung entsprechend eines sich zyklisch wiederholenden Nivellierungsmusters eine Form der Routinebildung und Standardisierung, erhöht die Transparenz und macht Abweichungen leicht erkennbar.

Als weitere Anwendungsvoraussetzungen konventioneller Nivellierungsansätze sind möglichst universell einsetzbare Betriebsmittel und vielseitig qualifizierte Mitarbeiter anzuführen (Zäh, Aull 2006, S. 686; Ohno 1993, S. 67; Monden 1983, S. 7; Coleman, Vaghefi 1994, S. 32). Zudem setzt die Anwendbarkeit derartiger Ansätze eine begrenzte Varianz im Produktspektrum in Verbindung mit relativ gleichmäßigen und prognostizierbaren Kundenabrufen voraus (Hüttmeir u. a. 2009, S. 501f; de Smet, Gelders 1998, S. 116f). Aus diesem Grund ist die Großserienfertigung gegenwärtig primäres Anwendungsgebiet derartiger Ansätze und kann dort als Stand der Technik bezeichnet werden (Slomp, Bokhorst, Germs 2009, S. 586).

2.2.2 Vorgehensweise konventioneller Nivellierungsansätze

In der Literatur finden sich Beschreibungen von Vorgehensweisen zur Produktionsnivellierung mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad und unterschiedlicher Fokussierung. Nachfolgend werden die Ansätze von Duggan (2002), Erlach (2007), Monden (1983), Rother, Shook (2000), Rother, Harris, Womack (2004), Shingo (1992), Smalley (2005), Takeda (2004) und Wuthnow (2010) betrachtet. Vorab ist bereits an dieser Stelle anzumerken, dass alle beschriebenen Nivellierungsansätze auf die Anwendung im Bereich der Großserienfertigung ausgerichtet sind.

Monden (1983) beschreibt anhand eines Beispiels aus der Automobilherstellung ein zweistufiges Vorgehen zur Produktionsnivellierung. Im ersten Schritt wird das monatliche Produktionsvolumen in gleiche Tagesmengen aufgeteilt (Monden 1983, S. 7). Im zweiten Schritt wird unter Berücksichtigung des durchschnittlichen Kundentaktes eine nivellierte Produktionsreihenfolge festgelegt, wobei die Taktzeiten für die einzelnen Fahrzeuge vom durchschnittlichen Kundentakt abweichen können (ebd.). Die Reihenfolgebildung wird durch einen Optimierungsalgorithmus unterstützt, der auch Anforderungen hinsichtlich möglichst konstanter Materialentnahmen berücksichtigt (Monden 1983, S. 60).

Ähnlich wie Monden beschränkt sich auch die von Shingo (1992) beschriebene Vorgehensweise zur Nivellierung auf die Darstellung einer grundlegenden Methodik zur Nivellierungsmustererstellung. Dabei wird ebenfalls eine gleichmäßige Aufteilung des Produktionsvolumens auf kleiner werdende Planungszeiträume vorgesehen, was als Zeitsegmentierung bezeichnet wird (Shingo 1992, S. 100ff). Innerhalb der so gebildeten Planungszeiträume werden die zu fertigenden Mengen in kleine Lose aufgeteilt (Shingo 1992, S. 102f). Den Ausgangspunkt der Zeitsegmentierung bildet ein ggf. bereits auf tatsächlichen Kundenbedarfen basierender Monatsplan, der wiederum auf einem auf Prognosewerten aufgebauten Jahresabsatzplan beruht (Shingo 1992, S. 99ff). Es wird darüber hinaus weder bei Monden noch bei Shingo darauf eingegangen, inwiefern eine Auswahl von Erzeugnisvarianten für die Nivellierung erforderlich ist und wie das Nivellierungsmuster konkret erstellt wird.

Smalley (2005) beschreibt die Vorgehensweise zur Nivellierung detailliert anhand eines exemplarisch gewählten Wertstroms aus der Automobilzulieferindustrie in insgesamt sechs Schritten. Die Entkopplung von Kundenbedarf und Produktion wird im dargestellten Fallbeispiel durch einen Fertigwarenbestand realisiert. Nachdem im ersten Schritt vorbereitende Analysen, insbesondere eine Analyse der Kundenabrufschwankungen, abgeschlossen sind, erfolgt im zweiten Schritt die Dimensionierung des Fertigwarenbestands (Smalley 2005, S. 1ff). Hierzu wird zunächst eine volumenbasierte ABC-Analyse durchgeführt, d. h. das betrachtete Produktspektrum wird entsprechend des Nachfragevolumens segmentiert (Smalley 2005, S. 15f). Basierend auf dieser Segmentierung wird festgelegt, welche Produkte in welcher Menge im Fertigwarenbestand vorrätig gehalten werden und wie der Fertigwarenbestand organisiert und gesteuert wird (Smalley 2005, S. 16ff). Im dritten Schritt wird der Prozess bestimmt, an dem die Fertigungsaufträge nivelliert eingesteuert werden (Smalley 2005, S. 27ff). Zur Nivellierungsmustererstellung wird an diesem Schrittmacherprozess das Produktionsvolumen gleichmäßig in Tagesmengen aufgeteilt, die wie in Abbildung 2.8 dargestellt für die Harmonisierung des Produktionsmix auf sog. Pitchintervalle verteilt werden (Smalley 2005, S. 34ff). Ein Pitchintervall entspricht dabei einer Art Mindestlosgröße und berechnet sich als Produkt von Kundentakt und Verpackungseinheit (ebd.). Die Anzahl der Pitchintervalle pro Tag ergibt sich als Quotient der täglich verfügbaren Fertigungszeit und der Länge eines Pitchintervalls (ebd.). Im Anschluss an die Nivellierungsmustererstellung wird festgelegt, auf welche Art am Schrittmacherprozess Fertigungsaufträge ausgelöst und eingesteuert werden (Smalley 2005, S. 37ff).

Auf der Basis der Mustererstellung für den Schrittmacherprozess wird im vierten Schritt konkretisiert, wie die dem Schrittmacherprozess vorgelagerten Prozesse gesteuert werden (Smalley 2005, S. 47ff). Im fünften Schritt werden der Ausbau und die Erweiterung der Nivellierungssystematik auf angrenzende Wertströme betrachtet (Smalley 2005, S. 73ff), wohingegen der sechste Schritt die Aufrechterhaltung und kontinuierliche Verbesserung des konzipierten Systems umfasst (Smalley 2005, S. 90ff).

Ähnliche Ansätze zur Nivellierung mit Hilfe von Pitchintervallen, die sich inhaltlich im Wesentlichen mit dem Ansatz von Smalley decken, finden sich bei Duggan (2002, S. 117ff), Erlach (2007, S. 207ff), Rother, Harris, Womack (2004, S. 63ff) sowie Rother, Shook (2000, S. 49ff).

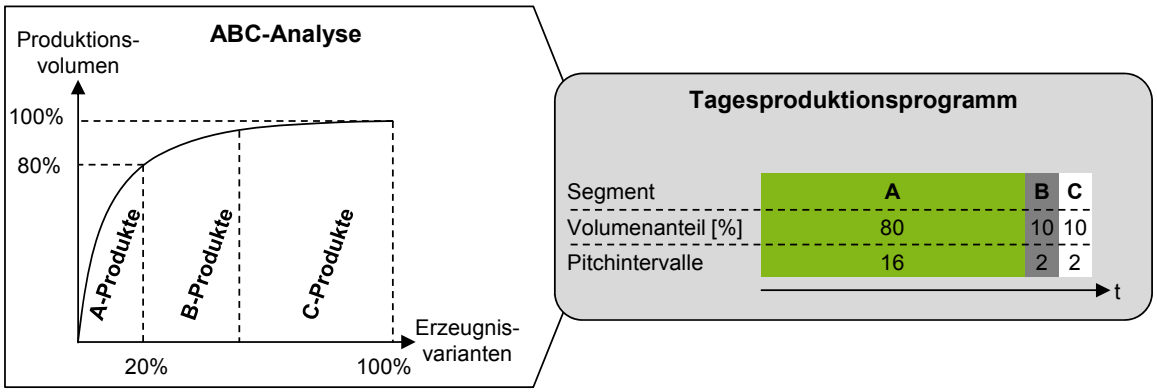


Abbildung 2.8: Einteilung des Tagesproduktionsprogrammes in Pitchintervalle (in Anlehnung an Smalley 2005 , S. 37)

Die von Takeda (2004) beschriebene Vorgehensweise zur Produktionsnivellierung orientiert sich an der bereits angeführten Differenzierung zwischen Nivellierung und Glättung (vgl. Abbildung 2.9). Betrachtet wird primär die Nivellierungsmustererstellung, wobei wiederum der letzte Bearbeitungsschritt im Wertstrom als Einsteuerungspunkt genutzt wird. Im ersten Schritt wird das Produktionsvolumen basierend auf einer volumenbezogenen Segmentierung des Produktspektrums gleichmäßig in erzeugnisbezogene Tagesmengen aufgeteilt, was als Nivellierung bezeichnet wird (Takeda 2004, S. 46ff). Es wird somit ein EPEI-Wert von einem Tag bzw. acht Stunden realisiert.

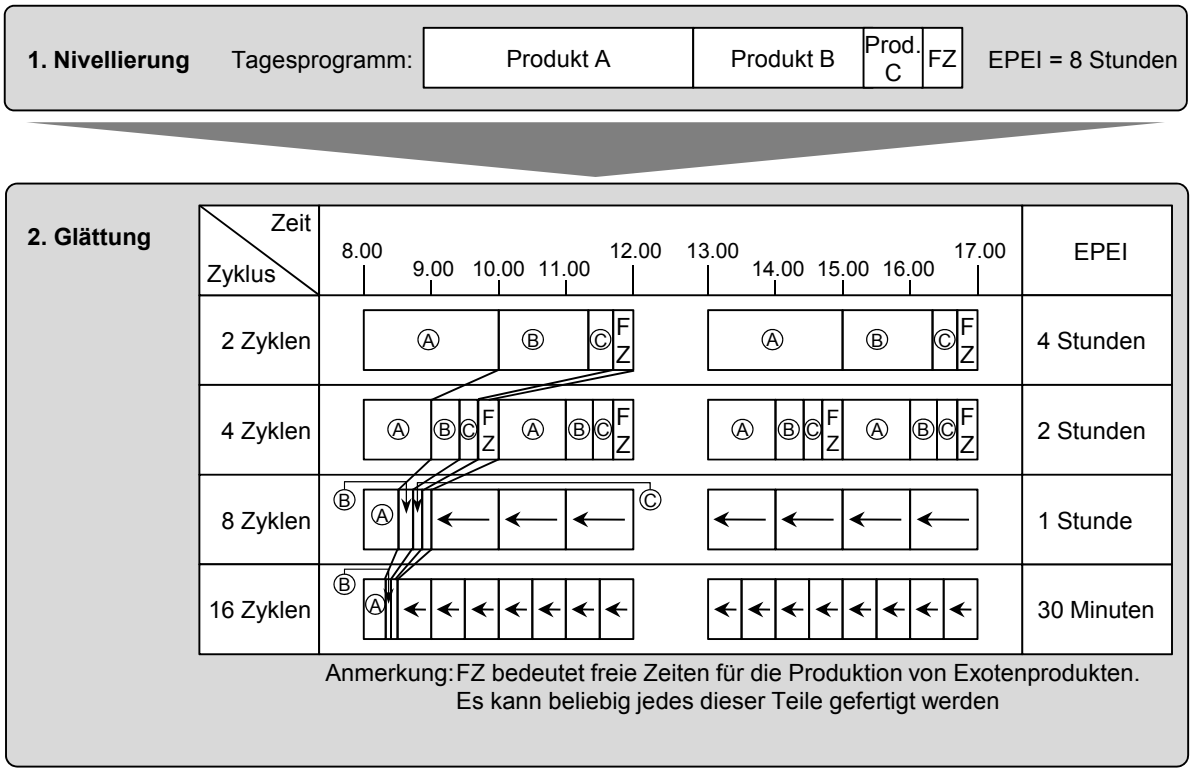


Abbildung 2.9: Nivellierung und Glättung des Produktionsprogramms (in Anlehnung an Takeda 2004, S. 49)

Im zweiten Schritt erfolgt die als Glättung bezeichnete Unterteilung der Tagesmengen in Teilmengen, die wiederum unterteilt werden, wodurch sich der EPEI-Wert entsprechend reduziert (Takeda 2004, S. 48ff). Ziel ist dabei die Realisierung kleinstmöglicher Lose und die Produktion eines jeden Produktes im Rahmen des durch den Verkauf vorgegebenen Zeitrahmens

(Takeda 2004, S. 51f). Die Möglichkeiten zur Reduzierung des EPEI-Wertes werden begrenzt durch die verfügbare Rüstkapazität einerseits und die jeweiligen Umrüstzeiten andererseits (Takeda 2004, S. 46ff).

Wuthnow (2010) beschreibt eine Vorgehensweise zur Nivellierung mit speziellem Fokus auf die Anwendung in der Automobilsteuergerätefertigung. Wesentliche Restriktionen, die dabei zu Grunde gelegt werden, sind die Unveränderbarkeit des Wertstromlayouts, der Betriebsmittel und Prozessabläufe und somit auch der Ressourcen, der Rüst- und Zykluszeiten, der Verfügbarkeiten sowie der Abrufmengen und -zeitpunkte (Wuthnow 2010, S. 95). Die Vorgehensweise zur Nivellierung gliedert sich in Konzept-, Planungs- und Umsetzungsphase (vgl. Abbildung 2.10).

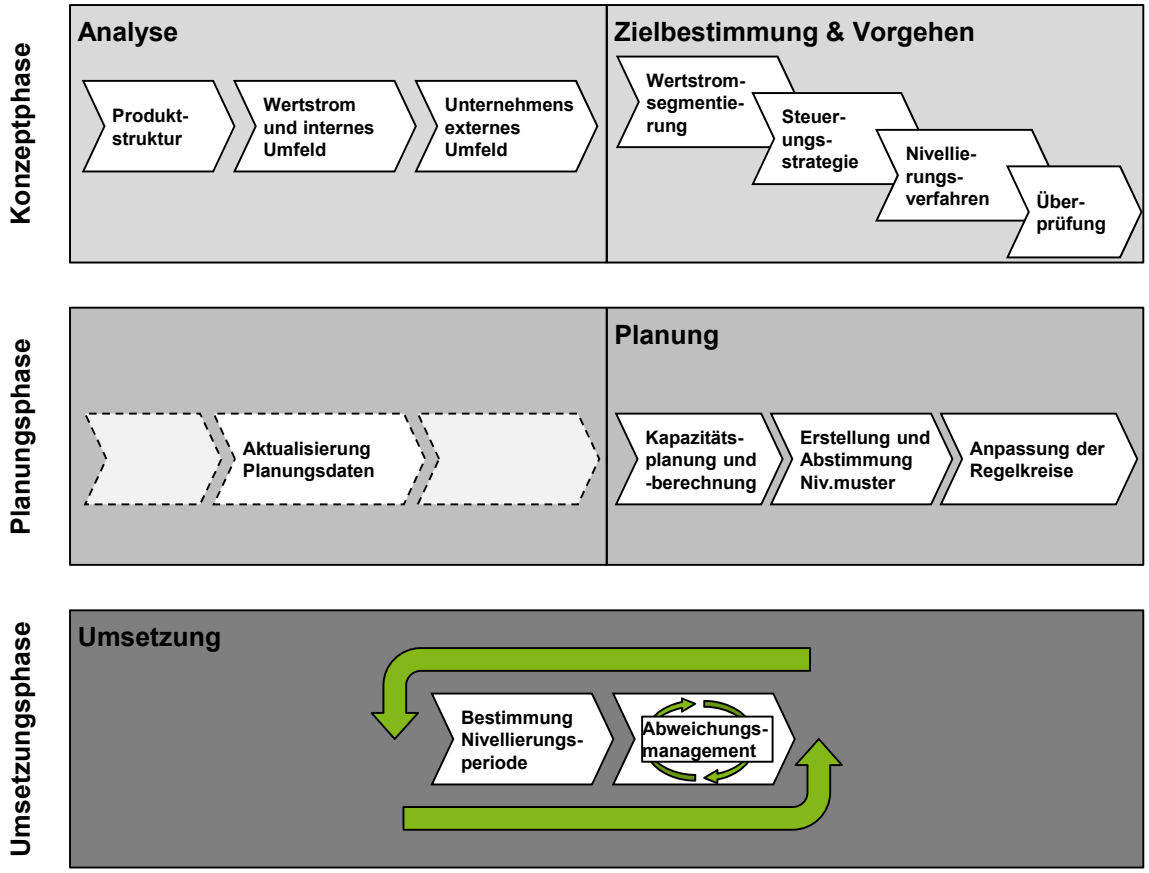


Abbildung 2.10: Methodik zur Nivellierung von Wertströmen in der Automobilsteuergerätefertigung (Wuthnow 2010. S. 97)

Die Konzeptphase beinhaltet die Analyse der Produktstruktur, des betrachteten Wertstroms sowie relevanter unternehmensinterner und -externer Einflussgrößen (Wuthnow 2010, S. 98ff). Aufbauend auf den Analyseergebnissen werden in der Konzeptphase die Notwendigkeit einer Wertstromsegmentierung geprüft und Zielzustände für die Steuerung sowie das Nivellierungsverfahren spezifiziert (Wuthnow 2010, S. 104ff). Dabei werden vier z. T. auf den Anwendungskontext abgestimmte und stufenartig aufeinander aufbauende Nivellierungsverfahren unterschieden (Wuthnow 2010, S. 76ff).

In der Planungsphase wird eine Kapazitätsplanung und -berechnung durchgeführt, mit Hilfe derer das Nivellierungsmuster erstellt wird (Wuthnow 2010, S. 113ff). Die Planungsphase beinhaltet ebenfalls die Aktualisierung von Planungsdaten und die Anpassung von

Verfahrensparametern (ebd.). Die Kapazitätsberechnung liefert als Ergebnis die verfügbare Rüstzeit (bspw. pro Tag), aus der sich wiederum die Anzahl möglicher Rüstvorgänge ergeben (Wuthnow 2010, S. 116f). Diese wird zusammen mit den Ergebnissen einer ABC-/XYZ-Analyse (d. h. einer Segmentierung des Produktspektrums hinsichtlich Volumen und Verbrauchsstetigkeit) für die Mustererstellung genutzt (Wuthnow 2010, S. 117ff). Wesentliche Schritte sind hierbei die Bestimmung von EPEI-Wert und Losgrößen und die Festlegung der Reihenfolge der Erzeugnisse im Nivellierungsmuster (ebd.).

Im Rahmen der Umsetzungsphase wird zunächst die sog. Nivellierungsperiode festgelegt (Wuthnow 2010, S. 122f). Diese bezeichnet den Zeitraum, für den das Nivellierungsmuster fixiert und operativ umgesetzt wird (ebd.). Parallel zum Betrieb werden im Rahmen des sog. Abweichungsmanagements Abweichungen vom geplanten Nivellierungsmuster erfasst und zur kontinuierlichen Verbesserung genutzt (Wuthnow 2010, S. 124ff).

Zusammenfassend ist wie eingangs erwähnt festzustellen, dass sich sämtliche o. a. Vorgehensweisen zur Nivellierung auf den Anwendungsbereich der Großserienfertigung fokussieren. Eine entsprechende Übertragung für die Anwendung in der Kleinserienfertigung wird nicht beschrieben.

2.3 Gruppentechnologie und Produktfamilienbildung

Im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung wird das Ziel verfolgt, gruppentechnologische Verfahren zur Bildung von Produktfamilien zu nutzen, die zur Produktionsnivellierung verwendet werden. Der Begriff der Gruppentechnologie (engl. Group Technology) bezeichnet nach Shunk (1985, S. 74) einen Ansatz, um Objekte wie Teile, Prozesse, Betriebsmittel o. ä. entsprechend ihrer Ähnlichkeit in Gruppen zusammenzufassen und diese Gruppen im Rahmen der Organisation der Objekte zur Steigerung von Effizienz und Effektivität zu nutzen.

Als Ursprung der Gruppentechnologie sind die Arbeiten von Sokolowski (1938) in den 1930er Jahren anzuführen. Diese behandeln die Entwicklung einer Methodik zur Typisierung technischer Vorgänge auf der Basis einer Werkstückklassifizierung anhand funktioneller, gestaltorientierter und technologischer Kriterien (ebd.). Dieser Ansatz wird in den 1960er Jahren fortgeführt von Mitrofanow (1960) und Opitz (1968), die ebenfalls Klassifizierungssysteme beschreiben. Im Fokus der frühen Phase der Gruppentechnologie steht die Rationalisierung planerischer Tätigkeiten im Bereich der technischen Auftragsabwicklung (Deuse 1998, S. 5). In der Folgezeit entwickelt sich ein weiterer Anwendungsschwerpunkt der Gruppentechnologie im Bereich der Arbeitssystemgestaltung und Fabrikplanung. Hier werden gruppentechnologische Ansätze zur Fertigungsstrukturierung genutzt, d. h. zur örtlichen Zusammenfassung unterschiedlicher Bearbeitungsmaschinen sowie manueller Arbeitssysteme zur Bearbeitung gleicher bzw. ähnlicher Erzeugnisse (Kettner, Schmidt, Greim 2010, S.219). Aus den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der Gruppentechnologie leitet Künzel (1996, S. 20) folgende Hauptaufgaben ab:

- Finden ähnlicher Bauteile bzw. ähnlicher Fertigungsverfahren basierend auf Merkmalen fertigungstechnischer, geometrischer oder funktionaler Art für Strukturierungsmaßnahmen in betrieblichen Bereichen

- Identifizierung und Standardisierung gleicher bzw. ähnlicher Prozesse und Abläufe im Bereich der Planung und Konstruktion
- Nutzung von Ähnlichkeitsinformationen zur Lösung von wiederholt auftauchenden Problemstellungen

Das Strukturieren eines Werkstückspektrums nach anwendungsbezogenen Kriterien, auch bezeichnet als Teilefamilienbildung, ist dem zuerst genannten Aufgabenbereich zuzuordnen (Deuse 1998, S. 6). Eine Teilefamilie stellt dabei eine hinsichtlich einer definierten Eigenschaft gleiche bzw. ähnliche Gruppe von Teilen dar (Martin 1989, S. 20). Wie Abbildung 2.11 zeigt, kann der Begriff der Teilefamilie unter Berücksichtigung der Art der zur Ähnlichkeitsfindung genutzten Eigenschaft genauer spezifiziert werden. Im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung wird ein spezieller Fall der Teilefamilienbildung betrachtet, nämlich die Bildung von Produktfamilien zu Nivellierungszwecken. Da hierzu primär fertigungsbezogene Kriterien zum Einsatz kommen (vgl. Abschnitt 3.2.2), handelt es sich folglich um eine spezielle Art von Fertigungsfamilien.

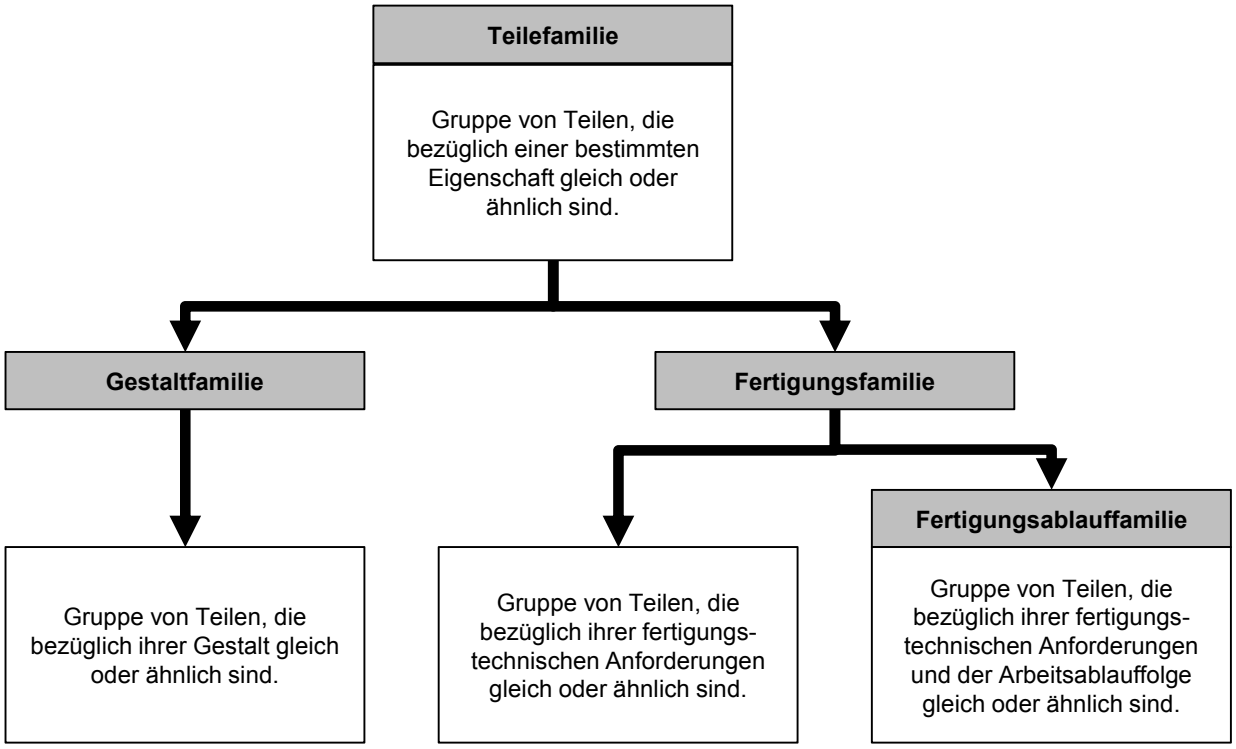


Abbildung 2.11: Definitionen zum Begriffsfeld der Teilefamilie (Martin 1989, S. 20)

Die zur Teilefamilienbildung eingesetzten Methoden lassen sich nach Deuse (1998, S. 7) folgenden Verfahrensgruppen zuordnen:

- Klassifizierungssysteme
- Fertigungsanalytische Verfahren
- Clusteranalytische Verfahren
- Methoden der Künstlichen Intelligenz

In den nachfolgenden Abschnitten werden die o. a. Verfahrensgruppen beschrieben und hinsichtlich ihrer Eignung zur Bildung von Produktfamilien zu Nivellierungszwecken bewertet.

2.3.1 Klassifizierungssysteme

Die bereits erwähnten Arbeiten von Sokolowski (1938) und Mitrofanow (1960) stellen den Ursprung der Entwicklung von Klassifizierungssystemen dar. Die von Sokolowski entwickelte Methodik dient der Typisierung technischer Vorgänge und basiert auf einer Strukturierung des Werkstückspektrums anhand funktionaler, gestaltorientierter und technologischer Merkmale (Sokolowski 1938). Das von Mitrofanow entwickelte formorientierte Klassifizierungsschema baut auf dem Klassifizierungssystem Sokolowskis auf (Mitrofanow 1960).

Das am weitesten verbreitete Klassifizierungssystem ist das in den 1960er Jahren von Opitz (1968) entwickelte werkstückbeschreibende Klassifizierungssystem, auch bezeichnet als Opitz-Schlüssel. Dieser stellt sich als neunstelliger Klassifizierungsschlüssel dar und setzt sich, wie Abbildung 2.12 zu entnehmen ist, aus einem fünfstelligen Formenschlüssel zur Beschreibung der Fertigteilgestalt und einem vierteiligen Ergänzungsschlüssel zusammen. Letzterer kann bspw. zur Beschreibung der Werkstoffeigenschaften oder der Rohteilgestalt genutzt werden (Deuse 1998, S. 8). Der Opitz-Schlüssel wurde für das Auffinden und die Wiederverwendung ähnlicher Konstruktions- und Fertigungsunterlagen entwickelt, wobei ebenfalls eine Anwendung für strukturplanerische Aufgaben möglich ist (ebd.).

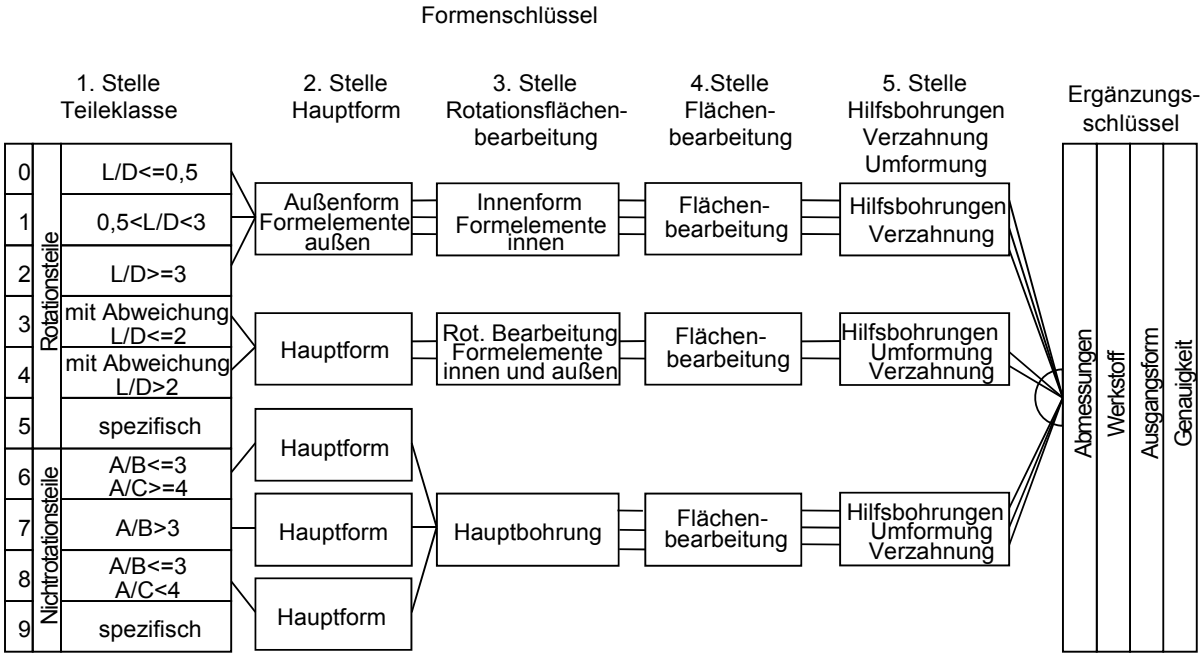


Abbildung 2.12: Werkstückbeschreibendes Klassifizierungssystem (Opitz 1968)

Einige weitere teilweise für einen spezifischen Anwendungskontext entwickelte Klassifizierungssysteme sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Tabelle 2.2: Zusammenfassung weiterer Klassifizierungssysteme (basierend auf Deuse 1998, S. 8)

Bezeichnung	Kurzbeschreibung	Quelle
Fertigungsbeschreibendes Klassifizierungssystem	Auf fertigungsspezifische Merkmale fokussierter Schlüssel für die Fertigungsverfahren Drehen, Bohren, Fräsen, Schleifen	(Moll, Lueg 1973)
Sachmerkmal-Leiste	Klassifizierungssystem für genormte und nichtgenormte materielle und immaterielle Gegenstände	(DIN 1992)
TMK-System	Werkstückverschlüsselung zur systematischen Wiederverwendung von Fertigungsunterlagen für die Fräsbearbeitung	(Heinz, Hebbeler 1990)
Tuffentsammer/Lutz-Schlüssel	Achtstelliger Schlüssel zur Klassifizierung von Drehbearbeitungsvorgängen	(Lutz 1967)
ZAFO-Schlüssel	universeller 26-stelliger Schlüssel mit je 10 Stellen für Haupt- und Nebenformelemente und 6 Stellen für unternehmensspezifische Merkmale	(Zimmermann 1967)

Allgemein weisen Klassifizierungssysteme nur eine sehr eingeschränkte Flexibilität hinsichtlich variierender Klassifizierungsmerkmale auf (Deuse 1998, S. 9; Künzel 1996, S. 28). Hinzu kommt, dass i. d. R. ein hoher Aufwand für die Datenaufnahme und die Verschlüsselung der Klassifizierungsmerkmale erforderlich ist (ebd.). Aus diesen Gründen eignet sich die Verfahrensgruppe der Klassifizierungssysteme nur bedingt für die im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung betrachtete Produktfamilienbildung zu Nivellierungszwecken.

2.3.2 Fertigungsanalytische Verfahren

Als Vertreter der Gruppe der fertigungsanalytischen Verfahren sind einerseits Methoden zur Teileflussanalyse sowie andererseits Methoden zur Komplettbearbeitungsanalyse anzuführen. Die Methoden zur Teileflussanalyse, auch bezeichnet als Fertigungsablaufanalyse, nutzen zur Teilefamilienbildung die Häufigkeit der auftretenden Fertigungsabläufe (Deuse 1998, S. 10; Göttker 1990, S. 24). Beispiele für derartige Methoden sind die sog. Production Flow Analysis (PFA) nach Burbidge (1971), deren Erweiterung, die von El-Essawy (1971) entwickelte Component Flow Analysis (CFA), oder das Verfahren der Partialablaufgruppen nach Heinz, Burkhardt (1985). In der Praxis haben sich die Methoden zur Teileflussanalyse auf Grund der ausschließlichen Fokussierung auf Arbeitsvorgangsfolgebeziehungen nicht durchgesetzt (Deuse 1998, S. 11, Künzel 1996, S. 30). Diese Fokussierung spricht auch gegen die Verwendung von Methoden der Teileflussanalyse zur Produktfamilienbildung zu Nivellierungszwecken, da die Arbeitsvorgangsfolge nicht das einzig mögliche Gruppierungskriterium darstellt (vgl. Abschnitt 3.2.2). Aus diesem Grund werden diese Methoden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

Die Methoden der Komplettbearbeitungsanalyse nutzen zur Strukturfindung sog. Werkstück-Betriebsmittel-Matrizen, d. h. eine matrizenförmige Zuordnung von Werkstücken zu Betriebsmitteln. Diese werden mit Hilfe unterschiedlicher Algorithmen sortiert, um möglichst disjunkte Teilmatrizen unter dem Kriterium übereinstimmender Betriebsmittel zu generieren und somit eine blockdiagonale Sortierung der Werkstück-Betriebsmittel-Matrix zu erzeugen (Deuse 1998, S. 11). Die Basis eines Großteils der hierzu verwendeten Algorithmen stellen die Methoden der Rangordnungsbestimmung und der linearen Programmierung dar (Künzel 1996, S. 33). Als Vertreter derartiger Algorithmen sind z. B. das Rank Order Clustering (ROC) (King,

Nakornchai 1982), der Direct Clustering Algorithm (DCA) (Chan, Milner 1982 ; Maßberg, Künzel 1996), der sich an den im nachfolgenden Abschnitt beschriebenen Verfahren der multivarianten Clusteranalyse orientierende Ansatz von McCormick, Schweitzer, White (1972) oder der auf einem genetischen Sortieralgorithmus basierende Ansatz von Hon, Chi (1994).

		Werkstück				
		1	2	3	4	5
Betriebsmittel	I	1	0	0	0	1
	II	0	1	1	0	0
	III	0	1	0	0	0
	IV	1	0	0	1	1
	V	0	1	1	0	0

		Werkstück				
		1	5	4	2	3
Betriebsmittel	IV	1	1	1	0	0
	I	1	1	0	0	0
	II	0	0	0	1	1
	V	0	0	0	1	1
	III	0	0	0	1	0

Abbildung 2.13: Blockdiagonale Sortierung einer Werkstückbetriebsmittel-Matrix (in Anlehnung an Deuse 1998, S. 11)

Allgemein sind die Verfahren der Komplettbearbeitungsanalyse nur sehr eingeschränkt zur Strukturierung großer Werkstückspektren geeignet (Auch 1989, S. 25) und sind daher für die praktische Teilefamilienbildung, insbesondere verglichen mit clusteranalytischen Verfahren, von untergeordneter Bedeutung (Deuse 1998, S. 12). Hinzu kommt, dass die Verfahren der Komplettbearbeitungsanalyse die Bildung einer blockdiagonalen Matrix und einer hinreichend guten Strukturierung nicht garantieren können und sich nur für binär skalierte Werkstückmerkmale eignen (Deuse 1998, S. 12; Künzel 1996, S. 35). Aus diesen Gründen ist auch diese Verfahrensgruppe für die im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung betrachtete Problemstellung der Bildung von Produktfamilien zu Nivellierungszwecken als nicht geeignet anzusehen.

2.3.3 Clusteranalytische Verfahren

Die Clusteranalytischen Verfahren, nachfolgend auch als Clusteringverfahren bezeichnet, werden den multivariaten statistischen Analysemethoden zugeordnet und zählen zu den am häufigsten zur Teilefamilienbildung eingesetzten Verfahren (Deuse 1998, S. 12). Allgemein werden die Methoden der multivariaten Statistik für die Analyse von Objekten genutzt, die durch n-dimensionale Merkmalsausprägungen beschrieben werden (ebd.). Dabei werden simultan die Beziehungen zwischen mehr als zwei Variablen berücksichtigt, was die multivariaten von uni- und bivariaten Verfahren unterscheidet (Steinhausen, Langer 1977, S. 25).

Die multivariaten Verfahren werden unterteilt in strukturen-prüfende und strukturen-entdeckende Verfahren. Die strukturen-prüfenden Verfahren werden primär eingesetzt, um Zusammenhänge zwischen Variablen zu prüfen (Backhaus u. a. 2006, S. 8). Zu den strukturen-prüfenden Verfahren zählen die Regressionsanalyse, die Varianzanalyse, die Diskriminanzanalyse, die Kontingenzanalyse, die Logistische Regression sowie das Conjoint Measurement (Backhaus u. a. 2006, S. 8ff). Strukturen-entdeckende Verfahren werden hingegen genutzt, um Zusammenhänge zwischen Variablen oder Objekten zu entdecken (Backhaus u. a. 2006, S. 12). Den strukturen-entdeckenden Verfahren werden neben der

Clusteranalyse auch die Faktorenanalyse, die Multidimensionale Skalierung, die Korrespondenzanalyse und die in Abschnitt 2.3.4 betrachteten Künstlichen Neuronalen Netze zugeordnet (Backhaus u. a. 2006, S. 12ff).

Sowohl die Faktorenanalyse als auch die Multidimensionale Skalierung und die Korrespondenzanalyse zielen primär auf die Reduktion bzw. Bündelung von Variablen und die Visualisierung komplexer Daten ab (Backhaus u. a. 2006, S. 12f). Clusteranalysen werden hingegen eingesetzt, um Objekte zu Gruppen zusammenzufassen (auch bezeichnet als Klassen oder Cluster) (Backhaus u. a. 2006, S. 12). Innerhalb der Gruppen wird dabei eine möglichst hohe Ähnlichkeit der Objekte (Homogenität) und zwischen den Gruppen eine möglichst große Unähnlichkeit (Heterogenität) angestrebt (ebd.).

Die Clusteranalyseverfahren werden, wie Abbildung 2.14 zu entnehmen ist, entsprechend ihrer Vorgehensweise beim Gruppierungsprozess untergliedert. Da bei produktionstechnischen Problemstellungen vorwiegend hierarchische und partitionierende Verfahrensderivate zum Einsatz kommen (vgl. Deuse 1998, S. 12; Künzel 1996, S. 43), beschränken sich die nachfolgenden Ausführungen auf diese beiden Verfahrensklassen.

Die Klasse der hierarchischen Clusteringverfahren wird unterteilt in agglomerative und divisive Verfahren. Hierarchisch-agglomerative Verfahren gehen von der feinsten Partition aus, d. h. alle Untersuchungsobjekte bilden eine eigene Gruppe, und fusionieren diese schrittweise bis die gröbste Partition erreicht ist, d. h. alle Untersuchungsobjekte befinden sich in einer Gruppe (Backhaus u.a. 2006, S. 511). Im Gegensatz dazu beschreiten divisive Verfahren den umgekehrten Weg, d. h. ausgehend von der gröbsten Partition erfolgt eine schrittweise Aufteilung bis zum Erreichen der feinsten Partition (ebd.). Im direkten Vergleich kommt agglomerativen Verfahren in der Praxis die größte und divisiven Verfahren hingegen eine vergleichsweise geringe Bedeutung zu (Backhaus u. a. 2006, S. 511).

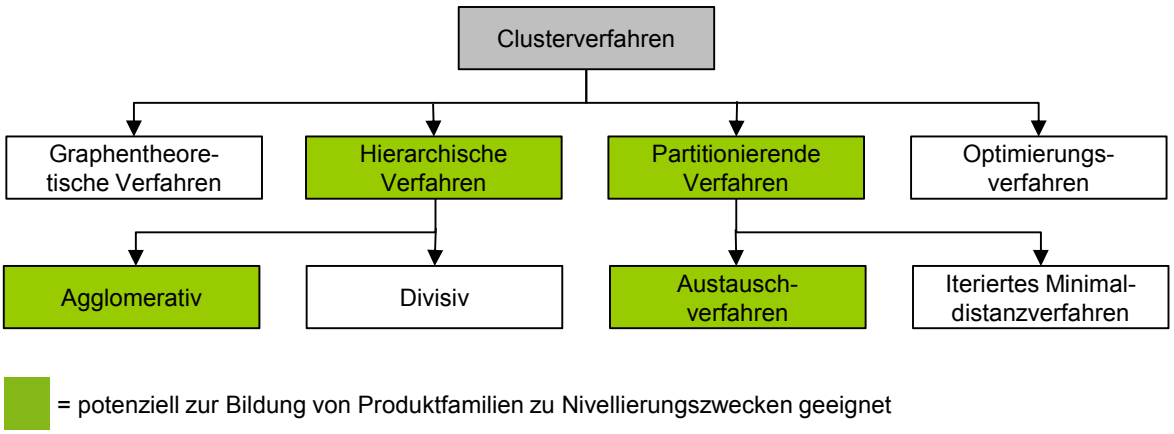


Abbildung 2.14: Gliederung der Clusteranalyseverfahren entsprechend ihrer Gruppierungsweise (in Anlehnung an Backhaus u. a. 2006, S. 511)

Partitionierende Verfahren setzen auf einer gegebenen Gruppierung der Objekte auf und ordnen die einzelnen Objekte zwischen den Gruppen so lange um, bis für eine gegebene Zielfunktion ein Optimum erreicht wird (Backhaus u. a. 2006, S. 511). Die hierzu eingesetzten Verfahren unterscheiden sich zum einen in der Art der Messung der Gruppierungs-

verbesserung und zum anderen darin, wie die Objekte zwischen den Gruppen ausgetauscht werden (Backhaus u. a. 2006, S. 512).

Wie eingangs erwähnt zählen die Verfahren der Clusteranalyse zu den Datenanalyseverfahren, die zu Zwecken der Teilefamilienbildung am häufigsten eingesetzt werden. Den Grund hierfür sieht Sossna (2000, S. 26) vor allem in der langjährigen Anwendung von Clusteranalyseverfahren in anderen Wissenschaftsbereichen und den dabei gesammelten Erfahrungen (ebd.). Anwendungen von Clusteranalyseverfahren zur Teilefamilienbildung finden sich bspw. bei Deuse (1998), Engel (1997) oder Künzel (1996).

Obwohl sich die Clusteranalyseverfahren in der praktischen Anwendung zur Teilefamilienbildung bewährt haben, ist vor allem die oftmals schwierige Beurteilung der Strukturlösungen als verfahrensbedingter Nachteil anzuführen (Künzel 1996, S. 42). Trotz dieses Nachteils erscheint die Clusteranalyse als potenziell geeignetes Verfahren zur Bildung von Produktfamilien zu Nivellierungszwecken, was sich im Rahmen von Vorstudien bestätigt hat (vgl. Deuse, Birkmann, Harms 2007).

2.3.4 Methoden der Künstlichen Intelligenz

Neben den im vorangegangenen Abschnitt angeführten Clusteranalyseverfahren ist es auch möglich, wissensbasierte Ansätze und Künstliche Neuronale Netze, beides Methoden der Künstlichen Intelligenz, zur Teilefamilienbildung zu nutzen (Deuse 1998, S. 17). Wissensbasierte Ansätze zur Teilefamilienbildung werden beispielsweise von Lu (1989), Ham, Goncalves, Han (1988), Doege, Partmann (1992) sowie Geiger, Greska (1992) verwendet. Ein verfahrensbedingter Nachteil wissensbasierter Ansätze liegt in der Komplexität der Implementierung des umfangreichen, für die Teilefamilienbildung erforderlichen Klassifikationswissens, weshalb sich derartige Ansätze vorwiegend für die Anwendung in technologisch stark eingeschränkten Bereichen eignen (Künzel 1996, S. 45). Aus diesem Grund erscheinen wissensbasierte Ansätze für die im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung angestrebte Produktfamilienbildung nicht geeignet und werden daher im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Abgesehen von wissensbasierten Ansätzen eignen sich auch Künstliche Neuronale Netzte zur Bildung von Teilefamilien. Diese orientieren sich an der Funktionsweise biologischer Informationsverarbeitungsprozesse im Gehirn und verwenden künstliche, in Schichten organisierte Neuronen (Nervenzellen), wodurch sie in der Lage sind, komplexe und hochgradig nichtlineare Zusammenhänge abzubilden (Backhaus u. a. 2006, S. 14). Zum Erkennen dieser Zusammenhänge ist eine sog. Trainingsphase, d. h. eine Lernphase erforderlich, in der Daten in das Netz geladen werden und das Netz konfiguriert wird (ebd.). Unterschieden wird dabei zwischen überwachtem Lernen, d. h. die richtigen Ergebnisse sind bekannt und sollen durch das Netz reproduziert werden, und unüberwachtem Lernen, d. h. die richtigen Ergebnisse sind nicht bekannt und es soll ein konsistentes Verarbeitungsmuster erzeugt werden (ebd.).

Ansätze zur Teilefamilienbildung mit Hilfe Künstlicher Neuronaler Netze werden bspw. von Deuse (1998), Kaparthi, Suresh (1992) und Liao, Lee (1994) verwendet. In der praktischen Anwendung setzen sich Künstliche Neuronale Netze nur langsam durch, was nach Sossna (2000, S. 39) vor allem mit der mangelnden Erklärungsfähigkeit eines parametrisierten Netzes

zusammenhängt. Trotzdem lassen die Eigenschaften Künstlicher Neuronaler Netze auf ein hohes Anwendungspotenzial im Bereich der Produktfamilienbildung zu Nivellierungszwecken schließen.

2.4 Konkretisierung der Problemstellung und Ableitung des Forschungsbedarfs

Aus den vorhergehenden Ausführungen wird zum einen deutlich, welche Potenziale sich durch eine nivellierte Fertigung einerseits hinsichtlich konkret messbarer Zielgrößen aber andererseits auch hinsichtlich nur indirekt oder nicht messbarer Größen ergeben. Zum anderen wird offensichtlich, dass sich bestehende, in der Literatur beschriebene Nivellierungsansätze primär auf das Anwendungsgebiet der Großserie fokussieren. Eine Umsetzung derartiger konventioneller Ansätze ist in der variantenreichen Kleinserienfertigung nicht ohne weiteres möglich. Der Grund hierfür liegt darin, dass in der Kleinserienfertigung wesentliche Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung konventioneller Nivellierungskonzepte nicht gegeben sind. Diesbezüglich anzuführen ist insbesondere die in der Kleinserienfertigung i. d. R. vorzufindende hohe Variantenvielfalt, die insbesondere bei der Produktionsplanung und somit auch bei der Produktionsnivellierung eine zentrale Herausforderung darstellt. Dies wird u. a. auch durch die Ergebnisse der zuvor bereits erwähnten empirischen Erhebung bestätigt (vgl. Abbildung 2.15).

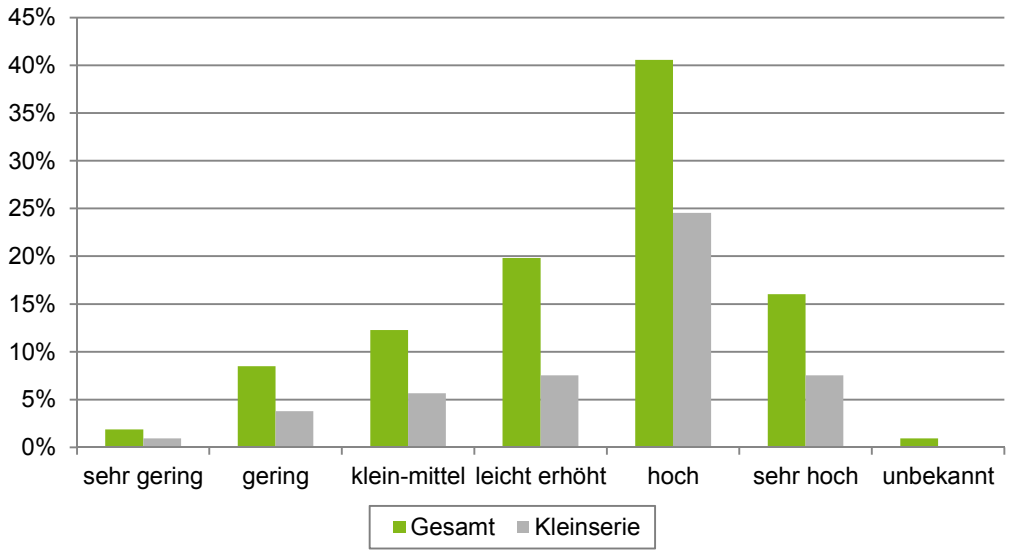


Abbildung 2.15: Beurteilung des Grades, zu dem die Variantenvielfalt Probleme bei der PPS verursacht (Ergebnis einer Online-Umfrage, an der 106 Unternehmensvertreter aus verschiedenen Branchen teilgenommen haben)

Um die Potenziale der Nivellierung auch in der Kleinserie realisieren zu können, bedarf es daher einer systematischen Vorgehensweise, die die Übertragung bereits bekannter und beschriebener Vorgehensweisen zur Nivellierung in der Großserie auf das Anwendungsgebiet der Kleinserienfertigung beschreibt. Zu diesem Zweck wird im Folgenden der Ansatz verfolgt, das variantenreiche Produktspektrum anhand von Fertigungsähnlichkeiten in eine handhabbare Anzahl von Produktfamilien zu gruppieren. Hierzu eignen sich grundsätzlich die u. a. aus gruppentechnologischen Anwendungen bekannten Methoden der Clusteranalyse und Künstlicher Neuronaler Netze.

Basierend auf den anhand von Fertigungsähnlichkeiten gebildeten Produktfamilien wird ein familienbasiertes Nivellierungsmuster generiert. Ein derartiges Muster zeichnet sich dadurch aus, dass innerhalb eines definierten Intervalls, Zeitfenster für die Produktion sämtlicher Produktfamilien definiert werden. Analog zur konventionellen Nivellierung wird dieses Intervall als EFEI-Wert bezeichnet (Every Family Every Interval). Entsprechend des auf diese Weise spezifizierten Musters werden jeweils die Erzeugnisvarianten einer Produktfamilie gefertigt, die aktuell durch eine Kundenbestellung nachgefragt werden. Die Auflagenhöhe der Lose hängt demnach, wie in der Kleinserienfertigung üblich, von der kundenindividuellen Auftragsbestellmenge ab. Ist ein Zeitfenster beendet, wechselt die Fertigung zur Bearbeitung der nachfolgenden Familie.

3 Systematische Vorgehensweise zur Produktionsnivellierung in der variantenreichen Kleinserienfertigung

Aufbauend auf den im Stand der Technik dargestellten Vorgehensweisen zur Produktionsnivellierung im Bereich der Großserienfertigung wurde im Rahmen des IGF-Forschungsvorhabens eine entsprechende Vorgehensweise für die Kleinserienfertigung entwickelt. Die Vorgehensweise setzt sich auf Makroebene aus den vier in Abbildung 3.1 dargestellten Schritten zusammen. Bevor in den nachfolgenden Unterkapiteln die einzelnen Schritte im Detail, d. h. auf Mikroebene, beschrieben werden, sind an dieser Stelle wesentliche Modellannahmen anzuführen, die der entwickelten Vorgehensweise zu Grunde liegen.

Abbildung 3.1: Systematische Vorgehensweise zur Nivellierung in der Kleinserie

Die erste wesentliche Modellannahme besteht darin, dass es möglich ist, das betrachtete Produktspektrum in disjunkte Produktfamilien zu gruppieren. Hierbei wird jede Erzeugnisvariante eindeutig einer Produktfamilie zugeordnet. Des Weiteren erfolgt die Zuordnung nach fertigungsbezogenen Kriterien. Hierdurch wird gewährleistet, dass innerhalb der Produktfamilien nur minimale bzw. idealerweise keine Rüstzeiten anfallen. Erzeugnisvarianten einer Produktfamilie lassen sich somit in nahezu beliebiger Reihenfolge und mit lediglich minimalen Rüstzeiten nacheinander fertigen.

Darüber hinaus wird im Rahmen der entwickelten Vorgehensweise angenommen, dass die Nivellierung an exakt einer Stelle im Wertstrom ansetzt. Dies bedeutet, dass im betrachteten Wertstrom Fertigungsaufträge an einer definierten Stelle entsprechend des spezifizierten Nivellierungsmusters eingesteuert werden. Als derartiger Einsteuerungspunkt eignet sich bspw. ein Engpassprozess, der gleichzeitig als eine Art Schrittmacher für den Wertstrom

genutzt werden kann. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass dieser Einsteuerungspunkt durch einen Arbeitsplatz bzw. ein Aggregat repräsentiert wird, das von allen Aufträgen passiert wird. Es liegt somit ein sog. Einmaschinen-Problem vor (vgl. Hansmann 2006, S. 365).

Die angeführten Modellannahmen bilden eine zentrale Basis der nachfolgend beschriebenen Vorgehensweise zur Nivellierung in der variantenreichen Kleinserienfertigung. Sie dienen der Vereinfachung der Problemstellung und ermöglichen die Entwicklung eines allgemeinen Berechnungsmodells. Gleichzeitig ist bereits an dieser Stelle anzumerken, dass die Modellannahmen den Transfer der Forschungsergebnisse in die betriebliche Praxis nicht ausschließen. Dies wird bestätigt durch die Erkenntnisse aus der Erprobung und Erstanwendung der entwickelten Vorgehensweise, welche im weiteren Verlauf der Ausarbeitung beschrieben werden (vgl. Kapitel 5).

3.1 Analyse der Eingangsgrößen und Erstellung des Nivellierungsmodells

Im ersten Schritt der entwickelten Vorgehensweise zur Nivellierung in der Kleinserienfertigung werden relevante Eingangsgrößen analysiert. Hierzu erfolgt zunächst eine detaillierte Wertstromanalyse. Auf diese Weise werden Material- und Informationsflüsse im Ist-Zustand transparent abgebildet. Dies ermöglicht u. a. die Identifizierung von Engpässen im Wertstrom, die potenzielle Einsteuerungspunkte für die Produktionsnivellierung darstellen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Wertstromanalysemethodik zu nutzen, um einen Soll- bzw. Zielzustand zu entwickeln und zu beschreiben. Die Wertstromanalyse wird ggf. ergänzt durch eine Kundenabrufanalyse. Die Ergebnisse der Kundenabrufanalyse dienen als Eingabedaten, die im Rahmen der Nivellierungsmustererstellung genutzt werden.

Aufbauend auf den Analyseergebnissen wird das sog. Nivellierungsmodell spezifiziert. Dieses Modell dient dazu, wesentliche Zielgrößen für die Nivellierung zu konkretisieren. Das Nivellierungsmodell dient als Unterstützung, um diese Zielgrößen systematisch abzuleiten und auf im Anwendungskontext relevante Rahmenbedingungen abzustimmen. Derartige Rahmenbedingungen resultieren einerseits aus den Charakteristika der Kleinserienfertigung, andererseits aus dem jeweiligen Anwendungsfall. Sowohl Wertstrom- und Kundenabrufanalyse als auch die Spezifizierung des Nivellierungsmodells werden in den nachfolgenden Abschnitten im Detail beschrieben.

3.1.1 Wertstrom- und Kundenabrufanalyse

Die Wertstromanalysemethodik hat ihren Ursprung im Toyota Produktionssystem. Das Ziel der Wertstromanalyse ist zunächst die transparente und zusammenhängende Visualisierung von Material- und Informationsflüssen eines Wertstroms im Ist-Zustand (Rother, Shook 2000, S. 6ff). Die Wertstromanalysemethodik bedient sich dabei einer einfachen und weitestgehend standardisierten Symbolik. Grundlegende Symbole sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Aufbauend auf der Abbildung des Ist-Zustands eines Wertstroms kann die Wertstromanalysemethodik genutzt werden, um systematisch Schwachstellen zu erkennen und einen verbesserten Soll-Zustand zu entwickeln (Halmosi, Löffler, Vollmer 2005, S. 48; Rother, Shook 2000, S. 4). Letzteres wird auch als Wertstromdesign bezeichnet. Die Wertstromanalyse wurde für den

Einsatz in der Großserienfertigung und insbesondere für die Automobilindustrie konzipiert. Auf Grund ihrer hohen Transparenz und der verhältnismäßig einfachen Symbolik hat sich die Methodik jedoch branchenübergreifend auch abseits der Großserienfertigung als grundlegendes Kommunikations- und Geschäftsplanungswerkzeug sowie als Hilfsmittel zur Umsetzung von Veränderungsprozessen etabliert (Fimpel, Stender 2003, S. 610f; Rother, Shook 2000, S. 9).

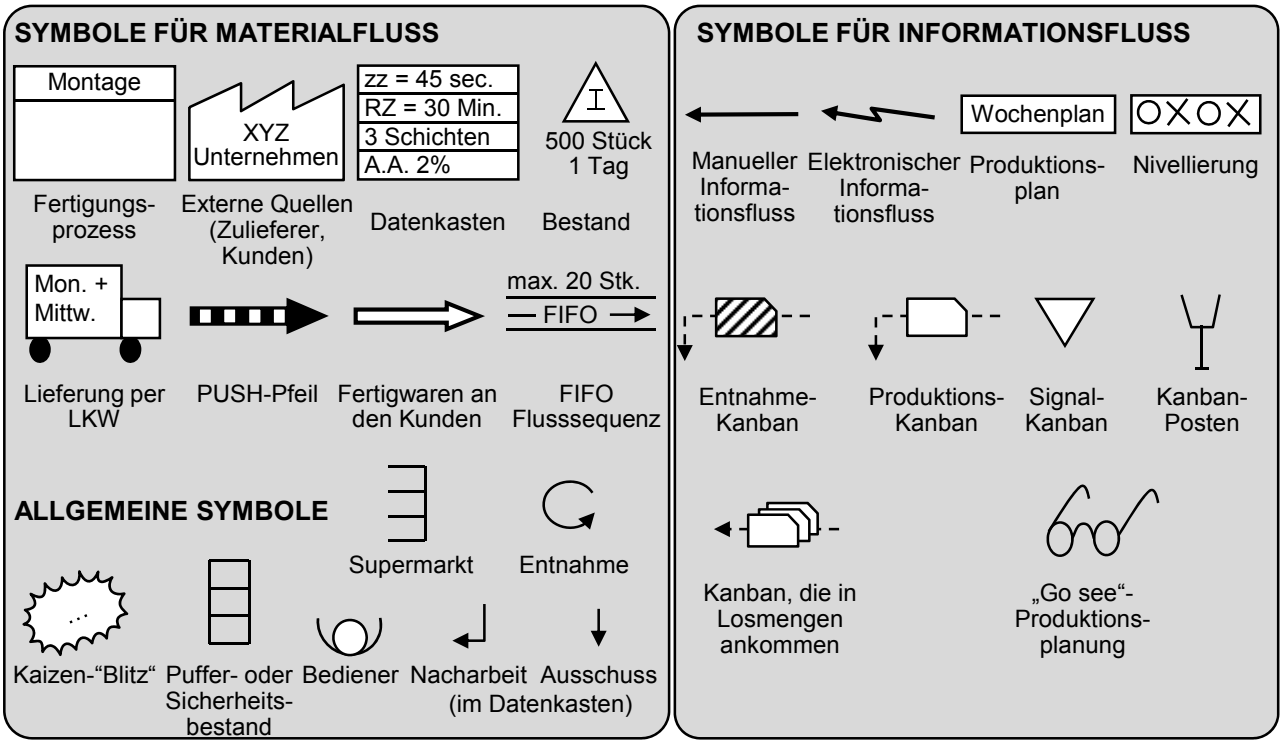


Abbildung 3.2: Grundlegende Symbole der Wertstromanalyse (in Anlehnung an Rother, Shook 2000)

Im Rahmen der hier beschriebenen Vorgehensweise zur Produktionsnivellierung kann die Wertstromanalysemethodik sowohl zur Abbildung und Analyse des betrachteten Ist-Wertstroms als auch zur Entwicklung und Beschreibung eines Soll-Wertstroms eingesetzt werden. Die Wertstromanalyse ermöglicht zudem die systematische Identifizierung von Engpässen im Wertstrom und kann somit als Unterstützung bei der Auswahl eines Einsteuerungspunktes für die Nivellierung genutzt werden.

Die Aufnahme des Ist-Wertstroms erfolgt, indem der Hauptzweig des Wertstroms in Gegenrichtung des Materialflusses, d. h. stromaufwärts, zurückverfolgt und i. d. R. mit Bleistift und Papier dokumentiert wird (Fimpel, Stender 2003, S. 611; Rother, Shook 2000, S. 4). Auf diese Weise wird der Wertstrom aus der Kundenperspektive erfasst. Den Ausgangspunkt der Analyse bilden somit die Prozesse, die den Kunden direkt betreffen und eine Schrittmacherfunktion für die im Wertstrom vorgelagerten Prozesse haben (Halmosi, Löffler, Vollmer 2005, S. 48, Rother, Shook 2000, S. 14). Zudem ergibt sich durch die Aufnahme aus der Kundenperspektive der Vorteil, dass auch im Fall eines sich flussaufwärts verzweigenden Wertstroms ein eindeutig definierter Startpunkt vorliegt (Erlach 2007, S. 35). Ergänzend zur Abbildung von Material- und Informationsflüssen werden im Rahmen der Ist-Aufnahme zentrale Daten und Kennzahlen des Ist-Wertstroms erhoben und ausgewertet. Wesentliche

dabei zu berücksichtigende Kenngrößen sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Darüber hinaus werden ggf. weitere relevante Daten ausgewertet wie Bestandsmengen bzw. Bestandsreichweiten, Liefermengen, Wiederbeschaffungszeiten, Los- und Behältergrößen, die Anzahl der Mitarbeiter je Wertstromelement bzw. je Prozessschritt, die Anzahl der Erzeugnisvarianten, die zur Verfügung stehende Arbeitszeit (unter Berücksichtigung des Schichtmodells und geplanter Stillstände bspw. durch Pausen) Ausschuss- und Nacharbeitsraten sowie Maschinenverfügbarkeiten (Erlach 2007, S. 59ff; Rother, Shook 2000, S. 19ff).

Tabelle 3.1: Wesentliche im Rahmen der Wertstromanalyse verwendete Kennzahlen (basierend auf Erlach 2007, S. 59ff; Rother, Shook 2000, S. 19ff)

Kennzahl	Definition
Zykluszeit	Zeitintervall (üblicherweise gemessen in Sekunden) zwischen der Fertigstellung eines Teils und der Fertigstellung des nächsten Teils am betrachteten Prozess
Rüstzeit	Zeitintervall, in dem ein Betriebsmittel auf Grund eines Wechsels von Vorrichtungen, Werkzeugen oder Materialien für eine neue Teilevariante nicht für die Bearbeitung zur Verfügung steht (gemessen vom letzten Gutteil der vorhergehenden bis zum ersten Gutteil der folgenden Variante)
Wertschöpfungszeit	Zeitanteil für wertschöpfende Tätigkeiten
Durchlaufzeit	Zeit, die ein Produkt benötigt, um einen Prozess oder einen Wertstrom vollständig zu durchlaufen
EPEI-Wert (Every Part Every Interval)	Zeitraum der benötigt wird, um alle Varianten einmal zu fertigen (unter Berücksichtigung der Bearbeitungszeiten, der Losgrößen, der Rüstzeiten sowie der zur Verfügung stehenden Arbeitszeit)

Bei der konventionellen Wertstromanalyse werden Daten im Zuge einer Momentaufnahme erhoben (Erlach 2007, S. 37; Rother, Shook 2000, S. 14). Allerdings zeigt die praktische Anwendung, dass es sich insbesondere beim Einsatz der Wertstromanalyse abseits der Großserie als zielführender erweist, Daten über einen längeren Zeitraum zu erfassen und statistisch auszuwerten. Neben der Betrachtung von Mittelwerten ist es dabei von Bedeutung, die Streuung der Daten zu berücksichtigen.

Die Wertstromanalyse wird ggf. um eine detaillierte Analyse der Kundenabrufe ergänzt, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die Produktionsnivellierung haben. Im Rahmen der Analyse sind insbesondere Abrufintervalle, mittlere Abrufmengen, die mengenmäßige Aufteilung des Produktspektrums nach Eruzeugnisvarianten sowie Abrufschwankungen zu berücksichtigen (Wuthnow 2010, S. 101). Von besonderem Interesse ist dabei die Trennung zwischen regelmäßigen und unregelmäßigen Abrufen bzw. Bedarfen, um eine verlässliche Datenbasis für die Erstellung des Nivellierungsmusters zu generieren. Eine solche Trennung ist bspw. möglich, indem für einen Zeitraum von T Perioden ein sog. Störpegel ermittelt wird. Der Störpegel (SP) berechnet sich für die Abrufmengen r_t $(t = 1, \ldots, T)$ als:

$$SP = \frac{MAA}{\bar{r}},$$

wobei MAA die mittlere absolute Abweichung vom arithmetischen Mittel $\bar{r}$ bezeichnet (Corsten 2004, S. 405f). Bei einem Störpegel > 0,5 kann von einem unregelmäßigen Bedarf ausgegangen werden (ebd.). Weitere Ausführungen zur Klassifizierung von Abrufverhalten finden sich bspw. bei Tempelmeier, Hauser, Becker (2003, S. 26ff).

3.1.2 Nivellierungsmodellerstellung

Das sog. Nivellierungsmodell dient dazu, wesentliche Zielgrößen für die Nivellierung unter anwendungskontextbezogenen Rahmenbedingungen abzuleiten und zu konkretisieren (Buhl u. a. 2009, S. 20). Das Nivellierungsmodell setzt sich aus den vier in Abbildung 3.3 dargestellten Elementen zusammen, die jeweils stufenweise skaliert sind. Für alle Elemente gilt, dass mit steigendem Detaillierungsgrad der jeweiligen Elementausprägung auch ein erhöhter Aufwand zu erwarten ist.

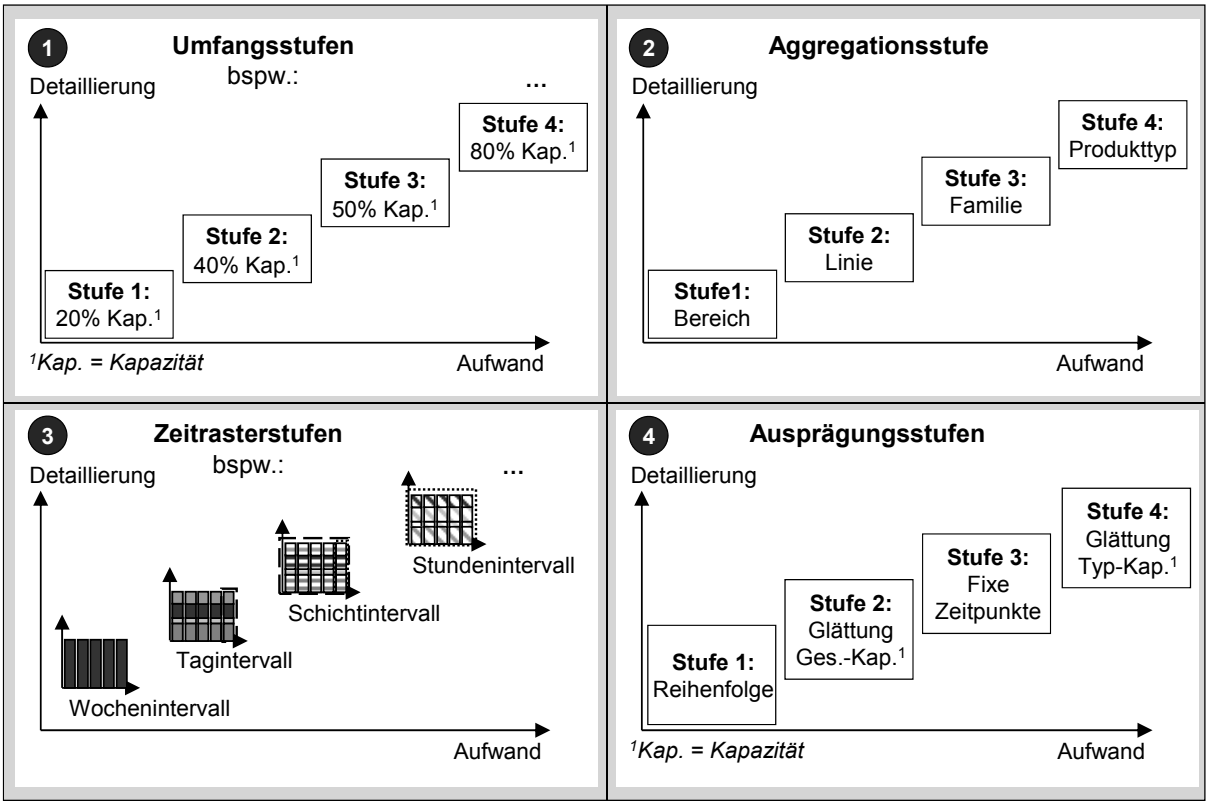


Abbildung 3.3: Elemente des Nivellierungsmodells (in Anlehnung an Buhl u. a. 2009, S. 20)

Das erste Element, die sog. Umfangsstufe, beschreibt den Anteil des betrachteten Produktspektrums bzw. den Anteil der Kapazität des betrachteten Wertstroms für den eine Nivellierung angestrebt wird (Buhl u. a. 2009, S. 20). Das zweite Modellelement, die sog. Aggregationsstufe, legt fest, ob die Nivellierung auf Produkttypebene (höchster Detaillierungsgrad) oder einer höheraggregierten Betrachtungsebene erfolgt (ebd.). Eine derartige höhere Aggregationsebene stellen die im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung zu Nivellierungszwecken verwendeten Produktfamilien dar. Das dritte Modellelement, die sog. Zeitrasterstufe, konkretisiert die zur Nivellierung verwendete Zeiteinheit, wohingegen das vierte Modellelement, die sog. Ausprägungsstufe, den Detaillierungsgrad der Nivellierung an sich spezifiziert (Buhl u. a. 2009, S. 20). Diesbezüglich kann zwischen einer Nivellierung in Form einer Reihenfolgedefinition, einer Glättung der Gesamtkapazität, der Fixierung von Zeitpunkten und der Glättung auf Produkttypebene unterschieden werden (Buhl u. a. 2009, S. 20).

3.2 Produktfamilienbildung zur Nivellierung

Mit der Produktfamilienbildung wird das Ziel verfolgt, das betrachtete Produktspektrum für die Nivellierung in eine handhabbare Anzahl von Produktfamilien zu zerlegen. Hierbei ist von einer größeren Anzahl von Erzeugnisvarianten auszugehen, die basierend auf einer multivariaten Analyse Produktfamilien zuzuordnen sind. Es ist weiterhin anzunehmen, dass a priori weder Referenzobjekte für die einzelnen Produktfamilien noch eine Partitionsgröße bekannt sind. Wie in Unterkapitel 2.3 beschrieben, eignen sich grundsätzlich die Verfahren der Clusteranalyse sowie Künstliche Neuronale Netze zur Lösung einer derartigen Problemstellung. Die Clusteranalyse kann als das am weitesten verbreitete und erprobte Verfahren zur Teilefamilienbildung bezeichnet werden, bedingt jedoch ggf. einen hohen Aufwand zur Auswertung und Interpretation der Ergebnisse. Künstliche Neuronale Netze weisen zwar ein hohes Anwendungspotenzial auf, gelten jedoch als weniger weit verbreitet und haben insbesondere den Nachteil der mangelnden Erklärungsfähigkeit eines parametrisierten Netzes.

Zu Gunsten der Anwendbarkeit und Akzeptanz in der betrieblichen Praxis wird daher im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung ein multivariates Clusteranalyseverfahren zur Produktfamilienbildung verwendet. Das Verfahren basiert auf konventionellen Clusteranalysealgorithmen und wurde um eine Optimierung der Variablengewichtung mit evolutionären Strategien erweitert. Wie aus Abbildung 3.4 ersichtlich wird, orientiert sich der Ablauf des Verfahrens zur Produktfamilienbildung zu Nivellierungszwecken in wesentlichen Punkten an dem allgemeinen Ablaufschema zur Durchführung von Clusteranalysen.

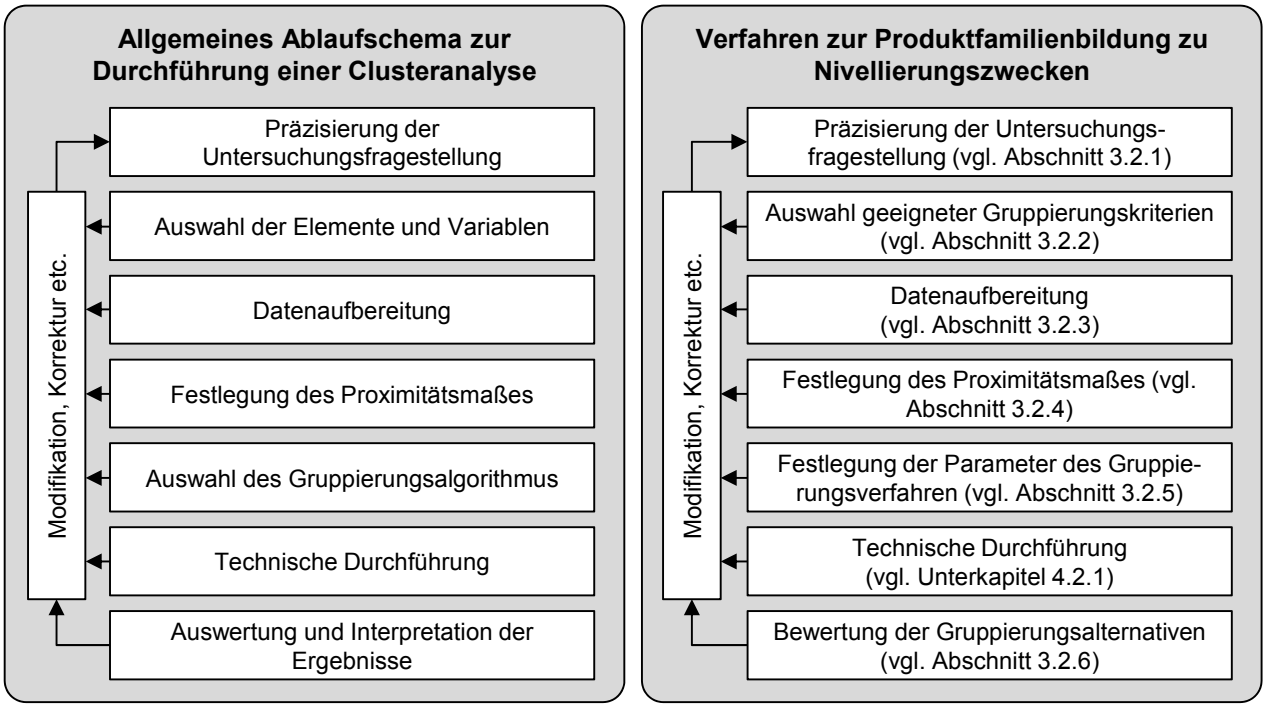


Abbildung 3.4: Ablaufschema zur Durchführung einer Clusteranalyse (in Anlehnung an Deuse 1998, S. 50; Steinhausen, Langer 1977, S. 19)

Nachfolgend werden wesentliche Punkte aufgeführt, in denen die zur Produktfamilienbildung zu Nivellierungszwecken entwickelte Vorgehensweise vom allgemeinen Ablaufschema zur Durchführung von Clusteranalysen abweicht. Diesbezüglich ist zunächst anzuführen, dass das

allgemeine Ablaufschema für Clusteranalysen im zweiten Schritt die Auswahl der Elemente und Variablen vorsieht, wohingegen beim Verfahren zur Produktfamilienbildung zu Nivellierungszwecken an dieser Stelle lediglich die Auswahl geeigneter Gruppierungskriterien erfolgt. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass die Elemente, d. h. die zu gruppierenden Objekte, mit der Präzisierung der Untersuchungsfragestellung feststehen. Die Variablen bezeichnen hingegen die zur Gruppierung herangezogenen Objekteigenschaften und werden somit im Zuge der Auswahl von geeigneten Gruppierungskriterien festgelegt. Die Bezeichnungen „Elemente“ und „Variablen“ haben ihren Ursprung in der multivariaten Statistik. Im Kontext maschineller Lernverfahren werden die Elemente als Beispiele bzw. die Variablen als Attribute bezeichnet.

Des Weiteren erfolgt im Rahmen des zur Produktfamilienbildung zu Nivellierungszwecken entwickelten Verfahrens anstelle einer Auswahl eines Gruppierungsalgorithmus die Festlegung der Parameter des entwickelten Gruppierungsverfahrens. Letzteres greift zwar zur Segmentierung des Produktspektrums auf konventionelle Clusteralgorithmen zurück, enthält aber wie bereits erwähnt darüber hinaus eine evolutionäre Optimierung der Variablengewichtung. Aus diesem Grund wird nachfolgend in Abschnitt 3.2.5 primär auf die methodische Entwicklung und die Eigenschaften des Gruppierungsverfahrens eingegangen. Hierbei werden ebenfalls die Verfahrensparameter betrachtet.

Zur Gruppierung werden unterschiedliche Clusteralgorithmen eingesetzt, da vorab nicht bekannt ist, welcher Algorithmus die besten Ergebnisse liefert. Dies ist abhängig von dem jeweiligen Anwendungsfall. Hinzu kommt, dass die Algorithmen jeweils abhängig von der Partitionsgröße unterschiedliche Lösungen erzeugen. Es ist daher erforderlich, die verschiedenen Gruppierungsalternativen zu bewerten und zu vergleichen, um die bestmögliche Lösung auszuwählen. Hierzu wird eine Bewertungsfunktion verwendet, die sowohl formale als auch aus dem Anwendungskontext abgeleitete Kriterien berücksichtigt. Der Schritt der Bewertung der Gruppierungsalternativen entspricht somit in wesentlichen Zügen dem Schritt der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse bei einer konventionellen Clusteranalyse. Auf die in Abbildung 3.4 aufgeführten Verfahrensschritte zur Produktfamilienbildung zu Nivellierungszwecken wird in den nachfolgenden Abschnitten mit Ausnahme des Schrittes der technischen Durchführung detaillierter eingegangen. Letzterer wird in Abschnitt 4.2.1 im Zuge der programmiertechnischen Umsetzung beschrieben.

3.2.1 Präzisierung der Untersuchungsfragestellung

Ziel der Produktfamilienbildung ist es, zu Nivellierungszwecken jede Erzeugnisvariante eindeutig einer Produktfamilie zuzuordnen. Die gebildeten Produktfamilien sind somit vollständig disjunkt. Des Weiteren ist bei der Produktfamilienbildung zu berücksichtigen, dass innerhalb der Produktfamilien nur minimale bzw. idealerweise keine Rüstzeiten anfallen. Dies wird durch die Auswahl geeigneter Gruppierungskriterien sichergestellt. Auf Grund des Anwendungskontextes der vorliegenden Ausarbeitung ist von einem Produktspektrum auszugehen, das sich durch eine hohe Variantenvielfalt auszeichnet. Dies bedeutet für die Produktfamilienbildung, dass eine große Anzahl n von p-dimensionalen Objekten einer Menge $X = \{X_1, X_2, \ldots, X_n\}$

einer definierten Anzahl von Produktfamilien zuzuordnen ist. Die Dimensionsgröße *p* resultiert dabei aus den zur Gruppierung betrachteten Variablen, d. h. aus den Gruppierungskriterien. Gesucht wird die am besten geeignete Partition $C^{(k)}$ von X, wobei die Objekte jeder Gruppe C_i $(i \in \mathbb{N};\ 1 \leq i \leq k)$ untereinander ähnlich bzw. unähnlich zu Objekten anderer Gruppen sind. Die Partitionsgröße *k*, d. h. die Anzahl der zu bildenden Produktfamilien, ist dabei wie bereits erwähnt a priori nicht bekannt. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass zudem keinerlei Zuordnung von Referenzobjekten zu Produktfamilien vorliegt. Die Produktfamilienbildung zu Nivellierungszwecken stellt somit eine komplexe, multivariate Problemstellung dar.

3.2.2 Auswahl geeigneter Gruppierungskriterien

Mit der Produktfamilienbildung wird wie eingangs erwähnt das Ziel verfolgt, ähnliche Erzeugnisvarianten, die sich gemeinsam, d. h. ohne bzw. mit minimalem Rüstaufwand, fertigen lassen, zu Gruppen zusammenzufassen. Das Produktspektrum wird somit unter Ausnutzung des Ähnlichkeitsprinzips segmentiert. Die Ähnlichkeit der Erzeugnisvarianten spiegelt sich in den zur Gruppierung herangezogenen Kriterien wider, die bei der Produktfamilienbildung als Variablen berücksichtigt werden. Diese Gruppierungskriterien hängen stark vom jeweiligen Anwendungsfall ab. Die Basis zur Ableitung geeigneter Gruppierungskriterien stellt eine detaillierte Beschreibung des betrachteten Arbeitssystems dar. Hierzu eignet sich die allgemeine Systematik zur Beschreibung von Arbeitssystemen nach REFA. Ein Arbeitssystem lässt sich demnach durch die Elemente Arbeitsperson, Arbeitsaufgabe, Arbeitsablauf, Eingabe, Ausgabe, Arbeitsmittel und Umwelteinflüsse charakterisieren.

Die Arbeitsaufgabe kennzeichnet den Zweck des Arbeitssystems, wohingegen der Arbeitsablauf die räumliche und zeitliche Folge des Zusammenwirkens von Mensch und Betriebsmittel mit der Eingabe beschreibt (REFA 1993, S. 151ff). Das Ziel dieses Zusammenwirkens ist die Veränderung oder Verwendung der Eingabe im Sinne der Arbeitsaufgabe (ebd.). Eingabe und Ausgabe bestehen im Allgemeinen aus Arbeitsgegenständen, Informationen und Energie, welche im Sinne der Arbeitsaufgabe in ihrem Zustand, ihrer Form oder ihrer Lage verändert oder verwendet werden bzw. wurden (REFA 1993, S. 152f). Arbeitsperson und Betriebsmittel bestimmen die Kapazitäten des Arbeitssystems, die genutzt werden, um die Eingabe gemäß der Arbeitsaufgabe in die Ausgabe zu transformieren (REFA 1993, S. 151). Umwelteinflüsse werden im Allgemeinen unterteilt in physikalische, chemische, organisatorische und soziale Wirkgrößen die auf das Arbeitssystem wirken und das Systemverhalten sowie die Eigenschaften der Systemelemente beeinflussen (REFA 1993, S. 153).

Basierend auf der Arbeitssystembeschreibung werden geeignete Kriterien abgleitet, die für die Produktfamilienbildung genutzt werden. Generell wird, wie Abbildung 3.5 zeigt, im Kontext der Teilefamilienbildung zwischen geometrie- und produktionsbezogenen Gruppierungskriterien unterschieden (Choobineh, Nare 1999, S. 3232; Lee-Post 2000, S. 794). Bezüglich einer detaillierteren Auflistung und Beschreibung der aufgeführten Gruppierungskriterien wird auf den Anhang der vorliegenden Ausarbeitung verwiesen (Anhang B).

Geometriebezogene Kriterien	Produktionsbezogene Kriterien
▪ Produktgestalt (äußere / innere End- bzw. Ausgangsform; Abmessungen) ▪ Materialtyp ▪ Toleranzen ▪ Oberflächengüte ▪ Größe und Gewicht	▪ Bearbeitungszeit ▪ Rüstaufwand (Rüstzeit, Rüstkosten) ▪ Erforderliches Personal (inkl. Kapazität) ▪ Erforderliche Betriebsmittel (inkl. Kapazität) ▪ Arbeitsinhalt / erforderliche Arbeitsvorgänge (inkl. Reihenfolge) ▪ Produkt- bzw. Baugruppenzugehörigkeit, Gleichteile ▪ Produktionsvolumen und Losgrößen

Abbildung 3.5: Mögliche Kriterien zur Bildung von Produktfamilien (basierend auf Choobineh, Nare 1999, S. 322; Heinz, Hebbeler 1990, S. 18; Lee, Chen 1997, S. 1125; Lee, Fischer 1999, S. 200; Lee-Post 2000, S. 794; Tönshoff, Rotzoll, Verweij 1997, S. 96)

Wie o. a. verfolgt die Produktfamilienbildung das Ziel, Erzeugnisvarianten zusammenzufassen, die gemeinsam ohne bzw. mit minimalem Umrüstaufwand gefertigt werden können. Die Familienbildung orientiert sich somit an Fertigungs- bzw. Bearbeitungsähnlichkeiten. Geometriebezogene Kriterien ermöglichen jedoch i. d. R. nur sehr eingeschränkt Rückschlüsse auf derartige Ähnlichkeiten. So bewirken bspw. geringe Unterschiede bei der Werkstückgeometrie potenziell erhebliche Unterschiede bei der Produktherstellung (Tönshoff, Rotzoll, Verweij 1997, S. 96). Aus diesem Grund eignen sich zur Produktfamilienbildung zu Nivellierungszwecken primär produktionsbezogene Kriterien.

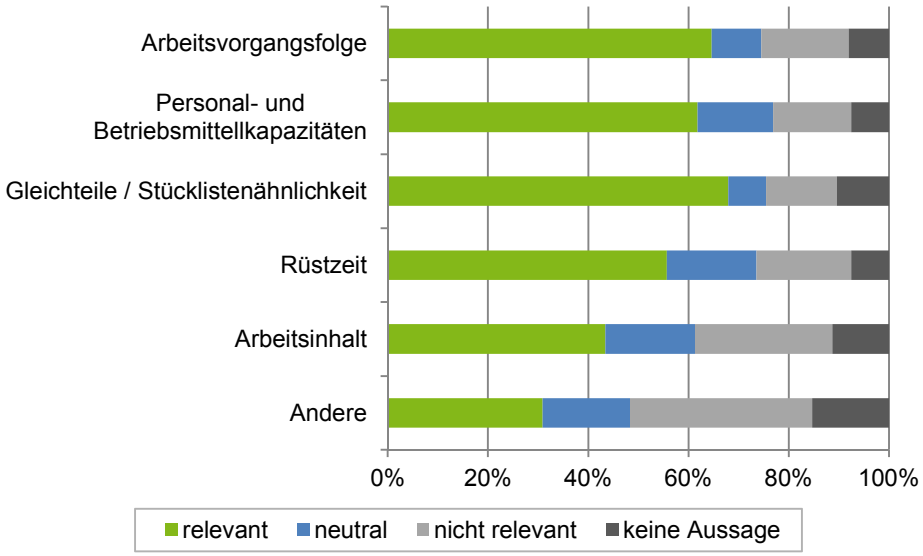


Abbildung 3.6: Bewertung von Kriterien zur Bildung von Produktfamilien zu Nivellierungszwecken (Ergebnis einer Online-Umfrage, an der 106 Unternehmensvertreter aus verschiedenen Branchen teilgenommen haben)

Mögliche derartige Kriterien sind Arbeitsinhalte, d. h. Arbeitsvorgangsfolge und Bearbeitungszeiten, sowie erforderliche Betriebsmittel und Personalkapazitäten, Gleichteile bzw. Stücklistenähnlichkeit und Rüstzeiten. Dies bestätigen auch die Ergebnisse der bereits in

Unterkapitel 2.1 erwähnten empirischen Erhebung, im Rahmen derer die Unternehmensvertreter u. a. auch zur Relevanz der o. a. Kriterien für die Bildung von Produktfamilien zu Nivellierungszwecken befragt wurden. Das Ergebnis dieser Befragung ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Demnach werden die zuvor angeführten Gruppierungskriterien für den betrachteten Anwendungsfall größtenteils als relevant eingestuft.

Durch die Auswahl geeigneter Gruppierungskriterien wird es möglich, jedes Objekt des betrachteten Produktspektrums, d. h. jede Erzeugnisvariante, in einer Roh datenmatrix mit seinen für die Produktfamilienbildung relevanten Attributen zu beschreiben. Ein Beispiel für den Aufbau einer derartigen Matrix ist Abbildung 3.7 zu entnehmen. Dabei entspricht jede Zeile der Matrix einem Objekt des betrachteten Produktspektrums. Die erste Spalte der Matrix dient der Identifizierung der Objekte. Die übrigen Spalten enthalten die Ausprägungen der zur Familienbildung betrachteten Objektattribute, d. h. die zur Gruppierung verwendeten Variablen, und basieren somit auf den ausgewählten Gruppierungskriterien.

	Variable 1	**Variable 2**	**…**	**Variable p**
Objekt 1				
Objekt 2				
…				
Objekt n				

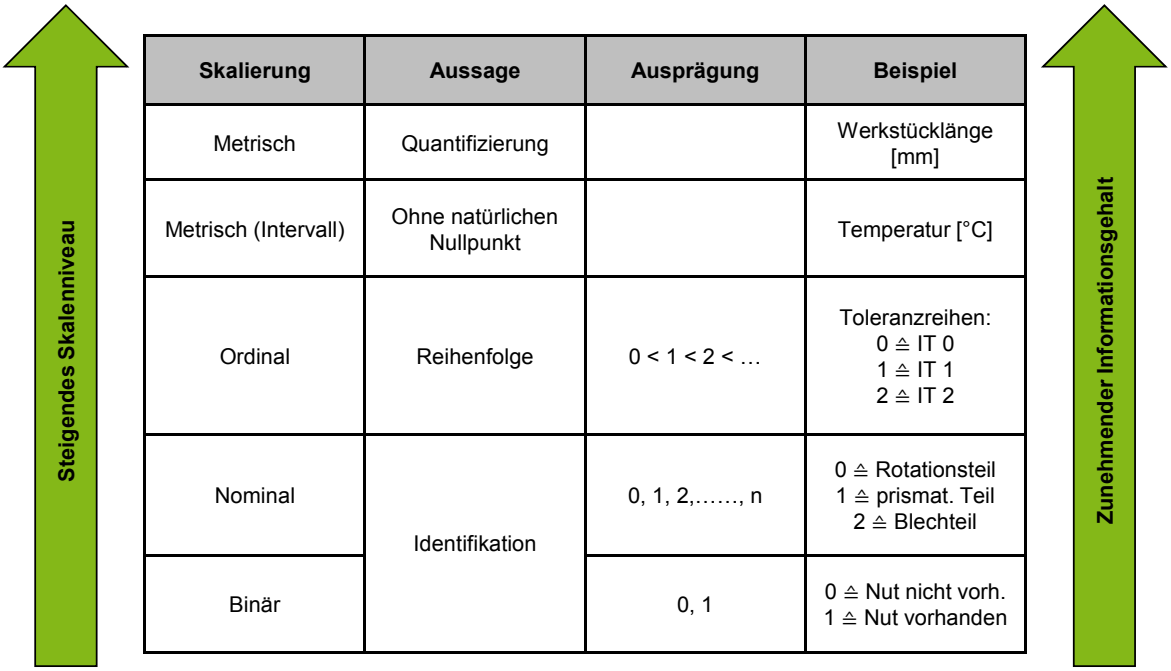
Abbildung 3.7: Beispielhafte Rohdatenmatrix (in Anlehnung an Backhaus u. a. 2006, S. 493)

3.2.3 Datenaufbereitung

Für das weitere Vorgehen zur Familienbildung ist es von zentraler Bedeutung, auf welchem Skalenniveau die Objekte in der Rohdatenmatrix beschrieben werden, d. h. wie die Zuordnung empirischer Relationen zu numerischen Relationen erfolgt (Steinhausen, Langer 1977, S. 29). Als primäre Quellen für die Rohdatenmatrix werden Stücklisten und Arbeitspläne genutzt. Ein Überblick über mögliche Skalierungen, deren Aussagen und Ausprägungen ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Unterschieden wird zwischen metrischer und nicht-metrischer Skalierung (Backhaus u. a. 2006, S. 6). Kann eine Variable mit einer reellen Zahl gemessen werden, liegt eine metrische, andernfalls eine nicht-metrische Skalierung vor (Deuse 1998, S. 53). Bei nicht-metrischer Skalierung wird zwischen ordinaler und nominaler Skalierung differenziert. Ordinale Variablen bilden eine Rangordnung mittels Rangwerten ab (Backhaus u. a. 2006, S. 5). Als ein typisches Beispiel aus dem ingenieurwissenschaftlichen Bereich können hierfür Toleranzreihen angeführt werden (Deuse 1998, S. 53). Nominalskalen hingegen dienen zur Identifikation qualitativer Objekteigenschaften, wobei binäre Merkmale eine Sonderform nominaler Skalierung darstellen und daher auch als nominal-dichotom bezeichnet werden (Backhaus u. a. 2006, S. 4f; Deuse 1998, S. 53). Darüber hinaus ist eine gemischte Skalierung möglich.

Im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung wird davon ausgegangen, dass die Rohdaten vollständig in binär skalierter Form vorliegen. Diese Annahme beeinflusst zum einen die im nachfolgenden Abschnitt beschriebene Entwicklung des Gruppierungsverfahrens und spiegelt

sich dort insbesondere in der Wahl des Proximitätsmaßes wider, welches die Ähnlichkeit der Objekte kennzeichnet (Deuse 1998, S. 13). Zum anderen hat die Annahme binär skalierter Rohdaten Einfluss auf die in Abschnitt 3.2.4 dargestellte Modellierung der Funktion zur Bewertung der Gruppierungsalternativen.



Skalierung	Aussage	Ausprägung	Beispiel
Metrisch	Quantifizierung		Werkstücklänge [mm]
Metrisch (Intervall)	Ohne natürlichen Nullpunkt		Temperatur [°C]
Ordinal	Reihenfolge	0 < 1 < 2 < …	Toleranzreihen: 0 ≙ IT 0 1 ≙ IT 1 2 ≙ IT 2
Nominal	Identifikation	0, 1, 2,……, n	0 ≙ Rotationsteil 1 ≙ prismat. Teil 2 ≙ Blechteil
Binär		0, 1	0 ≙ Nut nicht vorh. 1 ≙ Nut vorhanden

Abbildung 3.8: Skalierung von Variablen (in Anlehnung an Deuse 1998, S. 53)

Im Falle nicht binär skalierter Rohdaten besteht zum einen die Möglichkeit, das Gruppierungsverfahren sowie die Bewertungsfunktion an das vorliegende Skalenniveau anzupassen. Zum anderen kann im Rahmen der Datenaufbereitung das Skalenniveau der Rohdaten im Zuge einer Niveauregression angepasst werden, wobei eine derartige Transformation auch mit einem Informationsverlust verbunden ist (Backhaus u. a. 2006, S. 6).

Neben einer ggf. erforderlichen Transformation auf ein einheitliches Skalenniveau sind die Rohdaten im Zuge der Datenaufbereitung einer Prüfung auf Vollständigkeit und Plausibilität zu unterziehen. Ebenfalls Bestandteil der Rohdatenaufbereitung ist die Identifizierung von Ausreißern in der zur Familienbildung betrachteten Objektmenge, d. h. Objekten mit extremen Merkmalsausprägungen, die potenziell zu verzerrten Gruppierungsergebnissen führen (Deuse 1998, S. 52; Mertens, Wieczorrek 2000, S. 251). Neben der Einbeziehung von Expertenwissen eignet sich hierzu die Gruppierung der Objekte mit dem Single-Linkage-Algorithmus (Backhaus u. a. 2006, S. 529). Dieser wird der Klasse hierarchisch-agglomerativer Clusteranalyseverfahren zugeordnet und neigt zur sog. Kettenbildung, d. h. zur Bildung vieler kleiner und weniger großer Gruppen (ebd.). Potenziell führen Ausreißerobjekte zu Verzerrungen der Gruppierungsergebnisse. Aus diesem Grund empfiehlt es sich insbesondere im Fall binär skalierter Variablen, derartige Objekte im Rahmen der Datenaufbereitung aus der Rohdatenmatrix zu entfernen (Deuse 1998, S. 56; Kotz u. a. 2006, S. 1000).

3.2.4 Festlegung des Proximitätsmaßes

Die Auswahl eines geeigneten Proximitätsmaßes stellt im Rahmen konventioneller Clusteranalyseverfahren einen zentralen Schritt dar, der sich an die Rohdatenaufbereitung

anschließt. Das Proximitätsmaß dient der Quantifizierung der Ähnlichkeit bzw. der Unähnlichkeit der betrachteten Objekte. Dabei wird generell unterschieden zwischen Ähnlichkeits- und Distanzmaßen, wobei Ähnlichkeitsmaße die Ähnlichkeit zwischen zwei Objekten, Distanzmaße hingegen die Unähnlichkeit zwischen zwei Objekten quantifizieren (Backhaus u. a. 2006, S. 493f). Zur Berechnung der Ähnlichkeiten bzw. der Distanzen wird die aufbereitete Rohdatenmatrix in eine quadratische *n* x *n*-Ähnlichkeits- oder Distanzmatrix überführt (siehe Abbildung 3.9). Diese Matrix enthält für die einzelnen Objekte Ähnlichkeits- oder Distanzwerte, welche basierend auf den objektbezogenen Variablenausprägungen ermittelt werden (ebd.).

	Objekt 1	**Objekt 2**	**…**	**Objekt n**
Objekt 1		$d_{1,2}$	…	$d_{1,n}$
Objekt 2			…	$d_{2,n}$
…				…
Objekt n				

Abbildung 3.9: Aufbau einer Distanz oder Ähnlichkeitsmatrix (in Anlehnung an Backhaus u. a. 2006, S. 493)

Ob ein Ähnlichkeits- oder ein Distanzmaß verwendet wird, hängt vom verwendeten Clusteralgorithmus ab. Allerdings ist es möglich Ähnlichkeitsmaße in Distanzmaße zu transformieren und umgekehrt (Steinhausen, Langer 1977, S. 52). Es existiert eine Vielzahl von Ähnlichkeits- und Distanzmaßen, deren Einsatzeignung vom Anwendungskontext und dem Skalenniveau der betrachteten Variablen abhängt. Da wie o. a. im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung binär skalierte Rohdaten vorausgesetzt werden, beschränken sich die nachfolgenden Ausführungen auf entsprechend geeignete Proximitätsmaße.

Die Berechnung der Ähnlichkeit bzw. der Unähnlichkeit erfolgt durch einen paarweisen Vergleich, wobei für jeweils zwei Objekte sämtliche Eigenschaftsausprägungen, d. h. sämtliche Variablen, verglichen werden (Backhaus u. a. 2006, S. 494). Hierbei sind im Fall einer nominal-dichotomen Variablenstruktur die vier in Abbildung 3.10 aufgeführten Kombinationsmöglichkeiten zu unterscheiden. Demnach kann eine Eigenschaft bei beiden Objekten vorhanden (Feld a) bzw. nicht vorhanden (Feld d) oder bei nur einem der beiden Objekte vorhanden sein (Feld b bzw. Feld c).

	Objekt 2		
Objekt 1	Eigenschaft vorhanden (1)	Eigenschaft nicht vorhanden (0)	Zeilensumme
Eigenschaft vorhanden (1)	a	c	a+c
Eigenschaft nicht vorhanden (0)	b	d	b+d
Spaltensumme	a+b	c+d	m

Abbildung 3.10: Kombinationsmöglichkeiten binärer Variablen (Backhaus u. a. 2006, S. 495)

Ein Großteil der existierenden Ähnlichkeitsmaße ist auf eine allgemeine Ähnlichkeitsfunktion zurückzuführen. Die Ähnlichkeit *s* zweier Objekte X_j und X_l berechnet sich somit als:

$$s(X_j, X_l) = \frac{a + \delta * d}{a + \delta * d + \lambda(b + c)},$$

wobei die Variablen *a*, *b*, *c*, und *d* die Häufigkeit des Auftretens der jeweiligen Kombinationsmöglichkeiten in Abbildung 3.10 bezeichnet und δ sowie λ konstante Gewichtungsfaktoren darstellen (Steinhausen, Langer 1977, S. 54). So entspricht bspw. die Variable *a* der Anzahl an Eigenschaften, die bei beiden Objekten vorhanden sind. Abhängig von der Wahl der Gewichtungsfaktoren werden verschiedene Ähnlichkeitsmaße unterschieden, von denen einige wichtige in Tabelle 3.2 aufgeführt sind.

Tabelle 3.2: Auswahl einiger wichtiger Ähnlichkeits- und Distanzfunktionen für binäre Variablen (Steinhausen, Langer 1977, S. 55)

Nr.	Ähnlichkeitsfunktion s	Distanzfunktion d = 1 - s	δ	λ	Bemerkungen / Eigenschaften	Name / Autoren
1	$\frac{a}{a+b+c}$	$\frac{b+c}{a+b+c}$	0	1	Relativer Anteil gemeinsam vorhandener Eigenschaften bezogen auf die Variablen mit mindestens einer 1	Jaccard / Similarity S / Tanimoto
2	$\frac{2a}{2a+(b+c)}$	-	0	½	Doppelte Gewichtung gemeinsam vorhandener Eigenschaften	Dice
3	$\frac{a}{a+2(b+c)}$	$\frac{2(b+c)}{a+2(b+c)}$	0	2	Doppelte Gewichtung nicht übereinstimmender Positionen im Nenner	Sokal & Sneath
4	$\frac{a}{m}$	-	-	-	Relativer Anteil gemeinsam vorhandener Positionen bezogen auf Gesamtlänge	Russel & Rao
5	$\frac{a+d}{m}$	$\frac{b+c}{m}$	1	1	Relativer Anteil übereinstimmender Positionen bezogen auf Gesamtlänge	Simple-Matching
6	$\frac{2(a+d)}{2(a+d)+b+c}$	-	1	½	Doppelte Gewichtung übereinstimmender Positionen	Sokal & Sneath
7	$\frac{a+d}{a+d+2(b+c)}$	$\frac{2(b+c)}{a+d+2(b+c)}$	1	2	Doppelte Gewichtung nicht übereinstimmender Positionen im Nenner	Rogers & Tanimoto
8	$\frac{ae-bc}{\sqrt{(a+c)(b+d)(a+b)(c+d)}}$		-	-	Korrelationskoeffizient φ (-1 ≤ φ ≤ 1), Testgröße zum χ2-Test auf Unabhängigkeit der 2x2-Kontingenztafel	φ -Koeffizient

Tabelle 3.2 enthält ebenfalls zu jedem Ähnlichkeitsmaß das entsprechende Distanzmaß, sofern dies berechnet werden kann. Alternativ zur Ableitung aus dem Ähnlichkeitsmaß besteht die Möglichkeit, das Distanzmaß basierend auf den sog. Minkowski-Metriken oder L-Normen zu berechnen. Diese lassen sich auf eine allgemeine Distanzfunktion zurückführen, die sowohl für binär als auch für metrisch skalierte Variablen angewendet werden kann. Entsprechend

dieser allgemeinen Distanzfunktion wird die Distanz *d* zwischen zwei Objekten X_j und X_l berechnet als:

$$d(X_j, X_l) = \left[\sum_{i=1}^{p} | x_{ji} - x_{li} |^r \right]^{\frac{1}{r}},$$

wobei x_{ji} und x_{li} die Werte der Variable *i* bei den Objekten *j* bzw. *l* repräsentieren und *p* die Anzahl der Variablen bezeichnet (Backhaus u. a. 2006, S. 502f). Die positive Konstante *r* ($r \geq 1$) bezeichnet die sog. Minkowski-Konstante (ebd.). So ergibt sich aus der allgemeinen Distanzfunktion bspw. für *r* = 1 die sog. City-Block-Metrik (L_1-Norm) bzw. für r = 2 die Euklidische Distanz (L_2-Norm) (ebd.).

Im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung wird die quadriert Euklidische Distanz als Proximitätsmaß verwendet, wobei jede Variable mit einem Faktor gewichtet wird. Die Wahl eines Distanzmaßes bietet im Gegensatz zu Ähnlichkeitsmaßen, die für einige gängige Clusteralgorithmen nicht genutzt werden können, den Vorteil der universelleren Anwendbarkeit (vgl. Abschnitt 3.2.5). Die quadriert Euklidische Distanz ermöglicht zudem die Anwendung von Clusteralgorithmen wie dem K-Means-Algorithmus, die explizit die Verwendung euklidischer Distanzen voraussetzen. Das gewählte Distanzmaß begünstigt somit die Anwendung mehrerer Clusteralgorithmen, deren Gruppierungsergebnisse miteinander verglichen werden können. Hinzu kommt, dass durch den in der Distanzfunktion enthaltenen Gewichtungsfaktor die verschiedenen Objektattribute entsprechend ihrer Relevanz für die Produktfamilienbildung berücksichtigt werden. Die Distanz *d* zwischen zwei Objekten X_j und X_l berechnet sich somit als:

$$d(X_j, X_l) = \sum_{i=1}^{p} \alpha_i (x_{ji} - x_{li})^2 ,$$

wobei *p* die Anzahl der zur Produktfamilienbildung genutzten Variablen und α_i die Variablengewichtung angeben.

3.2.5 Gruppierungsverfahren

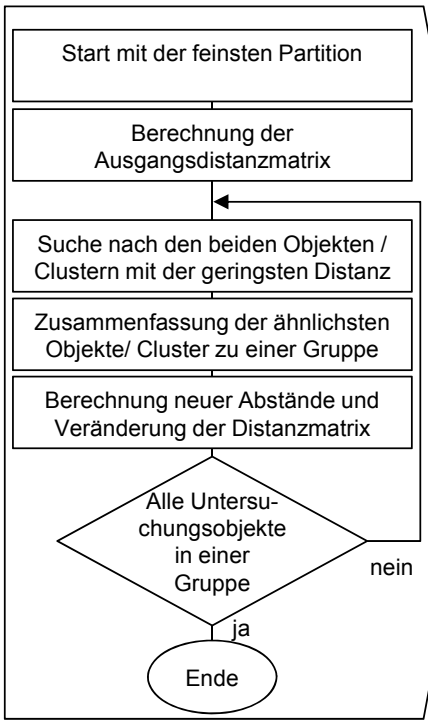
Im Rahmen der Produktfamilienbildung werden die Erzeugnisvarianten entsprechend ihrer Fertigungsähnlichkeit segmentiert. Wie eingangs beschrieben wird hierzu im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung ein Gruppierungsverfahren genutzt, das im Kern konventionelle Clusteralgorithmen verwendet, um Gruppierungsalternativen zu erzeugen, die bewertet und miteinander verglichen werden. Zusätzlich enthält das Gruppierungsverfahren eine evolutionäre Optimierung der Variablengewichtung. Auf letztere wird an späterer Stelle in diesem Abschnitt eingegangen. Zunächst werden die eingesetzten Clusteralgorithmen anhand ihrer Ablaufschritte und charakteristischer Eigenschaften beschrieben. Die Ausführungen beschränken sich dabei auf hierarchisch-agglomerative und Austauschverfahren, da diese wie in Abschnitt 2.3.3 angeführt primär zu Zwecken der Teilefamilienbildung eingesetzt werden.

Das allgemeine Ablaufschema hierarchisch-agglomerativer Clusteralgorithmen ist in Abbildung 3.11 dargestellt. Den Start bildet wie bereits erwähnt die feinste Partition, für die die

Ausgangsdistanzmatrix berechnet wird (Backhaus u. a. 2006, S. 514f). Fusioniert werden die beiden Objekte bzw. Gruppen mit der geringsten Distanz und es wird für die so erzeugte neue Partition eine neue Distanzmatrix berechnet (ebd.). Dieser Fusionierungsvorgang wiederholt sich solange, bis sich alle Untersuchungsobjekte in einer Gruppe befinden (ebd.). Die Unterschiede zwischen den agglomerativen Verfahren entstehen dadurch, wie die Distanzwerte nach den Fusionierungsschritten bestimmt werden (ebd.). Allgemein berechnet sich die Distanz *D* zwischen einer beliebigen Gruppe *R* und einer Gruppe, die durch Fusionierung der Gruppen *P* und *Q* entstanden ist als (Backhaus u. a. 2006, S. 516):

$$D(R,P+Q) = A * D(R,P) + B * D(R,Q) + E * D(P,Q) + G * | D(R,P) - D(R,Q) | .$$

Hierbei repräsentieren die Größen *A*, *B*, *E* und *G* Konstanten, die vom jeweiligen Clusteralgorithmus abhängen (ebd.). In Abbildung 3.11 sind die Werte der einzelnen Konstanten für die Clusteralgorithmen aufgeführt, die sich im Kontext der praktischen Anwendungen zur Teilefamilienbildung weitgehend bewährt und durchgesetzt haben. Diesbezüglich anzuführen sind der Single-Linkage Algorithmus, der Complete-Linkage Algorithmus, der Average-Linkage Algorithmus sowie das Verfahren nach Ward (Deuse 1998, S. 59). Letzteres setzt zwingend das Vorhandensein einer metrisch skalierten Variablenstruktur voraus (Backhaus u. a. 2006, S. 528). Da im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung von binär skalierten Daten ausgegangen wird, wird das Ward-Verfahren im Weiteren jedoch nicht betrachtet.



Verfahren	Konstante				Distanzberechnung
	A	B	E	G	D(R,P+Q)=A x D(R,P) + B x D(R,Q) + E x D(P,Q) + G x |D(R,P) - D(R,Q)|
Single-Linkage	0,5	0,5	0	-0,5	D(R,P+Q)=0,5 x [D(R,P) + D(R,Q) - |D(R,P) - D(R,Q)|]
Complete-Linkage	0,5	0,5	0	0,5	D(R,P+Q)=0,5 x [D(R,P) + D(R,Q) + |D(R,P) - D(R,Q)|]
Average-Linkage	0,5	0,5	0	0	D(R,P+Q)=0,5 x [D(R,P) + D(R,Q)]

Abbildung 3.11: Ablaufschema und Distanzberechnung hierarchisch-agglomerativer Verfahren (basierend auf Backhaus u. a. 2006, S. 515ff)

Wesentliche Charakteristika der o. a. hierachisch-agglomerativen Algorithmen sind in Abbildung 3.12 zusammengefasst. Kennzeichnend für den Single-Linkage-Algorithmus ist, dass auf jeder Fusionierungsstufe die Gruppen mit den zueinander am nächsten liegenden Nachbarobjekten vereinigt werden (Eckes, Roßbach 1980, S. 67). Für die Fusion zweier

Gruppen ist somit lediglich eine einzige Verbindung zwischen zwei Objekten erforderlich (ebd.). Der Single-Linkage-Algorithmus neigt dadurch tendenziell dazu, einzelne Objekte sukzessive mit bereits vorhandenen Gruppen zu fusionieren, was auch als Kettenbildungseffekt bezeichnet wird (ebd.). Auf diese Weise werden tendenziell viele kleine und wenige große Gruppen gebildet. Diese Eigenschaft wird auch als kontrahierend bezeichnet (Backhaus u. a. 2006, S. 527f). Da er schlecht getrennte Klassen nur unzureichend erkennt, wird der Single-Linkage Algorithmus i. d. R. nicht zur Bildung homogener Gruppen eingesetzt (Steinhausen, Langer 1977, S. 78). Zur Identifizierung von Ausreißern ist er auf Grund seiner Eigenschaften hingegen gut geeignet (Backhaus u. a. 2006, S. 529). Hinzu kommt, dass der Single-Linkage-Algorithmus in der Lage ist, verzweigte oder gekrümmte, linienförmige oder kreisförmige Gebilde zu erkennen, wobei der Zusammenhang der Objekte eine höhere Bedeutung hat als deren Ähnlichkeit (Steinhausen, Langer 1977, S. 78).

Beim Complete-Linkage-Algorithmus werden in jeder Fusionierungsstufe für alle Clusterpaarungen die jeweils entferntesten Objekte bestimmt und diejenigen fusioniert, für die diese Maximaldistanz minimal ist (Eckes, Roßbach 1980, S. 70). Die so gebildeten Gruppen zeichnen sich durch eine hohe Homogenität aus (ebd.). Der Complete-Linkage-Algorithmus bildet tendenziell ungefähr gleich große Gruppen (Backhaus u. a. 2006, S. 527f). Diese Fusionierungseigenschaft wird als dilatierend bezeichnet (ebd.).

Der Average-Linkage-Algorithmus stellt eine Kombination der o. a. Algorithmen dar. Er fusioniert jeweils die Gruppen, für die der Mittelwert aller Objektdistanzen minimal ist (Eckes, Roßbach 1980, S. 72). Hierdurch wird zum einen der Kontraktionseffekt des Single-Linkage, zum anderen der Dilationseffekt des Complete-Linkage-Algorithmus vermieden, weshalb die Fusionierungseigenschaften des Average-Linkage-Algorithmus als konservativ bezeichnet werden (ebd.).

Verfahren	Eigenschaft	Proximitätsmaße	Bemerkung
Single-Linkage	kontrahierend	alle	neigt zur Kettenbildung
Complete-Linkage	dilatierend	alle	neigt zu kleinen Gruppen
Average-Linkage	konservativ	alle	schwer interpretierbar

Abbildung 3.12: Charakterisierung ausgewählter hierachisch-agglomerativer Algorithmen (in Anlehnung an Backhaus u. a. 2006, S. 528)

Im Unterschied zu hierarchisch-agglomerativen Verfahren zerlegen partitionierende Algorithmen das Spektrum der betrachteten Untersuchungsobjekte in eine vorgegebene Anzahl von Gruppen. Am gebräuchlichsten sind in der Praxis die sog. Austauschverfahren, von denen wiederum dem K-Means-Algorithmus die größte Bedeutung zukommt (Deuse 1998, S. 59). Die nachfolgende Betrachtung fokussiert sich daher auf diesen Algorithmus.

Das grundlegende Ablaufschema eines Austauschalgorithmus zeigt Abbildung 3.13. Der Algorithmus startet mit einer vorgegebenen oder randomisiert erzeugten Anfangspartition, für die je Gruppe die Clusterzentren berechnet werden (Bacher 2000, S. 309; Deuse 1998, S. 60). Die Objekte werden daraufhin dem Clusterzentrum zugeordnet, zu dem die quadriert euklidische Distanz minimal ist, was dazu führt, dass die Varianz (d. h. die Heterogenität) innerhalb der

Gruppen in jedem Iterationsschritt minimiert wird (ebd.). Es folgt die Neuberechnung der Clusterzentren und die Überprüfung, ob sich die Zuordnung der Objekte verglichen mit der Startpartition geändert hat (ebd.). Ist dies der Fall, beginnt eine neue Iteration. Andernfalls wird der Algorithmus beendet.

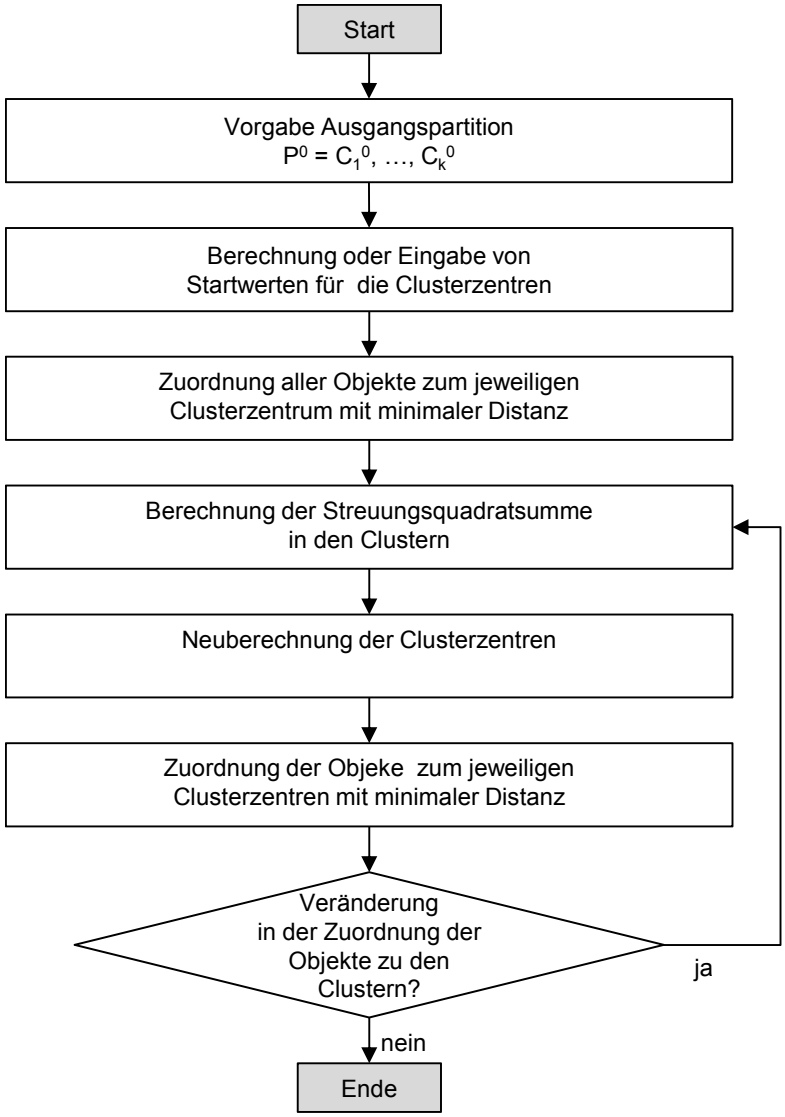


Abbildung 3.13: Ablaufschema eines Austauschalgorithmus

Der K-Means-Algorithmus benötigt wie o. a. eine Startpartition und somit auch eine vorgegebene Partitionsgröße (Lu, Ton, Traore 2008, S. 538). Die Startpartition hat wesentlichen Einfluss auf die Qualität der erzeugten Lösung (Sarkar, Yegnanarayana, Deepak 1997, S. 975). Das K-Means-Verfahren führt zwar zu einer lokal optimalen, jedoch nicht zwingend zu einer global optimalen Lösung (ebd.). Trotzdem gilt der K-Means-Algorithmus als eines der effizientesten und am meisten erprobten Clusteranalyseverfahren, das auch zur Analyse großer Datenmengen verwendet werden kann (Lu, Ton, Traore 2008, S. 537).

Die angeführten konventionellen Clusteralgorithmen bilden wie bereits erwähnt den Kern des im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung beschriebenen Verfahrens zur Produktfamilienbildung zu Nivellierungszwecken. Darüber hinaus erfolgt eine Optimierung der Variablengewichtung mit Hilfe evolutionärer Strategien. Der gesamte Ablauf des Gruppierungsverfahrens ist in Abbildung 3.14 dargestellt. Als Eingangsdaten für die Produktfamilienbildung

dient eine aufbereitete Rohdatenmatrix wie sie im vorangehenden Abschnitt beschrieben wird. Vor dem Beginn des eigentlichen Gruppierungsverfahrens ist ein Clusteralgorithmus festzulegen. Zur Auswahl stehen die o. a. Algorithmen, wobei es möglich ist, die Gruppierung sequentiell mit allen Algorithmen durchzuführen und die Ergebnisse zu vergleichen. Das Verfahren startet mit einer Partitionsgröße von k = 2. Für diese Partitionsgröße wird die Gruppierung mit Hilfe des gewählten Clusteralgorithmus durchgeführt und die Gewichtung der Variablen in der Distanzfunktion mit Hilfe evolutionärer Strategien optimiert.

Hierbei wird die Variablengewichtung in einen Vektor überführt, der jeder der *p* Variablen eine Gewichtung *α* zuordnet und als ein sog. Individuum betrachtet wird:

$$\vec{\alpha} = (\alpha_1,...,\alpha_p)$$

Im Rahmen der Optimierung wird eine Menge derartiger Individuen durch Anwendung von Selektions-, Rekombinations- und Mutationsoperationen verändert und hinsichtlich einer Zielfunktion optimiert (vgl. Mierswa 2009, S. 57f). Die Zielfunktion wird in diesem Fall durch den Wünschbarkeitsindex dargestellt. Als Ausgangspunkt dient eine zufällig erzeugte Startpopulation, d. h. eine Anzahl von Individuen mit zufällig erzeugten Gewichtungsfaktoren, mit der die Gruppierung mittels des vorher definierten Clusteralgorithmus durchgeführt und das Ergebnis anhand des Wünschbarkeitsindex bewertet wird.

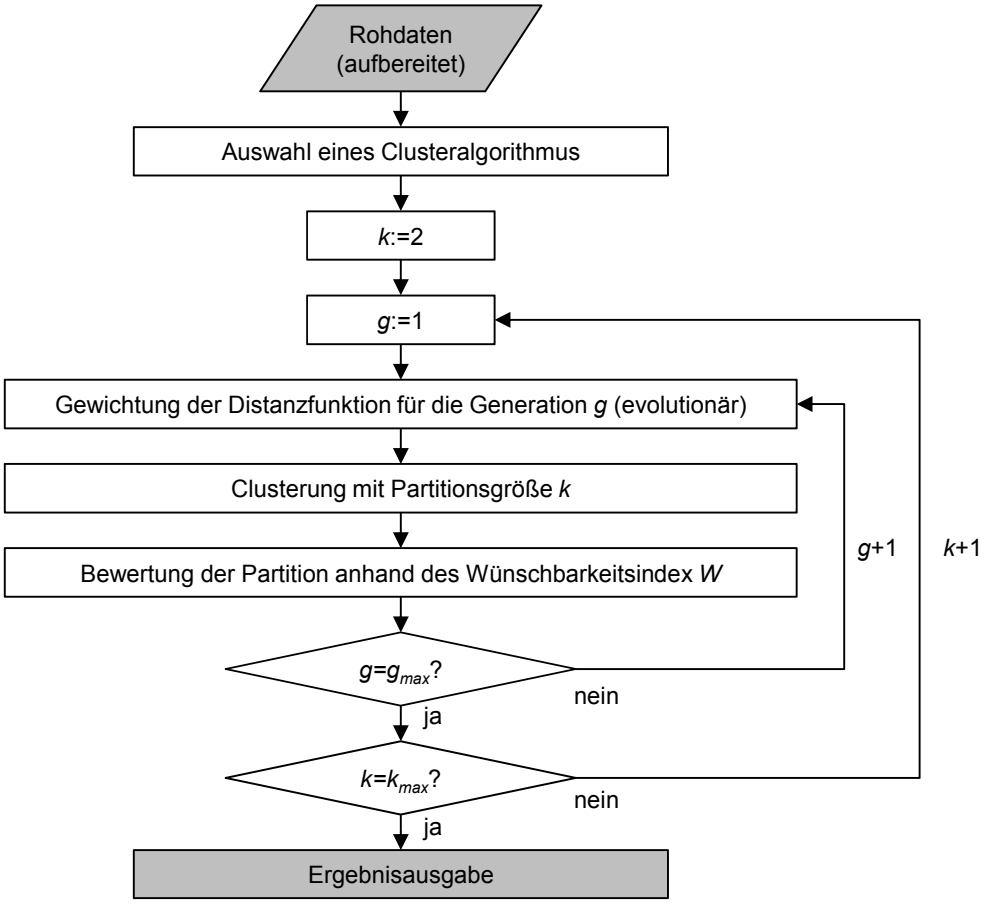


Abbildung 3.14: Gruppierungsalgorithmus mit evolutionärer Optimierung der Variablengewichtung (Ablaufschema)

Im Zuge der Selektion werden Individuen ausgewählt, aus denen durch Veränderung der Variablengewichtung eine Nachfolgegeneration neuer Individuen erzeugt wird. Die Selektion

erfolgt unter Berücksichtigung der zuvor durchgeführten Ergebnisbewertung, d. h. je besser ein Individuum bewertet wurde, desto höher die Selektionswahrscheinlichkeit für dieses Individuum (Mierswa 2009, S. 57f). Zur Veränderung der selektierten Individuen werden Rekombinations- und Mutationsoperationen durchgeführt. Bei der Rekombination, auch bezeichnet als Crossover, wird aus jeweils zwei als Eltern fungierenden Individuen ein neues Individuum, d. h. ein Kind, erzeugt, indem die Eigenschaften der Eltern, in diesem Fall die Gewichtungsfaktoren, miteinander kombiniert werden (Mierswa 2009, S. 58; Nissen 1994, S. 140ff). Die auf diese Weise generierten Individuen werden mutiert, d. h. die Variablengewichte werden mit einer definierten Wahrscheinlichkeit verändert (ebd).

Im Anschluss werden Individuen der Startpopulation und die neu erzeugte Generation von Individuen zu einer Population zusammengeführt, die im nächsten Optimierungsschritt als Ausgangspopulation genutzt wird (ebd.). Hierzu wird mit Hilfe jedes Individuums der Kinderpopulation eine Gruppierung durchgeführt und das Gruppierungsergebnis anhand des Wünschbarkeitsindex bewertet. Die Ergebnisse der Bewertung werden für die Fusion von Eltern- und Kinderpopulation verwendet. Hierbei besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die Elternpopulation komplett zu übernehmen und dieser die am besten bewerteten Kinder hinzuzufügen oder Eltern- und Kinderpopulation zu vergleichen und nur die am besten bewerteten Individuen beider Populationen zu übernehmen (Nissen 1994, S. 143f). Im Anschluss startet der zuvor beschriebene Evolutionsvorgang von neuem. Das Verfahren endet, sobald eine maximale Generationszahl erreicht wird.

Die Optimierung der Variablengewichtung in der Distanzfunktion wird iterativ für Partitionsgrößen von k = 2 bis zu einem Schwellwert k_{max} durchlaufen. Nach einer vollständig durchlaufenen Iteration liegt je Partitionsgröße ein Set von Variablengewichten vor, das für die Partitionsgröße die besten Gruppierungsergebnisse generiert. Die so erhaltenen Gruppierungsalternativen werden wiederum mittels der in Abschnitt 3.2.4 beschriebenen Bewertungsfunktion miteinander verglichen, um die optimale Partitionsgröße zu ermitteln. Darüber hinaus ist es wie o. a. möglich, das beschriebene Gruppierungsverfahren für verschiedene Clusteralgorithmen durchzuführen. Der Vergleich der Gruppierungsergebnisse erfolgt wiederum mit Hilfe der in Abschnitt 3.2.4 dargestellten Bewertungsfunktion. Auf diese Weise kann die hinsichtlich der in der Bewertungsfunktion enthaltenen Kriterien beste Lösung ausgewählt werden. Das Gruppierungsverfahren ist bis zu dieser Stelle programmiertechnisch umsetzbar. Obwohl in der Bewertungsfunktion bereits aus dem Anwendungskontext abgeleitetes Expertenwissen enthalten ist, ist es empfehlenswert, die mittels des o. a. Gruppierungsalgorithmus automatisch ermittelte beste Gruppierungsalternative einer abschließenden Plausibilitätsprüfung unter Einbeziehung von Expertenwissen zu unterziehen.

3.2.6 Bewertung der Gruppierungsalternativen

Im Rahmen des im vorangegangenen Abschnitt 3.2.5 beschriebenen Gruppierungsverfahrens wird eine Vielzahl von Gruppierungsalternativen erzeugt. Um diese alternativen Lösungen für das Problem der Produktfamilienbildung möglichst automatisiert zu vergleichen und die beste Lösung auszuwählen, ist eine geeignete Bewertungsfunktion erforderlich. Die Bewertung von

mittels Clusteranalyseverfahren erzeugten Gruppierungsalternativen wird auch bezeichnet als Clustervalidierung. Hierzu ist in der Literatur eine Vielzahl von Bewertungsgrößen zu finden (vgl. z. B. Sossna 2000). Dabei ist zu differenzieren zwischen Bewertungsgrößen zur Bestimmung der zu den Daten passenden Partitionsgröße und Größen zur Bewertung der Partitionsgüte.

Bspw. untersuchen Milligan, Cooper (1985) 30 Bewertungsgrößen hinsichtlich ihrer Eignung zur Partitionsgrößenbestimmung bzw. Milligan (1981) 30 Größen zu Partitionsgütebewertung. Speziell mit binären Datensätzen beschäftigen sich Weingessel, Dimitriadou, Dolnicar (1999). In allen drei Untersuchungen erweist sich insbesondere der sog. C-Index als eine gut geeignete Bewertungsgröße (vgl. Hubert, Levin 1976). Allerdings haben der C-Index wie auch der größte Teil der übrigen in den Untersuchungen angeführten Bewertungsgrößen den Nachteil, dass losgelöst vom Anwendungsfall lediglich formale Bewertungskriterien berücksichtigt werden. Dies erzeugt i. d. R. nur eingeschränkt aussagekräftige Bewertungsergebnisse und bedingt daher einen hohen Aufwand für zusätzliche Überprüfung der Gruppierungsalternativen mit Expertenwissen. Aus diesem Grund wird im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung eine Bewertungsfunktion – ein sog. Wünschbarkeitsindex – verwendet. Dieser enthält sowohl formale als auch Kriterien aus dem Anwendungskontext, die unter Berücksichtigung von Expertenwissen abgeleitet werden.

Der Wünschbarkeitsindex wird von Harrington (1965) als Ansatz zur multikriteriellen Optimierung von Qualitätsmerkmalen entwickelt. Jedes Qualitätsmerkmal wird dabei anhand einer sog. Wünschbarkeitsfunktion bewertet, die dem Merkmal entsprechend seiner Ausprägung einen numerischen Wert aus [0, 1] zuordnet (vgl. Trautmann 2004, S. 10f; Steuer 2005, S. 29ff). Der Wert 1 entspricht dabei der besten, d. h. der gewünschten Ausprägung, der Wert 0 hingegen repräsentiert die Ausprägung, die als schlechteste bewertet wird (ebd.). Der Wünschbarkeitsindex W fasst die einzelnen Wünschbarkeitsfunktionen (auch bezeichnet als Wünschbarkeiten) zu einem einheitenfreien Wert zusammen:

$$W : \{w_1, w_2, ..., w_d\} \rightarrow [0,1],$$

wobei die Variable d die Anzahl der Wünschbarkeitsfunktionen, d. h. die Anzahl der bewerteten Qualitätsmerkmale, angibt. Ursprünglich wird der Wünschbarkeitsindex als geometrisches Mittel der Wünschbarkeiten definiert (Harrington 1965):

$$W = \sqrt[d]{\prod_{i=1}^{d} w_i}.$$

Diese Definition hat zur Folge, dass der Gesamtindex den Wert 0 annimmt, sobald bereits eine der Wünschbarkeiten als inakzeptabel, d. h. mit dem Wert 0, bewertet wird. Auf der anderen Seite nimmt der Gesamtindex nur den Wert 1 an, wenn sämtliche Wünschbarkeiten mit dem Wert 1 bewertet werden, d. h. vollständig der gewünschten Ausprägung entsprechen. Der Gesamtindex wird somit stark von kleinen Werten, d. h. als schlecht bewertete Merkmalsausprägungen, beeinflusst, was sich insbesondere im Kontext der ursprünglichen Anwendung des Wünschbarkeitsindex zur Optimierung von Qualitätsmerkmalen als sinnvoll erweist (Trautmann 2004, S. 19).

Eine noch höhere Gewichtung erhalten die als schlecht bewerteten Merkmalsausprägungen, indem der Wünschbarkeitsindex als Produkt der Wünschbarkeitsfunktionen berechnet wird (vgl. Averill, Ingram, Nolan 2001). Alternativ ist es auch möglich den Wünschbarkeitsindex als arithmetisches Mittel der Wünschbarkeiten zu ermitteln, wobei der Einfluss einzelner kleiner Wünschbarkeiten abgeschwächt wird (vgl. Fuller, Scherer 1998). Darüber hinaus kann der Wünschbarkeitsindex auch als Minimum der Wünschbarkeitsfunktionen definiert werden, was zwar Verzerrungen durch voneinander abhängige Zielgrößen vermeidet, jedoch die Vernachlässigung der übrigen Zielgrößen zur Folge hat (vgl. Kim, Lin 2000).

Obgleich der Ansatz des Wünschbarkeitsindex ursprünglich auf die multikriterielle Optimierung von Qualitätsmerkmalen abzielt, ist eine Übertragung auf Bewertung von Clusteranalyseergebnissen möglich (vgl. Weihs, Szepannek 2009), wie es auch im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung angestrebt wird. Angesichts der o. a. Vorteile wird hierbei ein Wünschbarkeitsindex verwendet, der sich als geometrisches Mittel aus insgesamt vier Wünschbarkeitsfunktionen zusammensetzt. Diese leiten sich einerseits aus formalen Kriterien, andererseits jedoch auch aus dem Anwendungskontext ab. Bewertet werden durch je eine Wünschbarkeitsfunktion die Homogenität innerhalb der Gruppen (w_1), die Partitionsgröße (w_2), die Gleichmäßigkeit der Aufteilung der Objekte auf die Produktfamilien, d. h. die Größe der Produktfamilien (w_3) sowie die Anzahl sehr kleiner Produktfamilien (w_4). Der Wünschbarkeitsindex W für eine Partition $C^{(k)}$ der Partitionsgröße k berechnet sich somit als:

$$W(C^{(k)}) = \sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4} w_i}\,.$$

Bei der nachfolgend dargestellten Spezifizierung der einzelnen Wünschbarkeitsfunktionen wird wie o. a. von einer binären Variablenstruktur ausgegangen. Im Fall metrisch oder gemischt skalierter Variablen ist somit eine Anpassung der Wünschbarkeitsfunktionen erforderlich. Die grundsätzliche Anwendung ist jedoch möglich.

Die Wünschbarkeitsfunktion w_1 leitet sich aus der eingangs erwähnten Zielsetzung der Produktfamilienbildung ab, eine möglichst hohe Homogenität der Objekte innerhalb der Gruppen zu realisieren, die sich wiederum in minimalen Rüstzeiten innerhalb der Produktfamilien widerspiegelt. Aus diesem Grund bildet w_1 die durchschnittliche Distanz der Objekte innerhalb der Gruppen ab (vgl. Weihs, Szepannek 2009, S. 9):

$$w_1(C^{(k)}) = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{k} \sum_{X_j, X_l \in C_k, j \neq l} d(X_j, X_l)}{k(|C_k| - 1)^2} \right).$$

Dabei repräsentiert k die Partitionsgröße, $|C_k|$ die Anzahl der Objekte in der Gruppe C_k und $d(X_j, X_l)$ die quadriert Euklidische Distanz zwischen den Objekten X_j und X_l mit Gewichtung der einzelnen Variablen (vgl. Abschnitt 3.2.4).

Die Wünschbarkeitsfunktion w_2 zielt auf die Bewertung der Partitionsgröße ab. Zwar wird die exakte Partitionsgröße vor der Produktfamilienbildung als nicht bekannt vorausgesetzt, jedoch

wird davon ausgegangen, dass die Möglichkeit besteht, unter Einbeziehung von Expertenwissen anwendungsfallbezogen ein Intervall [k_{min}, k_{max}] festzulegen, innerhalb dessen die optimale Partitionsgröße erwartet wird. Dies führt zu einer sinnvollen Eingrenzung des Lösungsraums. Zur Spezifikation von w_2 wird der Ansatz nach Derringer, Suich (1980) verfolgt. Dieser stellt eine Verallgemeinerung der von Harrington entwickelten Wünschbarkeitsfunktionen dar und ermöglicht die Verwendung asymmetrischer Funktionsverläufe. Liegt wie im Fall des an dieser Stelle betrachteten Partitionsgrößenintervalls sowohl ein unterer als auch ein oberer Sollwert vor, kann w_2 wie folgt spezifiziert werden (vgl. Weihs, Szepannek 2009, S. 9):

$$w_2(C^{(k)}) = \begin{cases} 0, & k = 1 \\ \left(\frac{k-1}{k_{\min} - 2}\right)^2, & k \in \{2,3,...,k_{\min-1}\} \\ 1, & k \in \{k_{\min}, k_{\min+1},...,k_{\max}\} \\ \left(\frac{(k_{SG}+1)-k}{(k_{SG}+1)-(k+1)}\right)^3, & k \in \{k_{\max+1},...,k_{SG}\} \\ 0, & k \in N : k > k_{SG} \end{cases}.$$

Dabei wird ebenfalls eine obere Spezifikationsgrenze berücksichtigt (k_{SG}), die in diesem Fall die größte als sinnvoll erachtete Partitionsgröße darstellt. Wie aus der Funktion ersichtlich ist, werden Abweichungen von der gewünschten Merkmalsausprägung nach oben anders bewertet als Abweichungen nach unten (vgl. Steuer 2005, S. 35ff).

Die Wünschbarkeitsfunktion w_3 dient der Bewertung der Gleichmäßigkeit, mit der die Objekte auf die Produktfamilien aufgeteilt werden. Dies hat den Hintergrund, dass für den betrachteten Anwendungskontext annähernd gleichgroße Produktfamilien von Vorteil sind, da insbesondere sehr große wie auch sehr kleine Gruppen potenziell zu Schwierigkeiten bei der Nivellierungsmustererstellung führen. Dies wird deutlich anhand des Beispiels einer extrem ungleichmäßigen Partition, die eine sehr große Gruppe mit $n - k + 1$ Objekten und $k - 1$ kleine Gruppen enthält, die jeweils nur aus einem Objekt bestehen. Im Falle einer solchen Partition kann insbesondere in Verbindung mit Verzerrungen durch unregelmäßige Kundenabrufe nicht gewährleistet werden, dass ein sinnvolles, sich zyklisch wiederholendes Nivellierungsmuster erzeugt werden kann.

Zur Quantifizierung der Ausgeglichenheit der Gruppengröße wird die Anzahl der Intraclusterdistanzen n_w einer Partition verwendet. Die wenigsten Intraclusterdistanzen treten bei vollständig gleichmäßiger Aufteilung der Objekte auf die Gruppen auf. Im Gegenzug treten die meisten Intraclusterdistanzen auf, wenn $n - k + 1$ Objekte einer Gruppe und je ein Objekt den übrigen $k - 1$ Gruppen zugeordnet sind. Zwischen diesen beiden Extremwerten steigt n_w mit zunehmender Ungleichmäßigkeit der Aufteilung an. Die Wünschbarkeitsfunktion w_3 wird somit spezifiziert als (vgl. Weihs, Szepannek 2009, S. 10):

$$w_3(C^{(k)}) = 1 - \frac{n_w - \min C^{(k)}(n_w)}{\max C^{(k)}(n_w) - \min C^{(k)}(n_w)}.$$

Hierbei repräsentieren die Größen $min\ C^{(k)}(n_w)$ bzw. $max\ C^{(k)}(n_w)$ die minimale bzw. maximale Anzahl an Distanzen über alle möglichen Partitionen der Größe *k* von *n* Objekten.

Die o. a. Wünschbarkeitsfunktion w_3 berücksichtigt lediglich eine möglichst gleichmäßige Aufteilung des betrachteten Produktspektrums auf die Produktfamilien. Im Anwendungskontext der Produktfamilienbildung zu Nivellierungszwecken, ist neben einer möglichst gleichmäßigen Aufteilung auch eine möglichst geringe Anzahl sehr kleiner Produktfamilien gewünscht. Da w_3 die Bildung sehr kleiner Produktfamilien nicht ausreichend bestraft, wird hierzu die Wünschbarkeitsfunktion w_4 wie folgt modelliert (vgl. Weihs, Szepannek 2009, S. 10):

$$w_4(C^{(k)}) = 2^{-\beta}.$$

Die Variable β gibt dabei die Anzahl von Produktfamilien mit maximal n_{min} Objekten an.

Die beschriebene Vorgehensweise zur Produktfamilienbildung zu Nivellierungszwecken ist nur in Teilen programmiertechnisch umsetzbar. Die Auswahl der Gruppierungskriterien sowie die Datenaufbereitung sind stark abhängig vom Anwendungsfall, bedürfen eines hohen Maßes an Expertenwissen und sind daher im Gegensatz zu dem beschriebenen Gruppierungsverfahren programmiertechnisch nicht umsetzbar.

3.3 Erstellung des Nivellierungsmusters auf Produktfamilienbasis

Die anhand von Fertigungsähnlichkeiten gebildeten Produktfamilien werden genutzt, um ein auf Produktfamilien basierendes Nivellierungsmuster zu erstellen. Hierbei werden disjunkte Produktfamilien, das Ansetzen der Nivellierung an exakt einer Stelle im Wertstrom und das Vorliegen eines Ein-Maschinenfalls vorausgesetzt. Für die folgenden Berechnungen wird darüber hinaus eine monatliche Basisperiode angenommen, d. h. Angaben wie Kapazitätsangebote und -bedarfe beziehen sich auf einen Monat. Die Berechnung des EFEI-Werts erfolgt auf Schichtbasis.

Zur Nivellierungsmustererstellung gilt es zunächst die Produktfamilien zu identifizieren, die zyklisch in das Nivellierungsmuster eingeplant werden. Diese Familien werden nachfolgend auch als Nivellierungsfamilien bezeichnet. Die Auswahl der Nivellierungsfamilien erfolgt mit Hilfe einer ABC-/XYZ-Analyse. Im Anschluss wird die Reihenfolge bestimmt, entsprechend derer die Nivellierungsfamilien im Nivellierungsmuster angeordnet werden. Maßgebliches Zielkriterium bei der Reihenfolgefestlegung ist die Minimierung der Gesamtrüstzeit. Basierend auf dem mit der Reihenfolgebestimmung festgelegten Kapazitätsbedarf (bestehend aus Fertigungs- und Rüstzeiten) können der EFEI-Wert und die einzelnen Kapazitätszeitfenster berechnet werden, die den jeweiligen Nivellierungsfamilien zugewiesen werden. Ein Beispiel für ein Nivellierungsmuster auf Basis von Produktfamilien, das auf diese Weise generiert werden kann, ist in Abbildung 3.15 dargestellt.

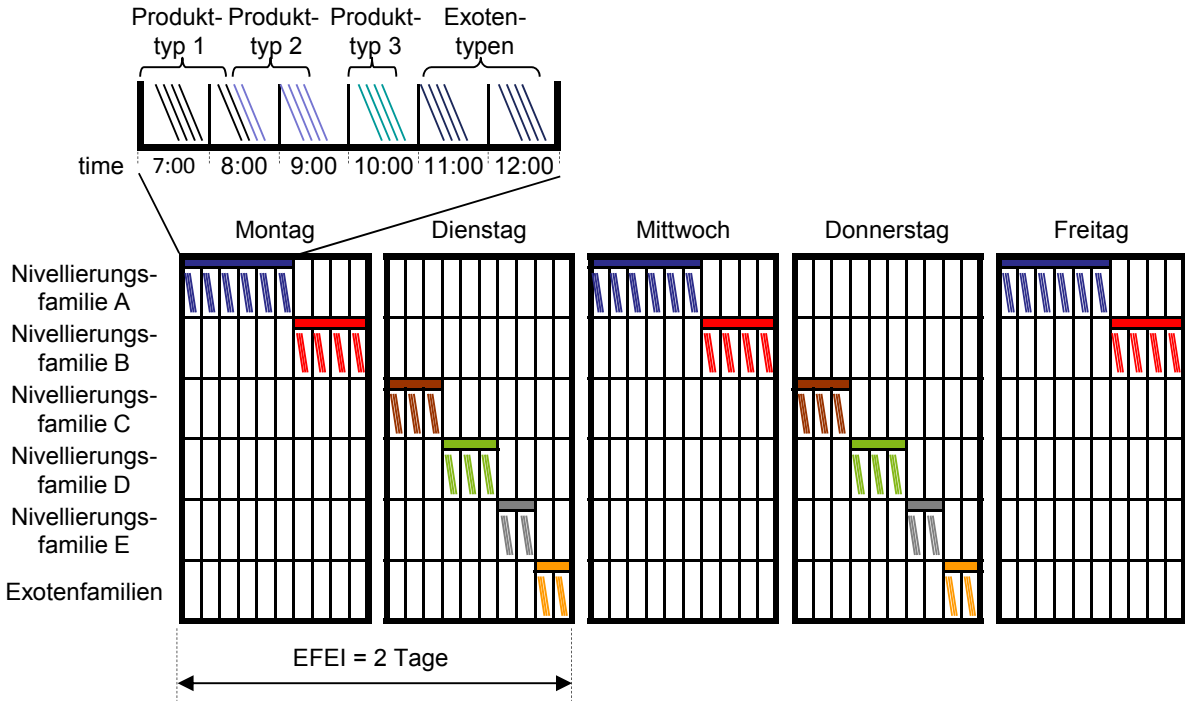


Abbildung 3.15: Beispielhaftes Nivellierungsmuster auf Basis von Produktfamilien (in Anlehnung an Deuse, Birkmann, Harms 2007, S. 46)

Im abgebildeten Beispiel wiederholt sich das Nivellierungsmuster alle 2 Schichten (EFEI-Wert = 2 Schichten). Auf die o. a. Schritte zur Erstellung des Nivellierungsmusters wird in den nachfolgenden Abschnitten im Detail eingegangen. Darüber hinaus wird in Abschnitt 3.3.5 ein Ansatz zur Musteroptimierung beschrieben. Dieser Ansatz nutzt das mit Hilfe der o. a. Schritte generierte Muster und versucht dieses mit Hilfe von Tauschoperationen zu optimieren. Zielgröße bei der Optimierung ist die Maximierung der Ausnutzung der verfügbaren Kapazität, ohne mehr zu produzieren als benötigt wird.

3.3.1 ABC/XYZ-Analyse

Im ersten Schritt der Nivellierungsmustererstellung sind wie o. a. Nivellierungsfamilien, d. h. zyklisch in das Nivellierungsmuster einzuplanende Produktfamilien, zu identifizieren. Zu diesem Zweck wird im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung eine ABC-/XYZ-Analyse verwendet. Die Analyse nutzt vergangenheits- und/oder prognosebezogene Produktionsvolumina. Da diese Daten i. d. R. bezogen auf einzelne Erzeugnisvarianten vorliegen, ist zunächst die produktfamilienbezogene Aggregation der Daten erforderlich. Im Zuge der ABC-/XYZ-Analyse werden die gebildeten Produktfamilien einerseits hinsichtlich ihres Anteils am Gesamtproduktionsvolumen, andererseits hinsichtlich ihrer Verbrauchsstetigkeit segmentiert. Letztere lässt sich bspw. durch den Variationskoeffizienten quantifizieren. Hinsichtlich des Volumenanteils wird zwischen A-Segment, B- und C-Segment unterschieden, wobei dem A-Segment die Familien mit dem höchsten und dem C-Segment die Familien mit dem geringsten Volumenanteil zugeordnet werden. In Analogie wird hinsichtlich der Verbrauchsstetigkeit differenziert zwischen X-Segment (hohe Verbrauchsstetigkeit), Y-Segment, und Z-Segment (geringe Verbrauchsstetigkeit). Die Grenzwerte zur Trennung der einzelnen Segmente hängen stark vom Anwendungsfall ab und können folglich nicht pauschal angegeben werden. Eine

Möglichkeit zur Darstellung des Ergebnisses der ABC-/XYZ-Analyse ist Abbildung 3.16 zu entnehmen.

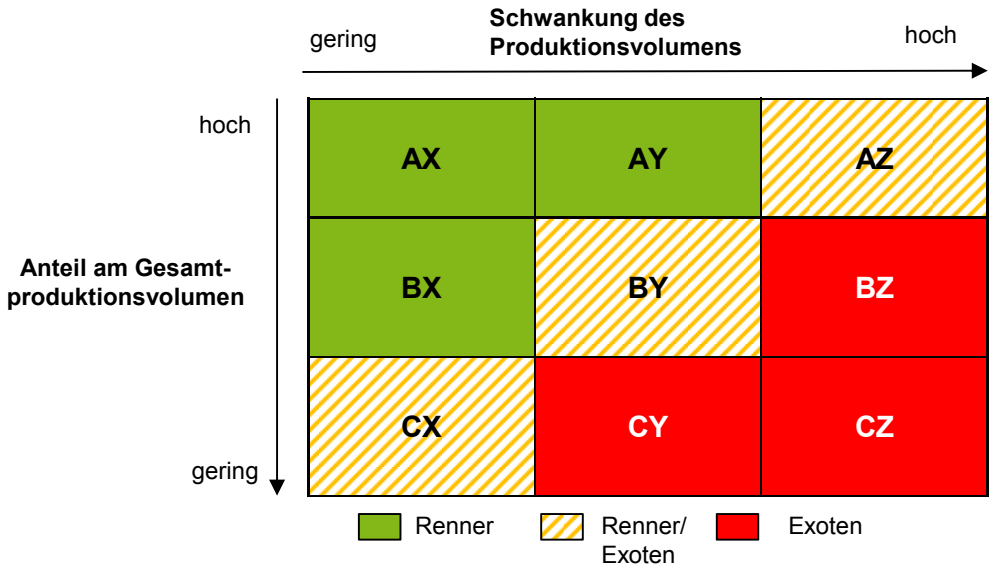


Abbildung 3.16: ABC-/XYZ-Analyse zur Identifizierung von Nivellierungsfamilien

Durch Kombination von ABC- und XYZ-Segmentierung wird es möglich, zwischen Renner- und Exotenfamilien zu unterscheiden (vgl. Abbildung 3.16). Während sich Rennerfamilien durch einen hohen Volumenanteil in Verbindung mit einer hohen Verbrauchsstetigkeit auszeichnen, sind für Exotenfamilien ein geringer Volumenanteil und eine geringe Verbrauchsstetigkeit charakteristisch (vgl. Dennis 2007, S. 83; Smalley 2005, S. 15). Angesichts dieser Eigenschaften eignen sich primär Rennerfamilien als Nivellierungsfamilien. Für Exotenfamilien bietet es sich hingegen an, pauschale Zeitfenster im Nivellierungsmuster vorzusehen.

3.3.2 Reihenfolgefestlegung

Der Schritt der Reihenfolgefestlegung verfolgt das Ziel, eine Abfolge festzulegen, in der die Nivellierungsfamilien im Nivellierungsmuster angeordnet werden. Maßgebliches Zielkriterium bei der Reihenfolgebildung ist die Minimierung der Gesamtrüstzeit für einen Zyklus, in dem alle Nivellierungsfamilien einmal enthalten sind. Ein derartiger Zyklus wird nachfolgend als Nivellierungszyklus bezeichnet. Die Reihenfolge der Nivellierungsfamilien im Muster wird somit beeinflusst von den Rüstzeiten zwischen den Familien, die sich bspw. in Form einer Rüstmatrix, wie sie Abbildung 3.17 zeigt, darstellten lassen. Die Elemente r_{ij} der Rüstmatrix geben jeweils die zum Umrüsten von Familie i zu Familie j benötigte Zeit an. Hierbei gilt:

$r_{ij} = \infty$ falls i = j.

Nachfolgend wird vom Vorliegen einer symmetrischen Rüstmatrix ausgegangen, d. h.:

$r_{ij} = r_{ji}$.

Das Reihenfolgefestlegungsproblem kann auf das sog. Traveling Salesman Problem (TSP) zurückgeführt werden. Das TSP ist das am intensivsten untersuchte kombinatorische Optimierungsproblem. Es beschreibt das Problem eines Handlungsreisenden, der eine definierte Anzahl von *m* Städten besucht und die kürzeste bzw. die kostengünstigste Rundreise sucht,

bei der er jede Stadt genau einmal bereist und am Ende wieder zum Ausgangspunkt zurückkehrt (Stache, Zimmermann 2010, S. 147; Laporte 2010, S. 35). Graphentheoretisch kann das TSP mit Hilfe eines vollständigen, (im Fall einer symmetrischen Rüstmatrix) ungerichteten Graphen $G = [V, E, R]$ mit einer Knotenmenge $V = \{t_1, t_2, \ldots, t_m\}$, einer Kantenmenge $\{(t_{i,j}): i; j \in V, i < j\}$ und einer zur Kantenbewertung genutzten Rüstmatrix $R = (r_{ij})$ beschrieben werden (Domschke, Drexl 2005, S. 142f). Hierbei stellt jede Stadt bzw. jede Nivellierungsfamilie einen Knoten dar. Für die Kantenbewertung gilt für alle Knoten *i*, *j* und *k* die Dreiecksungleichung (ebd.):

$$r_{ik} \leq r_{ij} + r_{jk}$$

	Nivellierungs-familie 1	**Nivellierungs-familie 2**	**…**	**Nivellierungs-familie m**
Nivellierungs-familie 1		r_{12}	…	r_{1m}
Nivellierungs-familie 2	r_{21}		…	r_{2m}
…	…	…		…
Nivellierungs-familie n	r_{n1}	r_{n2}	…	

Abbildung 3.17: Aufbau einer symmetrischen Rüstmatrix auf Produktfamilienbasis

Gesucht wird die Reihenfolge $[t_1, t_2, \ldots, t_n, t_{n+1}]$ mit minimaler Gesamtrüstzeit, in der jeder Knoten genau einmal enthalten ist und gilt $t_1 = t_{n+1}$ (d. h. eine geschlossene Rundreise) (ebd.). Generell wird das TSP der Klasse der *np*-vollständigen Probleme zugeordnet (Applegate 2006, S. 49f; Ziegenbalg, Ziegenbalg, Ziegenbalg 2007, S. 202f). Mögliche Lösungsverfahren für das TSP und deren Eigenschaften werden beispielsweise von Applegate (2006, S. 93ff), und Domschke, Drexl (2005, S. 142ff) beschrieben. Im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung wird eine gebräuchliche, verhältnismäßig einfache zweistufige Heuristik zur Lösung des TSP verwendet. Die Heuristik setzt sich aus einem deterministischen Eröffnungsverfahren und einem darauf aufbauenden deterministischen Verbesserungsverfahren zusammen. Als Eröffnungsverfahren wird das Verfahren des besten (oder nächsten) Nachfolgers (Nearest Neighbor) gewählt. Das Verfahren beginnt die Reihenfolge mit einem beliebigen Knoten $t_0 \in V$ und fügt in der ersten Iteration den Knoten t_1 mit dem geringsten Abstand zu t_0 der Reihenfolge hinzu (Domschke, Drexl 2005, S. 143). In den folgenden $i = 2, \ldots, m-1$ Iterationen wird jeweils der noch nicht in der Reihenfolge enthaltene Knoten t_i der Reihenfolge hinzugefügt, der zum Knoten t_{i-1} den geringsten Abstand aufweist (Domschke, Drexl 2005, S. 144). Auf diese Weise wird eine erste zulässige Lösung für das TSP generiert.

Das beschriebene Eröffnungsverfahren ist der Klasse der sog. Greedy-Algorithmen zuzuordnen, die in jeder Iteration die jeweils augenblicklich beste Alternative auswählen (Domschke, Drexl 2005, S. 144). Hinzu kommt, dass das Verfahren des besten Nachfolgers i. d. R. suboptimale Lösungen erzeugt (ebd.). Aus diesem Grund wird die mit dem Eröffnungsverfahren erzeugte Reihenfolge mit Hilfe des sog. 2-optimalen Verfahrens (2-opt) verbessert, das auf dem Prinzip der Nachbarschaftssuche basiert.

Allgemein wird bei der Nachbarschaftssuche eine gültige Lösung des betrachteten Problems vorausgesetzt, aus der durch Transformation eine neue Lösung erzeugt wird (Domschke, Drexl 2005, S. 128). Die Nachbarschaft stellt dabei die Gesamtheit sämtlicher aus der ursprünglichen Lösung durch einmalige Transformation erzeugbaren neuen Lösungen dar (ebd.). Zu den bekanntesten Transformationsarten zählen die Veränderung einer Lösung an exakt einer Stelle, das Vertauschen von Elementen sowie das Verschieben von Elementen (ebd.). Jede Lösung in der Nachbarschaft kann als Ausgangslösung für eine weitere Iteration der Nachbarschaftssuche verwendet werden. Die Nachbarschaftssuche endet bei reinen Verbesserungsverfahren, sobald in einer Iteration keine verbessernde Lösung in der Nachbarschaft gefunden wird und somit zumindest ein lokales Optimum erreicht ist (Domschke, Drexl 2005, S. 129). Es kann nicht garantiert werden, dass ein globales Optimum gefunden wird (ebd.). Lediglich sog. lokale Suchverfahren sind in der Lage, lokale Optima wieder zu verlassen, indem auch Transformationen erlaubt werden, die zwischenzeitlich zu einer Verschlechterung der Lösung führen (ebd.).

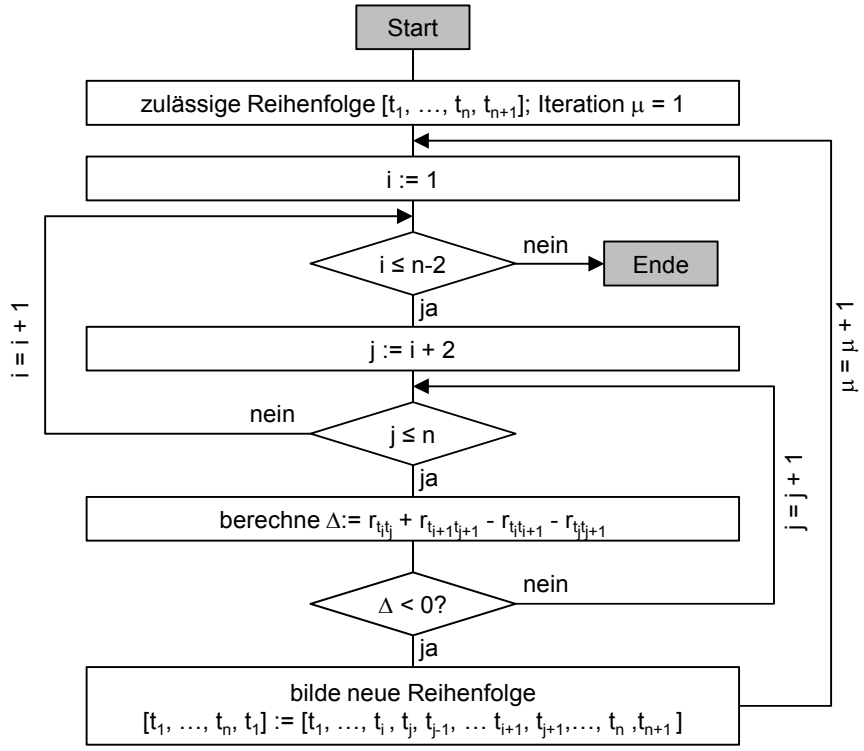


Abbildung 3.18: Ablaufschema 2-opt Verfahren

Der Ablauf des 2-opt Verfahrens ist in Abbildung 3.18 schematisch dargestellt. Das Verfahren prüft systematisch sämtliche Möglichkeiten zur Vertauschung von zwei Kanten einer gegebenen Reihenfolge gegen zwei andere (Domschke, Drexl 2005, S. 145). Ist durch die Vertauschung von zwei Kanten eine Verbesserung, d. h. in dem im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung betrachteten Kontext eine Reduzierung der Gesamtrüstzeit für einen Nivellierungszyklus, realisierbar, wird die entsprechende Vertauschung durchgeführt (ebd.). Anschließend beginnt erneut die Überprüfung der Auswirkungen von Kantenvertauschungen (ebd.). Das Verfahren ist beendet, wenn in einer Iteration sämtliche paarweisen Vertauschungsmöglichkeiten geprüft sind und keine Verbesserung mehr realisiert werden kann

(ebd.). Je Iteration benötigt das 2-opt Verfahren einen Rechenaufwand der Ordnung m^2 (Domschke, Drexl 2005, S. 146).

Auch mit Hilfe des 2-opt Verfahrens kann nicht gewährleitstet werden, dass eine global optimale Lösung erzielt wird (Domschke, Drexl 2005, S. 146). Rückschlüsse aus der praktischen Erstanwendung weisen jedoch darauf hin, dass die mit Hilfe der beschriebenen zweistufigen Heuristik erzeugten Reihenfolgen hinreichend gut sind (vgl. Kapitel 5). Hinzu kommt zum einen, dass die Rüstzeit zwar maßgebliches aber nicht zwingend einziges Kriterium bei der Reihenfolgefestlegung ist, weshalb sich auf jeden Fall eine Plausibilitätsprüfung der heuristisch generierten Reihenfolge mit Expertenwissen empfiehlt. Zum anderen dient die in diesem Schritt erzeugte Reihenfolge lediglich zur Erstellung eines Nivellierungsmusters, das im Zuge der in Abschnitt 3.3.5 beschriebenen Musteroptimierung als Startlösung genutzt wird.

3.3.3 EFEI-Berechnung

Die wie im vorangegangenen Abschnitt festgelegte Reihenfolge der Nivellierungsfamilien wird genutzt, um die Gesamtrüstzeit für einen Nivellierungszyklus zu ermitteln. Diese wird wiederum verwendet, um den theoretisch möglich EFEI-Wert zu berechnen. Hierzu wird zunächst die sog. (Gesamt-)Rüstlücke (RL_g) bestimmt. Diese gibt die für das Umrüsten zwischen den Nivellierungsfamilien zur Verfügung stehende Kapazität an. Die Rüstlücke wird ermittelt, indem vom verfügbaren Bruttokapazitätsangebot geplante Stillstände (Pausen, Instandhaltung), Verfügbarkeits-, Leistungs- und Qualitätsverluste abgezogen werden (vgl. Abbildung 3.19).

Abbildung 3.19: Rüstlückenermittlung

Das so berechnete Nettokapazitätsangebot wird wiederum reduziert um den Kapazitätsbedarf für Exotenfamilien (Fertigungs- und Rüstzeiten) und den Kapazitätsbedarf zur Fertigung der Nivellierungsfamilien (ohne Berücksichtigung von Rüstzeiten). RL_g berechnet sich somit als:

$$RL_g = [NGK * (1 - KE)] - KRG,$$

wobei KE den für Exotenfamilien vorgesehenen Anteil des Nettokapazitätsangebotes, NGK das Nettokapazitätsangebot und KRG den Kapazitätsbedarf zur Fertigung der Nivellierungsfamilien (beides gemessen in Stunden pro Monat) angibt.

Die Anzahl der theoretisch möglichen Nivellierungszyklen je Monat (lc_{th}) ergibt sich aus dem abgerundeten Quotienten von Rüstlücke (RL_g) und Gesamtrüstzeit für einen Nivellierungszyklus (RZ):

$$lc_{th} = \left\lfloor \frac{RL_g}{RZ} \right\rfloor .$$

Der in Schichten je Monat gemessene theoretisch mögliche EFEI-Wert ($EFEI_{th}$) berechnet sich somit als:

$$EFEI_{th} = \frac{AS}{lc_{th}} ,$$

wobei AS die Anzahl der verfügbaren Schichten je Monat bezeichnet. Ggf. besteht die Notwendigkeit, den theoretisch möglichen EFEI-Wert bspw. unter Berücksichtigung von Mindestlosgrößen anzupassen. $EFEI_{th}$ fungiert somit als unterer Schrankenwert für den unter Berücksichtigung von anwendungsbezogenen Restriktionen zur Nivellierungsmustererstellung gewählten Wert $EFEI_{ch}$.

3.3.4 Berechnung von Kapazitätszeitfenstern

Im letzten Schritt der Mustererstellung werden für die einzelnen Nivellierungsfamilien sowie für die Exotenfamilien Kapazitätszeitfenster berechnet. Durch die Anordnung der Zeitfenster entsprechend der in Abschnitt 3.3.2 festgelegten Reihenfolge entsteht das Nivellierungsmuster. Zur Berechnung der Kapazitätszeitfenster wird anhand des gewählten EFEI-Wert ($EFEI_{ch}$) die entsprechende Anzahl von Nivellierungszyklen je Monat berechnet:

$$lc_{ch} = \left\lfloor \frac{AS}{EFEI_{ch}} \right\rfloor ,$$

wobei AS wiederum die Anzahl der verfügbaren Arbeitsschichten je Monat repräsentiert. Basierend darauf berechnet sich das im Nivellierungsmuster einzuplanende Zeitfenster ZF_i für eine beliebige Nivellierungsfamilie i als Summe der erforderlichen Rüstzeit zur nächsten Familie $r_{i,i+1}$ und der je Nivellierungszyklus benötigten Fertigungszeit KR_i:

$$ZF_i = \frac{KR_i}{lc_{ch}} + r_{i,i+1}; i \in N, 1 \le i \le m .$$

KR_i ergibt sich dabei aus der Summe der monatlich benötigten Fertigungszeiten kr_l der j zu Nivellierungsfamilie i gehörenden Erzeugnisvarianten:

$$KR_i = \sum_{l=1}^{j} kr_l$$

Die Exotenfamilien werden im Nivellierungsmuster durch ein pauschales Zeitfenster (ZE_p) berücksichtigt, das sich im Muster an einen Nivellierungszyklus anschließt. Die Länge dieses Zeitfensters ergibt sich, indem der für Exotenfamilien zur Verfügung stehende Anteil des Nettokapazitätsangebots gleichmäßig auf die Nivellierungszyklen aufgeteilt wird:

$$ZE_p = \frac{NGK^* KE}{lc_{ch}}.$$

3.3.5 Musteroptimierung

Durch die Wahl eines vom theoretisch möglichen Wert abweichenden $EFEI_{ch}$ sowie durch Rundungseffekte besteht die Möglichkeit, dass die verfügbare Rüstlücke durch das Nivellierungsmuster nicht vollständig ausgenutzt wird. In diesem Fall kann die verbleibende Rüstlücke genutzt werden, indem große Zeitfenster im Nivellierungsmuster geteilt und Nivellierungsfamilien mehrfach in einem Nivellierungszyklus gefertigt werden. Die verbleibende Rüstlücke wird somit für zusätzliches Rüsten und nicht als zusätzliche Fertigungszeit genutzt. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit, Losgrößen zu reduzieren und damit potenziell Verbesserungen hinsichtlich zentraler Zielgrößen wie Durchlaufzeiten, Umlaufbeständen, Liefertreue und Flexibilität zu realisieren. Die Alternative, die verbleibende Rüstlücke als zusätzliche Fertigungszeit zu nutzen, stellt eine Form von Überproduktion, die schwerwiegendste Form der Verschwendung, dar und wird daher an dieser nicht weiter verfolgt.

Die verbleibende Rüstlücke RL_V berechnet sich als:

$$RL_V = NGK - \left\{ \frac{RL_g}{lc_{ch}} + \left[\left(lc_{ch} * ZE_p \right) + \sum_{i=1}^{m} ZF_i \right] \right\}$$

Die verbleibende Rüstlücke wird genutzt, um große Zeitfenster im Nivellierungsmuster in Teilzeitfenster zu splitten und diese getrennt in das Muster einzufügen. Dies stellt wiederum ein kombinatorisches Optimierungsproblem dar, das im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung mit Hilfe der in Abbildung 3.20 dargestellten Heuristik gelöst wird, die ebenfalls wie das bereits o. a. 2-opt-Verfahren das Prinzip der Nachbarschaftssuche verfolgt.

Die Heuristik sieht vor, dass in jeder Iteration μ das größte Zeitfenster im Muster gesucht und in zwei gleichgroße Hälften geteilt wird. Während die eine Hälfte an ihrer ursprünglichen Position im Muster verbleibt, wird für die zweite Hälfte geprüft, ob sich diese rüstzeitoptimal in das Muster einfügen lässt. Hierbei sind einerseits ein Unterschreiten einer evtl. vorhandenen Mindestlosgröße sowie andererseits ein Überschreiten der verbleibenden Rüstlücke bzw. der Gesamtrüstlücke zu vermeiden. Zusätzlich ist zu gewährleisten, dass keine zwei Zeitfenster der gleichen Nivellierungsfamilie unmittelbar aufeinander folgen. Ist ein Einfügen der zweiten Zeitfensterhälfte möglich, wird das Nivellierungsmuster entsprechend angepasst, die neue verbleibende Rüstlücke berechnet und es startet eine neue Iteration μ+1. Ist ein Einfügen der zweiten Zeitfensterhälfte nicht möglich, wird das nächstgrößte Zeitfenster im Nivellierungsmuster gesplittet und diesbezüglich geprüft.

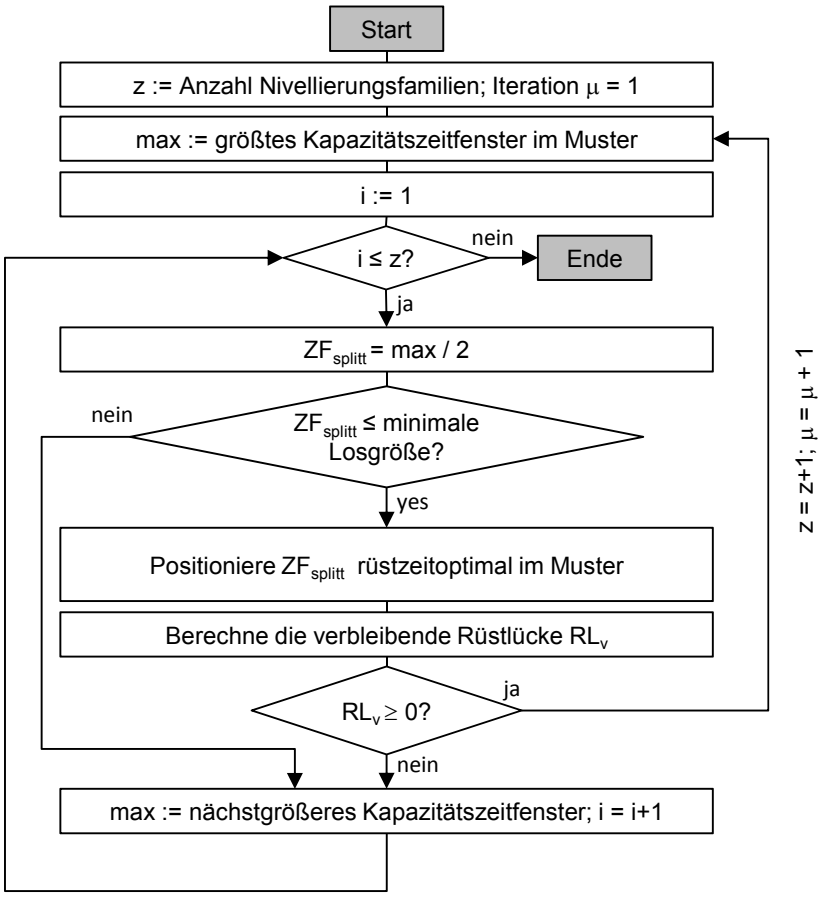


Abbildung 3.20: Heuristik zur Nivellierungsmusteroptimierung

Die Heuristik endet, sobald die verbleibende Rüstlücke ausgeschöpft ist oder in einer Iteration alle Nivellierungsfamilien erfolglos dahingehend geprüft wurden, ob sich ein Zeitfenster im Nivellierungsmuster aufsplitten und verteilen lässt. Die beschriebene Heuristik stellt einen Greedy-Algorithmus dar und liefert u. U. suboptimale Lösungen. Die Heuristik erwies sich jedoch trotzdem in den ersten praktischen Anwendungen als einsetzbar und lieferte brauchbare Ergebnisse (vgl. Kap. 5). Dennoch bestehen Möglichkeiten, die entwickelte Heuristik weiter zu verbessern, bspw. durch Integration einer Simulated-Annealing Komponente.

3.4 Umsetzung, Monitoring und kontinuierliche Verbesserung

Im Zuge der Umsetzung werden Fertigungsaufträge den Produktfamilien zugeordnet und entsprechend der aktuellen Auftragslage in das Nivellierungsmuster eingeplant. Vor dieser operativen Umsetzung der Nivellierung bedarf es unter Berücksichtigung der jeweils vorliegenden Rahmenbedingungen ggf. der Auswahl eines geeigneten Steuerungsverfahrens. Ein weiterer zentraler Aspekt der Umsetzung ist die Überwachung der Einhaltung des Nivellierungsmusters und das Reagieren auf Abweichungen im Rahmen des Kontinuierlichen Verbesserungsprozesses. Sowohl die Auswahl eines Steuerungsverfahrens als auch Abweichungserkennung und kontinuierliche Verbesserung werden in den nachfolgenden Abschnitten behandelt.

3.4.1 Auswahl eines Steuerungsverfahrens

In der Literatur wird eine Vielzahl unterschiedlicher Steuerungsverfahren beschrieben. Zur Klassifizierung gängiger Verfahren eignet sich zunächst das dem Verfahren zu Grunde liegende Steuerungsprinzip. Diesbezüglich sind zwei grundsätzliche Prinzipien zu unterscheiden, das Push- und das Pull-Prinzip. Beim Push-Prinzip werden Fertigungsaufträge mit Hilfe eines zentralen Produktionsplanungs- und -steuerungssystems bedarfs- oder prognoseorientiert durch die Fertigung gedrückt (Dickmann 2009, S. 158ff; Hopp, Spearman 2009, S. 340f). Dadurch dass die Terminierung der Aufträge i. d. R. auf Plandurchlaufzeiten basiert, die in der Praxis oftmals von den tatsächlichen Durchlaufzeiten abweichen, werden Aufträge zur Einhaltung von Lieferterminen früher als eigentlich erforderlich freigegeben. Infolge dessen erhöhen sich Umlaufbestände und Liegezeiten (durch Warteschlangen vor den Arbeitsstationen), weswegen die Plandurchlaufzeiten für die Folgeperioden entsprechend erhöht werden. Dies führt tendenziell zu einem gegenseitigen Aufschaukeln von Beständen und Durchlaufzeiten, was auch als Durchlaufzeitsyndrom bezeichnet wird (Kiener 2006, S. 268).

Im Gegensatz zum Push-Prinzip zeichnet sich das Pull-Prinzip dadurch aus, dass die Produktionsplanung und -steuerung dezentral erfolgt und Fertigungsaufträge durch Verbräuche in vorgelagerten Prozessen oder durch den Kunden ausgelöst werden (Dickmann 2009, S. 158ff; Hopp, Spearman 2009, S. 340f). Die Fertigungsaufträge werden somit gewissermaßen durch die Fertigung gezogen. Der Effekt des zuvor beschriebenen Durchlaufzeitsyndroms wird vermieden, weshalb das Pull-Prinzip wesentlich zur Vermeidung von Verschwendung in Form von Überproduktion, Beständen und langen Durchlaufzeiten beiträgt.

Die Auswahl eines Steuerungsverfahrens ist stark abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall. Verfahren die typischerweise mit Nivellierungsansätzen kombiniert werden, sind das Kanban- und das CONWIP-Verfahren. Die beiden Verfahren werden nachfolgend lediglich in Kürze beschrieben. Bezüglich einer detaillierten Beschreibung weiterer Verfahren wird auf die entsprechende Literatur verwiesen (vgl. z. B. Lödding 2008).

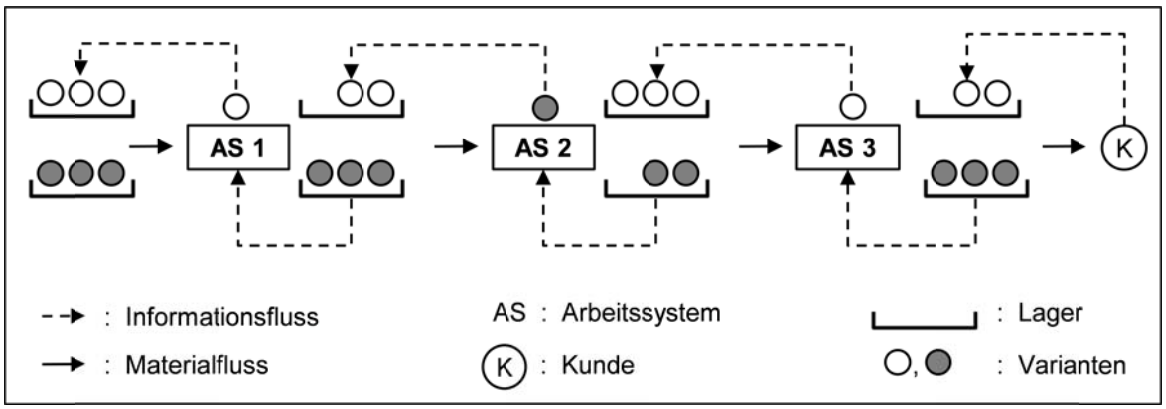


Abbildung 3.21: Verfahrensprinzip der Kanban-Steuerung (Lödding 2008, S. 178)

Bei der Steuerung nach dem Kanban-Verfahren wird der betrachtete Wertstrom in ein System selbststeuernder Regelkreise strukturiert (vgl. Abbildung 3.21). Zwischen einer verbrauchenden Stelle und einer erzeugenden Stelle erfolgt eine Entkopplung durch einen Pufferbestand (Dickmann, Dickmann 2009, S. 11f; Lödding 2008, S. 177ff). In einem solchen Regelkreis sind Material- und Informationsfluss gegenläufig (ebd.). Im Gegensatz zu Systemen, die nach dem

Push-Prinzip gesteuert werden, wird nur eine Fertigungsstufe, i. d. R. die aus Kundensicht letzte, durch ein zentrales Produktionsplanungs- und -steuerungssystem angesteuert (ebd.). Die übrigen Fertigungsstufen werden von den jeweils nachgelagerten Stufen gesteuert, d. h. eine erzeugende Stelle fertigt nur das, was von der nachgelagerten Stelle verbraucht wurde (ebd.)

Wesentliche Vorteile der Kanban-Steuerung sind die Vermeidung von Überproduktion sowie die Möglichkeit, Umlaufbestände und Durchlaufzeiten zu kontrollieren (Dickmann, Dickmann 2009, S. 13ff). Die Kanban-Steuerung ist allerdings nur für eine relativ geringe Variantenanzahl geeignet (Lödding 2008, S. 209). Dieses Defizit wird behoben durch eine Weiterentwicklung des Kanban-Verfahrens, das sog. Conwip-Verfahren (Conwip= constant work in process). Die Grundidee des Conwip-Verfahrens besteht darin, den Umlaufbestand auf einem konstanten Niveau zu regeln (Lödding 2008: 327). Das Verfahrensprinzip der Conwip-Steuerung ist Abbildung 3.22 zu entnehmen. Ein mit dem Conwip-Verfahren gesteuerter Wertstrom wird als ein geschlossener Regelkreis mit einem konstanten Umlaufbestand betrachtet. Ein neuer Auftrag wird nur ausgelöst, wenn dieser Umlaufbestand dadurch unterschritten wird, dass ein fertiggestellter Auftrag das System verlässt (Lödding 2008, S. 327).

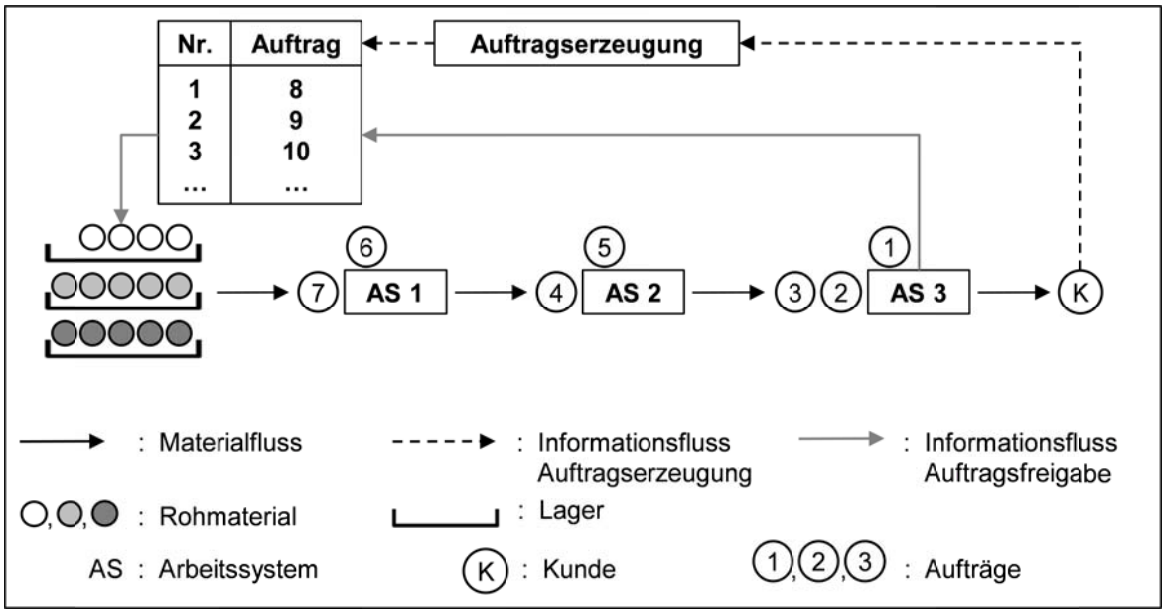


Abbildung 3.22: Verfahrensprinzip der CONWIP-Steuerung (Lödding 2008, S. 328)

Wesentliche Vorteile einer derartigen Steuerung sind die Möglichkeiten zur Kontrolle von Beständen und Durchlaufzeiten sowie die potenzielle Anwendbarkeit zur Steuerung variantenreicher Wertströme (Lödding 2008, S. 331; Wuthnow, Deuse 2009a).

3.4.2 Erkennung von Abweichungen und kontinuierliche Verbesserung

Ein weiterer im Rahmen der Umsetzung der Produktionsnivellierung relevanter Aspekt ist das Erkennen von Abweichungen und die Reaktion auf Abweichungen im Zuge des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP), was auch als Abweichungsmanagement bezeichnet wird. Im Kontext des KVP kann ein Nivellierungsmuster als eine Art Zielzustand verstanden werden (vgl. Abbildung 3.23).

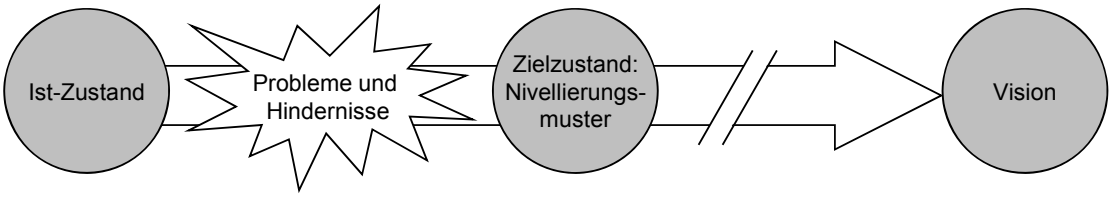


Abbildung 3.23 Nivellierungsmuster als Zielzustand (in Anlehnung an Rother 2009, S. 104)

Ein Zielzustand repräsentiert allgemein einen Zustand, der eine Weiterentwicklung des Ist-Zustandes in Richtung einer definierten Vision darstellt (Rother 2009, S. 63). Verglichen mit der Vision zeichnet sich der Zielzustand dadurch aus, dass er zum einen kurzfristiger realisierbar und zum anderen klarer und spezifischer definiert ist (ebd.). Die Abweichungen zwischen Ist- und Zielzustand weisen auf Probleme und Hindernisse hin, die es zur Erreichung des Zielzustands bspw. durch Anwendung der PDCA-Methode zu eliminieren gilt (Rother 2009, S. 140ff).

	Zielzustand	**Istzustand**	**Abgleich Ziel- und Istzustand**
EFEI Rennerfamilien	1 Tag	1 Tag	
Fertigung Exoten	an fixen Tagen	an fixen Tagen	
Volumenschwankungen bei Rennerfamilien	< 10%	≅ 20%	

keine Abweichung *Abweichung erkannt*

Abbildung 3.24: Mögliche Kriterien zur Erkennung von Abweichungen (in Anlehnung an Buhl u. a. 2009, S. 22)

Es reicht somit nicht aus, einen Zielzustand bspw. in Form eines Nivellierungsmusters zu spezifizieren, sondern bedarf quantifizierbarer Zielgrößen, anhand derer Abweichungen vom Zielzustand erkennbar sind (vgl. Abbildung 3.24). Abweichungen sind dabei in den Dimensionen Menge, Zeit und Reihenfolge zu erfassen (Wuthnow 2010, S. 59). Eine mögliche bereits erwähnte Kennzahl ist der EFEI-Wert, der auf einzelne oder auf alle Nivellierungsfamilien bezogen gemessen werden kann. Weitere im Rahmen des Abweichungsmanagements einsetzbare Kennzahlen sind die Terminabweichung, die Reihenfolgedisziplin sowie die sog. Nivellierungsgüte (Wuthnow 2010, S. 59ff}).

Die Terminabweichung dient der Quantifizierung von Abweichungen des tatsächlichen vom geplanten Auftragsdurchlauf und kann bezogen auf den Abgang, den Zugang und gegenüber der Plandurchlaufzeit eines Auftrags erhoben werden (Lödding 2008, S. 29). Die jeweiligen Berechnungsvorschriften sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst. Die Terminabweichung kann genutzt werden, um die zeitliche Einhaltung des Nivellierungsmusters zu überwachen, allerdings werden Mengenabweichungen und Reihenfolgevertauschungen nicht erfasst (Wuthnow 2010, S. 59).

Tabelle 3.3: Kennzahlen zur Erfassung von Terminabweichungen (basierend auf Lödding 2008, S. 29ff)

Kennzahl	Erläuterung	Berechnung	Variablen
Abgangstermin-abweichung (*TAA*)	Abweichung von Plan- zu Ist-Fertigstellungstermin	$TAA = TAE_{ist} - TAE_{plan}$	TAE_{ist} = Ist-Bearbeitungsende Auftrag [BKT] TAE_{plan} = Plan-Bearbeitungsende Auftrag [BKT]
Zugangstermin-abweichung TAZ	Abweichung von Plan- zu Ist-Starttermin	$TAZ = TAB_{ist} - TAB_{plan}$	TAB_{ist} = Ist-Bearbeitungsanfang Auftrag [BKT] TAB_{plan} = Plan-Bearbeitungsanfang Auftrag [BKT]
Relative Termin-abweichung TAR	Verzögerung gegenüber der Plandurchlaufzeit	$TAR = TAA - TAZ$	

Zur Erfassung der Einhaltung der Reihenfolge im Nivellierungsmuster eignet sich die sog. Reihenfolgedisziplin, die den Anteil aller Reihenfolgeentscheidungen angibt, bei denen die Auftragspriorisierung eingehalten wurde (Lödding 2008, S. 456). Die Reihenfolgedisziplin (*RD)* berechnet sich demnach als:

$$RD = \frac{Anzahl\ Aufträge\ mit\ eingehaltener\ Auftragspriorisierung}{Gesamtanzahl\ Aufträge}.$$

Eine Kennzahl, die von (Wuthnow 2010, S. 126) speziell für die konventionelle Nivellierung auf der Ebene von Produkttypen definiert wird, ist die Nivellierungsgüte (NG). Diese berechnet sich als Produkt vom sog. Erfüllungsgrad Gesamtmenge (*EG)* und dem Erfüllungsgrad geplante Reihenfolge und Menge (*EGRM*) ergibt (ebd.):

$$NG = EG * EGRM.$$

Obwohl die Nivellierungsgüte für eine Nivellierung auf Produkttypebene definiert ist, ist eine Übertragung auf die Nivellierung auf Produktfamilienbasis möglich. Der Erfüllungsgrad Gesamtmenge gibt dabei den relativen Anteil der planmäßig gefertigten Menge am Gesamtfertigungsvolumen an (vgl. Wuthnow 2010, S. 126). Der Erfüllungsgrad Reihenfolge und Menge ergibt sich als:

$$EGRM = \frac{\sum_{i=1}^{m}(PM_i * EGM_i * RF_i)}{\sum_{i=1}^{m} PM_i}.$$

Hierbei repräsentiert *m* die Anzahl der Nivellierungsfamilien, die übrigen Variablen geben je Nivellierungsfamilie *i* jeweils das Planvolumen (PM_i), den Mengenerfüllungsgrad (EGM_i) und den Reihenfolgekontrollfakor (RF_i) an. Letzterer nimmt den Wert 1 bzw. 0 an, wenn die geplante Reihenfolge eingehalten bzw. nicht eingehalten wurde. Der Mengenerfüllungsgrad bildet den relativen Anteil der geplanten zur produzierten Menge ab.

4 Softwareauswahl und Programmiertechnische Umsetzung

Zur Umsetzung und praktischen Anwendung der im vorangehenden Kapitel dargestellten systematischen Vorgehensweise zur Produktionsnivellierung in der Kleinserienfertigung sind insbesondere im Rahmen der Produktfamilienbildung sowie zur Nivellierungsmustererstellung komplexe und z. T. multivariate Berechnungen und Analysen erforderlich. Aus diesem Grund werden diese beiden Schritte programmiertechnisch in Form eines Softwaredemonstrators umgesetzt. Dieser kann zunächst zur prototypischen Erprobung und Erstanwendung der Forschungsergebnisse genutzt werden. Darüber hinaus begünstigt der Demonstrator aber auch den Transfer der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft, d. h. eine breite Anwendbarkeit der entwickelten Vorgehensweise – insbesondere auch in kleinen und mittleren Unternehmen. Nachfolgend wird zunächst auf die Auswahl einer geeigneten Softwareumgebung eingegangen (Unterkapitel 4.1). Im Anschluss wird die programmiertechnische Umsetzung der Produktfamilienbildung und der Nivellierungsmustererstellung beschrieben (Unterkapitel 4.2).

4.1 Auswahl der Softwareumgebung

Die Auswahl einer geeigneten Softwareumgebung zur Erstellung des Demonstrators stellt sowohl für die prototypische Erprobung und Erstanwendung als auch für den Transfer der Forschungsergebnisse in die betriebliche Praxis einen zentralen Erfolgsfaktor dar. Aus diesem Grund erfolgt an dieser Stelle die systematische Auswahl einer entsprechenden Software. Hierzu werden zunächst wesentliche Anforderungen spezifiziert (Abschnitt 4.1.1), anhand derer verschiedene alternative Softwareumgebungen verglichen werden (Abschnitt 4.1.2) und letztendlich eine Auswahl erfolgt (Abschnitt 4.1.3).

4.1.1 Spezifische Anforderungen an die Softwareumgebung

Wesentliche Anforderungen an eine Softwareumgebung, die sich zur programmiertechnischen Umsetzung der zuvor beschriebenen systematischen Vorgehensweise zur Produktionsnivellierung eignet, bestehen zunächst hinsichtlich der Leistungsfähigkeit. Diesbezüglich ist festzustellen, dass bei der Produktfamilienbildung und Nivellierungsmustererstellung stark unterschiedliche Leistungsanforderungen zu berücksichtigen sind. Das beschriebene Verfahren zur Produktfamilienbildung erfordert eine Vielzahl komplexer, multivariater Berechnungen. Der Verfahrenskern, d. h. die Generierung von Gruppierungsalternativen, der Bewertung und die evolutionäre Optimierung der Variablengewichtung kann automatisiert, d. h. durch ein entsprechendes Programm, durchgeführt werden und erfordert keine Interaktion mit dem Benutzer. Diese ist lediglich zum Einlesen der Daten, zum Einstellen der Verfahrensparameter vor dem Start des Verfahrens und zur Lösungsauswahl erforderlich.

Bei der Nivellierungsmustererstellung werden hingegen weniger komplexe Berechnungen benötigt, die jedoch stark aufeinander aufbauen und ein hohes Maß an

Interaktion mit dem Benutzer erfordern. So können nicht sämtliche Verfahrensparameter zu Beginn der Mustererstellung festgelegt werden. Stattdessen müssen diese sukzessive, in Verbindung mit erforderlichen Plausibilitätsprüfungen und somit in Interaktion mit dem Benutzer konkretisiert werden. Eine erste derartige Interaktion ist zur Auswahl der Nivellierungsfamilien erforderlich, da diese basierend auf einer ABC-/XYZ-Segmentierung erfolgt, für die abhängig vom Anwendungskontext Grenzwerte festgelegt werden müssen. Eine weitere Interaktion ist zur Festlegung der Reihenfolge der Nivellierungsfamilien im Nivellierungsmuster notwendig. Ein Ziel, das bei Reihenfolgebildung verfolgt wird, ist die Minimierung der Gesamtrüstzeit. Hierzu wird die beschriebene zweistufige Heuristik verwendet, die softwaretechnisch abgebildet werden kann. Allerdings sind neben der Rüstzeit ggf. weitere Zielkriterien zu berücksichtigen, die stark vom Anwendungskontext abhängen und somit einer Einbeziehung von Expertenwissen, d. h. einer Interaktion mit dem Benutzer, bedürfen. Eine weitere Interaktion ist zur Festlegung des EFEI-Wertes erforderlich, da dieser zwar wie in Abschnitt 3.3.3 angeführt theoretisch berechnet werden kann, jedoch ggf. unter Berücksichtigung des Anwendungskontextes angepasst werden muss.

Unabhängig vom Grad der Interaktion mit dem Benutzer wird sowohl für die Produktfamilienbildung als auch für die Nivellierungsmustererstellung eine Schnittstelle zum Im- und Export von Daten in gängigen Formaten benötigt. Bei der Auswahl einer Softwareumgebung sind zudem hohe Anforderungen an die Benutzerfreundlichkeit zu berücksichtigen. Um eine breite Anwendung insbesondere auch in kleinen und mittelständischen Unternehmen zu ermöglichen, ist dabei wichtig, dass der Softwaredemonstrator ohne Programmierkenntnisse genutzt werden kann. Eine weite Anwendbarkeit im Bereich kleiner und mittelständiger Unternehmen bedingt zudem, dass die Kosten der Softwareumgebung möglichst gering sind.

4.1.2 Mögliche Softwareumgebungsalternativen

Eine erste mögliche Softwarealternative besteht darin, die beschriebene Vorgehensweise zur Produktfamilienbildung und zur Nivellierungsmustererstellung in einer leistungsfähigen, universell einsetzbaren Programmiersprache wie C++ oder Java umzusetzen. Das so erstellte Programm benötigt eine (idealerweise grafische) Benutzeroberfläche, die sich durch eine entsprechende Bedienerfreundlichkeit auszeichnet. Zusammen mit der Komplexität des Verfahrens zur Produktfamilienbildung ergibt sich hieraus ein hoher zu erwartender Aufwand für die programmiertechnische Umsetzung.

Daher wird im Folgenden als zweite Alternative die Möglichkeit betrachtet, zumindest für die Produktfamilienbildung eine leistungsstarke, speziell für derartige Anwendungen entwickelte Softwareumgebung zu nutzen und diese entsprechend anzupassen. Diesbezüglich anzuführen sind bspw. die Umgebungen R, RapidMiner, SPSS und Statistica, die allesamt über Schnittstellen für den Im- und -export gängiger Dateiformate verfügen und auf die nachfolgend in Kürze eingegangen wird.

R ist eine Open Source Software und eine Programmiersprache und -umgebung, die im Bereich der Statistik als de facto Standard für Datenanalyseanwendungen gilt (Ligges 2008, S. 1ff). Über das sog. CRAN-Archive (Comprehensive R Archive Network) ist eine Vielzahl von Anwendungspaketen verfügbar, u. a. auch für die Clusteranalyse (Ligges 2008, S. 195). R benutzt ein Kommandozeilen-Interface, es sind jedoch auch R-Versionen mit grafischer Benutzeroberfläche verfügbar (Ligges 2008, S. 219ff). Trotzdem sind auch bei vordefinierten Anwendungspaketen zum Einlesen von Daten und zur Festlegung von Verfahrensparametern ansatzweise Programmierkenntnisse erforderlich.

Die Softwareumgebung RapidMiner ist ebenfalls als Open Source Software verfügbar. RapidMiner, ursprünglich unter dem Namen Yale am Lehrstuhl 8 der Fakultät Informatik der Technischen Universität Dortmund entwickelt, unterstützt eine Vielzahl von Anwendungen im Bereich der Datenanalyse und verfügt über eine grafische Benutzeroberfläche (Mierswa u. a. 2006, S. 936). RapidMiner kann u. a. für Clusteranalysen, aber auch für multikriterielle Optimierungen genutzt werden und unterstützt dabei sogar die Anwendung der Optimierung auf Schritte des Analyseprozesses selbst (vgl. Lokuciejewski u. a. 2010, S. 7f; Mierswa 2009, S. 940). Realisiert ist RapidMiner in der Programmiersprache Java. Bei der Nutzung bestehender Anwendungen sind keinerlei Programmierkenntnisse erforderlich.

Die Softwareumgebungen SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) und Statistica sind konzipiert für statistische Auswertungen unterschiedlicher Art und können u. a. für Clusteranalysen verwendet werden (Duller 2007, S. 39; de Sá 2003, S. 17ff). Beide Softwareumgebungen verfügen über eine grafische Bedienoberfläche und finden in Wissenschaft und Praxis weit verbreitet Anwendung (Backhaus u. a. 2006, S. 15; Weiß 2009, S. 3ff). Zur Ausführung vordefinierter Analysen werden keine Programmierkenntnisse benötigt. Allerdings handelt es sich sowohl bei SPSS als auch bei Statistica um eine kommerzielle Softwareprodukte.

Die zuvor angeführten Softwareumgebungen sind zwar zur programmiertechnischen Umsetzung der Produktfamilienbildung, nicht jedoch für die Umsetzung der Nivellierungsmustererstellung geeignet. Diese kann einerseits in einer Programmiersprache wie C++ oder Java umgesetzt werden. Dies ist wiederum mit erheblichem Programmieraufwand verbunden, insbesondere dann, wenn eine entsprechende Benutzerfreundlichkeit sichergestellt werden soll. Andererseits bietet sich die Möglichkeit, eine bestehende Software mit grafischer Benutzeroberfläche zu nutzen, die entsprechend angepasst wird. Eine derartige Software stellt beispielsweise MS-Excel dar. Dies ist zwar eine kommerzielle Software, die sich jedoch durch eine weite Verbreitung in der Industrie auszeichnet und auch in kleinen und mittelständischen Unternehmen einen Quasi-Standard für übliche Datenanalysen und Berechnungen darstellt. Eine Möglichkeit zur Umsetzung der Nivellierungsmustererstellung in MS-Excel bietet sich durch die Programmiersprache VBA (Visual Basic for Applications), mit Hilfe derer Programme in MS-Excel erstellt werden können (vgl. z. B. Can-Weber 2010).

4.1.3 Wahl einer Softwareumgebung

Zur Auswahl einer geeigneten Softwareumgebung sind die zuvor dargestellten Alternativen in Abbildung 4.1 zusammengefasst. Basierend auf den vorangehenden Ausführungen wird insbesondere auf Grund der stark unterschiedlichen Leistungsanforderungen sowie zu Gunsten der Benutzerfreundlichkeit für die Produktfamilienbildung und für die Nivellierungsmustererstellung auf unterschiedliche Softwareumgebungen zurückgegriffen. Dies bringt allerdings den Nachteil mit sich, dass zwischen den beiden Schritten eine Schnittstelle existiert.

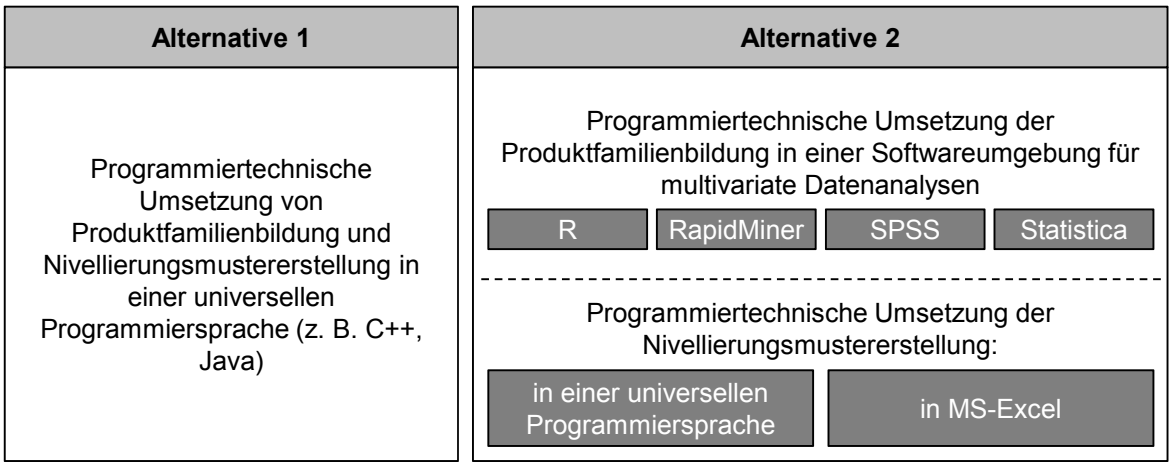


Abbildung 4.1: Zusammenfassung möglicher Softwareumgebungsalternativen

Zur Wahl einer Softwareumgebung für die Produktfamilienbildung wird eine im Jahr 2010 veröffentlichte umfassende Umfrage der Firma RexerAnalytics herangezogen. Demnach sind SPSS, Statistica und RapidMiner die Softwareumgebungen für komplexe, multivariate Datenanalysen mit den zufriedensten Nutzern (RexerAnalytics 2010). Da es sich bei RapidMiner um Open Source und bei SPSS sowie Statistica um kommerzielle Software handelt, wird RapidMiner zur programmiertechnischen Umsetzung der Produktfamilienbildung gewählt. Für die Nivellierungsmustererstellung wird hingegen die Softwareumgebung MS-Excel gewählt, da so eine hohe Benutzerfreundlichkeit gewährleistet werden kann. Zwar ist MS-Excel eine kommerzielle Software, es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Software bereits in einem Großteil der Unternehmen vorhanden ist und genutzt wird.

4.2 Programmiertechnische Umsetzung

Die Programmiertechnische Umsetzung erfolgt wie zuvor beschrieben für die Produktfamilienbildung in der Softwareumgebung RapidMiner (Version 4.6) und für die Nivellierungsmustererstellung in MS-Excel (Version 2010). Der Datenaustausch zwischen den beiden Umgebungen stellt kein Hindernis für die praktische Umsetzung dar, da die Ergebnisse der Produktfamilienbildung, d. h. die gewählte Zuordnung von Erzeugnisvarianten zu Produktfamilien aus RapidMiner in einer MS-Excel-kompatiblen Form exportiert werden können. Das Ergebnis der programmiertechnischen Umsetzung ist ein Softwaredemonstrator, der zur Erprobung und Erstanwendung der Vorgehenswiese und

für den Transfer der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft verwendet werden kann. Eine detaillierte Anleitung zur Nutzung des Softwaredemonstrators ist dem Anhang der vorliegenden Ausarbeitung zu entnehmen (Anhang C). Auf die Umsetzung der Produktfamilienbildung und der Nivellierungsmustererstellung wird nachfolgend separat eingegangen.

4.2.1 Produktfamilienbildung

Das in Abschnitt 3.2.5 beschriebene Verfahren zur Produktfamilienbildung ist programmiertechnisch derart umgesetzt, dass für jeden der angeführten Clusteralgorithmen zwei separate Teilprozesse in RapidMiner realisiert sind, die über die grafische Bedienoberfläche geöffnet werden können. Es sind somit je zwei Teilprozesse zur Gruppierung mit dem Complete-Linkage, dem Average-Linkage und dem K-Means-Algorithmus verfügbar. Innerhalb eines jeden Teilprozesses müssen die Rohdaten importiert und die Verfahrensparameter festgelegt werden. Im ersten Teilprozess werden jeweils die verschiedenen Gruppierungsalternativen erzeugt und bewertet und dabei die Variablengewichtung optimiert. Im zweiten Teilprozess wird die beste Lösung, d. h. die beste Variablengewichtung angewendet und eine entsprechende Partition erzeugt. Beide Teilprozesse sind in Form eines Operatorbaumes aufgebaut, wobei in RapidMiner vorhandene Standardoperatoren und eigens entwickelte Operatoren verwendet werden.

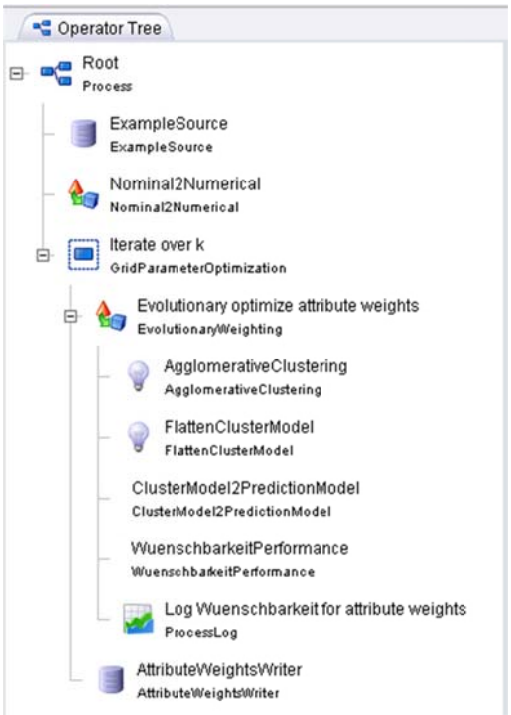


Abbildung 4.2: Programmaufbau Erzeugung und Bewertung von Gruppierungsalternativen mit Complete-Linkage-Algorithmus

Abbildung 4.2 zeigt exemplarisch für den Complete-Linkage-Algortihmus den Teilprozess für die Erzeugung und Bewertung der Gruppierungsalternativen. Nachfolgend wird die programmiertechnische Umsetzung exemplarisch für den Complete-Linkage-Algortihmus

beschrieben. Die Umsetzung der anderen Algorithmen unterscheidet sich lediglich durch den zur Gruppierung eingesetzten Operator.

Zum Importieren wird der Operator „Example Source“ genutzt, der über einen Assistenten für den Datenimport, den sog. „Example Source Wizard“, verfügt (siehe Abbildung 4.3). Mit Hilfe dieses Assistenten können unterschiedliche Datenformate eingelesen werden, allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass die Rohdatenmatrix bereits in aufbereiteter Form vorliegen muss. Die in Abschnitt 3.2.3 beschriebene Datenaufbereitung ist nicht im Programm enthalten, da diese i. d. R. stark vom Anwendungskontext abhängt und zudem ggf. ein hohes Maß an Expertenwissen erfordert.

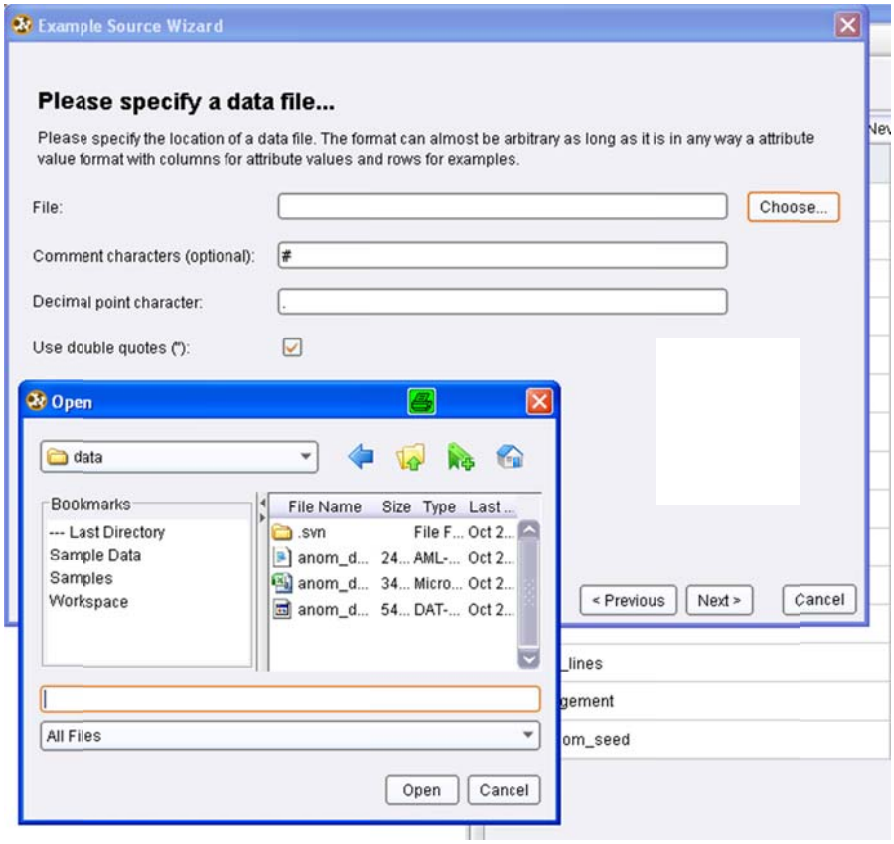


Abbildung 4.3: Einlesen der Daten

Der Kern des Gruppierungsverfahrens, die evolutionäre Optimierung der Variablengewichtung, wird durch den Operator „Evolutionary optimize attribute weigths“ abgebildet. Dieser verwendet die in Abschnitt 3.2.5 beschriebenen evolutionären Optimierungsstrategien (vgl. Lokuciejewski u. a. 2010). Die einzelnen Verfahrensparameter können über den Operator festgelegt werden. Der zur Bewertung der Gruppierungsalternativen genutzte Wünschbarkeitsindex ist in dem Operator „WuenschbarkeitPerformance“ enthalten. Die gewünschte minimale und maximale Partitionsgröße sowie die obere Spezifikationsgrenze können dabei als Verfahrensparameter durch den Benutzer festgelegt werden. Die Iteration der Optimierung über mehrere Partitionsgrößen wird durch den Operator „Iterate over k“ realisiert. Hierbei ist das Partitionsgrößenintervall, über das die Iteration durchgeführt wird, durch den Benutzer zu spezifizieren.

Die Ergebnisse des Gruppierungsverfahrens, d. h. die Werte des Wünschbarkeitsindex und die Werte der einzelnen Wünschbarkeitsfunktionen, werden für jede erzeugte Generation und für jede Partitionsgröße mit Hilfe des Operators „Log Wuenschbarkeit for attribute weigths“ protokolliert. Hierbei sind der Name und der Speicherort der Protokolldatei mit Hilfe eines Assistenten (ähnlich wie beim Datenimport) durch den Benutzer wählbar. Die entsprechenden Ergebnisse werden nach Abschluss des Gruppierungsprozesses auch in RapidMiner angezeigt (vgl. Abbildung 4.4) Für das beste Ergebnis, d. h. die am besten bewertete Gruppierungsalternative, wird die Gewichtung der einzelnen Variablen durch den Operator „AttributeWeightsWriter“ in eine separate Datei geschrieben. Speicherort und Benennung der Datei sind wiederum frei wählbar.

Log Wuenschbarkeit for attribute weights | ParameterSet Iterate over k | PerformanceVector WuenschbarkeitPerformance

Table View | Plot View

Log Wuenschbarkeit for attribute weights (2475 rows, 10 columns)

generation	best	performance	w1_homog...	w2_numOf...	w3_equalSi...	w4_minEle...	cluster_sizes	k	iteration
0	?	0.457	0.708	0.062	0.989	1	27 | 22 |	2	1
0	?	0.481	0.889	0.062	0.964	1	20 | 29 |	2	1
0	?	0.454	0.686	0.062	0.989	1	27 | 22 |	2	1
0	?	0.466	0.754	0.062	0.996	1	23 | 26 |	2	1
0	?	0.454	0.753	0.062	0.899	1	32 | 17 |	2	1
0	?	0.461	0.730	0.062	0.989	1	22 | 27 |	2	1
0	?	0.441	0.612	0.062	0.989	1	27 | 22 |	2	1
0	?	0.475	0.823	0.062	0.989	1	27 | 22 |	2	1
0	?	0.472	0.792	0.062	1	1	25 | 24 |	2	1
0	?	0.452	0.694	0.062	0.964	1	20 | 29 |	2	1
0	?	0.443	0.685	0.062	0.899	1	32 | 17 |	2	1
0	?	0.457	0.727	0.062	0.964	1	29 | 20 |	2	1
0	?	0.476	0.820	0.062	1	1	25 | 24 |	2	1
0	?	0.466	0.764	0.062	0.989	1	27 | 22 |	2	1
0	?	0.466	0.755	0.062	0.996	1	23 | 26 |	2	1
0	?	0.472	0.821	0.062	0.964	1	29 | 20 |	2	1
0	?	0.451	0.734	0.062	0.899	1	32 | 17 |	2	1
0	?	0.476	0.832	0.062	0.989	1	27 | 22 |	2	1
0	?	0.459	0.710	0.062	1	1	25 | 24 |	2	1
0	?	0.468	0.775	0.062	0.989	1	27 | 22 |	2	1
0	?	0.456	0.706	0.062	0.978	1	28 | 21 |	2	1
0	?	0.449	0.652	0.062	0.996	1	23 | 26 |	2	1
0	?	0.474	0.818	0.062	0.989	1	27 | 22 |	2	1
0	?	0.459	0.713	0.062	0.996	1	23 | 26 |	2	1
0	?	0.467	0.769	0.062	0.989	1	27 | 22 |	2	1

Abbildung 4.4: Ausgabe der Ergebnisse

Die jeweils besten Ergebnisse können für die verschiedenen Clusteralgorithmen auf diese Art miteinander verglichen werden. So wird es einerseits ermöglicht, eine optimale Partitionsgröße zu bestimmen. Andererseits kann auch der Algorithmus ermittelt werden, der die beste Lösung liefert. Dieser wird dann genutzt, um mit Hilfe des in Abbildung 4.5 dargestellten Teilprozesses eine entsprechende Partition zu erzeugen, die zur Nivellierungsmustererstellung verwendet wird. Dabei ist analog zu dem zuvor beschriebenen Teilprozess zunächst ein Import der Rohdaten mit dem Operator „ExampleSource“ erforderlich. Im Anschluss werden durch den Operator „AttributeWeightsLoader“ die

durch den vorangehenden Teilprozess dokumentierten besten Variablengewichte geladen. Die Partitionsgröße wird über den Operator „FlattenClusterModel“ festgelegt.

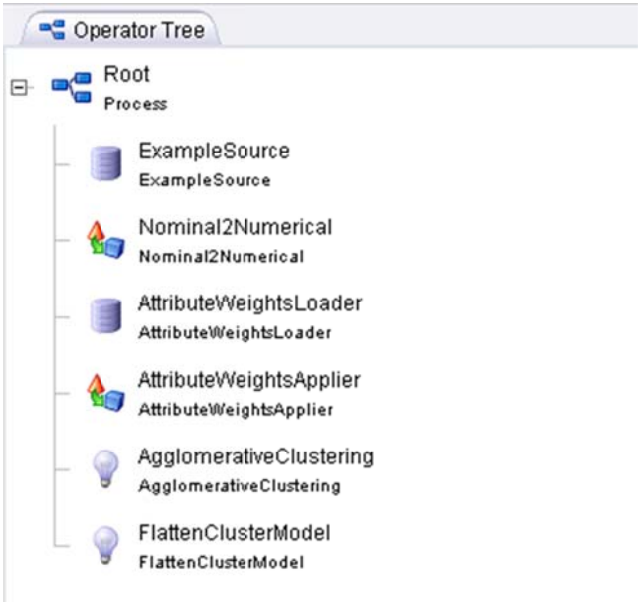


Abbildung 4.5: Programmaufbau zum Erzeugen der Partition für die Nivellierungsmustererstellung

Durch die Ausführung des Prozesses wird eine entsprechende Partition erzeugt. Die Zuordnung der Erzeugnisvarianten zu Produktfamilien wird dokumentiert, indem in der Rohdatenmatrix eine Spalte mit der Produktfamilienbezeichnung hinzugefügt wird. Diese Datenmatrix kann in einem Format exportiert werden, das mit MS-Excel eingelesen werden kann.

4.2.2 Nivellierungsmustererstellung

Die Nivellierungsmustererstellung erfolgt in MS-Excel und ist in VBA realisiert. Hierbei wird die in Unterkapitel 3.3 beschriebene Vorgehensweise zur Mustererstellung in Ereignisprozeduren abgebildet, die mit Hilfe von ActiveX-Steuerelementen aufgerufen werden. Zur Interaktion mit dem Benutzer kommen neben den ActiveX-Steuerelementen auch Eingabedialogfelder zum Einsatz. Bei den einzelnen Berechnungsschritten wird der Benutzer durch ergänzende Informationen unterstützt, die bei Bedarf ebenfalls gesteuert durch ActiveX-Steuerelemente aufgerufen werden können. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden für die einzelnen Schritte der Nivellierungsmustererstellung mehrere Tabellenblätter genutzt.

Im ersten Schritt wird die mit RapidMiner erzeugte Datenmatrix importiert, so dass jede Erzeugnisvariante einer Produktfamilie zugeordnet ist. Im Anschluss müssen für die einzelnen Erzeugnisvarianten vergangenheits- und/oder prognosebezogen Monatskapazitätsbedarfe eingegeben werden. Hierbei können bis zu 24 monatsbezogene Bedarfe berücksichtigt werden. Die Kapazitätsbedarfe werden automatisch auf Produktfamilienebene aggregiert und für die ABC-/XYZ-Analyse genutzt (vgl. Abbildung 4.6). Hierbei kann frei durch den Benutzer gewählt werden, welche Monate bei den weiteren

Berechnungen berücksichtigt werden. So können bspw. Monate mit starken Abweichungen vom durchschnittlichen Bedarf ausgeklammert werden.

Die ABC-/XYZ-Analyse wird durch eine Prozedur abgebildet, durch die die Kapazitätsbedarfe auf Produktfamilienebene aggregiert und die Produktfamilien in eine Rangfolge entsprechend ihres Anteils am Gesamtkapazitätsbedarf gebracht werden. Diese dient als Basis für die grafische Darstellung in Form einer Pareto-Kurve. Diese wird genutzt, um den Benutzer bei der Festlegung von Grenzwerten für ABC-/XYZ-Segmentierung zu unterstützen.

Basierend auf dem Ergebnis der Segmentierung erfolgt durch den Benutzer die Wahl der Nivellierungsfamilien, d. h. die Wahl der Produktfamilien, die zyklisch in das Nivellierungsmuster eingeplant werden. Für diese Familien sind durch den Benutzer Mindestlosgrößen, ebenfalls gemessen in Fertigungsstunden, einzugeben, die im Rahmen der EFEI-Berechnung und der Musteroptimierung genutzt werden.

Abbildung 4.6: ABC-/XYZ-Analyse und Nivellierungsfamilienauswahl

Für die Nivellierungsfamilien wird im nächsten Schritt eine gesamtrüstzeitoptimale Reihenfolge bestimmt (vgl. Abbildung 4.7). Hierzu sind durch den Benutzer zunächst die Rüstzeiten zwischen den einzelnen Nivellierungsfamilien in eine entsprechende Rüstmatrix einzugeben. Mit Hilfe der programmiertechnisch umgesetzten zweistufigen Heuristik, die in Abschnitt 3.3.2 beschrieben wurde, wird eine Reihenfolge mit minimaler Gesamtrüstzeit ermittelt. Die kann ggf. durch den Benutzer unter Berücksichtigung

weiterer, anwendungskontextbezogener Zielkriterien und Einflussgrößen verändert werden.

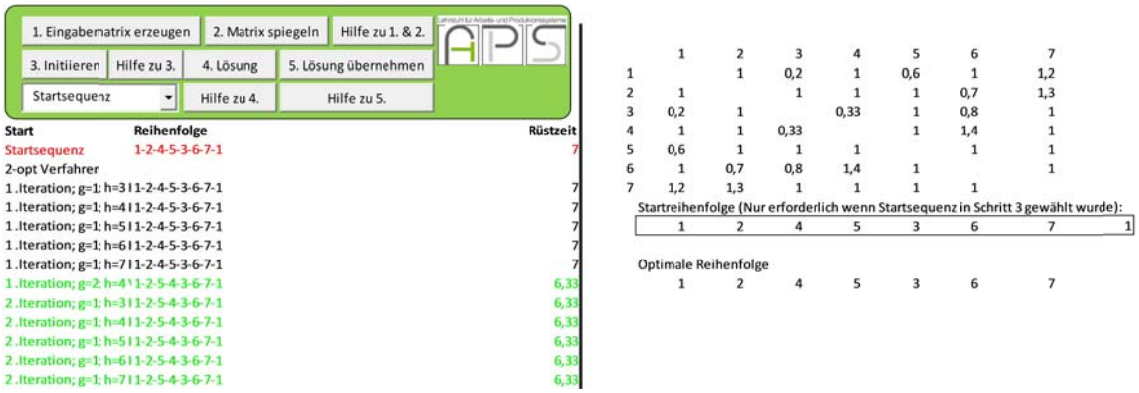


Abbildung 4.7: Reihenfolgefestlegung

Basierend auf der so festgelegten Reihenfolge werden im nächsten Schritt der EFEI-Wert und die Kapazitätszeitfenster im Nivellierungsmuster berechnet (vgl. Abbildung 4.8). Hierzu sind vom Benutzer zunächst Daten zum Kapazitätsangebot anzugeben. Diese werden wie in Abschnitt 3.3.3 beschrieben zur Berechnung eines theoretisch möglichen EFEI-Wertes verwendet. Dieser kann durch den Benutzer ggf. unter Berücksichtigung der zuvor angegebenen Mindestlosgrößen verändert werden.

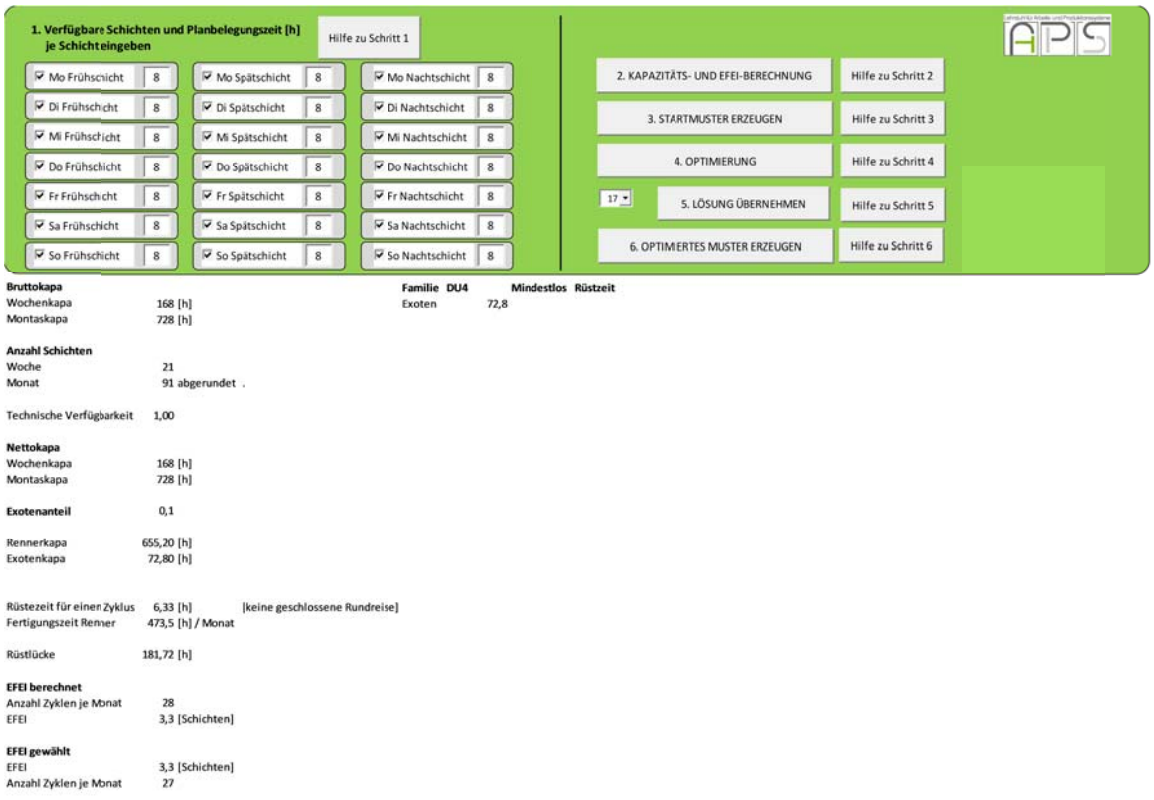


Abbildung 4.8: EFEI-Berechnung und Mustererstellung

Der vom Benutzer festgelegte EFEI-Wert wird zur Berechnung der Kapazitätszeitfenster im Nivellierungsmuster herangezogen. Neben den erforderlichen Berechnungen sind auch die Visualisierung des Nivellierungsmusters und die in Abschnitt 3.3.5 dargestellte Musteroptimierung programmiertechnisch umgesetzt.

Die unterschiedlichen, im Rahmen der Musteroptimierung generierten Lösungen werden direkt im Tabellenblatt festgehalten. So wird dem Benutzer die Möglichkeit gegeben, eine Lösung auszuwählen, die ggf. nicht der durch das Programm vorgeschlagenen Lösungen entspricht. Das optimierte Muster kann ebenfalls visualisiert werden.

5 Validierung

Die entwickelte Vorgehensweise und der darauf basierende Softwaredemonstrator wurden mit Praxisdaten validiert. Auf die Einzelheiten dieser Erprobung und Erstanwendung wird in den nachfolgenden Unterkapiteln eingegangen. Die Gliederung orientiert sich dabei an den Makro-Schritten der entwickelten Vorgehensweise zur Nivellierung in der Kleinserie (vgl. Kapitel 3). Somit werden zuerst die Analyse der Eingangsgrößen und die Nivellierungsmodellerstellung dargestellt (Unterkapitel 5.1). Darauf aufbauend werden die Produktfamilienbildung zu Nivellierungszwecken (Unterkapitel 5.2) und die Nivellierungsmustererstellung (Unterkapitel 5.3) beschrieben. Der Schritt der Umsetzung wird im an dieser Stelle nicht betrachtet, da die Ergebnisse aus Gründen der Vorwettbewerblichkeit nicht in der betrieblichen Praxis umgesetzt wurden.

5.1 Analyse der Eingangsgrößen und Nivellierungsmodellerstellung

Als wesentlicher Aspekt der Analyse der Eingangsgrößen wird an dieser Stelle in Kürze der Anwendungskontext beschrieben. Betrachtet wird ein Montagebereich in der Maschinenbaubranche, in dem im Zweischichtbetrieb zu einem hohen Anteil kundenspezifische Erzeugnisse in Kleinserie gefertigt werden. Das Produktspektrum weist eine hohe Variantenvielfalt auf. Neben einer hohen erzeugnisbezogenen Schwankung des Produktionsvolumens zeichnet sich die betrachtete Montage zudem durch stark spreizende Arbeitsinhalte aus. Für den größten Teil des Produktspektrums liegt der Arbeitsinhalt in einem Bereich zwischen 3 und 60 Minuten je Einheit. Auf die Durchführung von Wertstrom- und Kundenabrufanalyse konnte im Rahmen der Erprobung und Erstanwendung verzichtet werden, da diesbezüglich bereits entsprechende Ergebnisse vorlagen.

Die Ableitung der Ziele für die Entwicklung eines Nivellierungskonzeptes für die betrachtete Montage erfolgt anhand des in Abschnitt 3.1.2 dargestellten Nivellierungsmodells. Diesbezüglich ist festzuhalten, dass ein Ausgleich von Produktionsvolumen und -mix für mindestens eine Schicht pro Tag angestrebt wird. Dabei wird der Ansatz einer Nivellierung auf Produktfamilienbasis verfolgt.

5.2 Produktfamilienbildung

Für die Produktfamilienbildung wird die Stücklistenähnlichkeit als Gruppierungskriterium gewählt. Dies hat den Hintergrund, dass in der betrachteten Montage Umrüstaufwand vor allem durch Materialrüsten entsteht. Die Stücklistenähnlichkeit spiegelt sich in der Verwendung gleicher oder ähnlicher Komponenten wieder. Somit ergibt sich durch eine hohe Stücklistenähnlichkeit die Möglichkeit, die entsprechenden Produkte zusammen mit geringem Rüstaufwand zu fertigen.

Im Rahmen der Datenaufbereitung werden die in der betrachteten Montage gefertigten Erzeugnisse hinsichtlich ihrer Stücklistenähnlichkeit analysiert. Dabei können ca. 700 mehrfach verwendete Komponenten und Bauteile identifiziert werden, die als Variablen für die Clusteranalyse genutzt werden. Die Daten werden in eine binär skalierte Rohda-

tenmatrix überführt (vgl. Abbildung 5.1). Signifikante Ausreißer wurden im Zuge der Datenaufbereitung nicht festgestellt.

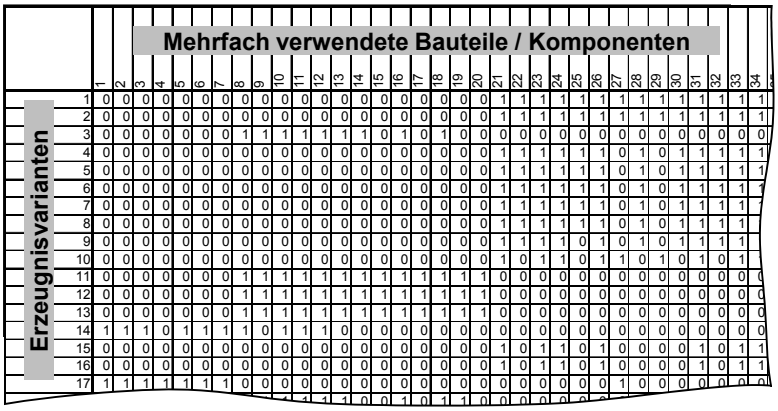


Abbildung 5.1: Auszug aus der Rohdatenmatrix (0 = Komponente wird nicht verbaut; 1= Komponente wird verbaut)

Für das Gruppierungsverfahren werden die Verfahrensparameter wie folgt festgelegt: Für die Optimierung der Variablengewichtung mit evolutionären Strategien wird die Anzahl der Generationen je Iterationsschritt auf zehn begrenzt. Dabei wird eine Populationsgröße von 25 Individuen verwendet. Für die Iteration über die Partitionsgröße wird ein Intervall von 2 bis 20 festgelegt, d. h die Iteration startet mit 2 Produktfamilien und endet, wenn für eine Partition mit 20 Produktfamilien eine optimale Variablengewichtung gefunden wird.

Unter Einbeziehung von Expertenwissen wird eine gewünschte Partitionsgröße von mindestens 5 und maximal 15 Produktfamilien sowie eine obere Spezifikationsgrenze (d. h. eine maximal mögliche Partitionsgröße) von 99 Produktfamilien definiert. Die Größen werden verwendet, um den in Abschnitt 3.2.6 beschrieben Wünschbarkeitsindex an den Anwendungsfall anzupassen.

Die Produktfamilienbildung wird mit dem Complete-Linkage, dem Average-Linkage und dem K-Means-Algorithmus durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Der Verlauf des Wünschbarkeitsindex sowie die Verläufe der einzelnen Wünschbarkeitsfunktionen sind in Abbildung 5.2 exemplarisch für den Complete-Linkage-Algorithmus in Abhängigkeit der Partitionsgröße dargestellt. Dabei sind die entsprechenden Funktionswerte für sämtliche Generationen der jeweiligen Partitionsgröße, d. h. die Werte für alle erzeugten Gruppierungsalternativen, berücksichtigt.

Zur Auswahl einer Lösung werden je Clusteralgorithmus die besten Ergebnisse miteinander verglichen. Anhand dieses Vergleichs und unter Einbeziehung von Expertenwissen wird eine Partition mit sieben Produktfamilien gewählt, die mit dem K-Means-Algorithmus gebildet wird.

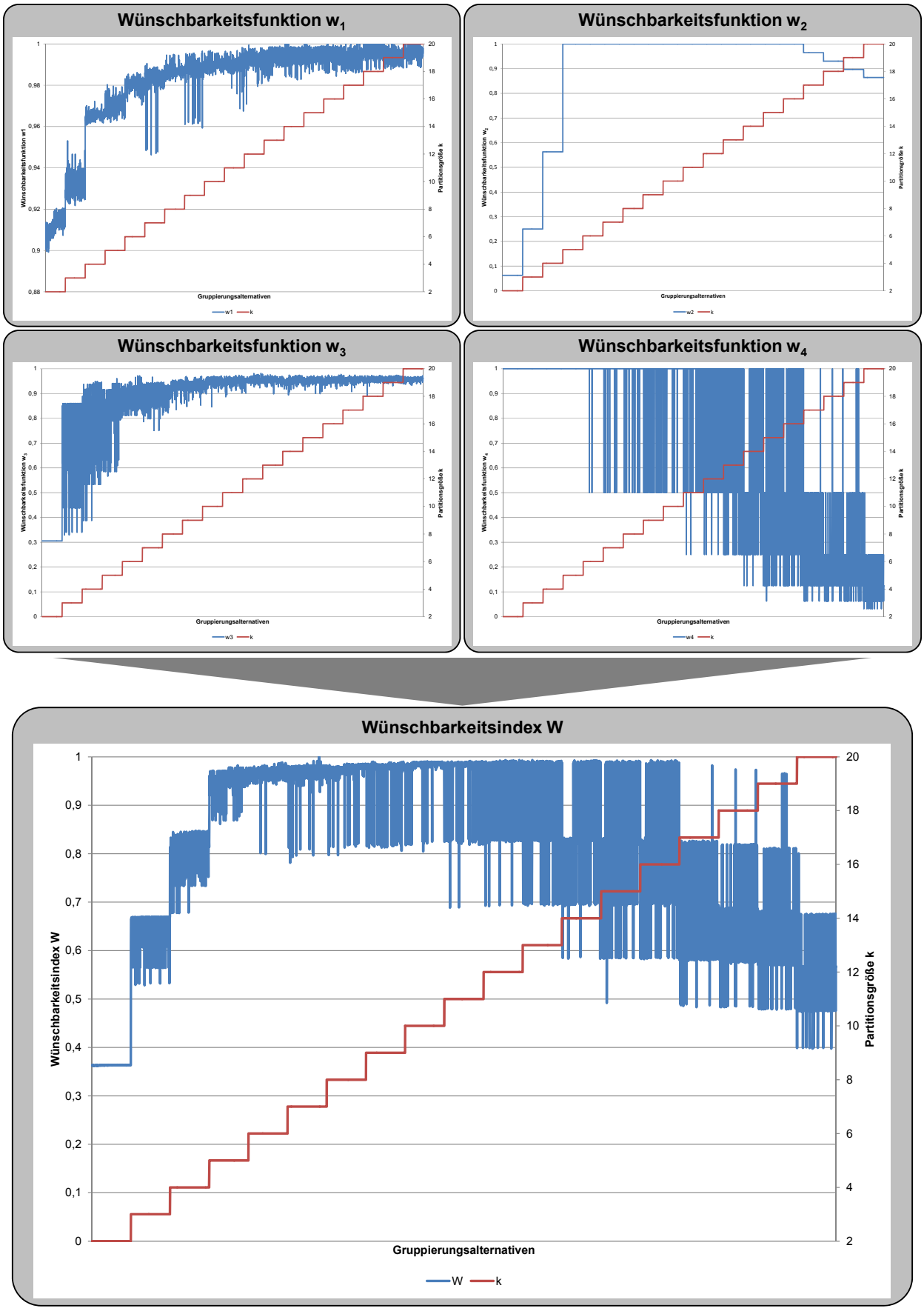


Abbildung 5.2: ***Verlauf des Wünschbarkeitsindex (W) und der einzelnen Wünschbarkeitsfunktionen (w_1 - w_4) in Abhängigkeit der Partitionsgröße (k)***

Bemerkenswert ist in diesem Kontext ebenfalls ein Vergleich zwischen konventionellen Clusterverfahren und dem im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung beschriebenen Clusterverfahren mit einer Optimierung der Variablengewichtung mit Hilfe evolutionärer Strategien. Hierzu wird das betrachtete Produktspektrum zunächst wie o. a. gruppiert, d. h. mit der evolutionären Optimierung der Variablengewichtung, und die Ergebnisse mit dem entsprechend spezifizierten Wünschbarkeitsindex bewertet. Im Anschluss wird basierend auf den gleichen Rohdaten eine Clusteranalyse mit konventionellen Clusteralgorithmen durchgeführt und die Ergebnisse ebenfalls mit dem Wünschbarkeitsindex bewertet. Der Vergleich der Ergebnisse ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Hierbei ist anzumerken, dass für die Gruppierung mit evolutionärer Optimierung der Variablengewichtung je Partitionsgröße nur die jeweils beste Lösung, d. h. die beste Gewichtung der Variablen, berücksichtigt wird.

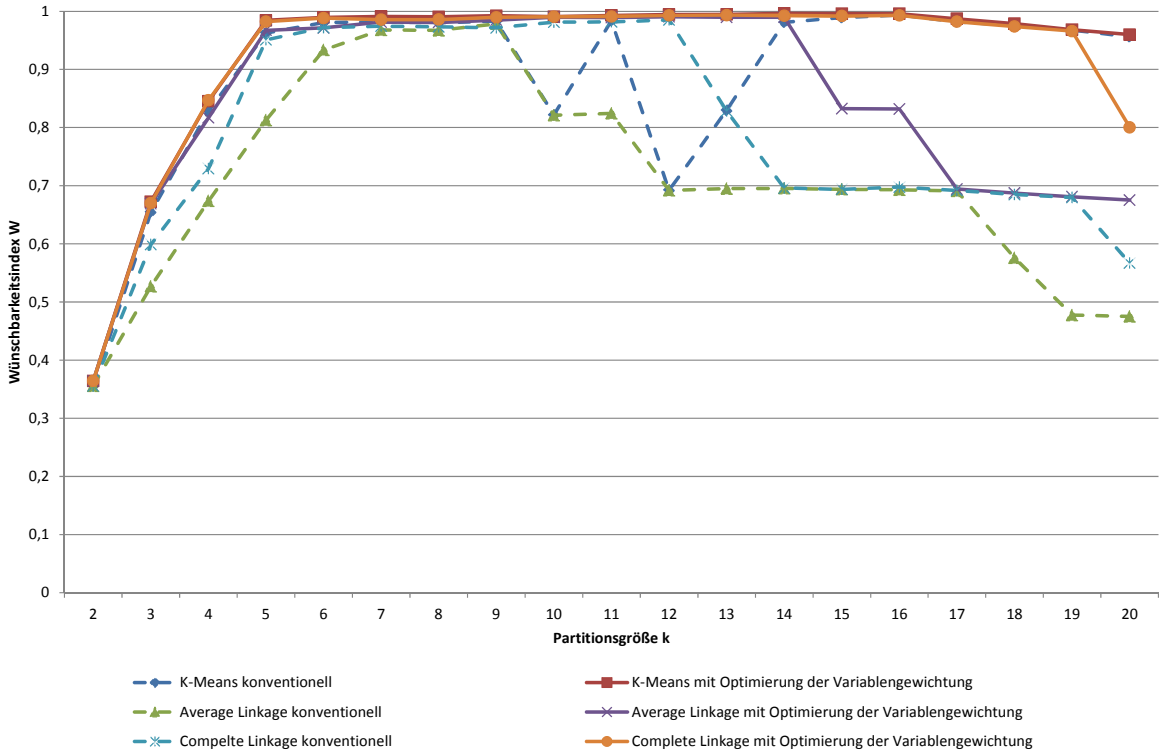


Abbildung 5.3: Vergleich der Gruppierungsergebnisse konventioneller Clusteralgorithmen und des Gruppierungsverfahrens mit Optimierung der Variablengewichtung mit Hilfe evolutionärer Strategien

Es ist anhand der Grafik deutlich ersichtlich, dass die Clusterung mit einer evolutionären Optimierung der Variablengewichtung insgesamt zu besseren Ergebnissen führt – zumindest bezogen auf die im Wünschbarkeitsindex abgebildeten Kriterien. Dieser Effekt ist insbesondere für den Complete- und Average-Linkage und weniger für den K-Means-Algorithmus zu beobachten. Dies erklärt sich dadurch, dass im K-Means-Algorithmus bereits das Ziel der Optimierung der Clusterhomogenität berücksichtigt ist (vgl. Abschnitt 3.2.5). Insgesamt erscheint es somit sinnvoll, die erzielten Ergebnisse als Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen zu nutzen.

5.3 Nivellierungsmustererstellung

Basierend auf einer ABZ-/XYZ-Analyse und unter Einbeziehung von Expertenwissen wurden vier Nivellierungsfamilien festgelegt, die zusammen ca. 80% des Produktionsvolumens ausmachen (Abbildung 5.4). Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass einerseits starke Volumenschwankungen, andererseits aber auch starke Schwankungen der Arbeitsinhalte, d. h. der Montagezeit je Einheit, vorliegen.

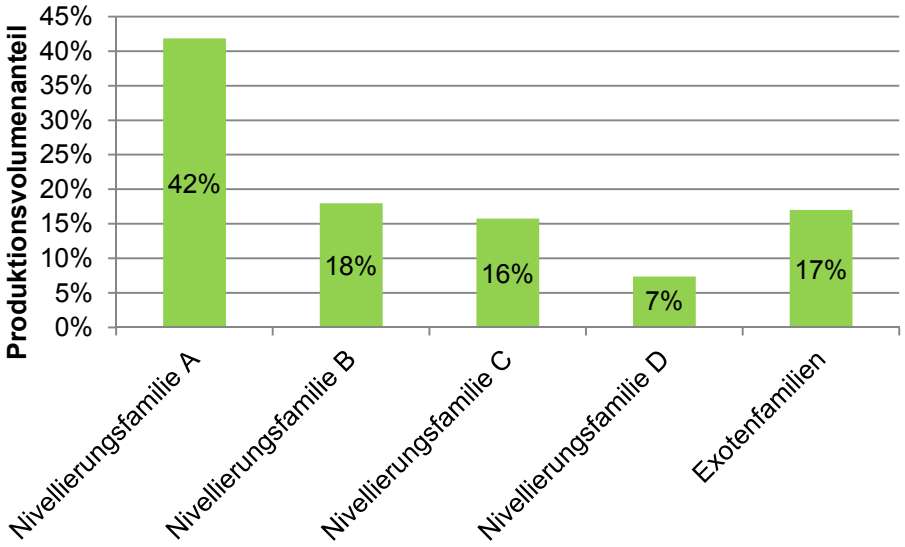


Abbildung 5.4: Anteile der Nivellierungsfamilien am Produktionsvolumen

Aus diesem Grund wird bei der Nivellierungsmustererstellung für die Nivellierungsfamilien nicht ein dem Volumenanteil entsprechender Kapazitätsbedarf berücksichtigt. Stattdessen wird unter Einbeziehung von Expertenwissen für die Nivellierungsfamilien ein reduzierter Kapazitätsbedarf festgelegt, der für die jeweiligen Nivellierungsfamilien eine Art Grundlast darstellt. Die auf diese Weise festgelegten Kapazitätsbedarfe gemessen in Fertigungsstunden je Monat sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. In Summe ergibt sich für alle Nivellierungsfamilien ein monatlicher Kapazitätsbedarf (*KRG*) von 179 Stunden.

Tabelle 5.1: Kapazitätsbedarfe für die Nivellierungsfamilien

Nivellierungsfamilie	Kapazitätsbedarf [Fertigungszeit pro Monat in Stunden]
1	88
2	38
3	36
4	17
Summe	**179**

Rüstzeitoptimal werden die Nivellierungsfamilien in der Reihenfolge ‘1 – 2 – 4 – 3‘ gefertigt. Für einen Nivellierungszyklus ist eine Gesamtrüstzeit (*RZ*) von 0,5 Stunden erforderlich. Für die Fertigung von Exoten soll im Nivellierungsmuster ein Kapazitätsanteil (*KE*) von mindesten 40% berücksichtigt werden. Es steht eine monatliche Nettogesamtkapazität (*NGK*) von 325 Stunden bei 43 Schichten pro Monat (*AS*) zu Verfügung.

Hieraus berechnet sich die verfügbare Rüstlücke (RL_g) wie folgt:

$$RL_g = [NGK * (1 - KE)] - KRG = [325 * (1 - 0{,}4)] - 179 = 16[h].$$

Es ergibt sich somit eine theoretisch mögliche Anzahl von Nivellierungszyklen je Monat (lc_{th}) von:

$$lc_{th} = \left\lfloor \frac{RL_g}{RZ} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{16}{0{,}5} \right\rfloor = 32.$$

Dies bedeutet, dass ein EFEI-Wert ($EFEI_{th}$) von gerundet 1,3 Schichten theoretisch realisierbar ist:

$$EFEI_{th} = \frac{AS}{lc_{th}} = \frac{43}{32} \approx 1{,}3.$$

Unter Berücksichtigung der eingangs erwähnten Zielsetzung wird für die Nivellierungsmustererstellung ein EFEI-Wert von 2 Schichten gewählt ($EFEI_{ch}$). Hieraus ergibt sich wiederum die Anzahl der Nivellierungszyklen je Monat (lc_{ch}) wie folgt:

$$lc_{ch} = \left\lfloor \frac{AS}{EFEI_{ch}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{43}{2} \right\rfloor = 21.$$

Basierend auf den zuvor angeführten monatlichen Kapazitätsbedarfen ergeben sich hieraus die in Abbildung 5.5 dargestellten Kapazitätszeitfenster im Nivellierungsmuster.

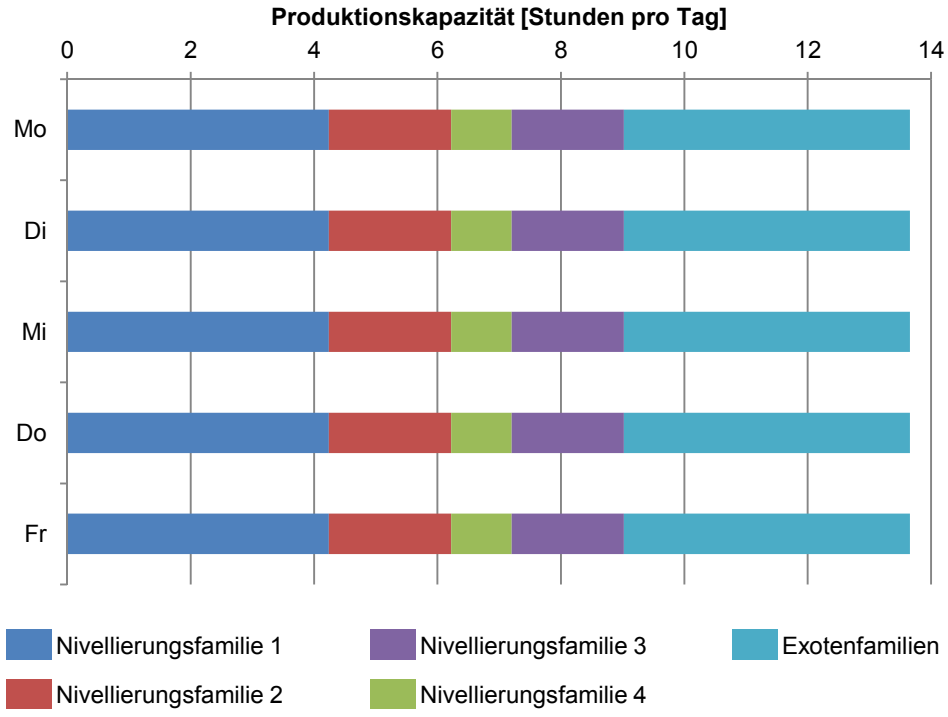


Abbildung 5.5: Nivellierungsmuster für eine Arbeitswoche (EFEI = 2 Schichten)

In dem visualisierten Nivellierungsmuster ist innerhalb der ersten Schicht ein Großteil der Kapazitätszeitfenster für die Nivellierungsfamilien vorgesehen, wohingegen für die zweite Schicht vorwiegend die Fertigung von Exotenfamilien und sog. Overflow geplant wird. Overflow entsteht dann, wenn Aufträge, die eigentlich einer Nivellierungsfamilie zugeordnet werden, nicht im entsprechenden Zeitfenster gefertigt werden können, da das Zeit-

fenster bspw. nicht mehr genügend Kapazität bietet. Das entsprechende Nivellierungsmuster ist für eine Arbeitswoche visualisiert.

Die verbleibende Rüstlücke kann entweder als zusätzliche Fertigungszeit für Exotenfamilien und Overflow oder für das Bilden kleinerer Kapazitätszeitfenster mit Hilfe der in Abschnitt 3.3.5 beschriebenen Heuristik genutzt werden (Abbildung 5.6).

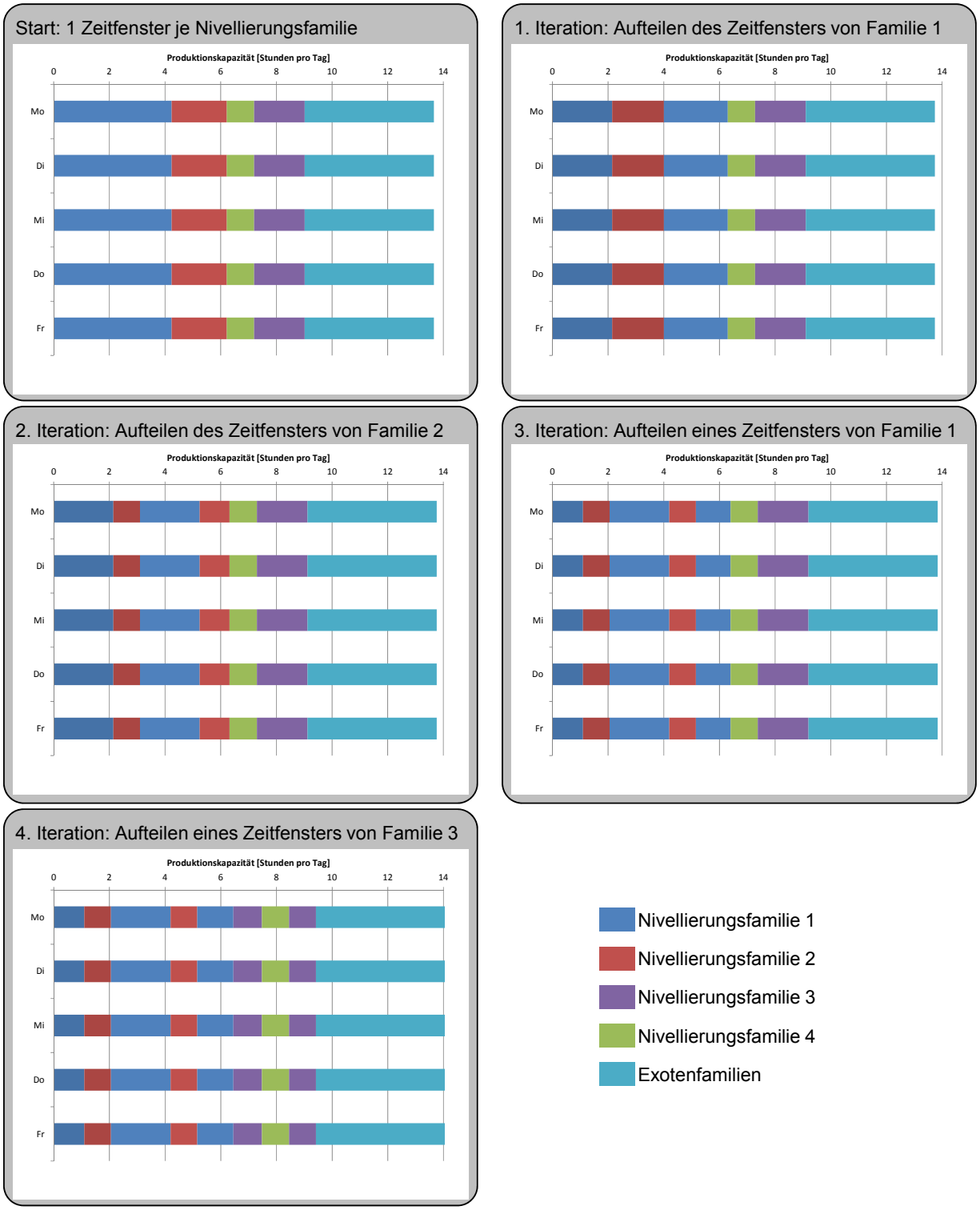


Abbildung 5.6: Aufteilung der Nivellierungsfamilien im Nivellierungsmuster zur Ausnutzung der verbleibenden Rüstlücke (Musteroptimierung)

Die Abbildung zeigt die Ergebnisse der verschiedenen, im Verlauf der Musteroptimierungsheuristik durchlaufenen Iterationen zur Aufteilung der Kapazitätszeitfenster im Nivellierungsmuster.

5.4 Zusammenfassung

Insgesamt ist aus der Erprobung und Erstanwendung die Erkenntnis abzuleiten, dass die entwickelte Vorgehensweise zur Nivellierung in der Kleinserienfertigung und der darauf basierende Softwaredemonstrator plausible und auch unter Gesichtspunkten der Praxistauglichkeit brauchbare Ergebnisse liefern. Dabei ist hervorzuheben, dass die Anwendbarkeit der entwickelten Vorgehensweise und des Softwaredemonstrators sich nicht auf den dargestellten Anwendungsfall beschränkt.

Sowohl bei der Entwicklung der Vorgehensweise als auch bei deren programmiertechnischer Umsetzung wurde der Schwerpunkt auf eine möglichst universelle Anwendbarkeit gelegt. So bspw. können für die Produktfamilienbildung nahezu beliebige Gruppierungskriterien genutzt werden, die lediglich auf ein binäres Skalenniveau transformiert werden müssen. Außerdem können zentrale Verfahrensparameter wie die gewünschte Partitionsgröße oder das Iterationsintervall vom Benutzer festgelegt werden. Im Rahmen der Erprobung und Erstanwendung konnten keine Restriktionen bzgl. der maximalen Anzahl von Erzeugnisvarianten, die bei der Gruppierung berücksichtigt werden können, festgestellt werden.

Auch die Nivellierungsmustererstellung bietet zahlreiche Anpassungsmöglichkeiten und daher ein hohes universelles Anwendungspotenzial. Bspw. kann eine aus dem Anwendungskontext resultierende Anzahl von Nivellierungsfamilien berücksichtigt werden. Außerdem bieten sich bspw. die Möglichkeiten zur Anpassung von Kapazitätsbedarfen und -angebot sowie zur Eingabe individueller Rüstzeiten zwischen den Nivellierungsfamilien. Somit stellt insbesondere der Softwaredemonstrator ein Hilfsmittel dar, das für den Transfer der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft genutzt werden kann.

6 Schlussbetrachtung

Die Produktionsnivellierung stellt eines der Kernelemente des Toyota Produktionssystems bzw. der Lean Production dar und ermöglicht als solches die Realisierung signifikanter Produktivitätssteigerungen. Bestehende und in der Literatur beschriebene konventionelle Nivellierungsansätze fokussieren sich stark auf das Anwendungsgebiet der Großserienfertigung. Eine Umsetzung derartiger Ansätze ist in der variantenreichen Kleinserienfertigung, wie sie in zahlreichen kleinen und mittelständischen Unternehmen vorzufindenden ist, nicht ohne weiteres möglich. Der Grund hierfür liegt darin, dass in der Kleinserienfertigung wesentliche Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung konventioneller Nivellierungskonzepte nicht gegeben sind. Diesbezüglich anzuführen ist insbesondere die in der Kleinserienfertigung i. d. R. vorzufindende hohe Variantenvielfalt in Verbindung mit stark schwankenden Kundenabrufen.

Primäres Ziel des IGF-Forschungsvorhabens war daher die Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise zur Produktionsnivellierung in der variantenreichen Kleinserienfertigung. Zu diesem Zweck wurde der Ansatz verfolgt, das variantenreiche Produktspektrum anhand von Fertigungsähnlichkeiten in eine handhabbare Anzahl von Produktfamilien zu gruppieren und basierend darauf ein familienorientiertes Nivellierungsmuster zu generieren. Hierzu wurden bereits bekannte und in der Literatur beschriebene Vorgehensweisen zur Nivellierung in der Großserie auf das Anwendungsgebiet der Kleinserienfertigung übertragen. Den Kern der entwickelten Vorgehensweise stellen die Schritte der Produktfamilienbildung und der Nivellierungsmustererstellung dar. Im Rahmen der Entwicklung der systematischen Vorgehensweise wurden zunächst wesentliche Gruppierungskriterien für die Produktfamilienbildung sowie weitere für die Nivellierungsmustererstellung relevante Einflussgrößen aufbereitet und strukturiert zusammengefasst.

Zur Produktfamilienbildung wurden Verfahren der multivariaten Datenanalyse untersucht und eingesetzt, die u. a. im Kontext gruppentechnologischer Anwendungen bekannt und erprobt sind. In diesem Kontext wurde eine Bewertungsfunktion in Form eines Wünschbarkeitsindex entwickelt, die einen Vergleich der im Zuge der Produktfamilienbildung erzeugten Gruppierungsalternativen sowohl anhand rein formaler als auch anhand anwendungskontextspezifischer Anforderungen ermöglicht. Für die beiden zuvor angeführten, den Kern der entwickelten Vorgehensweise darstellenden Schritte wurden eine formalisierte Darstellung in algorithmischer Form und darauf aufbauend eine programmiertechnische Umsetzung realisiert.

Die programmiertechnische Umsetzung der Produktfamilienbildung erfolgte in der Open Source Softwareumgebung RapidMiner. Die Vorgehensweise zur Nivellierungsmustererstellung wurde hingegen in MS-Excel mit Hilfe von VBA umgesetzt. Der auf diese Weise erstellte Softwaredemonstrator wurde erfolgreich mit Praxisdaten erprobt und erstangewendet. Zur praktischen Anwendung des Demonstrators wurde eine entsprechende Programmanleitung erstellt.

Bezugnehmend auf die eingangs formulierte Zielsetzung ist somit festzuhalten, dass durch die aufgezeigten Ergebnisse das Ziel des Vorhabens in vollem Umfang erreicht wurde.

Die erzielten Ergebnisse stellen den Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen und weiterführende Forschungsfragen dar. Diesbezüglich sind zum einen die Möglichkeiten zur Integration der Nivellierung in bestehende Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme anzuführen. Hierbei stellt sich insbesondere die Frage, inwieweit es möglich ist, Nivellierungsansätze mit Advanced Planning & Scheduling-Strategien (APS) oder Manufacturing Execution Systemen (MES) zu kombinieren bzw. in diese zu integrieren. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit zu untersuchen, inwieweit der entwickelte Ansatz zur Nivellierung von einer reinen Engpassbetrachtung zur Betrachtung mehrerer zu nivellierender Engpässe oder gar zu einer Gesamtwertstrombetrachtung erweitert werden kann.

7 Literaturverzeichnis

Applegate 2006
APPLEGATE, D. L.: *The traveling salesman problem: A computational study.* Princeton: Princeton Univ. Press, 2006 (Princeton series in applied mathematics).

Auch 1989
AUCH, M.: *Fertigungsstrukturierung auf der Basis von Teilefamilien.* Berlin: Springer, 1989 (IPA-IAO Forschung und Praxis 135).

Averill, Ingram, Nolan 2001
AVERILL, A. F.; INGRAM, J. M. ; NOLAN, R. F.: *Optimising the Selection of Metal Cleaning Processes or Cleaning Agents Using Desirability Functions.* In: *Transactions of the Institute of Metal Finishing* 79 (2001), Nr. 4, S. 123–128.

Bacher 2000
BACHER, J.: *A Probabilistic Clustering Model for Variables of Mixed Type.* In: *Quality and Quantity* 34 (2000), Nr. 3, S. 223–235.

Backhaus u. a. 2006
BACKHAUS, K.; ERICHSON, B.; PLINKE, W.; WEIBER, R.: *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung.* 11. Aufl. Berlin: Springer, 2006.

Buhl u. a. 2009
BUHL, Matthias ; BOHNEN, Fabian ; DEUSE, Jochen ; SCHNEIDER, Rainer: *Effiziente Kleinserienfertigung durch Produktionsnivellierung.* In: *Productivity Management* 14 (2009), Nr. 4, S. 19–22.

Burbidge 1971
BURBIDGE, J. L.: *Production flow analysis.* In: *The Production Engineer* 50 (1971), Nr. 4/5, S. 139–152.

Can-Weber 2010
CAN-WEBER, M.: *Richtig einsteigen: Excel 2010 VBA-Programmierung.* Unterschleißheim: Microsoft Press [u.a.], 2010.

Chan, Milner 1982
CHAN, H.-M ; MILNER, D.-A: *Direct Clustering Algorithm for Group Formation in Cellulare Manufacture.* In: *Journal of Manufacturing Systems* 1 (1982), Nr. 1, S. 65–75.

Choobineh, Nare 1999
CHOOBINEH, F.; NARE, A.: *The Impact of Ignored Attributes on a CMS Design.* In: *International Journal of Production Research* 37 (1999), Nr. 14, S. 3231–3245.

Coleman, Vaghefi 1994
COLEMAN, J. B.; VAGHEFI, M. R.: *Heijunka: A Key to the Toyota Production System.* In: *Production and Inventory Management Journal* 35 (1994), Nr. 4, S. 31–35.

Corsten 2004
CORSTEN, H.: *Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement.* 10. Aufl. München: Oldenbourg, 2004 (Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre).

Dennis 2007
DENNIS, P.: *Lean production simplified : A plain language guide to the world's most powerful production system.* 2. Aufl. New York : Productivity Press, 2007.

Derringer, Suich 1980
DERRINGER, G.; SUICH, R.: *Simultaneous Optimization of Several Response Variables.* In: *Journal of Quality Technology* 12 (1980), Nr. 4, S. 214–219.

Deuse 1998
DEUSE, J.: *Fertigungsfamilienbildung mit feature-basierten Produktmodelldaten.* Aachen : Shaker, 1998 (Berichte aus der Produktionstechnik 98,24).

Deuse, Birkmann, Harms 2007
DEUSE, J.; BIRKMANN, S.; HARMS, T.: *Einsatz der Gruppentechnologie zur Nivellierung in der variantenreichen Kleinserie.* In: *Industrie Management* 23 (2007), Nr. 6, S. 45–48.

Deuse, Stausberg, Wischniewski 2007
DEUSE, J.; STAUSBERG, J.; WISCHNIEWSKI, S.: *Leitsätze zur Gestaltung einer verschwendungsarmen Produktion.* In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* 102 (2007), Nr. 5, S. 291–294

Dickmann, Dickmann 2009
DICKMANN, E.; DICKMANN, P.: Kanban - Element des Toyota Produktionssystems. In: DICKMANN, P. (Hrsg.): *Schlanker Materialfluss.* 2. Aufl. Berlin: Springer, 2009 (VDI-Buch), S. 11–15.

Dickmann 2009
DICKMANN, P.: Grundlegende Steuerungsverfahren. In: DICKMANN, P. (Hrsg.): *Schlanker Materialfluss.* 2. Aufl. Berlin: Springer, 2009 (VDI-Buch), S. 156–162.

DIN 1992
NORM, DIN 4000 Teil 1: *Sachmerkmal Leisten - Begriffe und Grundsätze*

DIN 2002,
DIN 199-1: *Technische Produktdokumentation - CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten - Teil 1: Begriffe*

Doege, Partmann 1992
DOEGE, E. ; PARTMANN, N.: *Klassifizierung von Gesenkschmiedeteilen.* In: *Werkstattstechnik* 82 (1992), Nr. 10, S. 30–33.

Domschke, Drexl 2005
DOMSCHKE, W.; DREXL, A.: *Einführung in Operations Research.* 6., Aufl. Berlin: Springer, 2005 (Springer-Lehrbuch).

Duggan 2002
DUGGAN, K. J.: *Creating mixed model value streams: Practical lean techniques for building to demand.* New York N.Y.: Productivity Press, 2002.

Duller 2007
DULLER, C.: *Einführung in die Statistik mit EXCEL und SPSS: Ein anwendungsorientiertes Lehr- und Arbeitsbuch. 2.* Aufl. Heidelberg: Physica-Verlag 2007 (Physica-Lehrbuch).

Eckes, Roßbach 1980
ECKES, T.; ROßBACH, H.: *Clusteranalysen.* Stuttgart : Kohlhammer, 1980 (Kohlhammer Standards PsychologieTeilgebiet Methoden).

El-Essawy 1971
EL-ESSAWY, I. F. K.: *The Development of Component Flow Analysis in Production Systems Design for Multi-product Engineering Companies.* Dissertation. University of Manchester. 1971.

Engel 1997
ENGEL, L.: *Ein Beitrag zur Anwendung mathematisch-statistischer Methoden bei der Ähnlichkeitsbildung in der Umformtechnik.* Siegen: Höpner und Göttert, 1997.

Erlach 2007
ERLACH, K.: *Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik.* Berlin: Springer, 2007.

Eversheim 1989
EVERSHEIM, W.: *Organisation in der Produktionstechnik.* 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl., 1989 (Studium und Praxis).

Fimpel, Stender 2003
FIMPEL, A.; STENDER, S.: *Mit Wertstromdesign zur flexiblen Produktion.* In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 98 (2003), Nr. 11, S. 610–612.

Firchau u. a. 2002
FIRCHAU, N. L.; FRANKE, H.-J.; HUCH, B.; MENGE, M.: Variantenmanagement: Variantenvielfalt in Produktion und Prozessen erfolgreich beherrschen. In: FRANKE, H.-J. (Hrsg.): *Varianten-management in der Einzel- und Kleinserienfertigung.* München: Hanser, 2002, S. 1–25.

Fuller, Scherer 1998
FULLER, D.; SCHERER, W.: *The Desirability Function: Underlying Assumptions and Application Implications.* In: *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics 4*, S. 4016-4021.

Furmans 2005
FURMANS, K.: Models of Heijunka-Levelled Kanban-Systems. In: *5th International Conference on Analysis of Manufacturing Systems - Production and Management.* Thessaloniki : Publishing Ziti, 2005, S. 243–248.

Geiger, Greska 1992
GEIGER, M. ; GRESKA, W.: *Wissensbasierte Klassifizierung von Blechformteilen.* In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 87 (1992), Nr. 2, S. 108–111.

Göttker 1990
GÖTTKER, A.: *Untersuchung rechnergestützter Verfahren zur Teilefamilienbildung.* Köln: Verl. TÜV Rheinland, 1990.

Große-Heitmeyer, Wiendahl 2004
GROßE-HEITMEYER, V.; WIENDAHL, H.-P.: Einführung. In: WIENDAHL, H.-P. (Hrsg.): *Variantenbe-herrschung in der Montage.* Berlin: Springer, 2004 (Engineering online library), S. 3–20.

Halmosi, Löffler, Vollmer 2005
HALMOSI, H.; LÖFFLER, B.; VOLLMER, L.: *Wertstromdesign in der variantenreichen Produktion.* In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 100 (2005), 1-2, S. 47–52.

Ham, Goncalves, Han 1988
HAM, I.; GONCALVES, E. V.; HAN, C. P.: *An Integrated Approach to Group Technology.* In: *Annals of the CIRP Vol.* 37/1/1988, S. 433–437.

Hansmann 2006
HANSMANN, K.-W.: *Industrielles Management.* 8. Aufl. München: Oldenbourg, 2006.

Harrington 1965
HARRINGTON, E. C.: *The desirability Function.* In: *Industrial Quality Control* 21 (1965), Nr. 10, S. 494–498.

Heinz, Burkhardt 1985
HEINZ, K.; BURKHARDT, M.: *Partialgruppen - Ein Konzept zur ablauforientierten Strukturierung der Einzel- und Kleinserienfertigung.* In: *VDI-Z* 127 (1985), Nr. 18, S. 733–739.

Heinz, Hebbeler 1990
HEINZ, K.; HEBBELER, M. B.: *Standardisieren der Ablaufplanung beim Fräsen: Klassifizierung der Werkstücke.* In: *Werkstattstechnik* 80 (1990), S. 17–21.

Hon, Chi 1994
HON, K. K. B.; CHI, H.: *A new Approach of Group Technology Part Families Optimization.* In: *Annals of the CIRP Vol* 431/1/1994, S. 425–428.

Hopp, Spearman 2009
HOPP, W. J; SPEARMAN, M. L.: *Factory physics.* 3. ed.. Boston: McGraw-Hill/Irwin, 2009 (The McGraw-Hill/Irwin series).

Hubert, Levin 1976
HUBERT, L. J. ; LEVIN, J. R.: *A General Statistical Framework for Assesing Categorial Clustering in Recall.* In: *Psychological Bulletin* 83 (1976), Nr. 6, S. 1072–1080.

Hüttmeir u. a. 2009
HÜTTMEIR, A.; DE TREVILLE, S.; VAN ACKERE, A.; MONNIER, L.; PRENNINGER, J.: *Trading off between heijunka and just-in-sequence.* In: *International Journal of Production Economics* 118 (2009), Nr. 2, S. 501–507.

Jones, Womack 2002
JONES, D.; WOMACK, J.: *Seeing the Whole: Mapping the Extended Value Stream.* Massachusetts: Brookline, 2002

Jones 2006
JONES, D. T.: *Heijunka: Leveling Production.* In: *Manufacturing Engineering* 137 (2006), Nr. 2, S. 29–36.

Kaparthi, Suresh 1992
KAPARTHI, S. ; SURESH, N. C.: *Machine- component Cell Formation in Group Technology: A Neural Network Approach.* In: *International Journal of Production Research* 30 (1992), Nr. 6, S. 1353–1367.

Kettner, Schmidt, Greim 2010
KETTNER, H.; SCHMIDT, J.; GREIM, H.-R.: *Leitfaden der systematischen Fabrikplanung: Mit zahlreichen Checklisten.* Unveränd. Nachdr. München: Hanser, 2010.

Kiener 2006
KIENER, S.: *Produktions-Management: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung.* 8. Aufl. München: Oldenbourg, 2006.

Kim, Lin 2000
KIM, K. -J; LIN, D. K. J.: *Simultaneous Optimization of Mechanical Properties of Steel by Maximizing Desirability Functions.* In: *Applied Statistics* 49 (2000), Nr. 3, S. 311–326.

King, Nakornchai 1982
KING, J. R.; NAKORNCHAI, V.: *Machine-component Group Formation in Group Technology: Review and Extension.* In: *International Journal of Production Research* 20 (1982), Nr. 2, S. 117–133.

Kotz u. a. 2006
KOTZ, S.; BALAKRISHNAN, N.; READ, Campbell B.; VIDAKOVIC, B.: *Encyclopedia of statistical sciences.* 2. Aufl. Hoboken, NJ : Wiley, 2006.

Künzel 1996
KÜNZEL, R.: *Strukturierung von großen Werkstückspektren mit Verfahren der klassifikatorischen und unscharfen Datenanalyse.* Aachen: Skaker, 1996 (Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme 95,4).

Laporte 2010
LAPORTE, G.: *A concise guide to the Traveling Salesman Problem.* In: *Journal of the Operational Research Society* 61 (2010), Nr. 1, S. 35–40.

Lee, Chen 1997
LEE, S. D.; CHEN, Y. L.: *A Weighted Approach for Cellular Manufacturing Design: Minimizing Intercell Movement and Balancing Workload among Duplicated Machines.* In: *International Journal of Production Research* 35 (1997), Nr. 4, S. 1125–1146.

Lee, Fischer 1999
LEE, S. Y.; FISCHER, G. W.: *Grouping Parts Based on Geometrical Shapes and Manufacturing Attributes Using a Neural Network.* In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 10 (1999), Nr. 2, S. 199–209.

Lee-Post 2000
LEE-POST, A.: *Part Family Identification Using a Simple Genetic Algorithm.* In: *International Journal of Production Research* 38 (2000), Nr. 4, S. 793–810.

Liao, Lee 1994
LIAO, T. W.; LEE, K. S.: *Integration of a Feature-based CAD-system and an ART1 neural model for GT Coding and Part Family Forming.* In: *Computers and Industrial Engineering* 26 (1994), Nr. 1, S. 93–104.

Ligges 2008
LIGGES, U.: *Programmieren mit R.* 3. Aufl. Berlin: Springer, 2008 (Statistik und ihre Anwendungen).

Liker 2004
LIKER, J. K.: *The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer.* New York: McGraw-Hill, 2004.

Liker 2006
LIKER, J.K.: *Der Toyota-Weg: 14 Managementprinzipien des weltweit erfolgreichsten Automobilkonzerns.* München: FinanzBuch, 2006.

Lippolt, Furmans 2008
LIPPOLT, C. R.; FURMANS, K.: Sizing of Heijunka-Controlled Production Systems with Unreliable Production Processes. In: KOCH, T. (Hrsg.): *Lean Business Systems and Beyond.* Boston, MA: International Federation for Information Processing, 2008, S. 11–19.

Lödding 2008
LÖDDING, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration.* 2. Aufl. Berlin: Springer, 2008 (VDI-Buch).

Lokuciejewski u. a. 2010
LOKUCIEJEWSKI, P.; STOLPE, M.; MORIK, K.; MARWEDEL, P.: Automatic Selection of Machine Learning Models for Compiler Heuristic Generation. In: *Proceedings of the 4th Workshop on Statistical and Machine Learning Approaches to ARchitecture and compilaTion SMART 2010*.

Lu 1989
LU, S.: *Machine Learning Techniques for Group Technology.* In: *Annals of the CIRP Vol* 38/1/1989, S. 455–459.

Lu, Ton, Traore 2008
LU, W.; TON, H.; TRAORE, I.: E-Means: An Evolutionary Clustering Algorithm. In: KANG, L. (Hrsg.): *Advances in computation and intelligence: Third international symposium, ISICA 2008, Wuhan, China, December 19 - 21, 2008; proceedings.* Berlin: Springer, 2008 (Lecture notes in computer science, 5370), S. 537–545.

Luczak, Eversheim 2001
LUCZAK, H.; EVERSHEIM, W.: *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte.* 2. Aufl. Berlin : Springer, 2001 (VDI-Buch).

Lutz 1967
LUTZ, W.: *Entwicklung einer fertigungsbeschreibenden Systemordnung für das Drehen von Einzelteilen und Kleinserien.* Dissertation. Universität Stuttgart. 1967.

Martin 1989
MARTIN, J.: *Gruppentechnologische Fertigungsstrukturen: Planung und Bewertung bei Einzel- und Kleinserienfertigung.* Köln : Verl. TÜV Rheinland, 1989 (Schriftenreihe technische Betriebsführung).

Maßberg, Künzel 1996
MAßBERG, W.; KÜNZEL, R.: *A new Hybrid Method for Part-Family Development.* In: *Annals of the CIRP* Vol 45/1/ 1996, S. 465–470.

McCormick, Schweitzer, White 1972
MCCORMICK, W. T.; SCHWEITZER, P. J.; WHITE, T. W.: *Problem Decomposition and Data Reorganization by a Clustering Technique.* In: *Operations Research* 20 (1972), Nr. 5, S. 993–1009.

McKellen 2004
MCKELLEN, C.: *Production levelling.* In: *Metalworking Production* 148 (2004), Nr. 12, S. 14.

Mertens, Wieczorrek 2000
MERTENS, P.; WIECZORREK, H. W.: *Data X Strategien: Data Warehouse, Data Mining und operationale Systeme für die Praxis.* Berlin: Springer, 2000.

Mierswa 2009
MIERSWA, I.: *Non-Convex and Multi-Objective Optimization in Data Mining.* Dissertation. Technische Universität. 2009.

Mierswa u. a. 2006

MIERSWA, I.; WURST, M.; KLINKENBERG, R.; SCHOLZ, M.; EULER, T.: Rapid Prototyping for Complex Data Mining Tasks. In: *Proceedings of the 12th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-06), August 20 - 23, 2006, Philadelphia, USA 2006*.

Milligan 1981
MILLIGAN, G. W.: *A Monte Carlo Study of Thirty Internal Criterion Measures for Cluster Analysis.* In: *Psychometrika* 46 (1981), Nr. 2, S. 187–199.

Milligan, Cooper 1985
MILLIGAN, G. W.; COOPER, M. C.: *An Aexamination of Procedures for Determining the Number of Clusters in a Data Set.* In: *Psychometrika* 50 (1985), Nr. 2, S. 159–179.

Mitrofanow 1960
MITROFANOW, S. P.: *Wissenschaftliche Grundlagen der Gruppentechnologie.* Berlin: VEB Verlag, 1960.

Moll, Lueg 1973
MOLL, W. -P ; LUEG, H.: *Fertigungsbeschreibendes Klassifizierungssystem.* Stuttgart: Großmann-Verlag, 1973.

Monden 1983
MONDEN, Y.: *Toyota Production System: Practical approach to production management.* Norcross: Industrial Engineering and Management Press, 1983.

Nissen 1994
NISSEN, V.: *Evolutionäre Algorithmen: Darstellung, Beispiele, betriebswirtschaftliche Anwendungsmöglichkeiten.* Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 1994 (DUV).

Oeltjenbruns 2000
OELTJENBRUNS, H.: *Organisation der Produktion nach dem Vorbild Toyotas..* Aachen: Shaker, 2000 (Innovationen der Fabrikplanung und -organisation 3).

Ohno 1993
OHNO, T.: *Das Toyota-Produktionssystem.* Frankfurt/Main: Campus, 1993.

Opitz 1968
OPITZ, H.: *Verschlüsselungsrichtlinien und Definitionen zum werkstückbeschreibenden Klassifizierungssystem.* Essen: Giradet Verlag, 1968.

Park 1993
PARK, P. S.: *Uniform Plant Loading through Level Production.* In: *Production and Inventory Management Journal* 34 (1993), Nr. 2, S. 12–17.

REFA 1993
REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation: *Grundlagen der Arbeitsgestaltung.* 2. Aufl. München: Hanser, 1993 (Methodenlehre der Betriebsorganisation).

Reinhart u. a. 2010
REINHART, G.; EGBERS, J.; HÜTTNER, S.; GEIGER, F.; HATWIG, J.: *Nivellierung variantenreicher Serienprodukte.* In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (2010), Nr. 4, S. 356–361.

RexerAnalytics 2010
REXERANALYTICS: *3rd Annual Data Miner Survey: 2009 Survey Summary Report,* 2010

Rother 2009
ROTHER, M.: *Die Kata des Weltmarktführers: Toyotas Erfolgsmethoden.* Frankfurt/Main: Campus, 2009.

Rother, Harris, Womack 2004
ROTHER, M.; HARRIS, R.; WOMACK, J.: *Kontinuierliche Fließfertigung organisieren : Praxisleitfaden zur Einzelstück-Fliessfertigung für Manager, Ingenieure und Meister in der Produktion.* Aachen: Lean Management Institut, 2004.

Rother, Shook 2000
ROTHER, M.; SHOOK, J.: *Sehen lernen: Mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen.* Stuttgart: LOG_X, 2000.

de Sá 2003
DE SÁ, J. P. M.: *Applied statistics using SPSS, STATISTICA and MATLAB.* Berlin: Springer, 2003.

Sarkar, Yegnanarayana, Deepak 1997
SARKAR, M.; YEGNANARAYANA, B.; DEEPAK, K.: *A clustering algorithm using an evolutionary programming-based approach.* In: *Pattern Recognition Letters* 18 (1997), S. 975–986.

Schürle 2009
SCHÜRLE, P.: Produktionsnivellierung - mit Heijunka Produktion und Logsitik stabilisieren. In: DICKMANN, P. (Hrsg.): *Schlanker Materialfluss.* 2. Aufl. Berlin: Springer, 2009 (VDI-Buch), S. 248–254.

Shingo 1992
SHINGO, S.: *Das Erfolgsgeheimnis der Toyota-Produktion: Eine Studie über das Toyota-Produktionssystem - genannt die "Schlanke Produktion".* Landsberg/Lech : Moderne Industrie, 1992.

Shunk 1985
SHUNK, D. L.: *Group Technology Provides Organized Approach to Realizing Benefits of CIMS.* In: *Industrial Engineering* 17 (1985), Nr. 4, S. 74–80.

Slomp, Bokhorst, Germs 2009
SLOMP, J.; BOKHORST, J. A. C. ; GERMS, R.: *A Lean Production Control System for High-Variety/Low-Volume Environments: A Case Study Implementation.* In: *Production Planing & Control* 20 (2009), Nr. 7, S. 586–595.

Smalley 2005
SMALLEY, A.: *Produktionssysteme glätten: Anleitung zur Lean Production nach dem Pull-Prinzip - angepasst an die Kundennachfrage.* Aachen: Lean Management Institute, 2005.

de Smet, Gelders 1998
DE SMET, R. ; GELDERS, L.: *Using simulation to evaluate the introduction of a kanban subsystem within an MRP-controlled manufacturing environment.* In: *International Journal of Production Economics* 56-57 (1998), S. 111–122.

Sokolowski 1938
SOKOLOWSKI, A. P.: *Probleme der Typisierung technologischer Prozesse.* Leningrad : Lenitomasch, 1938.

Sossna 2000
SOSSNA, F.: *Reorganisation gruppentechnologischer Fertigungsstrukturen.* Aachen: Shaker, 2000 (Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme / Institut für Automatisierungstechnik, Lehrstuhl für Produktionssysteme 99,4).

Stache, Zimmermann 2010
STACHE, U. ; ZIMMERMANN, W.: *Operations Research: Quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung.* 10. Aufl. München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2010.

Steinhausen, Langer 1977
STEINHAUSEN, D.; LANGER, K.: *Clusteranalyse: Einführung in Methoden und Verfahren der automatischen Klassifikation.* Berlin: de Gruyter, 1977 (De Gruyter Lehrbuch).

Steuer 2005
STEUER, D.: *Statistische Eigenschaften der Multikriteriellen Optimierung mittels Wünschbarkeiten.* Dissertation. Technische Universität. 2005.

Syska 2006
SYSKA, A.: *Produktionsmanagement: Das A - Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute.* Wiesbaden: Gabler, 2006.

Takeda 2004
TAKEDA, H. MEYNERT, A.: *Das synchrone Produktionssystem: Just-in-time für das ganze Unternehmen.* 4. Aufl. Frankfurt/Main: Redline Wirtschaft, 2004.

Tempelmeier, Hauser, Becker 2003
TEMPELMEIER, H.; HAUSER, R.; BECKER, I.: *Material-Logistik: Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung und das Supply Chain Management.* 4. Aufl. Berlin: Springer, 2003.

Tönshoff, Rotzoll, Verweij 1997
TÖNSHOFF, H. K.; ROTZOLL, M. A. ; VERWEIJ, M. J.: *Familiengründung: Die Bildung von Werkstückfamilien als Voraussetzung für produktorientierte Strukturen.* In: *AV* 34 (1997), Nr. 2, S. 93–97.

Trautmann 2004
TRAUTMANN, H.: *Qualitätskontrolle in der Industrie anhand von Kontrollkarten für Wünschbarkeitsindizes - Anwendungsfeld Lagerverwaltung.* Dissertation. Technische Universität Dortmund. 2004.

Weber, Kabst 2006
WEBER, W.; KABST, R.: *Einführung in die Betriebswirtschaftslehre.* 6. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2006.

Weihs, Szepannek 2009
WEIHS, C.; SZEPANNEK, G.: *Distances in Classification.* In: *LNAI* (2009), Nr. 5633, S. 1–12.

Weingessel, Dimitriadou, Dolnicar 1999
WEINGESSEL, A.; DIMITRIADOU, E.; DOLNICAR, S.: *An Examination of Indexes for Determinining the Number of Clusters in Binary Dara Sets.* Working Paper. Wien, Vienna University of Economics and Business Administration. 1999.

Weiß 2009
WEIß, C.: *Datenanalyse und Modellierung mit STATISTICA.* München: Oldenbourg, 2009.

Wiendahl 2010
WIENDAHL, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure* 7. Aufl. München: Hanser, 2010.

Womack, Jones, Roos 1992
WOMACK, J. P. ; JONES, D. T. ; ROOS, D.: *Die zweite Revolution in der Autoindustrie.* 7. Aufl. Frankfurt/Main: Campus-Verl., 1992.

Wuthnow 2010
WUTHNOW, A.: *Steuerung und Nivellierung von Wertströmen in der Automobilsteuergeräte-fertigung.* Aachen: Shaker, 2010 (Industrial Engineering 3).

Wuthnow, Deuse 2009a
WUTHNOW, A.; DEUSE, J.: *Produktionssteuerung bei hoher Variantenvielfalt in der Elektronik-fertigung:* In: *PPS Management* 14 (2009), Nr. 2, S. 43–46.

Wuthnow, Deuse 2009b
WUTHNOW, A.; DEUSE, J.: *Systematische Nivellierung von Wertströmen.* In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104 (2009), Nr. 4, S. 229–234.

Zäh, Aull 2006
ZÄH, M. F. ; AULL, F.: *Lean Production-Methoden und Interdependenzen.* In: *Werkstattstechnik Online* 96 (2006), Nr. 9, S. 683–687.

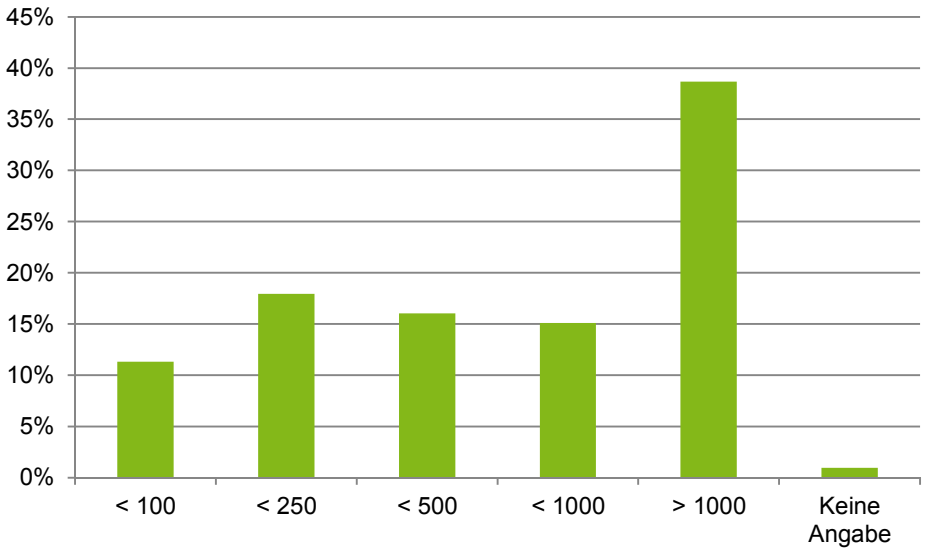
Ziegenbalg, Ziegenbalg, Ziegenbalg 2007
ZIEGENBALG, J.; ZIEGENBALG, O.; ZIEGENBALG, B.: *Algorithmen.* 2. Aufl. Frankfurt/Main: Deutsch, 2007.

Zimmermann 1967
ZIMMERMANN, D.: *ZAFO - Eine allgemeine Formenordnung für Werkstückgestaltung, Handhabung und Rationalisierungserfolg.* Stuttgart: Großmann-Verlag, 1967.

8 Anhang A – Auswertung der Empirischen Erhebung

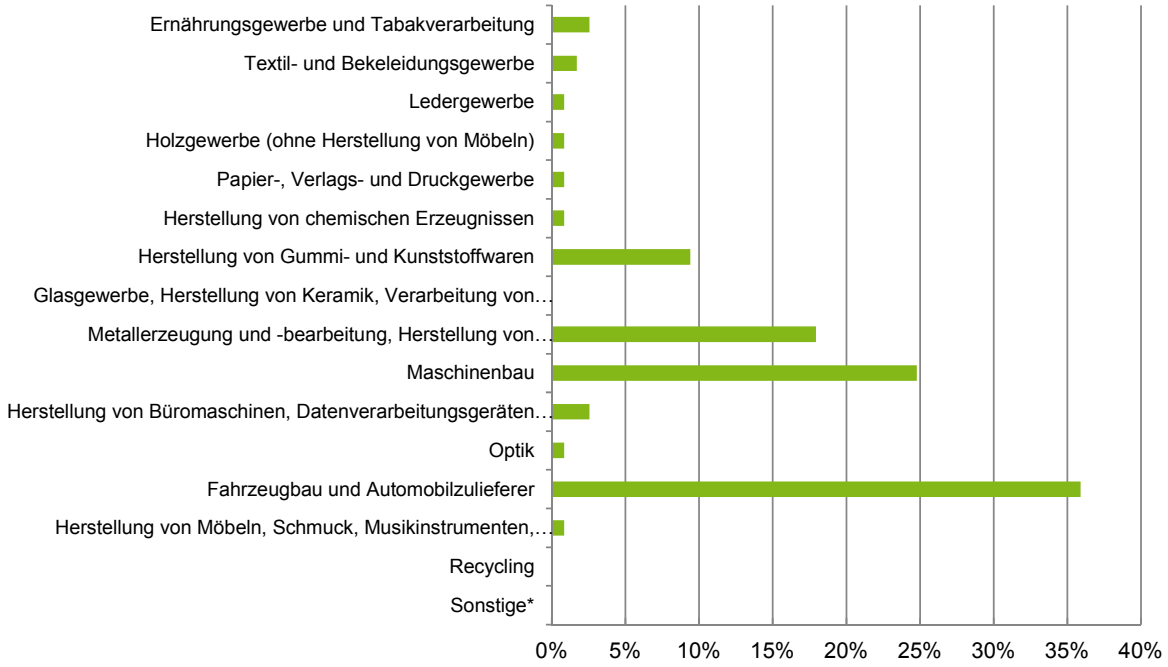
Die empirische Erhebung wurde im Jahr 2009 in Form einer online-Befragung durchgeführt. Abgefragt wurden dabei allgemeine Unternehmensformationen (Mitarbeiteranzahl, Fertigungsart etc.), Information zur Produktionsplanung und -steuerung sowie Informationen bezogen auf die Produktionsnivellierung. Insgesamt beteiligten sich an der Umfrage 106 Vertreter von Unternehmen unterschiedlicher Branchen und Größe.

Mitarbeiteranzahl der befragten Unternehmen



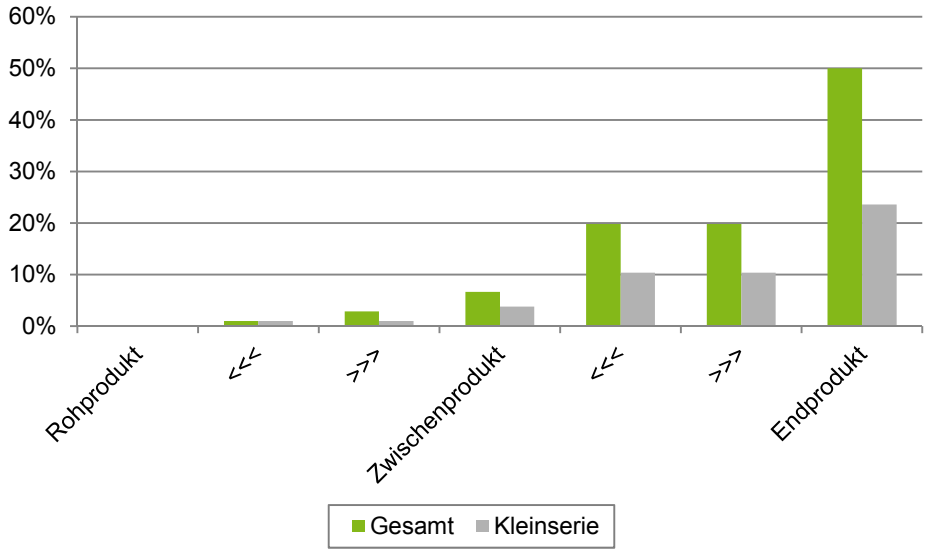
	< 100	< 250	< 500	< 1000	> 1000	Keine Angabe	Gesamt
absolut	12	19	17	16	41	1	106
relativ	11%	18%	16%	15%	41%	1%	100%

Branchenzugehörigkeit der befragten Unternehmen



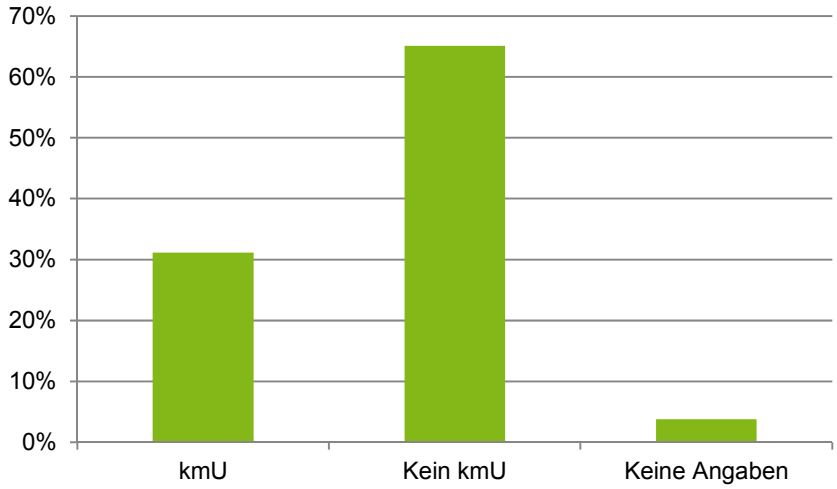
	relativ	absolut
Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung	3%	3
Textil- und Bekleidungsgewerbe	2%	2
Ledergewerbe	1%	1
Holzgewerbe (ohne Herstellung von Möbeln)	1%	1
Papier-, Verlags- und Druckgewerbe	1%	1
Herstellung von chemischen Erzeugnissen	1%	1
Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren	9%	11
Glasgewerbe, Herstellung von Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden	0%	0
Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen	18%	21
Maschinenbau	25%	29
Herstellung von Büromaschinen, Datenverarbeitungsgeräten Elektrotechnik, Feinmechanik	3%	3
Optik	1%	1
Fahrzeugbau und Automobilzulieferer	36%	42
Herstellung von Möbeln, Schmuck, Musikinstrumenten, Sportgeräten, Spielwaren	1%	1
Recycling	0%	0
Sonstige	0%	0
Gesamt	100%	117

Einordnung der befragten Unternehmen in die Wertschöpfungskette



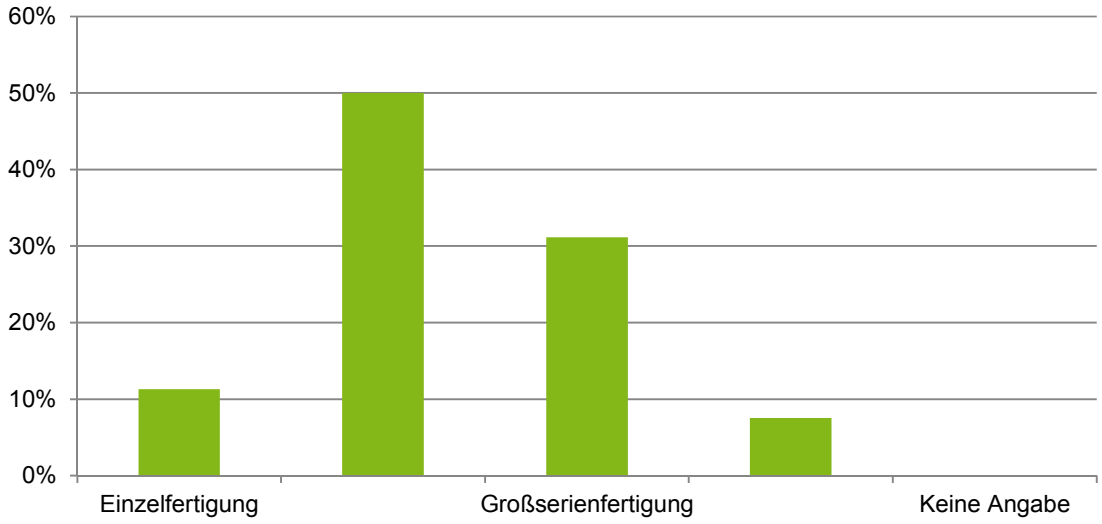
		Roh-produkt	<<<	>>>	Zwischen-produkt	<<<	>>>	End-produkt	Gesamt
Gesamt	relativ	0%	1%	3%	7%	20%	20%	50%	100%
	absolut	0	1	3	7	21	21	53	106
Klein-serie	relativ	0%	1%	1%	4%	10%	10%	24%	50%
	absolut	0	1	1	4	11	11	25	53

Anteil kleiner und mittelständischer Unternehmen (KMU)



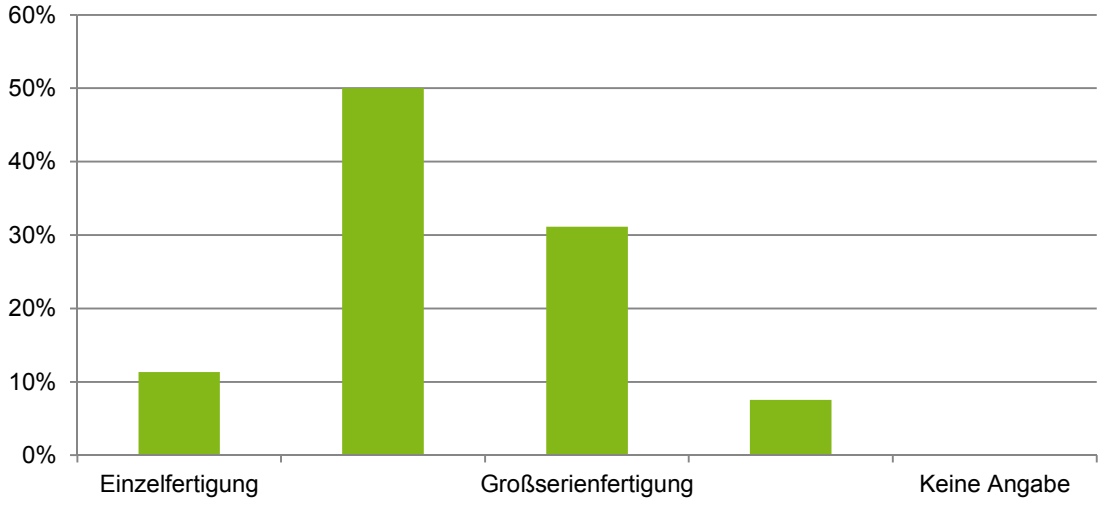
	kmU	Kein kmU	Keine Angaben	Gesamt
absolut	33	69	4	106
relativ	31%	65%	4%	100%

Gliederung der beteiligten Unternehmen nach Fertigungsformen



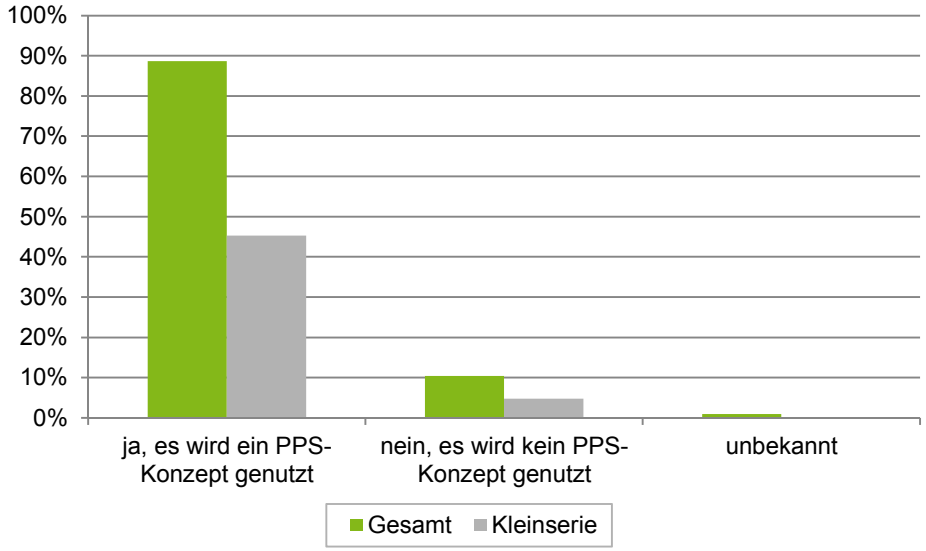
		Baustelle	Werkstatt-fertigung	Insel-fertigung	Linien-fertigung	Sonstige	Gesamt
Gesamt	relativ	1%	20%	18%	52%	9%	100%
	absolut	1	21	19	55	10	106
Klein-serie	relativ	0%	10%	11%	24%	5%	50%
	absolut	0	11	12	25	5	53

Gliederung der beteiligten Unternehmen nach Fertigungsarten



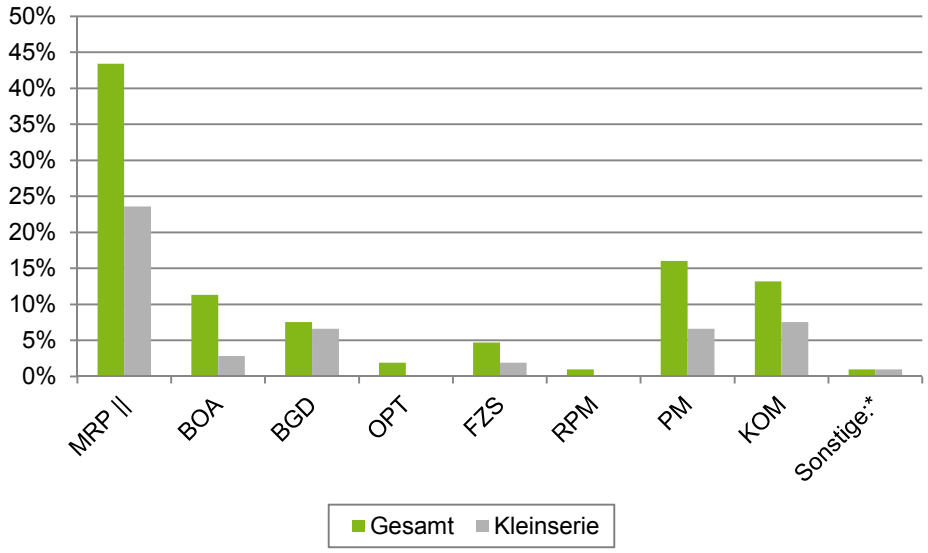
	Einzelfertigung	Kleinserienfertigung	Großserienfertigung	Massenfertigung	Keine Angabe	Gesamt
absolut	12	53	33	8	0	
relativ	11%	50%	31%	8%	0%	100%

Grundsätzlicher Einsatz von Produktionsplanungs- und –steuerungs(PPS)-Konzepten in den befragten Unternehmen



		ja	nein	unbekannt	Gesamt
Gesamt	relativ	89%	10%	1%	100%
	absolut	94	11	1	106
Klein-serie	relativ	45%	5%	0%	50%
	absolut	48	5	0	53

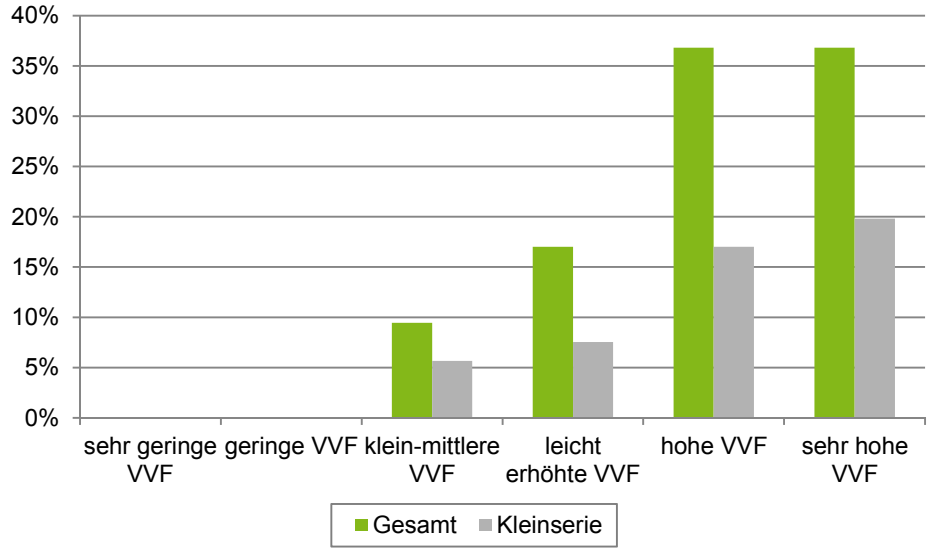
Art des genutzten PPS-Konzeptes



		MRP II	BOA	BGD	OPT	FZS	RPM	PM	KOM	Sonstige	Gesamt
Gesamt	relativ	43%	11%	8%	2%	5%	1%	16%	13%	1%	100%
	absolut	46	12	8	2	5	1	17	14	1	106
Klein-serie	relativ	24%	3%	7%	0%	2%	0%	7%	8%	1%	50%
	absolut	25	3	7	0	2	0	8	8	0	53

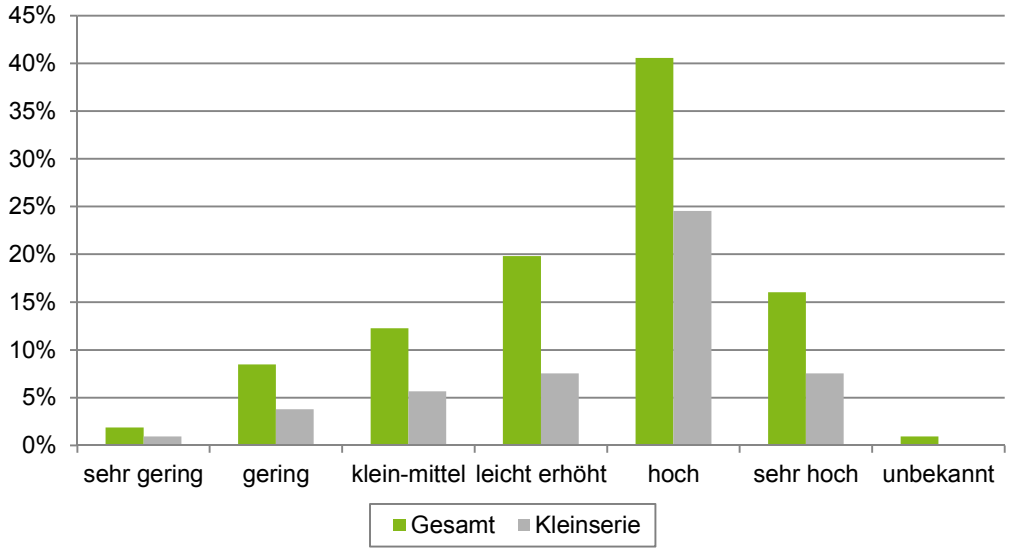
MRP II = Material Ressource Planing
BOA = Belastungsorientierte Auftragsfreigabe
BGD = Bestandsgeregelte Durchflusssteuerung
OPT = Optimized Production Technology
FZS = Fortschrittkennzahlensystem
RPM = Repetitive Production Management
PM = Projektmanagement
KOM = Kapazitätsorientierte Materialbewirtschaftung

Selbsteinschätzung der befragten Unternehmen hinsichtlich der Variantenvielfalt (VVF) im Produktspektrum



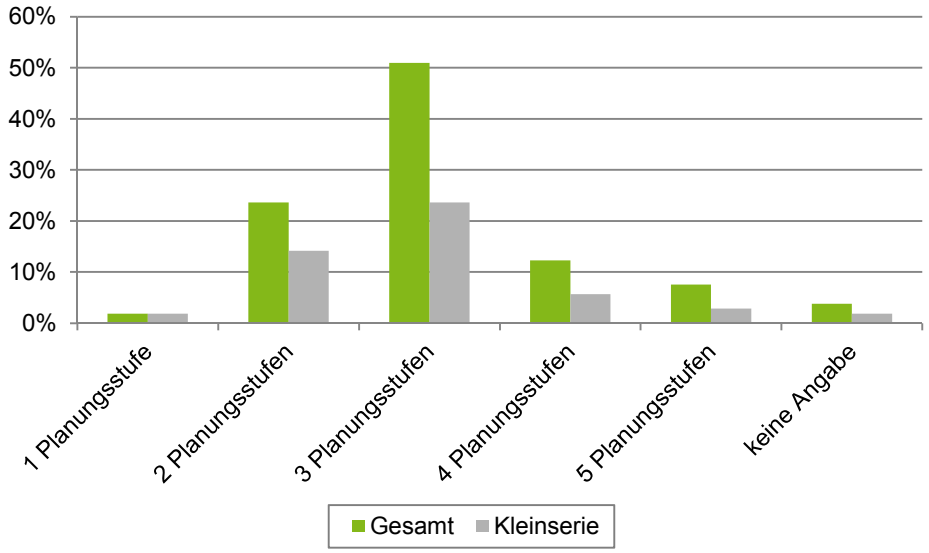
		sehr geringe VVF	geringe VVF	klein-mittlereVVF	leicht erhöhte VVF	hohe VVF	sehr hohe VVF	Gesamt
Gesamt	relativ	0%	0%	9%	17%	37%	37%	100%
	absolut	0	0	10	18	39	39	106
Kleinserie	relativ	0%	0%	6%	8%	17%	20%	50%
	absolut	0	0	6	8	18	21	53

Einschätzung der vorliegenden Variantenvielfalt als Problem für die Produktionsplanung



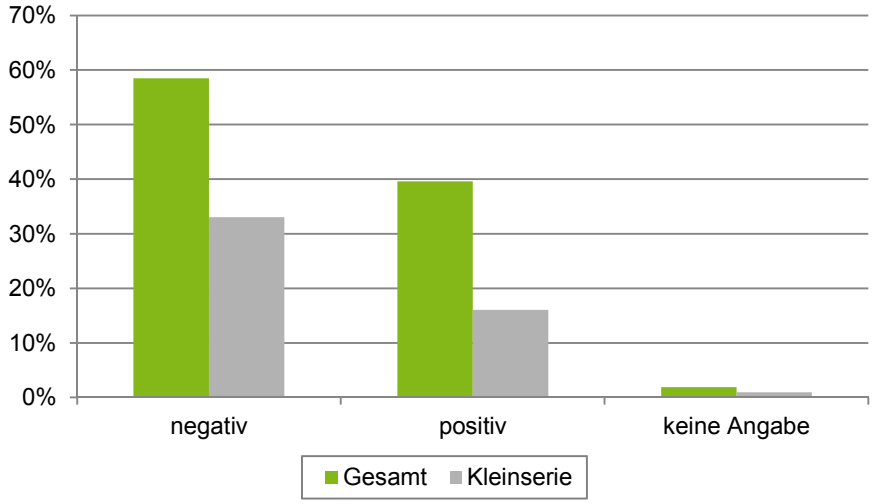
		sehr gering	gering	klein-mittel	leicht erhöht	hoch	sehr hoch	Gesamt
Gesamt	relativ	2%	8%	12%	20%	41%	16%	100%
	absolut	2	9	13	21	43	17	106
Kleinserie	relativ	1%	4%	6%	8%	25%	8%	50%
	absolut	1	4	6	8	26	8	53

Anzahl der für die Produktionsplanung genutzten Stufen



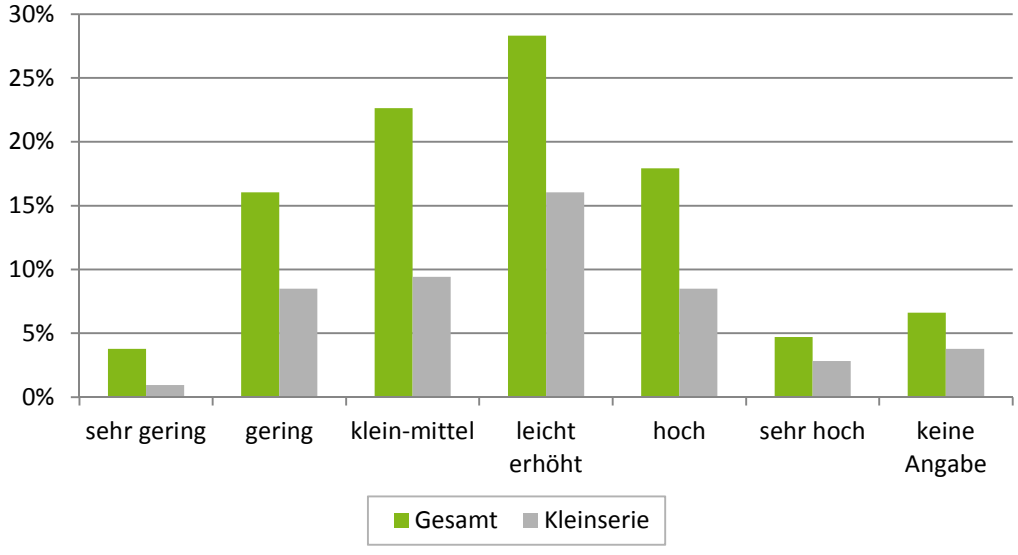
		1 Planungs-stufe	2 Planungs-stufen	3 Planungs-stufen	4 Planungs-stufen	5 Planungs-stufen	Keine Angabe	Gesamt
Gesamt	relativ	2%	24%	51%	12%	8%	4%	100%
	absolut	2	25	54	13	8	4	106
Klein-serie	relativ	2%	14%	24%	6%	3%	2%	50%
	absolut	2	15	25	6	3	2	53

Einschätzung von Prognosefähigkeit / Vorhersagbarkeit für die Produktion aufgrund von Absatz, Bestellintervallen, Auftragsabwicklung etc.



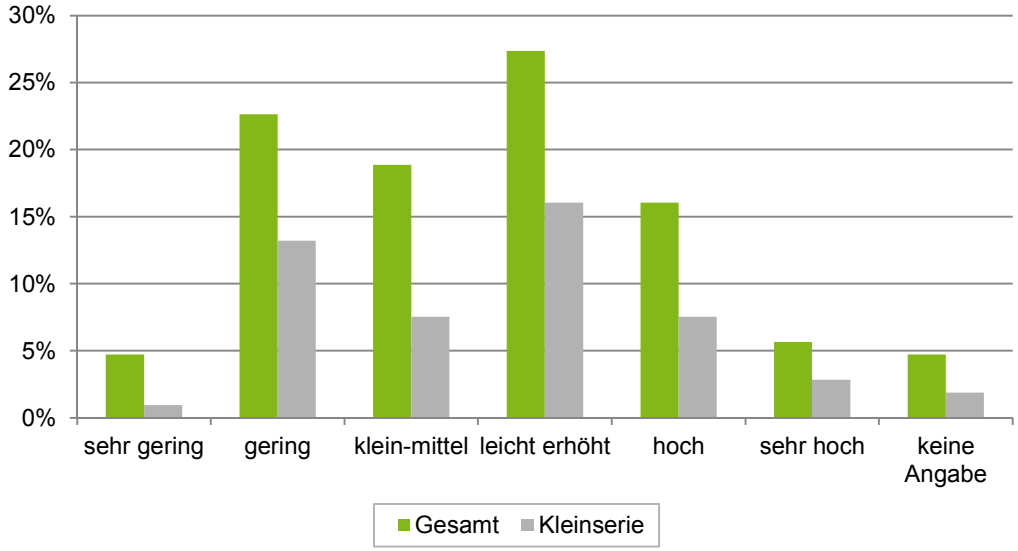
		negativ	positiv	keine Angabe	Gesamt
Gesamt	relativ	58%	40%	2%	100%
	absolut	62	42	2	106
Klein-serie	relativ	33%	16%	1%	50%
	absolut	35	17	1	53

Bewertung der Zusammenarbeit mit Lieferanten innerhalb der Wertschöpfungskette im Hinblick auf einen Informationsaustausch für die Produktionsplanung



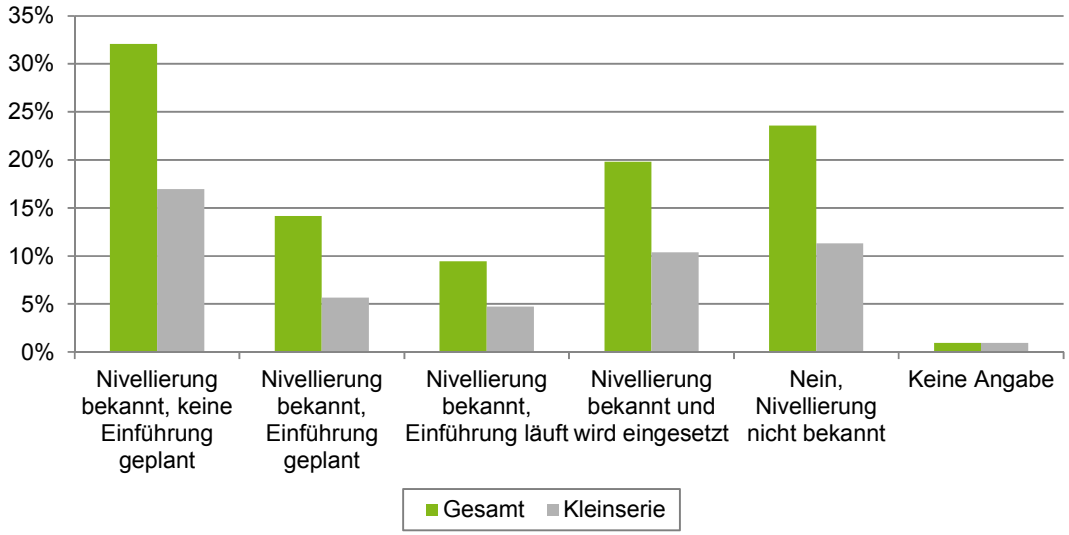
		sehr gering	gering	klein-mittel	leicht erhöht	hoch	sehr hoch	Keine Angabe	Gesamt
Gesamt	relativ	4%	16%	23%	28%	18%	5%	7%	100%
	absolut	4	17	24	30	19	5	7	106
Kleinserie	relativ	1%	8%	9%	16%	8%	3%	4%	50%
	absolut	1	9	10	17	9	3	4	53

Bewertung der Zusammenarbeit mit Kunden innerhalb der Wertschöpfungskette im Hinblick auf einen Informationsaustausch für die Produktionsplanung



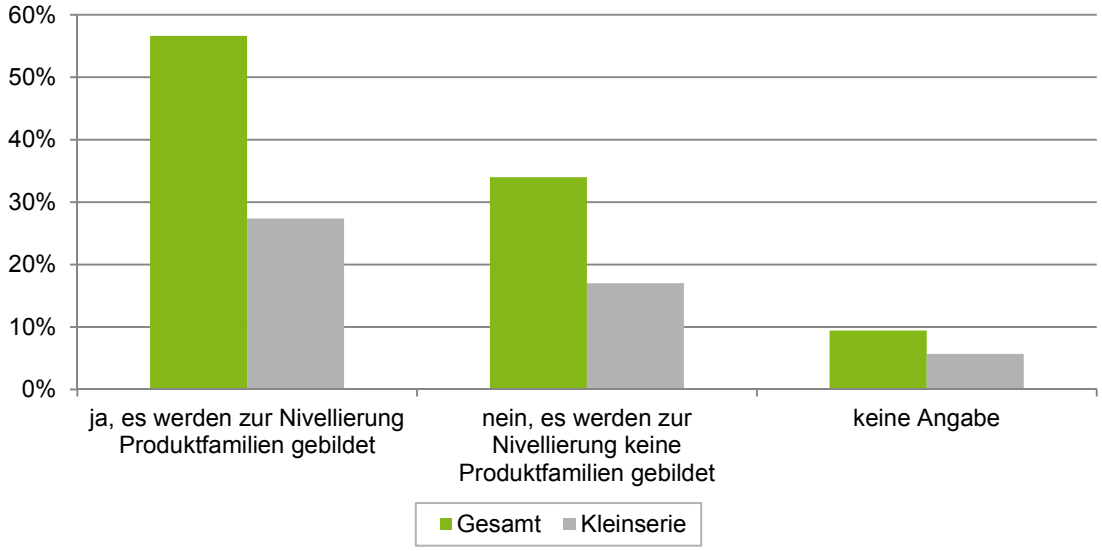
		sehr gering	gering	klein-mittel	leicht erhöht	hoch	sehr hoch	Keine Angabe	Gesamt
Gesamt	relativ	5%	23%	19%	27%	16%	6%	5%	100%
	absolut	5	24	20	29	17	6	5	106
Kleinserie	relativ	1%	13%	8%	16%	8%	3%	2%	50%
	absolut	1	14	8	17	8	3	2	53

Bekanntheit und Einsatz der Produktionsnivellierung



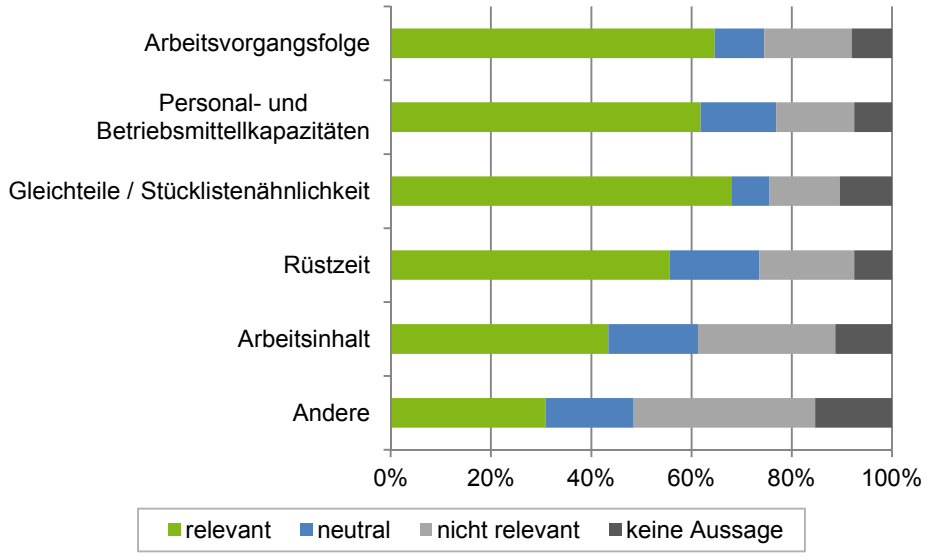
		Ja, keine Einführung geplant	Ja, Einführung geplant	Ja, Einführung läuft	Ja, Konzept wird eingesetzt	Nein	Keine Angabe	Summe
Gesamt	Relativ	32%	14%	9%	20%	24%	1%	100%
	absolut	34	15	10	21	25	1	106
Klein-serie	Relativ	17%	6%	5%	10%	11%	1%	50%
	absolut	18	6	5	11	12	1	53

Bildung von Produktfamilien zu Nivellierungszwecken



		ja	nein	unbekannt	Gesamt
Gesamt	relativ	57%	34%	9%	100%
	absolut	60	36	10	106
Klein-serie	relativ	27%	17%	6%	50%
	absolut	29	18	6	53

Einschätzung von Kriterien zur Produktfamilienbildung zu Nivellierungszwecken



Verdichtung		nicht relevant		neutral		relevant		keine Aussage		Gesamt	
		abs.	%	abs.	%	abs.	%	abs.	%	abs.	%
1	Reihenfolge der Arbeitsvorgänge	20	19%	10	9%	68	64%	8	8%	106	100%
2	erforderliche Personalkapazität	21	20%	19	18%	57	54%	9	8%	106	100%
2	erforderliche Betriebsmittel	12	11%	13	12%	74	70%	7	7%	106	100%
3	Gleichteile (Stückähnlichkeiten)	15	14%	8	8%	72	68%	11	10%	106	100%
3	Arbeitsinhalt/ erforderliche Arbeitsvorgänge	17	16%	11	10%	69	65%	9	8%	106	100%
4	Rüstzeit	20	19%	19	18%	59	56%	8	8%	106	100%
5	Bearbeitungszeit	29	27%	19	18%	46	43%	12	11%	106	100%
6	Produktgeometrie/ Produktgestalt	28	26%	15	14%	52	49%	11	10%	106	100%
6	äußere/ innere Abmessungen	32	30%	18	17%	39	37%	17	16%	106	100%
6	Materialtyp	30	28%	14	13%	46	43%	16	15%	106	100%
6	Toleranzen	47	44%	24	23%	19	18%	16	15%	106	100%
6	Oberflächengüte	48	45%	15	14%	23	22%	20	19%	106	100%
6	Durchmesser	45	42%	18	17%	26	25%	17	16%	106	100%
6	Gewicht	45	42%	21	20%	19	18%	21	20%	106	100%
6	Losgröße	30	28%	20	19%	44	42%	12	11%	106	100%
6	Jahresproduktion	42	40%	21	20%	27	25%	16	15%	106	100%

1=Arbeitsvorgangsfolge

2= Personal und Betriebsmittelkapazitäten

3= Gleichteile / Stücklistenähnlichkeit

4= Rüstzeit

5= Arbeitsinhalt

6= Andere

9 Anhang B – Kennzahlenkatalog

Gruppierungskriterien

(basierend auf Choobineh, Nare 1999; Heinz, Hebbeler 1990; Lee, Chen 1997; Lee, Fischer 1999; Lee-Post 2000; Tönshoff, Rotzoll, Verweij 1997)

Kennzahl	Definition
Produktgestalt	äußere und innere End- bzw. Ausgangsform sowie ggf. Abmessungen eines Erzeugnisses
Materialtyp	Gruppiert ein Material anhand seiner Eigenschaften in unterschiedliche Materialtypen
Toleranzen	Zulässige Abweichung eines Bauteilmaß von einem gegebenen Sollwert
Oberflächengüte	Rauhtiefe einer Erzeugnisoberfläche
Größe und Gewicht	Größe und Gewicht eines Erzeugnisses
Bearbeitungszeit	Notwendige Zeit zur Bearbeitung eines Erzeugnisses
Rüstaufwand	Rüstzeit, Rüstkosten
Erforderliches Personal	Für die Bearbeitung notwendiges Personal
Erforderliche Betriebsmittel	Für die Bearbeitung notwendiger Betriebsmittel
Arbeitsinhalt / erforderliche Arbeitsvorgänge (inkl. Reihenfolge)	Definierter Arbeitsinhalt einer Arbeitsstation zur Fertigung von Erzeugnissen
Produkt- bzw. Baugruppen-zugehörigkeit, Gleichteile	Zugehörigkeit eines Produktes zu einer Baugruppe auf Basis von Gleichteilen

Kennzahlen zur Erfolgsmessung

(basierend auf Lödding 2008; Wuthnow 2010)

Kennzahl	Definition
Reihenfolgedisziplin	Quotient aus der Anzahl Aufträge mit eingehaltener Auftragspriorisierung und Gesamtanzahl an Aufträgen
Nivellierungsgüte	Produkt vom sog. Erfüllungsgrad Gesamtmenge (EG) und dem Erfüllungsgrad geplante Reihenfolge und Menge (EGRM)
Planvolumen (PM_i)	geplantes Produktionsvolumen
Mengenerfüllungsgrad (EGM_i)	Relativer Anteil zwischen der geplanten und der produzierten Menge
Reihenfolgekontrollfakor (RF_i)	Kontrollfaktor, der den Wert 0 bei Nichteinhaltung der geplanten Reihenfolge und den Wert 1 bei Einhaltung der geplanten Reihenfolge einnimmt.
Abgangsterminabweichung (TAA)	Abweichung von Plan- zu Ist-Fertigstellungstermin
Zugangsterminabweichung TAZ	Abweichung von Plan- zu Ist-Starttermin
Relative Terminabweichung TAR	Verzögerung gegenüber der Plandurchlaufzeit

Einflussgrößenbildung auf die Nivellierungsmustererstellung

(basierend auf Erlach 2007; Rother, Shook 2000)

Kennzahl	Definition
Zykluszeit	Zeitintervall (üblicherweise gemessen in Sekunden) zwischen der Fertigstellung eines Teils und der Fertigstellung des nächsten Teils am betrachteten Prozess
Rüstzeit	Zeitintervall, in dem ein Betriebsmittel auf Grund eines Wechsels von Vorrichtungen, Werkzeugen oder Materialien für eine neue Teilevariante nicht für die Bearbeitung zur Verfügung steht (gemessen vom letzten Gutteil der vorhergehenden bis zum ersten Gutteil der folgenden Variante)
Wertschöpfungszeit	Zeitanteil für wertschöpfende Tätigkeiten
Durchlaufzeit	Zeit, die ein Produkt benötigt, um einen Prozess oder einen Wertstrom vollständig zu durchlaufen
EPEI-Wert (Every Part Every Interval)	Zeitraum der benötigt wird, um alle Varianten einmal zu fertigen (unter Berücksichtigung der Bearbeitungszeiten, der Losgrößen, der Rüstzeiten sowie der zur Verfügung stehende Arbeitszeit)
EFEI-Wert (Every Family Every Interval)	Zeitraum der benötigt wird, um alle Produktfamilien einmal zu fertigen (unter Berücksichtigung der Bearbeitungszeiten, der Losgrößen, der Rüstzeiten sowie der zur Verfügung stehende Arbeitszeit)
Rüstlücke	Die für das Umrüsten zwischen Erzeugnisvarianten bzw. Produktfamilien zur Verfügung stehende Kapazität
Kapazitätsbedarf für Exotenfamilien	Notwendiger Kapazitätsbedarf zur Fertigung von Exoten innerhalb eines Fertigungsintervalls
Bestandsmenge	Im Lager und innerhalb der Produktion befindlicher Materialbestand
Bestandsreichweiten	Zeitraum, in dem ausschließlich mit den vorhandenen Beständen produziert werden kann
Liefermenge	Bestandsmenge, die in einer Lieferung dem bereits bestehenden Bestand hinzugefügt wird
Wiederbeschaffungszeiten	Zeit, die notwendig ist, um einen definierten Bestand an Material wiederzubeschaffen
Losgröße	Menge an (Teil-)Erzeugnissen, die als geschlossener Posten die Fertigung durchläuft
Behältergröße	Größe der zum Transport vorgesehenen Behälter
Anzahl der Mitarbeiter je Prozessschritt	Anzahl an Mitarbeitern, die einem Prozessschritt (Wertstromelement) zur Verfügung stehen
Zur Verfügung stehende Arbeitszeit	Zeit vom Beginn bis zum Ende der Arbeit ohne Ruhepausen
Ausschussrate	Anzahl an Teilen, die aus der Produktion aufgrund von Qualitätsdefiziten ausgeschleußt werden; gemessen in Anzahl an fehlerhafter Teile pro Millionen gefertigter Einheiten (ppm – parts per million)
Nacharbeitsrate	Anzahl an Teilen, die während oder am Ende der Produktion aufgrund von Qualitätsdefiziten nachgearbeitet werden; gemessen in Anzahl an nachgearbeiteter Teile pro Millionen gefertigter Einheiten (ppm)
Maschinenverfügbarkeit	Prozentwert, der die zur Produktion verfügbare Zeit gegen die gesamte, zur Verfügung stehenden Zeit entgegensetzt.

10 Anhang D – Anleitung zur Verwendung des Softwaredemonstrators

Einleitung

Von der im Rahmen des IGF-Forschungsvorhabens entwickelten systematischen Vorgehensweise zur Produktionsnivellierung in der variantenreichen Kleinserienfertigung wurden die Schritte der Produktfamilienbildung und der Nivellierungsmustererstellung programmiertechnisch in Form eines Softwaredemonstrators umgesetzt. Die nachfolgenden Ausführungen dienen als Anleitung zur Verwendung dieses Demonstrators. Beschrieben wird der Umgang mit dem Softwaredemonstrator anhand eines fiktiven Beispiels.

Für die programmiertechnische Umsetzung wurden zwei unterschiedliche Softwareumgebungen verwendet. Während die Produktfamilienbildung in der Open Source Softwareumgebung RapidMiner (Version 4.6) umgesetzt ist, erfolgt die Nivellierungsmustererstellung in MS-Excel (Version 2010). Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf Verwendung des Softwaredemonstrators. Auf die Installation der Softwareumgebungen und deren grundlegende Funktionalität wird an dieser Stelle nicht eingegangen. Diesbezüglich wird auf die entsprechenden Programmdokumentationen verwiesen:

RapidMiner: www.rapid-i.com

MS Excel: www.microsoft.com

Produktfamilienbildung

Entpacken Sie das Archiv „Prod.fam.bildung“ in einen beliebigen Ordner. Nach dem Entpacken enthält dieser Ordner die Datei „clustering-0.0.1-SNAPSHOT.jar“ und die Unterordner „data“, „processes“ und „results“ (Abbildung 10.1).

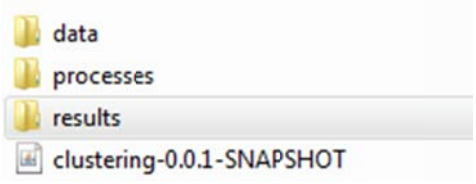


Abbildung 10.1: Inhalt Ordners „Prod.fam.bildung“

Kopieren Sie die Datei „clustering-0.0.1-SNAPSHOT.jar“ in dem Programmverzeichnis von RapidMiner (d. h. in das Verzeichnis, in dem RapidMiner installiert wurde - gemäß Standardeinstellungen C:\Programme\Rapid-I\RapidMiner) in den folgenden Unterordner:

C:\Programme\Rapid-I\RapidMiner\lib\plugins\

Für die Produktfamilienbildung stehen drei Clusteranalysealgorithmen zur Verfügung, deren Ergebnisse bewertet und miteinander verglichen werden können: K-Means, Complete-Linkage und Average-Linkage. Für jeden der drei Algorithmen wurden zwei Teilprozesse erstellt, nämlich:

- jeweils ein Prozess zum Erzeugen und Bewerten von Gruppierungsalternativen, mit dem Ziel für ein definiertes Partitonsgrößenintervall eine Optimierung der Variablengewichtung mit Hilfe evolutionärer Strategien zu realisieren sowie

- jeweils ein Prozess zur Anwendung der als am besten bewerteten Variablengewichtung und der entsprechenden Gruppierung der Objekte.

Die verfügbaren Prozesse sind in Tabelle 10.1 zusammengefasst. Die Prozesse sind für alle drei Clusteranalyseverfahren gleich aufgebaut und unterscheiden sich lediglich in dem zur Gruppierung verwendeten Operator. Nachfolgend wird exemplarisch die Verwendung des Complete-Linkage-Algortihmus dargestellt. Die beschriebene Vorgehensweise ist übertragbar auf die anderen Prozesse.

Tabelle 10.1: Prozesse zur Produktfamilienbildung

Bezeichnung	**Kurzbeschreibung**
10_kmeans_evo	Erzeugung und Bewertung von Gruppierungsalternativen mit K-Means
15_keans_apply	Anwendung der besten Variablengewichtung und Gruppierung mit K-Means
20_complete_evo	Erzeugung und Bewertung von Gruppierungsalternativen mit Complete-Linkage
25_complete_apply	Anwendung der besten Variablengewichtung und Gruppierung mit Complete-Linkage
30_average_evo	Erzeugung und Bewertung von Gruppierungsalternativen mit Average-Linkage
35_average_apply	Anwendung der besten Variablengewichtung und Gruppierung mit Average-Linkage

Erzeugung und Bewertung von Gruppierungsalsternativen

Starten Sie RapidMiner und öffnen Sie den Prozess „20_complete_evo“. Nutzen Sie für den Import der Rohdaten den Datenimportassistenten, der über den Operator „ExampleSource“ verfügar ist (Abbildung 10.2). Folgen Sie den Anweisungen des Assistenten, um die Rohdatenmatrix in RapidMiner zu laden. Nach dem Datenimport können die Rohdaten über die Funktion „Edit“ des Operators „ExampleSource“ bearbeitet werden (Abbildung 10.2).

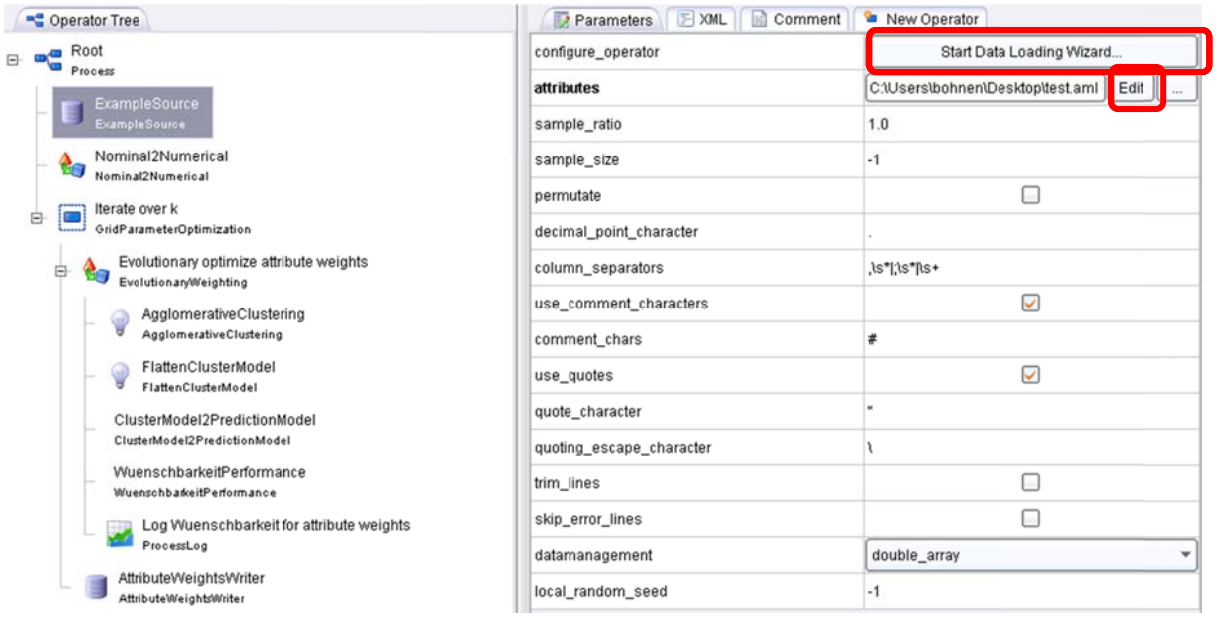


Abbildung 10.2: Starten des Datenimportassistenten

Die Bearbeitungsansicht der Rohdaten ist in Abbildung 10.3 exemplarisch dargestellt und dient der Veranschaulichung des erforderlichen Aufbaus der Rohdatenmatrix. Die erste Spalte der Rohdatenmatrix dient der Identifizierung der Objekte (d. h. der Erzeugnisvarianten), die erste Zeile enthält die Variablenbezeichnungen. Es ist für den weiteren Programmablauf zwingend erforderlich, dass die Variablenausprägungen in binär skalierter Form vorliegen.

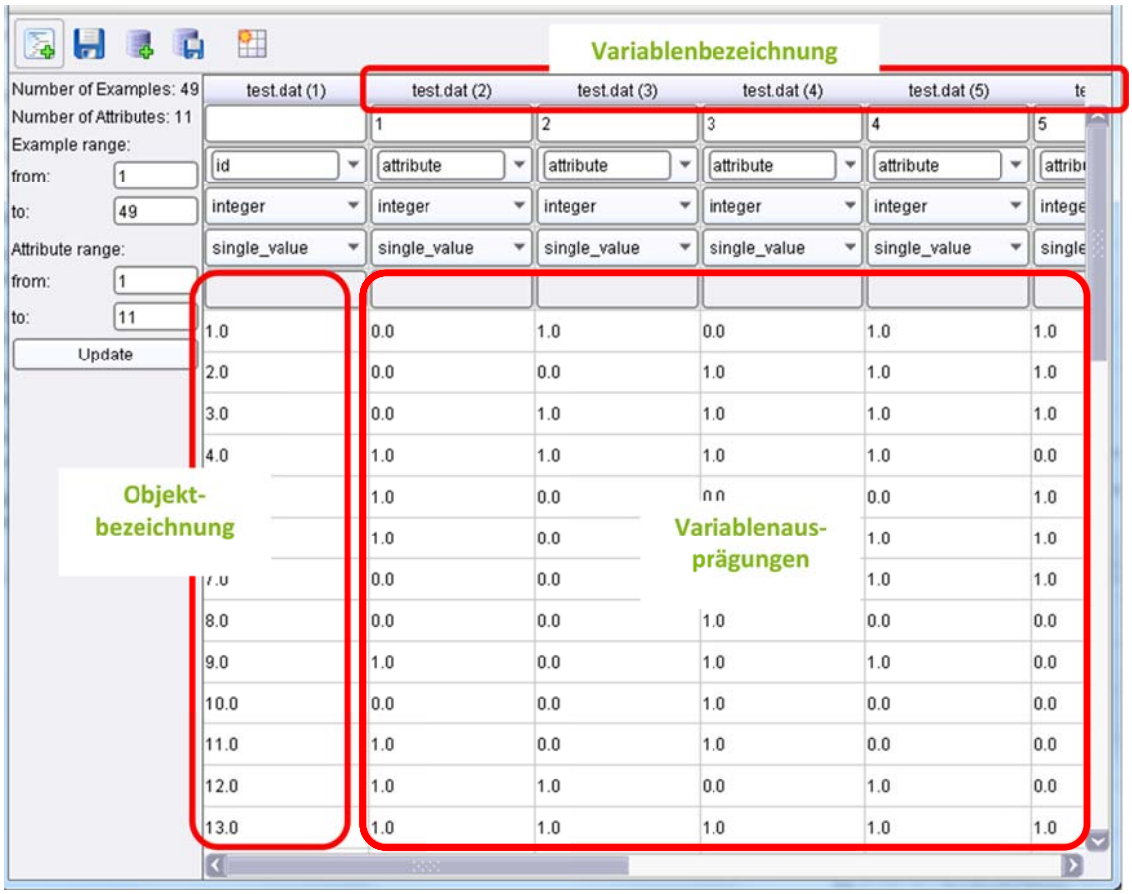


Abbildung 10.3: Eingelesene Rohdatenmatrix (Bearbeitungsansicht)

Spezifizieren Sie anschließend über den Operator „Iterate over k“ das Partitionsgrößenintervall, über das iterativ für jede Partitionsgröße *k* mit Hilfe evolutionärer Strategien eine optimale Variablengewichtung bestimmt wird (Abbildung 10.4). Hierbei kann die untere (*Min*) und die obere Intervallgrenze (*Max*) sowie die Aufteilung der Iterationsschritte im Intervall (*Steps*) festgelegt werden. Im dargestellten Beispiel wird das Intervall [2, 20] festgelegt. Die Iteration erfolgt in 19 Schritten, d. h. es gilt k = 2, 3, 4, …, 20.

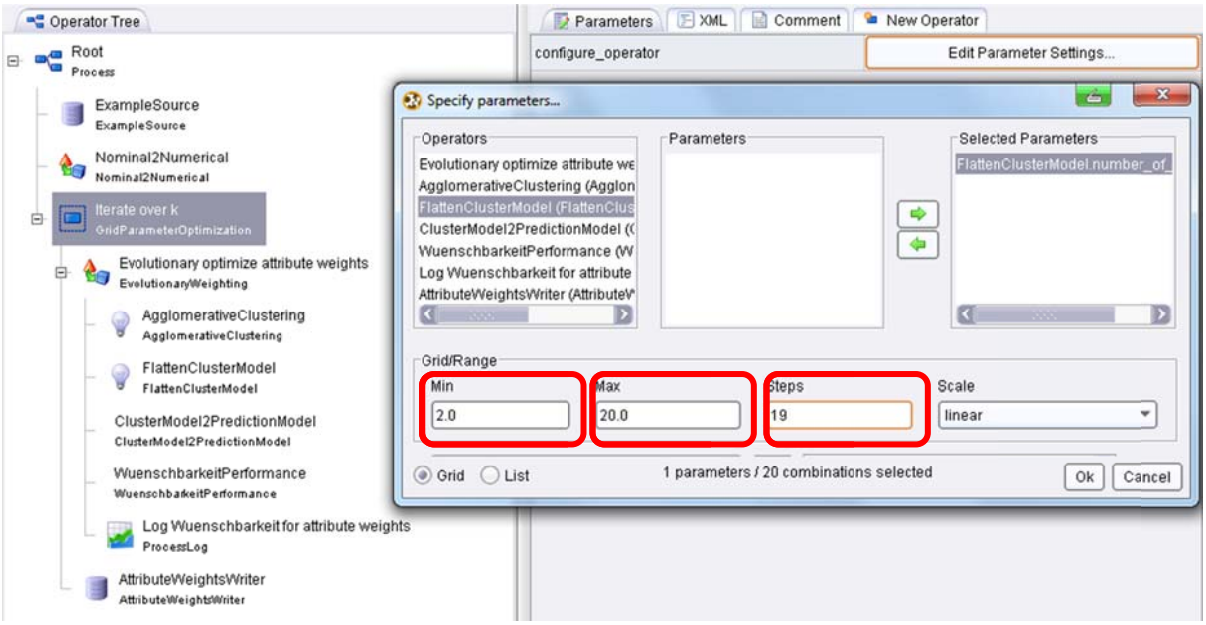


Abbildung 10.4: Konfiguration des Operators „Iterate over k“

Die Parameter der für die Optimierung der Variablengewichtung verwendeten evolutionären Strategien können über den Operator „Evolutionary optimize attribute weights“ festgelegt werden (Abbildung 10.5). Diesbezüglich anzuführen sind u. a. die Populationsgröße, die maximale Generationenanzahl und das Selektionsschema.

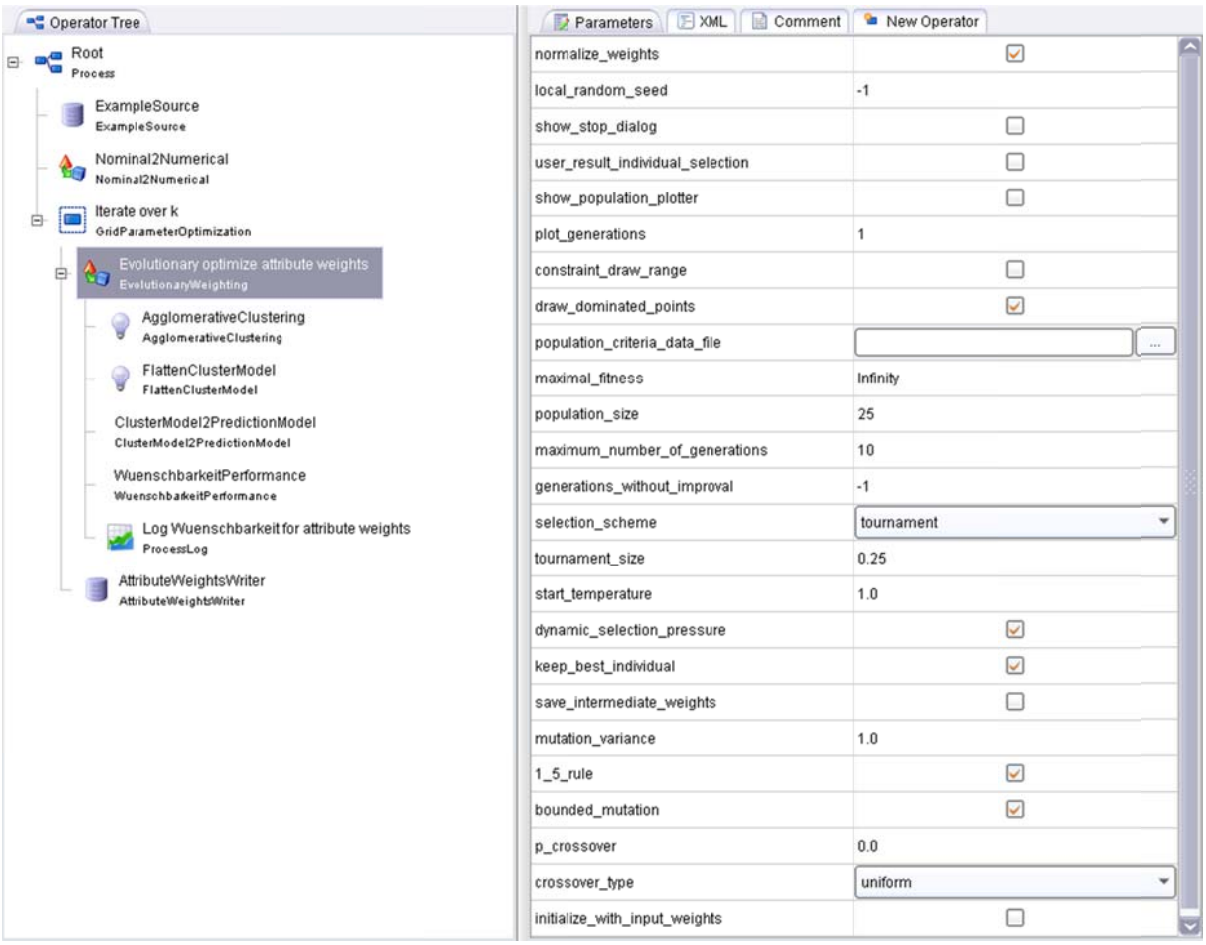


Abbildung 10.5: Konfiguration des Operators „Evolutionary optimize attribute weights“

Der Wünschbarkeitsindex wird über den Operator „WuenschbarkeitPerformance“ konfiguriert (Abbildung 10.6). Hierbei können die gewünschte minimale (*min_partition_size*) und maximale Partitionsgröße (*max_partition_size*) eingestellt werden. Außerdem kann die obere Spezifikationsgrenze für die Partitionsgröße angegeben werden (*max_possible_size*).

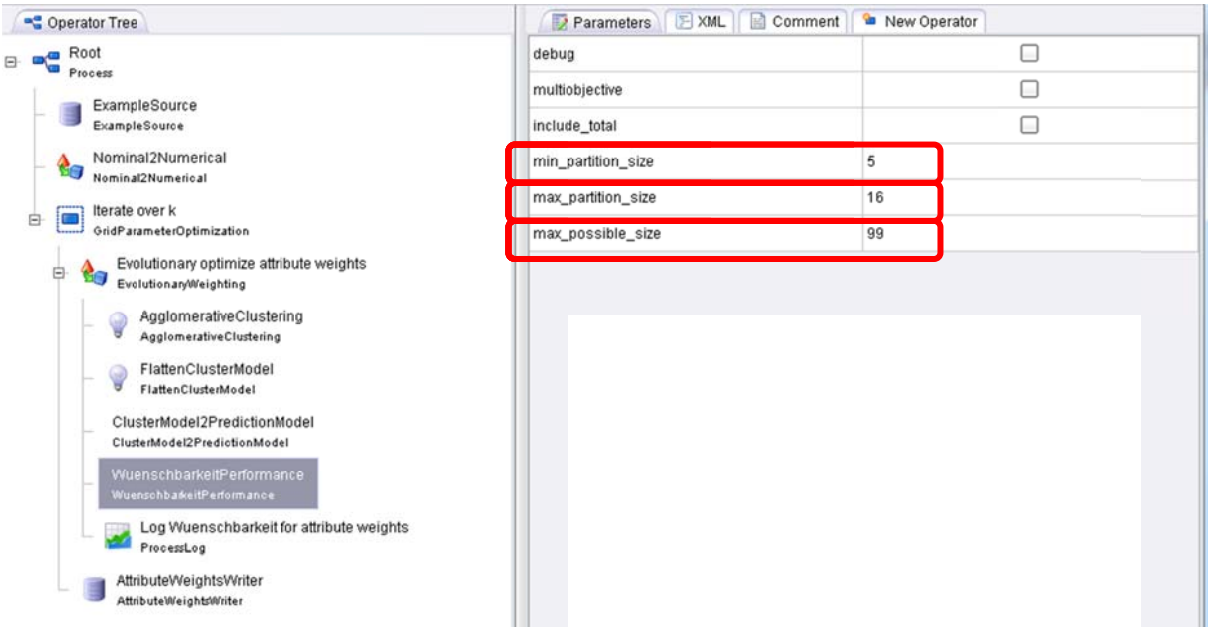


Abbildung 10.6: Konfiguration des Operators „WuenschbarkeitPerformance“

Über die Operator „Log Wuenschbarkeit for attribute weights“ können Speicherort und Bezeichnung der Protokolldatei festgelegt werden (Abbildung 10.7). In dieser Datei wird das Ergebnis der Bewertung für alle erzeugten Gruppierungsalternativen gespeichert.

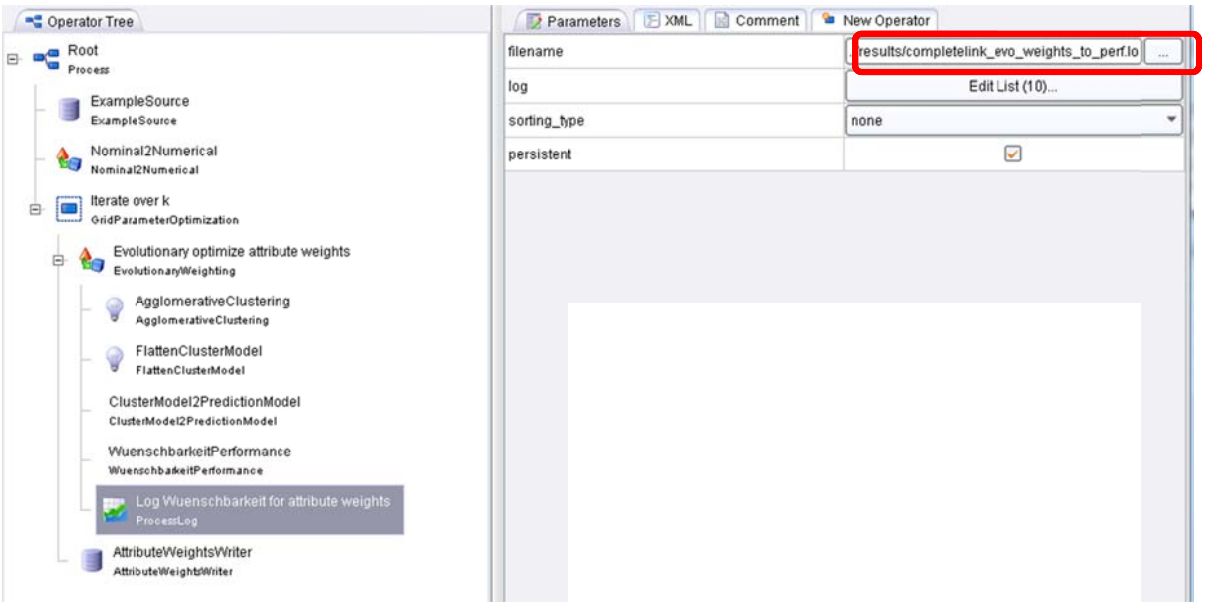


Abbildung 10.7: Konfiguration des Operators „Log Wuenschbarkeit for attribute weights“

Analog können über den Operator „AttributeWeigthsWriter“ Speicherort und Bezeichnung der Datei gewählt werden, in der für jedes *k*, d. h. für jede Partitionsgröße, die als am besten bewertete Variablengewichtung gespeichert wird (Abbildung 10.8). Einzelheiten zur voreingestellten Dateibezeichnung werden im weiteren Verlauf erläutert.

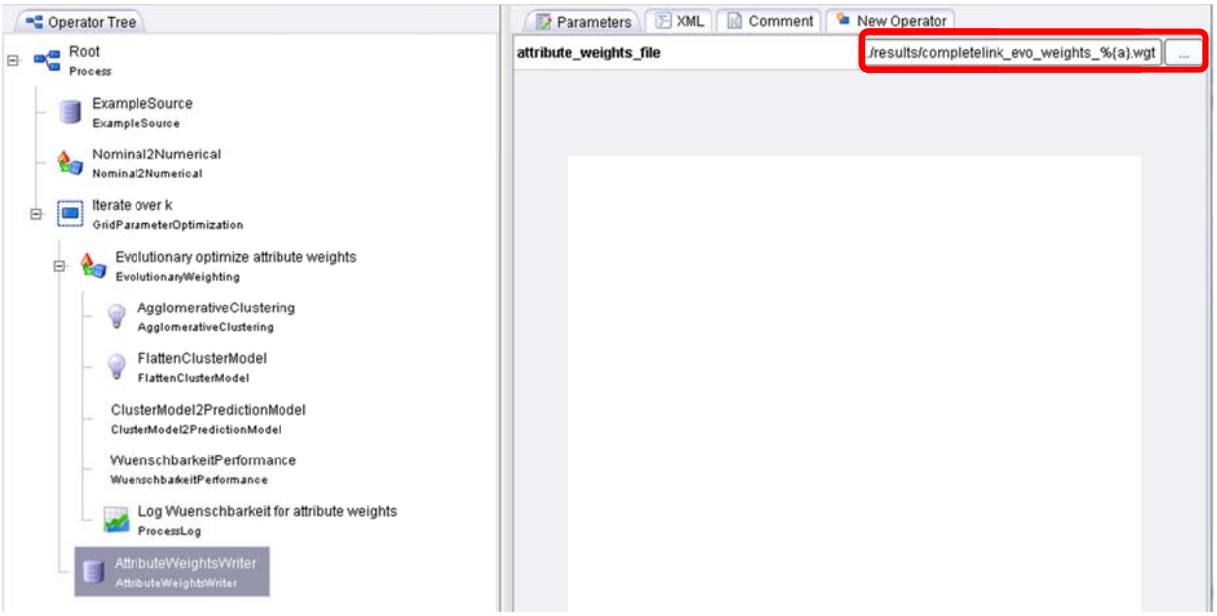
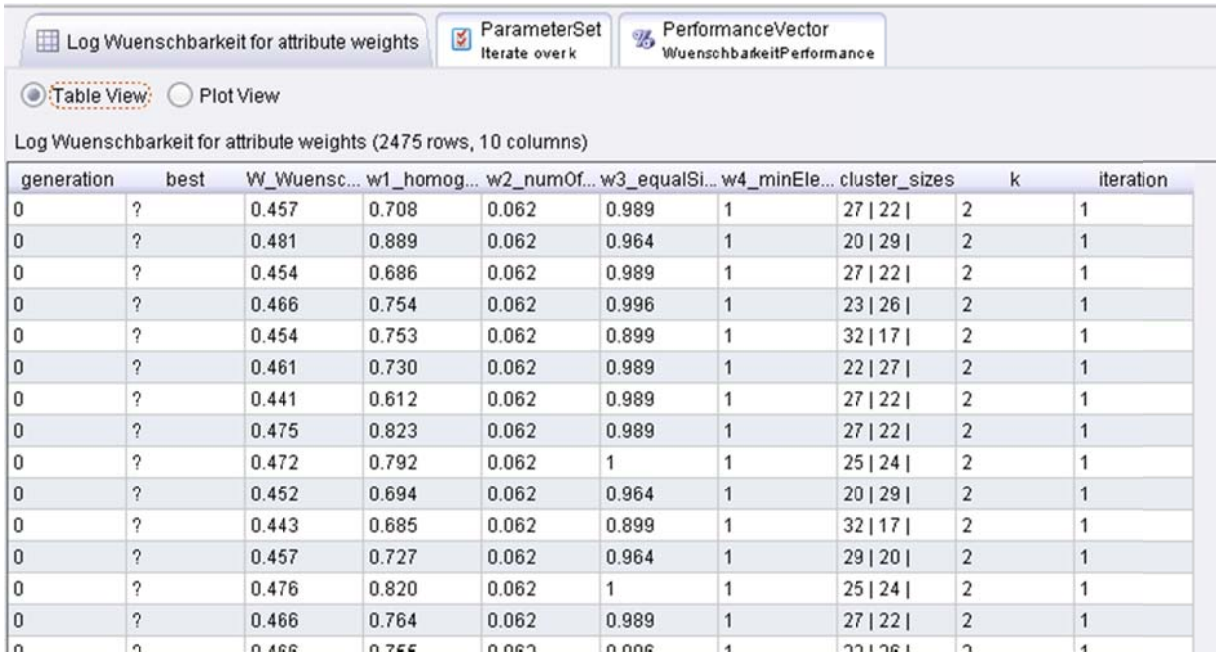


Abbildung 10.8: Konfiguration des Operators „Attribute WeightsWriter“

Starten Sie den Prozess. Nach dem der Prozess erfolgreich abgeschlossen ist, werden die Ergebnisse angezeigt. Dabei kann die komplette Protokolldatei ausgegeben werden (Abbildung 10.9). Diese enthält je Gruppierungsvariante u. a. den Wert des Wünschbarkeitsindex („*W_Wuenschbarkeitsindex*“), die Werte der einzelnen Wünschbarkeitsfunktionen (*w1 bis w4*), die Gruppengrößen (*cluster_sizes*) sowie die Partitionsgröße (*k*).



generation	best	W_Wuensc...	w1_homog...	w2_numOf...	w3_equalSi...	w4_minEle...	cluster_sizes	k	iteration
0	?	0.457	0.708	0.062	0.989	1	27 | 22 |	2	1
0	?	0.481	0.889	0.062	0.964	1	20 | 29 |	2	1
0	?	0.454	0.686	0.062	0.989	1	27 | 22 |	2	1
0	?	0.466	0.754	0.062	0.996	1	23 | 26 |	2	1
0	?	0.454	0.753	0.062	0.899	1	32 | 17 |	2	1
0	?	0.461	0.730	0.062	0.989	1	22 | 27 |	2	1
0	?	0.441	0.612	0.062	0.989	1	27 | 22 |	2	1
0	?	0.475	0.823	0.062	0.989	1	27 | 22 |	2	1
0	?	0.472	0.792	0.062	1	1	25 | 24 |	2	1
0	?	0.452	0.694	0.062	0.964	1	20 | 29 |	2	1
0	?	0.443	0.685	0.062	0.899	1	32 | 17 |	2	1
0	?	0.457	0.727	0.062	0.964	1	29 | 20 |	2	1
0	?	0.476	0.820	0.062	1	1	25 | 24 |	2	1
0	?	0.466	0.764	0.062	0.989	1	27 | 22 |	2	1

Abbildung 10.9: Ergebnisausgabe (komplette Protokolldatei)

Alternativ ist es möglich, nur die beste Lösung anzuzeigen (Abbildung 10.10). Dabei werden der beste Wert des Wünschbarkeitsindex und die dazugehörige Partitionsgröße ausgegeben.

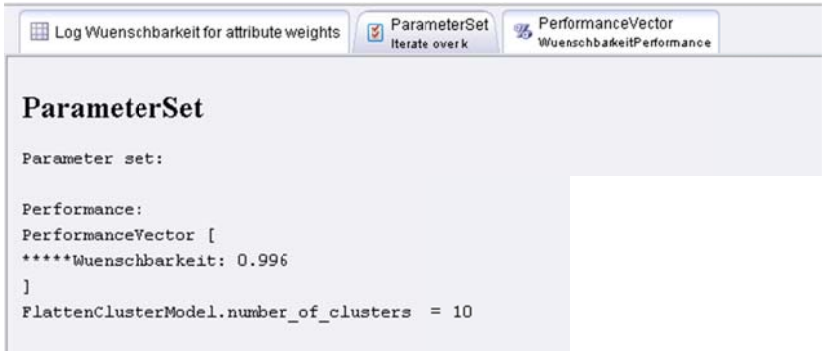


Abbildung 10.10: Ergebnisausgabe (nur bestes Ergebnis)

Basierend auf der Ergebnisdarstellung ist es möglich, die Ergebnisse aller drei Clusteranalysealgorithmen zu vergleichen. Somit kann einerseits die optimale Partitionsgröße und darüber hinaus der Algorithmus ausgewählt werden, der das beste Ergebnis liefert. Ein derartiger Ergebnisvergleich ist für das an dieser Stelle betrachtete fiktive Anwendungsbeispiel in Tabelle 10.2 zusammengefasst. Angegeben ist dabei die beste Lösung je Clusteralgorithmus.

Tabelle 10.2: Ergebnisvergleich (ausgewählte Ergebnisse)

Clusteralgortihmus	**Wünschbarkeitsindex *W***	**Partitionsgröße *k***
K-Means	0,9958	9
Complete-Linkage	**0,9965**	10
Average-Linkage	0,9959	8

Das beste Ergebnis liefert in diesem Fall der Complete-Linkage-Algorithmus für eine Partitionsgröße von $k = 10$. Diese Angaben werden benötigt, um im nächsten Schritt, die entsprechende Zuordnung der Objekte zu Gruppen durchzuführen.

Anwendung der Variablengewichtung zur Produktfamilienbildung

Öffnen Sie entsprechend der Ergebnisse des zuvor beschriebenen Vergleichs der verschiedenen Algorithmen den Prozess zur Anwendung der Variablengewichtung, d. h. in diesem Fall den Prozess „25_complete_apply“.

Nutzen Sie wiederum den über den Operator „ExampleSource“ verfügbaren Datenimportassistenten, um die Rohdaten zu laden (Abbildung 10.11).

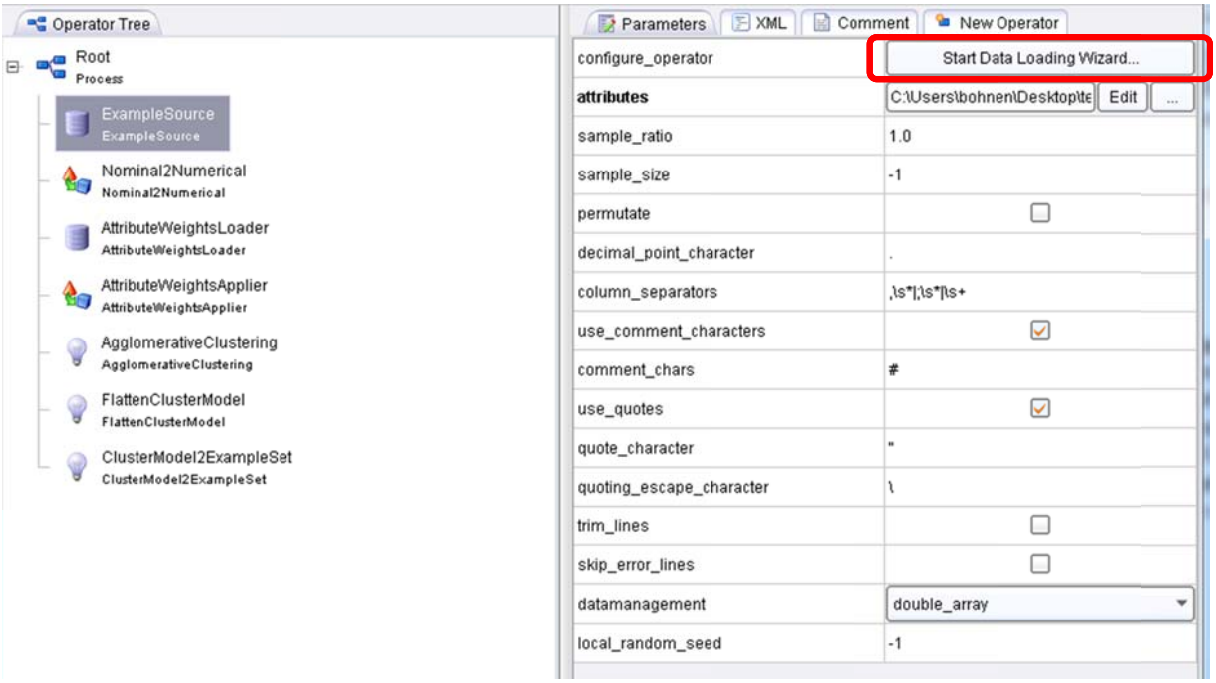


Abbildung 10.11: Starten des Datenimportassistenten

Importieren Sie über den Operator „AttributeWeightsLoader“ die zuvor als am besten bewertete Variablengewichtung (Abbildung 10.12). Die voreingestellte Bezeichnungssystematik für die Speicherung der Variablengewichtung ist wie in Abbildung 10.12 dargestellt aufgebaut und enthält Informationen bezüglich des eingesetzten Clusteralgorithmus und der Partitionsgröße (d. h. der jeweiligen Iteration). In diesem Fall wird die Datei mit der Bezeichnung „completelink_evo_9“ geöffnet, da das beste Ergebnis mit dem Complete-Linkage-Algorithmus bei einer Partitionsgröße von $k = 10$, d. h. im neunten Iterationsschritt ($k = 2, 3, \ldots, 10$) erzielt wurde.

Abbildung 10.12: Importieren der Variablengewichtung

Stellen Sie über den Operator „FlattenClusterModel“ die Partitionsgröße ein, in diesem Fall 10, und starten Sie den Gruppierungsprozess.

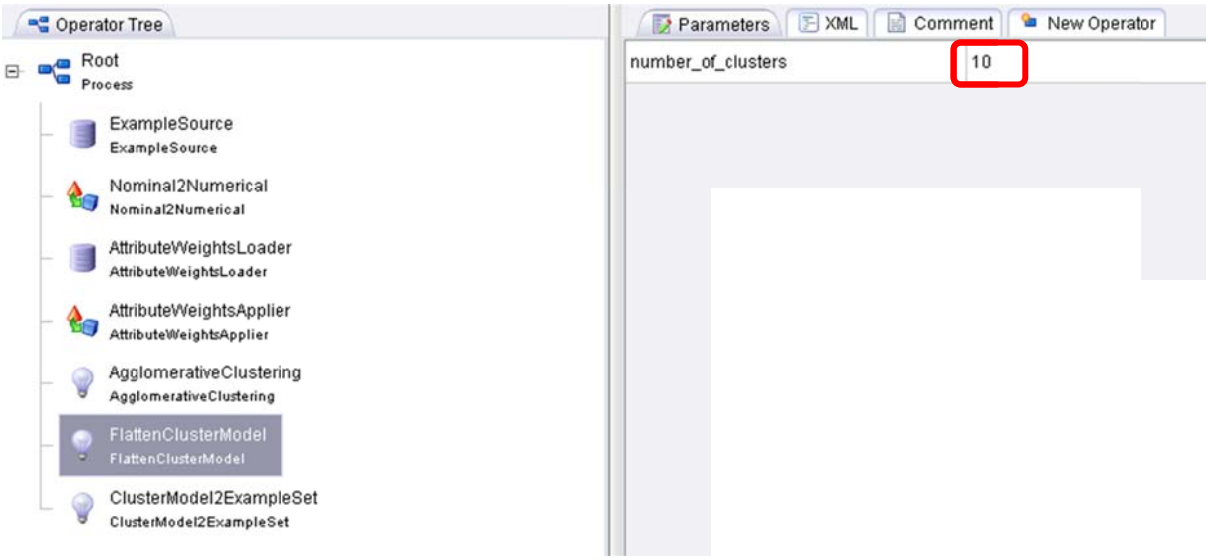


Abbildung 10.13: Festlegung der Partitionsgröße

Nachdem die Gruppierung unter Anwendung der importierten Variablengewichtung durchgeführt wurde, erhalten Sie das Gruppierungsergebnis in Form einer Rohdatenmatrix, der eine Spalte hinzugefügt wurde, die der Zuordnung der Objekte (d. h. der Erzeugnisse) zu Clustern (d. h. zu Produktfamilien) dient (Abbildung 10.14). Exportieren Sie diese Datenmatrix mit Hilfe der Option „Save“.

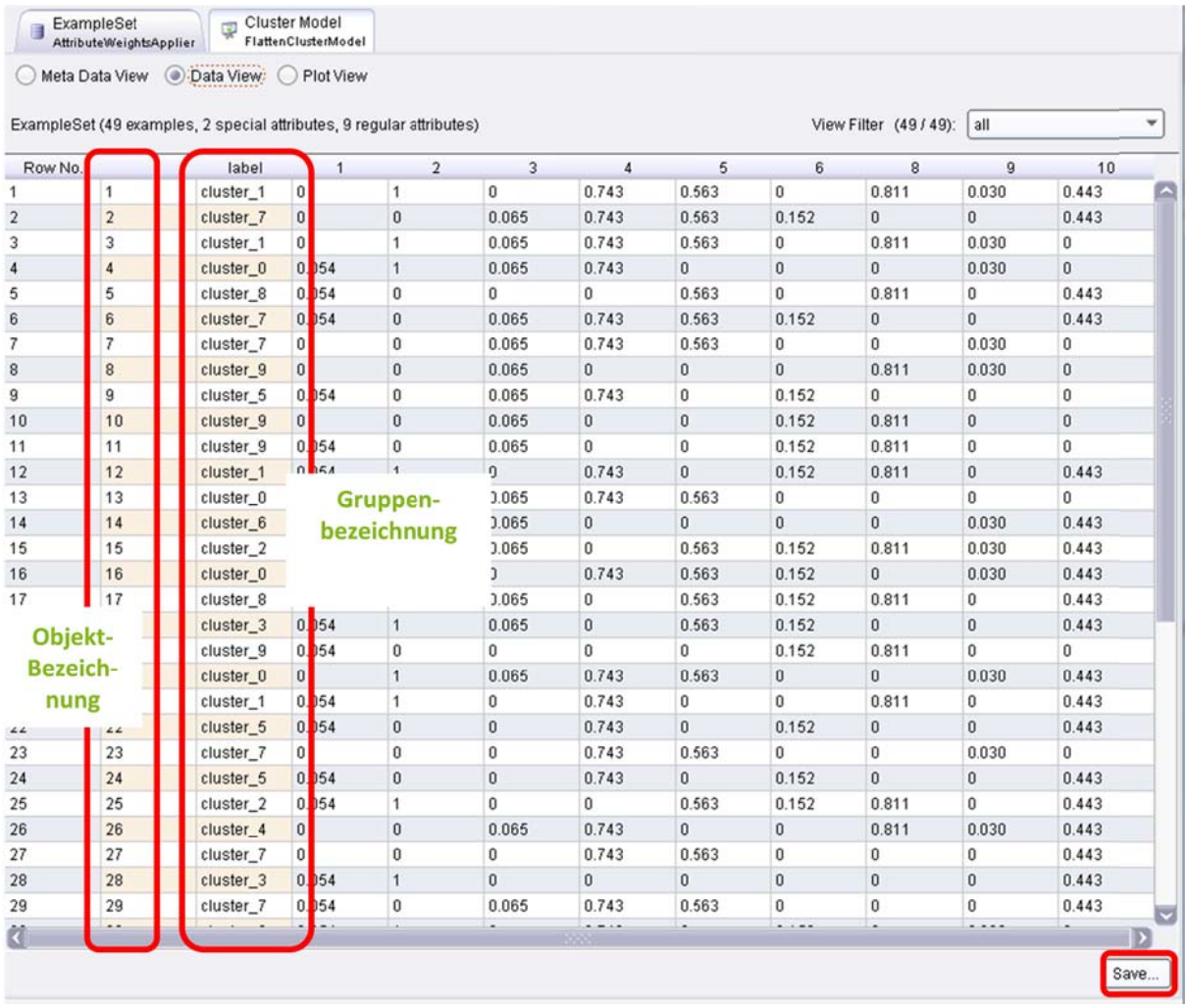


Abbildung 10.14: Ausgabe des Gruppierungsergebnisses

10.1 Nivellierungsmustererstellung

Importieren des Gruppierungsergebnisses

Öffnen Sie Datei, in der Sie das Gruppierungsergebnis gespeichert haben mit MS-Excel. Die Datei enthält in der vorletzten Spalte die Objekt-Bezeichnung (d. h. die Bezeichnung der Erzeugnisvarianten) und in der letzten Spalte die Cluster-Bezeichnung (d. h. die Zuordnung zu Produktfamilien) (Abbildung 10.15). Kopieren Sie diese beiden Spalten in die Zwischenablage.

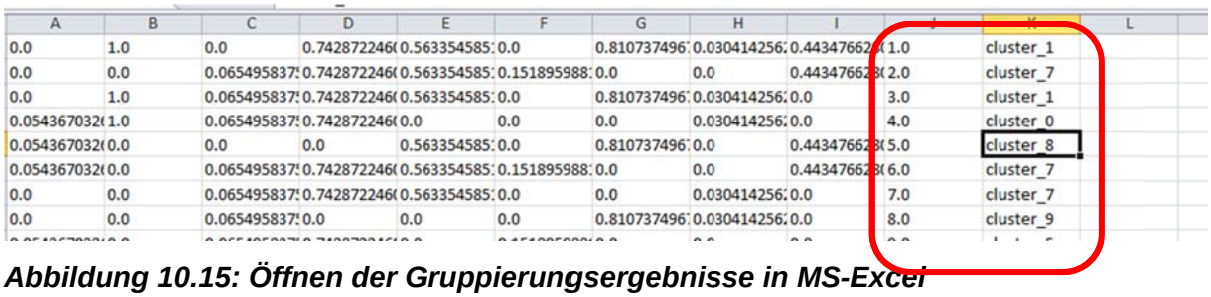
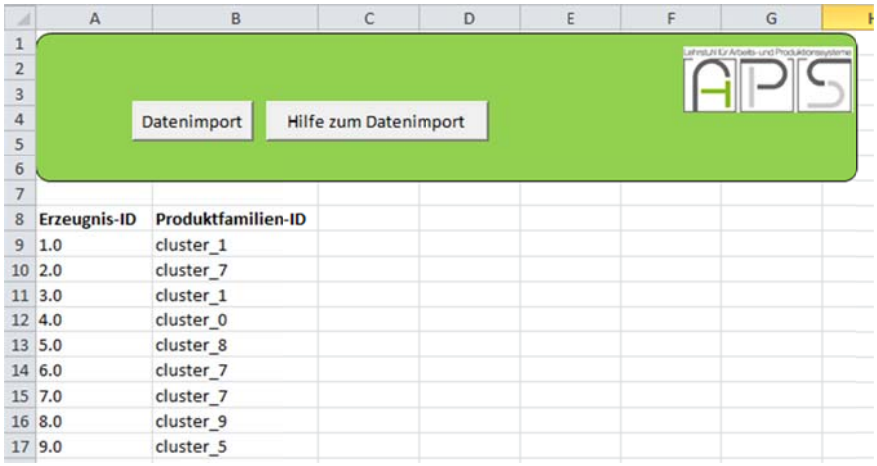


Abbildung 10.15: Öffnen der Gruppierungsergebnisse in MS-Excel

Öffnen Sie die MS-Exceldatei „Nivellierungsmustererstellung“ und fügen Sie den Inhalt der Zwischenablage in das Tabellenblatt „DATENIMPORT“ in den Spalten A und B ab Zeile 9 ein

(Abbildung 10.16). Klicken Sie auf die Schaltfläche „Datenimport“ um die Daten in den Demonstrator zu laden.



	A	B	C	D	E	F	G
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8	Erzeugnis-ID	Produktfamilien-ID					
9	1.0	cluster_1					
10	2.0	cluster_7					
11	3.0	cluster_1					
12	4.0	cluster_0					
13	5.0	cluster_8					
14	6.0	cluster_7					
15	7.0	cluster_7					
16	8.0	cluster_9					
17	9.0	cluster_5					

Abbildung 10.16: Datenimport

Definition der Familienanzahl und Eingabe der Kapazitätsbedarfe

Wechseln Sie in das Tabellenblatt „EINGABE“. Im ersten Schritt muss die Gesamtanzahl der Produktfamilien überprüft werden (Abbildung 10.17). Zusammen mit dem zuvor beschriebenen Datenimport wird im Tabellenblatt „EINGABE“ die Anzahl der gebildeten Produktfamilien eingetragen. Sollte die dort angegebene Produktfamilienanzahl nicht korrekt sein, wiederholen Sie den Datenimport.

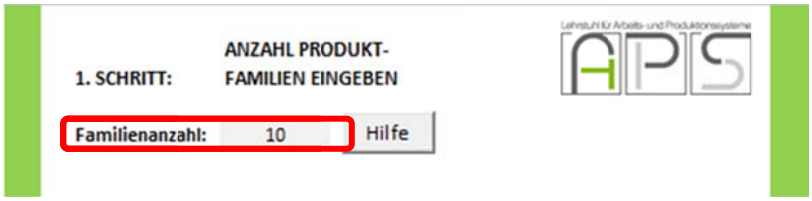


Abbildung 10.17 Eingabe der Gesamtanzahl der Familien

Ausgangsdatenbasis für die Nivellierungsmustererstellung ist die Berechnung von produktfamilienbezogenen Kapazitätsbedarfen. Um die Daten für die Berechnung dieser Bedarfe einzugeben, klicken Sie auf die Schaltfläche „DATENEINGABE“, so dass sich das Tabellenblatt zur Dateneingabe automatisch öffnet (Abbildung 10.18, Abbildung 10.19).

Abbildung 10.18 Button zur Rohdateneingabe

Basierend auf dem Datenimport aus RapidMiner ist in diesem Tabellenblatt für jede Erzeugnisvariante (d. h. für jede Produkt-ID; Spalte A) die Zugehörigkeit zu einer Produktfamilie festgelegt. Hierbei ist anzumerken, dass beim Datenimport eine Transformation der Produktfamilienbezeichnung durchgeführt wird. In RapidMiner beginnt die Familienbezeichnung mit 0.

Für die weiteren Berechnungen in MS-Excel wird die Bezeichnung um den Wert 1 verschoben, d. h. Produktfamilie 0 in RapidMiner entspricht Produktfamilie 1 in MS-Excel.

Tragen Sie in diesem Tabellenblatt für jede Erzeugnisvariante monatliche Kapazitätsbedarfe [gemessen in Stunden] ein. Dabei können bis zu 24 Monatswerte berücksichtigt werden, bspw. die jeweils vergangenen 12 Monate (Spalten t_{-12} bis t_{-1}) und die folgenden 12 Monate als Prognosewerte (Spalten t_0 bis t_{11}) (Abbildung 10.19).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	DATENEINGABE			ZUR BERECHNUNG ZURÜCK								
2												
3												
4	Produkt-ID	Produktfami	t-12 [Mon.]	t-11 [Mon.]	t-10 [Mon.]	t-9 [Mon.]	t-8 [Mon.]	t-7 [Mon.]	t-2[Mon.]6	t-5 [Mon.]	t-4 [Mon.]	t-3 [Mon.]
5	1	2	10,3	10,51	11,10	11,87	12,52	13,14	13,78	14,47	14,88	15,48
6	2	8	4,6	5,53	6,44	7,20	7,25	7,64	4,6	5,38	5,76	6,64
7	3	2	2	2,72	3,03	3,46	4,33	4,36	5,21	5,76	5,86	6,15
8	4	1	45,2	45,23	45,60	45,20	45,70	45,60	45,10	45,59	45,80	45,70
9	5	9	7,5	7,56	8,30	8,69	8,96	9,57	9,79	10,51	11,17	12,13
10	6	8	4,6	4,76	5,06	5,22	5,37	4,6	4,83	5,76	5,87	4,6
11	7	8	5,3	5,62	5,75	5,3	5,36	6,11	6,65	7,22	5,3	5,64
12	8	10	8,02	8,16	9,07	8,02	9,01	9,21	10,13	8,02	8,23	8,90
13	9	6	9	9,47	10,40	10,89	11,32	11,71	12,38	12,78	13,21	13,43
14	10	10	5,3	5,96	6,54	6,61	5,3	6,07	6,91	5,3	5,54	6,46
15	11	10	63,3	64,01	64,46	64,59	63,3	63,71	63,77	63,3	64,30	64,51
16	12	2	5	5,62	6,02	6,22	7,18	8,04	8,60	9,00	9,44	10,03
17	13	1	85,3	85,90	85,70	85,60	85,70	85,72	86,01	85,79	85,01	85,02

Abbildung 10.19 Eingabe der Ausgangsdaten

Die Dateneingabe wird mit der Schaltfläche „ZUR BERECHNUNG ZURÜCK“ abgeschlossen. Sie gelangen so zur zurück zum Tabellenblatt „DATENEINGABE“.

ABC-/XYZ-Analyse

Kapazitätsbedarfe einzelner Monate können für die nachfolgenden Berechnungen ausgeschlossen werden, um extreme Abweichungen einzelner Monate vom Durchschnitt, beispielsweise bedingt durch Werksferien, zu berücksichtigen. Hierzu ist jedem Monat ein Kontrollkästchen-Steuerelement zugeordnet. Die Monatswerte werden bei der Berechnung nur berücksichtigt, wenn das jeweilige Kontrollkästchen aktiviert ist (Abbildung 10.20).

Abbildung 10.20 Auswahl des zu berücksichtigenden Zeitraums

Klicken Sie auf die Schaltfläche „BERECHNEN“, um die Aggregation der Kapazitätsbedarfe auf Produktfamilienebene durchzuführen (Abbildung 10.21).

Abbildung 10.21 Auswahl des betrachteten Zeitraums

Dabei werden die Kapazitätsbedarfe der einzelnen Erzeugnisvarianten entsprechend ihrer Familienzugehörigkeit aufsummiert und absteigend sortiert. Zusätzlich werden arithmetischer Mittelwert und Variationskoeffizient der Kapazitätsbedarfe auf Familienbasis berechnet.

Darauf aufbauend werden die Familien einer ABC-/XYZ-Segmentierung unterzogen. Die ABC-Analyse gruppiert die Familien auf Basis ihrer Kapazitätsbedarfe zueinander und gruppiert sie in die Klassen A, B und C. In der Klasse A werden dabei alle Familien zusammengefasst, die einen kumulierten Kapazitätsbedarfsanteil von bis zu 70% haben. Familien der Klasse B besitzen kumuliert einen Anteil zwischen 70% und 90% bzw. Familien der Klasse C zwischen 90% und 100%. Die hier vorgegebenen Parameter für die Klassengrenzen sind voreingestellt, lassen sich jedoch in der Eingabemaske anpassen (Abbildung 10.22).

Bei der XYZ-Analyse wird zu Beginn für jede Familie der Variationskoeffizient berechnet (als Quotient von Standardabweichung und Mittelwert). Hieraus ergibt sich ein Maß für die Schwankungen des Kapazitätsbedarfs über die berücksichtigten Monate. Die daraus gewonnenen Werte werden den Klassen X, Y, Z zugeordnet. Die voreingestellten Parameter für die Klassengrenzen sind wiederum über die Eingabemaske anpassbar (Abbildung 10.22).

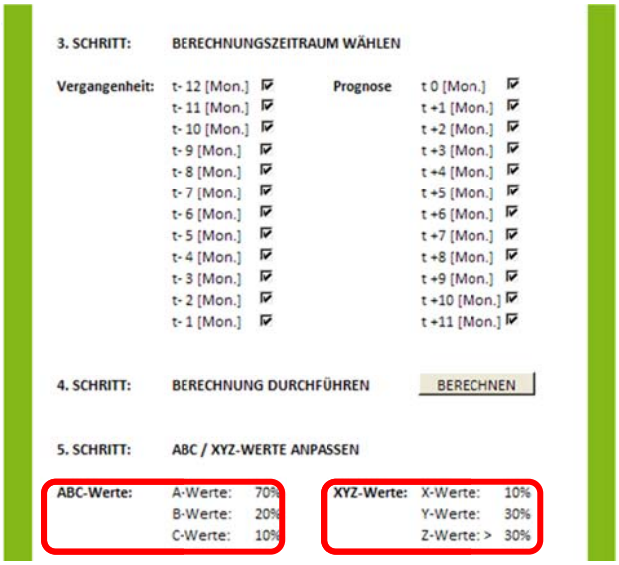


Abbildung 10.22 Parametereingabe für ABC- und XYZ Analyse

Die Summe der Klassengrenzen der ABC-Analyse muss dabei immer 100% ergeben. Die Parameter der XYZ-Analyse besitzen diesbezüglich keine Restriktionen. Ebenfalls können dort auch Parameter größer als 100% vorgegeben werden.

Für jede Familie wird im Folgenden die ABC- und XYZ-Analyse zusammengefasst und automatisch in eine Neun-Felder-Matrix überführt (Abbildung 10.23). Grüne Felder repräsentieren dabei sog. Renner-Familien mit einem hohen Kapazitätsbedarfsanteil mit einer geringen Streuung des Bedarfs über die betrachteten Monate. Familien, die in rote Felder gruppiert wurden, sog. Exoten-Familien, besitzen einen geringen Kapazitätsbedarfsanteil und weisen eine hohe Bedarfsstreuung auf. Familien in gelben Feldern können weder eindeutig als Renner noch als Exoten klassifiziert werden.

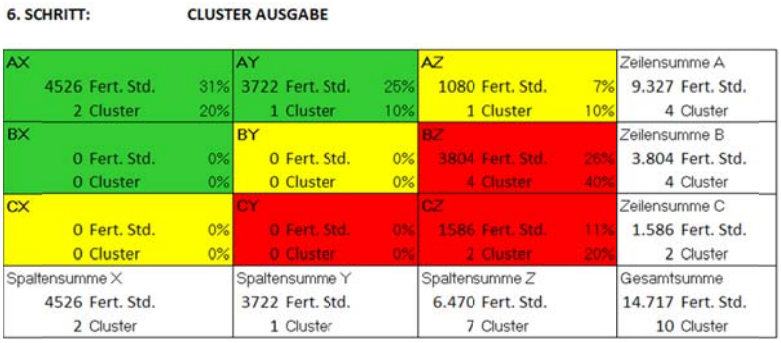


Abbildung 10.23 Clusterausgabe der Familien

Auswahl der Nivellierungsfamilien

Auf Basis der Segmentierung in Renner- und Exotenfamilien sind vom Benutzer die sog. Nivellierungsfamilien auszuwählen, d. h. die Familien, die zyklisch in das Nivellierungsmuster eingeplant werden. Sie haben dabei die Möglichkeit, alle Familien als Nivellierungsfamilien auszuwählen, oder die Familien einzeln auszuwählen (Abbildung 10.24).

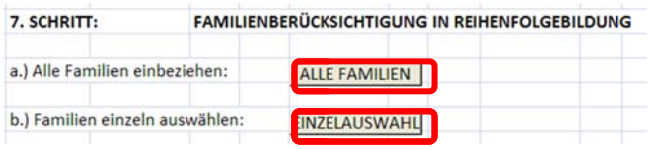


Abbildung 10.24 Auswahl von Familien für die Reihenfolgebildung

Klicken Sie auf die Schaltfläche „Familien für Reihenfolgebildung erzeugen“, um die Festlegung der Reihenfolge der Nivellierungsfamilien im Nivellierungsmuster – den nächsten Schritt zur Mustererstellung – durchzuführen (Abbildung 10.25).

Abbildung 10.25 Familien für die Reihenfolgebildung übernehmen

Geben Sie anschließend für die einzelnen Nivellierungsfamilien Mindestlosgrößen [Fertigungszeit, gemessen in Stunden] ein, indem Sie auf die Schaltfläche „Mindestlosgrößen“

klicken (Abbildung 10.26). Wechseln Sie anschließend in das Tabellenblatt „REIHENFOLGEBILDUNG“

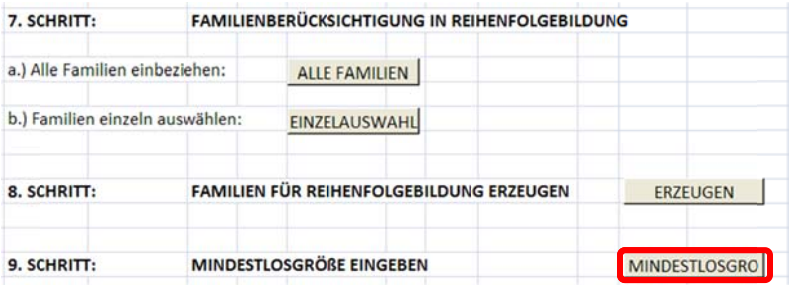


Abbildung 10.26 Mindestlosgrößen festlegen

Rüstlückenberechnung und Reihenfolgefestlegung

Beginnen Sie die Rüstzeitlückenberechnung, indem Sie auf die Schaltfläche „Eingabematrix erzeugen“ klicken (Abbildung 10.27).

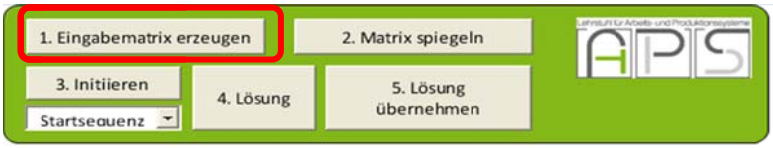


Abbildung 10.27 Eingabematrix erzeugen

Auf Basis der vorher ausgewählten Nivellierungsfamilien wird eine Rüstmatrix erzeugt (Abbildung 10.28).

Abbildung 10.28 Rüstzeitmatrix auf Basis der berücksichtigten Familien

Tragen Sie in alle Matrixfelder unterhalb der Diagonalen Rüstzeiten zwischen den entsprechende Familien [gemessen in Stunden] ein. Lediglich in die Diagonale der Matrix werden keine Werte eingetragen, da sich dort Spalten-/Zeilenkombinationen der gleichen Familie befinden. Es ist lediglich notwendig, die Daten unterhalb der Diagonale einzutragen. Die Werte können durch das Klicken auf die Schaltfläche „Matrix Spiegeln“ auf den Teil oberhalb der Diagonalen übertragen werden, da für die weiteren Berechnung von einer symmetrischen Rüstmatrix ausgegangen wird (Abbildung 10.29).

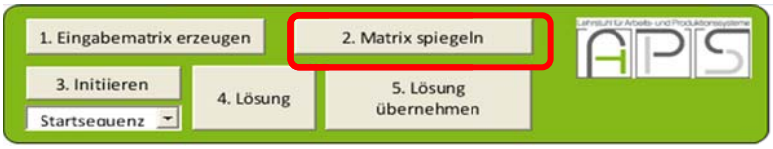
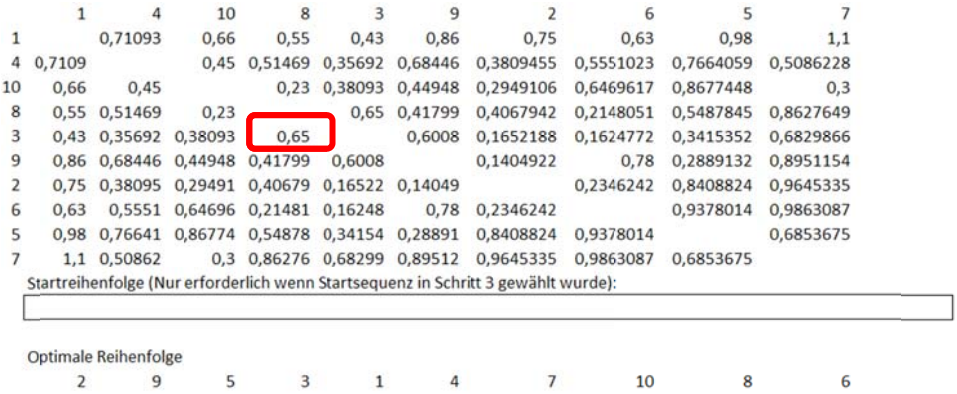


Abbildung 10.29 Button zur Spiegelung der Matrix



	1	4	10	8	3	9	2	6	5	7
1		0,71093	0,66	0,55	0,43	0,86	0,75	0,63	0,98	1,1
4	0,7109		0,45	0,51469	0,35692	0,68446	0,3809455	0,5551023	0,7664059	0,5086228
10	0,66	0,45		0,23	0,38093	0,44948	0,2949106	0,6469617	0,8677448	0,3
8	0,55	0,51469	0,23		0,65	0,41799	0,4067942	0,2148051	0,5487845	0,8627649
3	0,43	0,35692	0,38093	0,65		0,6008	0,1652188	0,1624772	0,3415352	0,6829866
9	0,86	0,68446	0,44948	0,41799	0,6008		0,1404922	0,78	0,2889132	0,8951154
2	0,75	0,38095	0,29491	0,40679	0,16522	0,14049		0,2346242	0,8408824	0,9645335
6	0,63	0,5551	0,64696	0,21481	0,16248	0,78	0,2346242		0,9378014	0,9863087
5	0,98	0,76641	0,86774	0,54878	0,34154	0,28891	0,8408824	0,9378014		0,6853675
7	1,1	0,50862	0,3	0,86276	0,68299	0,89512	0,9645335	0,9863087	0,6853675	

Startreihenfolge (Nur erforderlich wenn Startsequenz in Schritt 3 gewählt wurde):

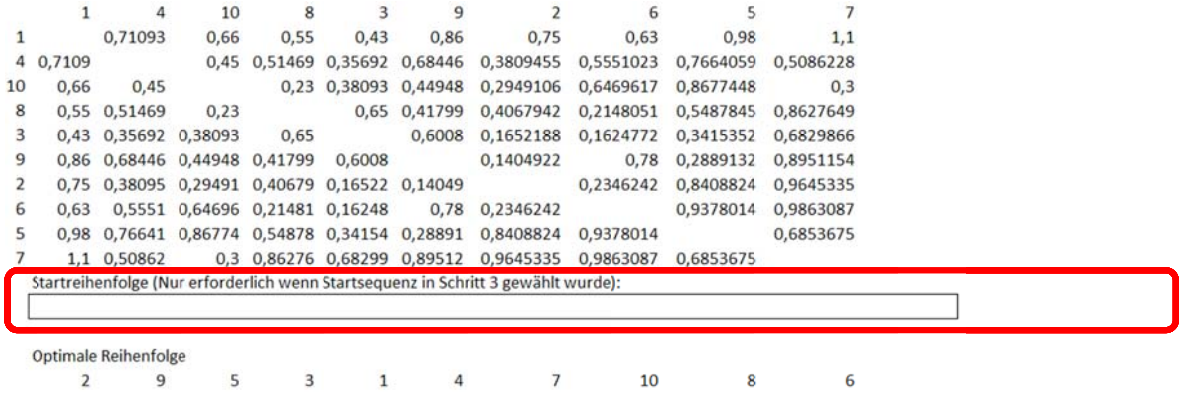
Optimale Reihenfolge

2	9	5	3	1	4	7	10	8	6

Abbildung 10.30 Ausgefüllte und gespiegelte Rüstzeitmatrix

In diesem Beispiel dauert die Umrüstung von Familie 3 auf die Familie 8 (bzw. umgekehrt) 0,65 Stunden (Abbildung 10.30).

Auf Basis der Rüstmatrix kann die rüstzeitoptimale Reihenfolge berechnet werden. Hierbei besteht die Möglichkeit, eine Startreihenfolge vorzugeben, die beispielsweise der aktuellen Fertigungsreihenfolge entspricht. Dazu müssen die Familien in der Reihenfolge ihrer Fertigung in das Feld „Startreihenfolge“ eingetragen werden. Wichtig ist dabei, dass die an erster Stelle eingetragene Familie auch an letzter Stelle eingetragen wird (Abbildung 10.31 und Abbildung 10.32).



	1	4	10	8	3	9	2	6	5	7
1		0,71093	0,66	0,55	0,43	0,86	0,75	0,63	0,98	1,1
4	0,7109		0,45	0,51469	0,35692	0,68446	0,3809455	0,5551023	0,7664059	0,5086228
10	0,66	0,45		0,23	0,38093	0,44948	0,2949106	0,6469617	0,8677448	0,3
8	0,55	0,51469	0,23		0,65	0,41799	0,4067942	0,2148051	0,5487845	0,8627649
3	0,43	0,35692	0,38093	0,65		0,6008	0,1652188	0,1624772	0,3415352	0,6829866
9	0,86	0,68446	0,44948	0,41799	0,6008		0,1404922	0,78	0,2889132	0,8951154
2	0,75	0,38095	0,29491	0,40679	0,16522	0,14049		0,2346242	0,8408824	0,9645335
6	0,63	0,5551	0,64696	0,21481	0,16248	0,78	0,2346242		0,9378014	0,9863087
5	0,98	0,76641	0,86774	0,54878	0,34154	0,28891	0,8408824	0,9378014		0,6853675
7	1,1	0,50862	0,3	0,86276	0,68299	0,89512	0,9645335	0,9863087	0,6853675	

Startreihenfolge (Nur erforderlich wenn Startsequenz in Schritt 3 gewählt wurde):

Optimale Reihenfolge

2	9	5	3	1	4	7	10	8	6

Abbildung 10.31 Feld für die Eingabe einer Startsequenz

Startreihenfolge (Nur erforderlich wenn Startsequenz in Schritt 3 gewählt wurde):

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1

Abbildung 10.32 Vorgegebene Startreihenfolge mit gleicher Familie in der ersten und letzten Spalte

Es ist notwendig, den Beginn der Lösungsheuristik zu initiieren (Schaltfläche „3.Initieren“). Daraufhin können Sie aus einer Drop-Down Liste entweder die eingegebene Startsequenz auswählen (Startsequenz in der Drop-Down Liste auswählen), oder jede Familie als Startfamilie für die Reihenfolgebildung auszuwählen (Alle in der Drop-Down Liste auswählen) (Abbildung 10.33).

Abbildung 10.33 Initiieren des Optimierungsvorgangs mit Auswahl einer Startfamilie oder Startsequenz

Durch das Klicken auf die Schaltfläche „4.Lösung“ wird die 2-stufige Heuristik (Nearest Neighbor und 2-opt) zur Reihenfolgebestimmung gestartet. aus (Abbildung 10.34). Die Heuristik gibt jede überprüfte Reihenfolge mit ihrer jeweiligen Rüstzeit aus, markiert grün die Reihenfolge mit der kürzesten Rüstzeit und schlägt diese als Basis für die weitere Berechnung vor (Abbildung 10.35).

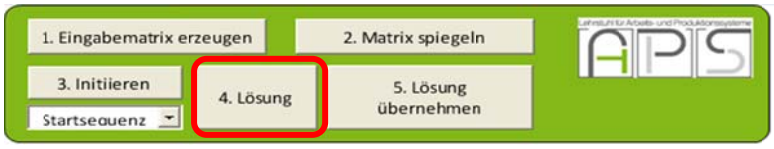


Abbildung 10.34 Auslösen der Rüstzeitberechnung und -Optimierung

Abbildung 10.35 Berechnung der Rüstzeiten für Fertigungsreihenfolgen und Ausgabe der optimalen Rüstreihenfolge

Für die weitere Berechnung des Nivellierungsmusters ist es notwendig, eine Reihenfolge als Basis für das Nivellierungsmuster festzulegen. Hierbei besteht die Möglichkeit, die von der Heuristik vorgeschlagene Reihenfolge zu übernehmen, oder eine andere Reihenfolge manuell einzutragen. Zur Übernahme der vorgeschlagenen Reihenfolge klicken Sie auf die Schaltfläche „Lösung übernehmen“ (Abbildung 10.36). Um eine andere Reihenfolge als Basis für das Nivellierungsmuster auszuwählen, müssen Sie im Feld „Optimale Reihenfolge“ die Familien entsprechend der gewünschten Abfolge eintragen und daraufhin auf die Schaltfläche „Reihenfolge übernehmen“ klicken.

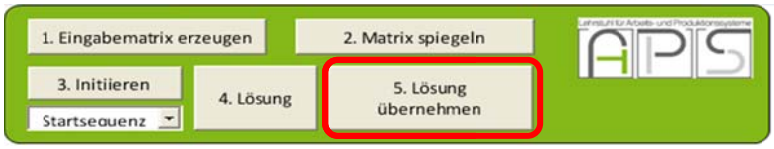


Abbildung 10.36 Auswahl der vorgeschlagenen oder eingetragenen Fertigungsreihenfolge als Basis für die Startmustererstellung

Kapazitäts- und EFEI-Berechnung

Im Tabellenblatt „Mustererstellung“ werden alle notwendigen Parameter für die Erstellung des Nivellierungsmusters eingegeben. Dazu werden die Schichten pro Tag mit den jeweils zur Verfügung stehenden Stunden eingetragen. Es existiert eine Unterteilung in Früh-, Spät- und Nachtschicht für jeden Wochentag. Die Berücksichtigung der jeweiligen Schicht bei der Kapazitätsberechnung erfolgt über ein entsprechendes Kontrollkästchen-Steuerelement (Abbildung 10.37). Tragen Sie zudem die jeweilige Schichtarbeitszeit in die dafür vorgesehenen Textfelder ein.

Abbildung 10.37 Auswahl der Schichten mit Eingabe der Arbeitszeiten

Klicken Sie zur Durchführung der Berechnung auf die Schaltfläche „Kapazitäts- und EFEI-Berechnung durchführen“ (Abbildung 10.38) und folgen Sie den Aufforderungen in den Dialogboxen. Die nachfolgende Berechnung des theoretisch möglichen EFEI-Wertes erfolgt schichtbezogen. Die Berechnungsschritte entsprechen den Schritten in Abschnitt 3.3.3. Zusätzlich ergibt sich an dieser Stelle die Möglichkeit, einen prozentualen Wert für die technische Verfügbarkeit des betrachteten Arbeitssystems anzugeben, der bei der Kapazitätsberechnung berücksichtigt wird.

Abbildung 10.38 Auslösung für die Kapazitätsberechnung des Arbeitssystems

Nivellierungsmuster erzeugen und visualisieren

Zur Berechnung der Kapazitätszeitfenster im Nivellierungsmuster klicken Sie auf die Schaltfläche „Startmuster erzeugen“. Es erfolgt eine graphisch Ausgabe des Nivellierungsmusters in Form einer schematischen Produktionsprogrammtafel (Abbildung 10.39 und Abbildung 10.40):

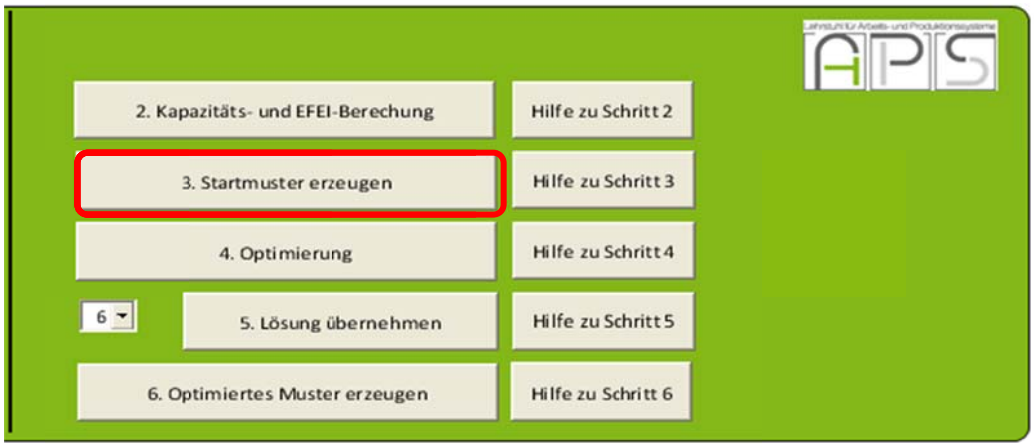


Abbildung 10.39 Button zur Erzeugung des Startmusters

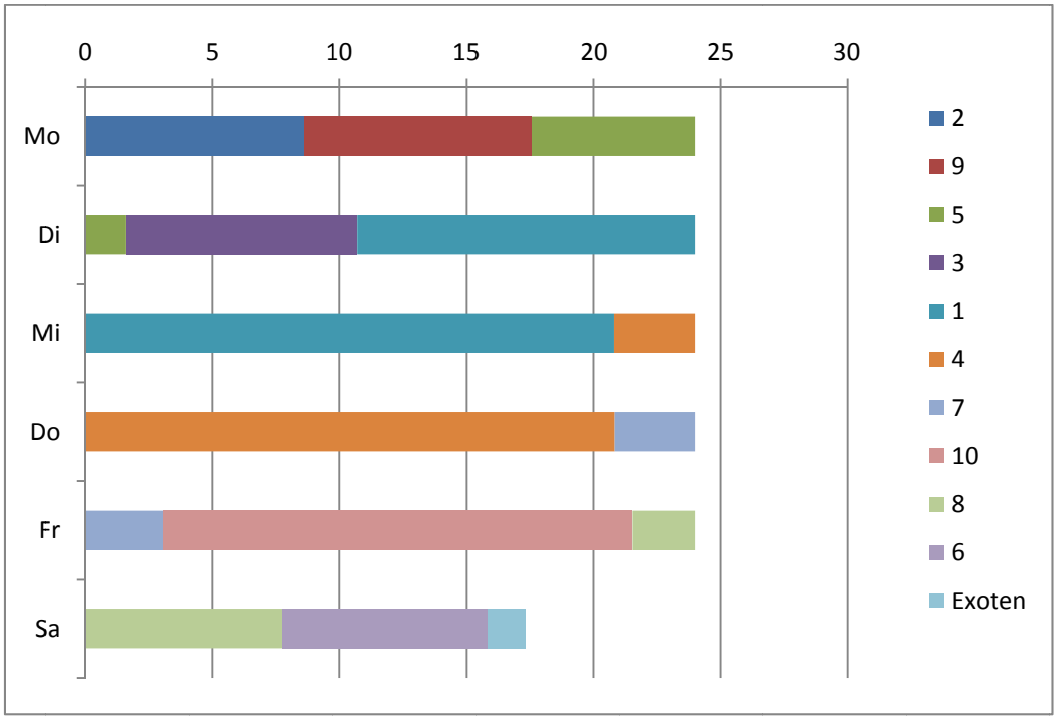


Abbildung 10.40 Graphische Darstellung des Startmusters

Musteroptimierung

Klicken Sie auf die Schaltfläche „Optimieren“, um die in Abschnitt 3.3.5 beschriebene Musteroptimierungsheursitik auszuführen. Alle erzeugten Nachbarschaftslösungen werden ausgegeben.

Abbildung 10.41 Ausgabe der optimalen Lösung

Zusätzlich wird eine Optimierungsvariante für die Visualisierung vorgeschlagen (Abbildung 10.41). Dazu wird eine Nummer ausgegeben, die die Position der Fertigungsreihenfolge innerhalb der Optimierung darstellt. Im unten aufgeführten Beispiel wurde die optimierte Fertigungsreihenfolgebildung und Losgrößenbildung im 6. Schritt der Optimierung gefunden. Zusätzlich hat der Nutzer die Möglichkeit, eine optimierte Fertigungsreihenfolge selber auszuwählen, die als Grundlage für das optimierte Muster dient. Dazu wählt der Nutzer die Nummer in einem Drop Down Menü aus, die der gewünschten Position der Fertigungsreihenfolge innerhalb der Optimierung darstellt (Abbildung 10.42).

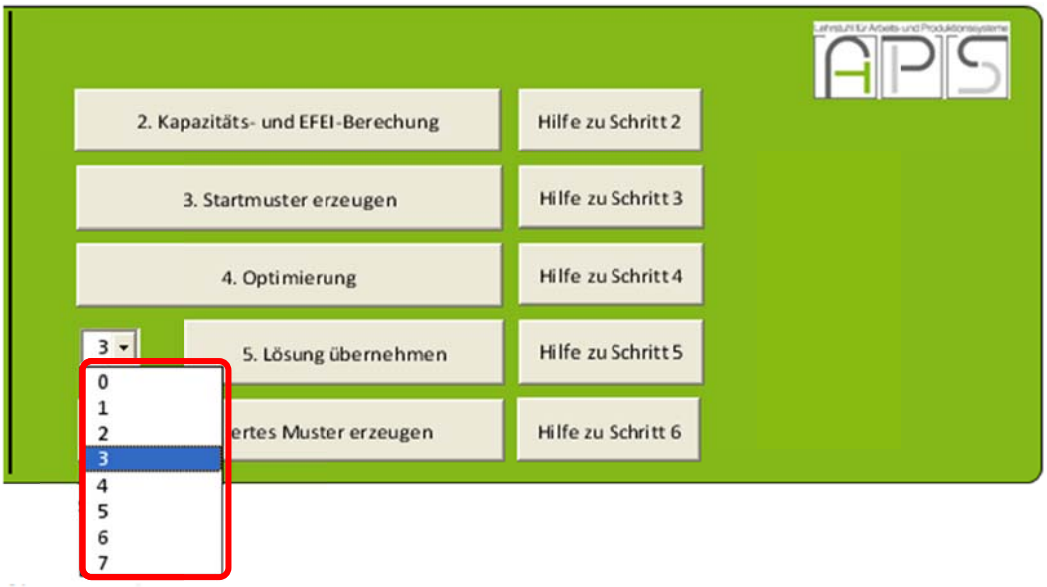


Abbildung 10.42 Auswahlmöglichkeit einer anderen Lösung

Durch Klicken auf „Lösung übernehmen“ wird die ausgewählte Fertigungsreihenfolge für das optimierte Muster übernommen (Abbildung 10.43) und durch Betätigen von „Optimiertes Muster erzeugen“ graphisch ausgegeben (Abbildung 10.44).

Abbildung 10.43 Buttons zur Übernahme der gewählten Lösung und zur Erzeugung des optimierten Musters

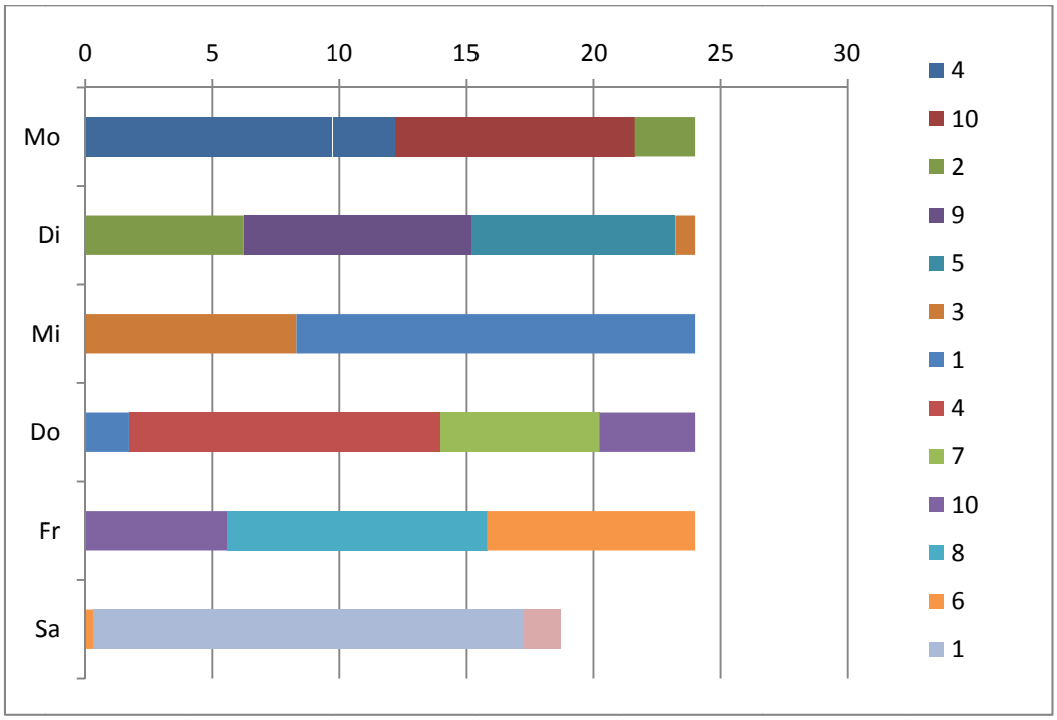


Abbildung 10.44 Graphische Ausgabe des optimierten Musters