

**Entscheidungshilfe zur Auswahl
Schlanker Produktionssysteme
für die Montage von Werkzeugmaschinen**

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Wirt.-Ing. Guido Rumpel

aus Waren

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Tag der Einreichung: 28.06.2012
Tag der mündlichen Prüfung: 17.10.2012

Darmstadt 2012

D 17

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

Guido Rumpel

**Entscheidungshilfe zur Auswahl
Schlanker Produktionssysteme
für die Montage von Werkzeugmaschinen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2013

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2013

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1690-1

ISSN 1864-2179

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Kaum ein Ansatz zur Erhöhung der Effizienz von Produktionsprozessen hat in den letzten 20 Jahren so viel Aufmerksamkeit erregt wie das Konzept der Schlanken Produktion. Die Idee der absoluten Wertschöpfungsorientierung durch Elimination sämtlicher Verschwendungen ist heute ein wichtiger Hebel zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit von Produktionen in Hochlohnländern wie Deutschland.

Insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen sehen sich jedoch vor Probleme gestellt das Konzept der Schlanken Produktion erfolgreich umzusetzen. Als zentraler Hinderungsgrund wird immer wieder die mangelnde Eignung der klassischen Methoden der Schlanken Produktion für die spezifischen Rahmenbedingungen dieser Unternehmen genannt.

Die vorliegende Arbeit leistet einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Eignung unterschiedlicher Produktionssysteme (als Gestaltungsobjekt Schlanker Produktion) für unterschiedliche Rahmenbedingungen der Produktion. In der Forschungsarbeit wurden verschiedene Arten von Schlanken Produktionssystemen identifiziert und deren Eignung für den Einsatz bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen der Montage am Beispiel der Endmontage von Werkzeugmaschinen untersucht. Die Untersuchung stützt sich vor allem auf einen umfangreichen Benchmarking von Produktionssystemen im Werkzeugmaschinenbau und auf die Durchführung eines Simulationsexperiments. Die Kernergebnisse dieser Untersuchung wurden letztlich in einer Methode zur Auswahl Schlanker Produktionssysteme für die Montage im Werkzeugmaschinenbau entwickelt, dem ProduktionsSystemKompass.

Die Ergebnisse eines komplexen und facettenreichen Forschungsprozesses wurden zu einer einfachen und verständlichen Methode verdichtet, die sich in einer zentralen Grafik zusammenfassen lässt. Das nutzt sowohl dem Praktiker als auch Wissenschaftler und ist ein gelungenes Beispiel, wie komplexen Wirkungszusammenhängen durch geschickte Systematisierung der Schrecken genommen werden kann.

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt. Im Zuge der Anfertigung dieser Arbeit erhielt ich vielfältige Unterstützung für die ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken möchte:

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, der durch seine stete Gesprächsbereitschaft, fachlichen Anregungen und konstruktive Diskussionen zum Gelingen dieser Arbeit entscheidend beigetragen hat. Neben der inhaltlichen Zusammenarbeit in Forschungsprojekten und bei der Institutsleitung habe ich insbesondere die immer offene und angenehme Atmosphäre zwischen uns geschätzt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart danke ich sehr für sein Interesse und kritische Durchsicht der Arbeit sowie der Übernahme des Koreferats.

Der wesentliche Teil dieser Arbeit basiert auf Beobachtungen und Datenerfassung in der Industrie sowie einem intensiven Erfahrungsaustausch. Ohne die Vielzahl der involvierten Unternehmen, die sich bereitwillig und offen an dieser Arbeit beteiligt hätten, wäre der Untersuchung die Grundlage entzogen. Diesen Unternehmen und Unternehmensvertretern gilt mein ausdrücklicher Dank.

Im kreativen Umfeld des Forschungsinstituts fand ich fachliche Unterstützung und Motivation durch viele Kolleginnen und Kollegen. Ein besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Julien Hohenstein für die gemeinsame Zeit als OBERINGENIEURE am PTW. Nicht vergessen werden sollen die zahlreichen Studenten, die durch Abschlussarbeiten und als Hilfskräfte mit viel Eifer und wertvollen Hinweisen zu dieser Arbeit beigetragen haben, allen voran Herrn Tobias Meudt.

Allen Korrekturlesern des Manuskripts möchte ich danken für die aufgebrachte Zeit und hilfreichen Kommentare, insbesondere Herrn Philipp Kuske und Herrn Dr.-Ing. Josef Ernst für die fachliche Prüfung sowie der Germanistin Frau Ivana Cubelic für viel Verständnis und Durchhaltevermögen.

Mein herzlicher Dank gebührt schließlich meiner Familie und besonders meiner Freundin Ulrike Neumann: Kein Motivationstief war diesem Rückhalt gewachsen. Ihnen widme ich diese Arbeit.

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	iv
Abkürzungen und Formelverzeichnis	vii
1. Einleitung	1
2. Stand der Forschung und Anwendung.....	4
2.1 Schlanke Produktionssysteme.....	4
2.1.1 Definition „Produktionssysteme“.....	4
2.1.2 Definition und Abgrenzung „Schlanke Produktionssysteme“.....	5
2.1.3 Ziel und Aufbau Schlanker Produktionssysteme.....	7
2.1.4 Entwicklung Schlanker Produktionssysteme.....	9
2.1.5 Verbreitung Schlanker Produktionssysteme	11
2.2 Konfiguration Schlanker Produktionssysteme in der Endmontage von KMU	12
2.2.1 Definition und Einordnung Endmontage.....	12
2.2.2 Konfiguration Schlanker Produktionssysteme.....	13
2.2.3 Herausforderungen bei der Implementierung Schlanker Produktionssysteme für KMU	15
2.2.4 Bestehende Ansätze zur Implementierung Schlanker Produktionssysteme für KMU	18
2.2.4.1 Klassischer Ansatz	18
2.2.4.2 Moderne Ansätze.....	18
2.2.4.3 Zusammenfassung	21
2.3 Schlanke Produktionssysteme im Werkzeugmaschinenbau.....	22
2.3.1 Werkzeugmaschinenbau in Deutschland	22
2.3.2 Herausforderung des Werkzeugmaschinenbaus in Deutschland	25
2.3.3 Wettbewerbsfaktoren spanender Werkzeugmaschinen	27
2.3.4 Entstehungsprozess spanender Werkzeugmaschinen	29
2.3.5 Schlanke Produktion spanender Werkzeugmaschinen	31
3. Forschungskonzeption.....	34
3.1 Forschungsziel	34
3.1.1 Zieldefinition.....	34
3.1.2 Inhaltliche Anforderungen.....	34
3.1.3 Formale Anforderungen.....	36

3.2 Lösungsansatz und Forschungsthesen.....	36
3.3 Vorgehensweise zur Zielerreichung	37
4. Ermittlung der Gestaltungsparameter von Produktionssystemen	40
4.1 Vorgehen und Hilfsmittel.....	40
4.2 Priorisierung der Subsysteme von Schlanker Produktionssystemen.....	41
4.3 Klassische Grundformen von Produktionssystemen der Montage	44
4.4 Erweiterte Gestaltungsfelder von Produktionssystemen der Montage	45
4.4.1 Allgemeine Charakteristika von Prozessen	45
4.4.2 Erweiterte Gestaltungsfelder des Hauptprozesses.....	47
4.4.3 Erweiterte Gestaltungsfelder des Materialflusses.....	50
4.5 Zusammenfassung	54
5. Identifikation von Arten Schlanker Produktionssysteme im Werkzeugmaschinenbau.....	56
5.1 Vorgehen und Hilfsmittel.....	57
5.1.1 Allgemeine Vorgehensweise beim Benchmarking.....	57
5.1.2 Spezifische Vorgehensweise beim Benchmarking	58
5.2 Bewertung der Leistungsfähigkeit von Produktionssystemen.....	60
5.3 Systematisierung der Rahmenbedingungen für Produktionssysteme	65
5.4 Datenerhebung Benchmarking	72
5.5 Datenauswertung Benchmarking	75
5.5.1 Einteilung der untersuchten Produktionssysteme nach Typen....	75
5.5.2 Bewertung der Leistungsfähigkeit der Produktionssysteme	77
5.5.3 Vergleich der Gestaltungsparameter in Abhängigkeit von der Leistungsfähigkeit.....	79
5.6 Zusammenfassung	88
6. Verhalten und Einsatzgrenzen der Arten von Schlanken Produktionssystemen	89
6.1 Vorgehen und Hilfsmittel.....	89
6.1.1 Definition und Zielsetzung Simulation	89
6.1.2 Vorgehensweise bei der Simulation.....	90
6.1.3 Validierung der Ergebnisse	92
6.2 Modellbildung.....	93

6.2.1	Ziele des Simulationsexperiments und Modellumfang.....	93
6.2.2	Simulationswerkzeug Plant Simulation	93
6.2.3	Modellbildung für Gestaltungsprinzipien der Montage.....	94
6.2.4	Modellbildung für Rahmenbedingungen der Montage	98
6.3	Experimentplanung	102
6.3.1	Definition Zielkennwerte	102
6.3.2	Experimentablauf.....	104
6.3.3	Auswertungsablauf	105
6.4	Ergebnisauswertung	107
6.4.1	Darstellung der Verschwendungscharakteristik.....	107
6.4.2	Erklärung der Verschwendungscharakteristik.....	109
6.5	Einsatzgrenzen Schlanker Produktionssysteme (ProduktionsSystemKompass).....	112
6.5.1	Entwicklung und Darstellung des ProduktionsSystemKompass	112
6.5.2	Anwendungsbereich des ProduktionsSystemKompass.....	115
6.6	Zusammenfassung.....	119
7.	Operationalisierung der Erkenntnisse in einer Methode zur Auswahl Schlanker Produktionssysteme	120
7.1	Ziele und Anwendungsbereiche der Methode	120
7.2	Darstellung der Methode.....	121
7.2.1	Vorbereitungsphase.....	121
7.2.2	Methodenpfad A „Montageoptimierung“	122
7.2.3	Methodenpfad B „Montagesegmentierung“	126
7.3	Beispielhafte Anwendung der Methode: Neuplanung einer Montage	130
7.3.1	Ausgangssituation und Aufgabenstellung	130
7.3.2	Anwendung der Methode und Ergebnisse	131
7.3.3	Diskussion der Anwendbarkeit	133
7.4	Zusammenfassung.....	133
8.	Schlussbetrachtung und Ausblick.....	134
	Literaturverzeichnis	136
	Anhang	143

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Erfolgsfaktoren für eine erfolgreiche Produktion in Deutschland	1
Bild 2: Makrostruktur des Produktionsprozesses	4
Bild 3: Methoden und Prinzipien der Schlanke Produktion als Gestaltungsinstrument von Produktionssystemen	6
Bild 4: Basisaufbau von Schlanke Produktionssystemen	8
Bild 5: Gestaltung von Produktionssystemen im Wandel der Zeit	10
Bild 6: Verbreitungsprofil Schlanke Produktionssysteme	11
Bild 7: Einordnung und Schnittstellen der Endmontage im Produktionsprozess	13
Bild 8: Charakterisierung der Produktion als Unternehmensprozess und Einordnung des Anwendungsgebiets der Produktionsoptimierung	14
Bild 9: Prozess der Gestaltung und Umsetzung von Schlanke Produktionssystemen	15
Bild 10: Prioritäre Maßnahmen zur Unterstützung der Implementierung Schlanke Produktionssysteme aus Unternehmenssicht	17
Bild 11: Fokus verschiedener Ansätze der Gestaltung von Schlanke Produktionssystemen	21
Bild 12: Zusammenfassung klassischer und moderner Ansatz	22
Bild 13: Gliederung der Werkzeugmaschinen nach DIN 69651	23
Bild 14: Umsatz nach Arten von Werkzeugmaschinen	24
Bild 15: Größte Absatzmärkte von deutschen Werkzeugmaschinen im Vergleich	25
Bild 16: Weltrangliste der Werkzeugmaschinenproduktion nach Ländern	26
Bild 17: Verdrängungswettbewerb im internationalen Werkzeugmaschinenbau	26
Bild 18: Maschinentypen spanender Werkzeugmaschinen	27
Bild 19: Gebrauchswertparameter und Werkzeugmaschinenkomponenten am Beispiel eines Bearbeitungszentrums	28
Bild 20: Entstehungsprozess einer Baukastenmaschine	29
Bild 21: Ablauf der Endmontage am Beispiel eines Drehzentrums	30
Bild 22: Beispielhafte Kostenstrukturen verschiedener Werkzeugmaschinen nach Art und Produktionsstandort	31
Bild 23: Getaktete Fließmontagesysteme der drei größten deutschen Werkzeugmaschinenhersteller	32
Bild 24: Gestaltungsprozess Schlanke Produktionssysteme	35
Bild 25: Bestehende Ansätze im Vergleich zum Lösungsansatz der vorliegenden Arbeit	37
Bild 26: Vorgehensweise zur Methodenentwicklung	38
Bild 27: Vorgehen und Hilfsmittel im Kapitel 4	40
Bild 28: Schnittstellen und beispielhafte Gestaltungsfelder der Montage	42
Bild 29: Subsysteme von Produktionssystemen und deren Bedeutung für die Untersuchung	43
Bild 30: Abgeleitete Untersuchungsfelder	44
Bild 31: Klassische Grundformen von Produktionssystemen der Montage	45
Bild 32: Charakteristika und Elemente von Prozessen	46
Bild 33: Gestaltungsfelder und –parameter des Hauptprozesses	47
Bild 34: Gestaltungsfelder und –parameter des Materialflusses	51
Bild 35: Teilearten im Werkzeugmaschinenbau	53

Bild 36: Systematik der Gestaltungsfelder eines Produktionssystems in der Montage von Werkzeugmaschinen (1).....	55
Bild 37: Systematik der Gestaltungsfelder eines Produktionssystems in der Montage von Werkzeugmaschinen (2).....	56
Bild 38: Vorgehensweise, Optionen und Gütekriterien beim Benchmarking.....	58
Bild 39: Verschwendung und Verschwendungsarten.....	60
Bild 40: Verschwendung aus Sicht der Produktionsfaktoren (Zahlenwerte illustrativ).....	61
Bild 41: Visualisierung der Kennzahlen.....	64
Bild 42: Einflussfaktoren auf die Gestaltung der Montage von Werkzeugmaschinen.....	65
Bild 43: Klassische Grundformen von Produktionssystemen der Montage und deren Einsatzfelder.....	66
Bild 44: Vergleich der Betrachtungsweisen auf die Systematisierung der Rahmenbedingungen für Produktionssysteme.....	67
Bild 45: Einflussgrößen auf die Prozessfrequenz.....	68
Bild 46: Begriffe im Zusammenhang mit der Varianz von Prozessen.....	69
Bild 47: Typisches Störungsprofil eines Arbeitstakts.....	70
Bild 48: Diagramm zur Darstellung der Rahmenbedingungen für Produktionssysteme..	71
Bild 49: Schritte bei der Datenerhebung und -auswertung.....	72
Bild 50: Methodensteckbrief Wertstromanalyse.....	74
Bild 51: Ergebnisse der Clusteranalyse im k-means-Verfahren.....	76
Bild 52: Einordnung der untersuchten Produktionssysteme und deren Einteilung in Typen.....	77
Bild 53: Leistungsfähigkeit der untersuchten Produktionssysteme nach Typen.....	78
Bild 54: Ursachen für Leistungsunterschiede im Montageprozess.....	79
Bild 55: Einsatz klassischer Grundformen von Produktionssystemen im Werkzeugmaschinenbau.....	81
Bild 56: Gestaltung der Produktionssysteme in Typ 1.....	83
Bild 57: Gestaltung der Produktionssysteme in Typ 2.....	84
Bild 58: Gestaltung der Produktionssysteme in Typ 3.....	85
Bild 59: Gestaltung der Produktionssysteme in Typ 4.....	87
Bild 60: Vergleich der Benchmark-Produktionssysteme hinsichtlich der Gestaltung von Grundform und Hauptprozess.....	88
Bild 61: Ablauf eines Simulationsexperiments.....	91
Bild 62: Übersicht Validierungstechniken nach dem Grad der Subjektivität.....	92
Bild 63: Hierarchischer Grundaufbau eines 3-Ebenen-Modells mit Plant Simulation.....	94
Bild 64: Baukasten zur Modellierung der Produktionssysteme (vereinfachte Darstellung).....	95
Bild 65: Berücksichtigung des Kundentakts in den Simulationsmodellen.....	98
Bild 66: Bestimmung der Lernrate für die Simulation aus Literatur und Fallstudien.....	99
Bild 67: Steckbrief Lernkurvenmethode.....	100
Bild 68: Modellierung der Prozessvarianz im Simulationsexperiment.....	102
Bild 69: Beispielhafte Darstellung der Zielkennwerte eines Simulationslaufs.....	103
Bild 70: Zusammensetzung der Prozessfrequenz im Simulationsexperiment.....	104
Bild 71: Bestimmung der Einschwingdauer für die Simulationsläufe.....	105
Bild 72: Ablauf der Experimentauswertung für ein Schlanke Produktionssystem.....	106
Bild 73: Verschwendungscharakteristik der simulierten Produktionssysteme.....	108

Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
5S	Methode der Schlanke Produktion (siehe Anhang A)
CNC	Computerized Numerical Control
c.p.	ceteris paribus (lat. „Alles andere bleibt gleich“)
DNC	Distributed Numerical Control bzw. Direct Numerical Control
GPS	Ganzheitliche Produktionssysteme
JIS	Just in Sequence, Methode der Schlanke Produktion (siehe Anhang A)
JIT	Just in Time, Methode der Schlanke Produktion (siehe Anhang A)
KMU	Klein- und mittelständische Unternehmen
KPI	Key Performance Indicators, Werkzeug der Schlanke Produktion (siehe Anhang A)
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess (Prinzip der schlanke Produktion)
OEE	Overall Equipment Efficiency, Werkzeug der Schlanke Produktion (siehe Anhang A)
p.a.	per annum (lat. „pro Jahr“, „jährlich“)
PDCA	Plan-Do-Check-Act, Werkzeug der Schlanke Produktion (siehe Anhang A)
Poka Yoke	Methode der Schlanke Produktion (siehe Anhang A)
SWOT-Analyse	Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Bedrohungen)
TCO	Total Costs of Ownership
TPS	Toyota Produktionssystem
KSS	Kühlschmierstoffe
U-Layout	Methode der Schlanke Produktion (siehe Anhang A)

Formelzeichen

Abkürzung	Einheit	Bezeichnung
σ_{AT}	h	rechtsseitige Standardabweichung Arbeitstakt gesamt
AZ	h	Tatsächliche Gesamtanwesenheitszeit
DLZ_n	h	Durchlaufzeit der Werkzeugmaschinen n
KS_{AK}	€/UZ	Kostensatz der Arbeitskräfte
KS_{MO}	€/UZ	Kostensatz der Montageobjekte
KT_{MB}	h/Stück	Ø Kundentakt
MZ_n	h	Geplante Montagezeit der Werkzeugmaschinen n
PF_{MB}		Prozessfrequenz im Montagebereich
PV_{MB}	%	Prozessvarianz des Montagebereichs
q		letzter Montageschritt
UZ		Untersuchungszeitraum
VA_{AK}	%	Ø Verschwendungsanteil der Arbeitskräfte
V_K	€	Ø kostenmäßige Verschwendung im Produktionssystem zur Basis der Arbeitskosten
VA_{MO}	%	Ø Verschwendungsanteil der Montageobjekte
WSA_{AK}	%	Ø Wertschöpfungsanteil der Arbeitskräfte
WSA_{MO}	%	Ø Wertschöpfungsanteil der Montageobjekte
z		Gesamtanzahl montierter Werkzeugmaschinen
ZS_{MB}	h	Anzahl der verfügbaren Zeitstunden im Montagebereich
ZZ_k	h	Ø Zykluszeit des Arbeitstakts k [h]

1. Einleitung

Produktion ist das Fundament für Arbeitsplätze und Wohlstand in Deutschland. Experten schätzen, dass jeder dritte Arbeitsplatz in Deutschland und somit ca. 15 Mio. Menschen direkt oder indirekt vom Verarbeitenden Gewerbe abhängen. In keinem anderen Hochlohnländ findet sich ein derart hoher Anteil von Produktion gemessen an der gesamten Wirtschaftsleistung. Während zudem in anderen Hochlohnländern der Anteil von Produktion stetig sinkt, kann in Deutschland eine Renaissance der Produktion statistisch belegt werden. Die Vorteile einer derart auf Realwerten basierten Wirtschaft zeigten sich deutlich, z.B. in der letzten Weltwirtschaftskrise 2009/2010.¹

Doch trotz der positiven Entwicklung der letzten Jahre steht Deutschland als Produktionsstandort unter zunehmenden Druck. Die Lohnkosten am Hochlohnländ Deutschland werden in diesem Zusammenhang oft als Hauptherausforderung genannt. Dabei spielt nicht die absolute Höhe der Lohnkosten die entscheidende Rolle, sondern vielmehr der Umfang der Wertschöpfung, der mit diesem Lohn generiert werden kann: die sog. Lohnstückkosten. Die Ansätze zur Senkung der Lohnstückkosten sind zahlreich, kaum ein Ansatz hat in den letzten 20 Jahren jedoch so viel Aufmerksamkeit erregt wie das Konzept der Schlanke Produktion. Die Idee der absoluten Wertschöpfungsorientierung durch Elimination sämtlicher Verschwendungen ist auch heute noch aktuell. So wurde kürzlich in einem der umfangreichsten Benchmarkings im Verarbeitenden Gewerbe „Fabrik des Jahres 2010“ die Notwendigkeit herausgestellt, die Produktionsprozesse nach den Prinzipien der Schlanke Produktion zu organisieren, um operative Exzellenz bzw. eine sehr hohe Leistungsfähigkeit der Produktion zu erreichen (siehe Bild 1). Es ist festgestellt worden, dass die erfolgreichsten Unternehmen die Nutzung der Prinzipien der Schlanke Produktion nachhaltig bewerkstelligen.²

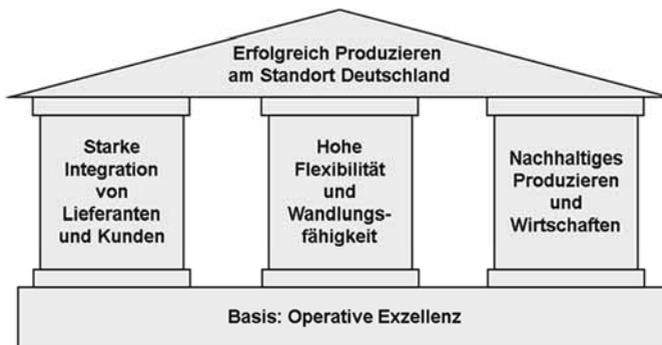


Bild 1: Erfolgsfaktoren für eine erfolgreiche Produktion in Deutschland³

Andererseits ist aber auch festgestellt worden, dass jede zweite Produktion von seinem Management in Bezug auf den erreichten Grad der operativen Exzellenz stark über-

¹ vgl. Abele, Reinhart (2011).

² vgl. Jordan (2010).

³ vgl. Jordan (2010).

schätzt wird und jede sechste Produktion aufgrund relativ schlechter Produktionsleistungen sogar mittelfristig gefährdet ist. Der Bedarf nach Schlanker Produktion ist heute demnach ungebrochen hoch und das Potential zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit von Produktionen in Deutschland durch Schlanke Produktion weiterhin gegeben.⁴

Insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen außerhalb des Automobilbaus und seiner Zulieferer sehen sich heute vor Probleme gestellt das Konzept der Schlanken Produktion erfolgreich einzuführen. Diese Arbeit verfolgt deshalb das Ziel einen Beitrag zu leisten, um die operativen Exzellenz durch Schlanke Produktion in Unternehmen weiter zu steigern und dessen Verbreitung gerade in Branchen und Unternehmensklassen zu fördern, die bisher unzureichenden Zugang zu den Ideen und Prinzipien der Schlanken Produktion haben:

- **Untersuchungsobjekt:** Der Werkzeugmaschinenbau in Deutschland wird in der Arbeit als Untersuchungsobjekt adressiert. Insbesondere ist diese Branche trotz ähnlicher Produkte durch eine starke Inhomogenität gekennzeichnet. Von der Einzelstückproduktion mit wenigen Werkzeugmaschinen pro Jahr bis zur Großserienproduktion mit fast 1000 Werkzeugmaschinen pro Jahr findet sich hier ein Querschnitt vieler Unternehmensklassen typischer klein- und mittelständischer Unternehmen in Deutschland. Ebenso typisch für diese Unternehmensklassen ist der Verbreitungsgrad Schlanker Produktion relativ gering und auf die Großserienproduktion beschränkt. Das sind ideale Voraussetzungen, um die Anwendungsgrenzen konventioneller Schlanker Produktion zu analysieren und angepasste Systeme Schlanker Produktionen zu entwickeln.
- **Untersuchungsmotivation:** Der deutsche Werkzeugmaschinenbau ist überdurchschnittlich exportorientiert und sieht sich somit besonders stark internationalem Wettbewerb und somit hohem Kostendruck ausgesetzt. Die Notwendigkeit zur Senkung der Produktionskosten bzw. Steigerung der Leistungsfähigkeit der Produktion ist hier besonders hoch, gleichzeitig werden heute die Ansätze der Schlanken Produktion noch nicht umfassend genutzt. Gelingt es mit dieser Arbeit einen Beitrag zu leisten, die Ansätze Schlanker Produktion auch für die Einzel-, Klein- und Mittelserie zugänglich zu machen, können dadurch Potentiale zur Leistungssteigerung und Kostensenkung erschlossen werden. Somit kann die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen dieser Branche nachhaltig gesteigert werden.

⁴ vgl. Jordan (2010).

- **Untersuchungsgegenstand:** Produktionssysteme sind das zentrale Gestaltungsobjekt der Schlanke Produktion. Die erfolgreiche Umsetzung Schlanke Produktionssysteme basiert zum einen auf der inhaltlichen, anforderungsgerechten Auslegung der Produktionssysteme und zum anderen auf unternehmenskulturellen Aspekten zur Schaffung von Verständnis, Akzeptanz und Sicherstellung der Nachhaltigkeit der Veränderungen. Diese Arbeit beschränkt sich aus kapazitiven Gründen auf die inhaltliche Auslegung von Schlanke Produktionssystemen für die Montage von Werkzeugmaschinen (als Teilprozess der Produktion).
- **Untersuchungsziel:** Es sollen Arten von Schlanke Produktionssystemen identifiziert werden, die unter verschiedenen Rahmenbedingungen des Werkzeugmaschinenbaus effizient eingesetzt werden können. Dabei werden bewusst die Grenzen der Gestaltung konventioneller Schlanke Produktionssysteme aufgebrochen und offener Lösungsraum generiert, um alternative Produktionssysteme im Sinne der Schlanke Produktion abzuleiten. Auf dieser Grundlage soll eine Methode entwickelt werden zur Auswahl des leistungsfähigsten Schlanke Produktionssystems bei gegebenen Rahmenbedingungen einer spezifischen Montage.

Zur Bearbeitung der Zielstellung wird in **Kapitel 2** zunächst umfassend der Stand der Forschung und Anwendung zu Definition und Gestaltung von Produktionssystemen beleuchtet. Dabei werden die Gestaltungsansätze moderner Schlanke Produktionssysteme herausgearbeitet und an den Verhältnissen im Werkzeugmaschinenbau gespiegelt. Auf der Grundlage der identifizierten Defizite heutiger Gestaltungsansätze Schlanke Produktionssysteme wird das angestrebte Ergebnis der Arbeit in **Kapitel 3** detailliert dargestellt und die Forschungsansätze und -thesen erläutert, die zu einer Überwindung der in Kapitel 2 erkannten Probleme beitragen können. **Kapitel 4 bis 6** sind der Beschreibung der Vorgehensweise zur Prüfung der in Kapitel 3 formulierten Forschungsthesen gewidmet. In **Kapitel 7** findet sich schließlich die Operationalisierung der Forschungsergebnisse in einer Beschreibung der entwickelten Methode, welche durch ein Fallbeispiel ergänzt wird. Die Schlussbetrachtungen in **Kapitel 8** bieten letztlich eine Zusammenfassung und kritische Würdigung der erzielten Ergebnisse sowie einen Ausblick für weiterführende Arbeiten.

2. Stand der Forschung und Anwendung

In Folgendem soll der Stand der Forschung und Anwendung von Schlanken Produktionssystemen in der Montage von Werkzeugmaschinen dargestellt werden. Dazu wird zunächst der Begriff des Schlanken Produktionssystems definiert und eingeordnet. Darauf aufbauend werden Ansätze zur Gestaltung Schlanker Produktionssysteme beleuchtet und hinsichtlich der Erfüllung aktueller industrieller Anforderungen bewertet. Schließlich wird diese Bewertung branchenspezifisch für den Werkzeugmaschinenbau vorgenommen und die Bedeutung der Schlanken Produktion vor dem Hintergrund der aktuellen Herausforderungen der Branche skizziert.

2.1 Schlanke Produktionssysteme

2.1.1 Definition „Produktion“ und „Produktionssysteme“

Produktion kann allgemein als Wertschöpfungsprozess verstanden werden, welcher der Kombination und Transformation von Produktionsfaktoren zur Leistungserstellung im Rahmen eines Input-Troughput-Output-Prozesses dient.⁵ Produktionssysteme bestimmen in diesem Zusammenhang den infrastrukturellen Rahmen der Transformation von Produktionsfaktoren, also die Art und Weise der Faktortransformation (siehe Bild 2).⁶

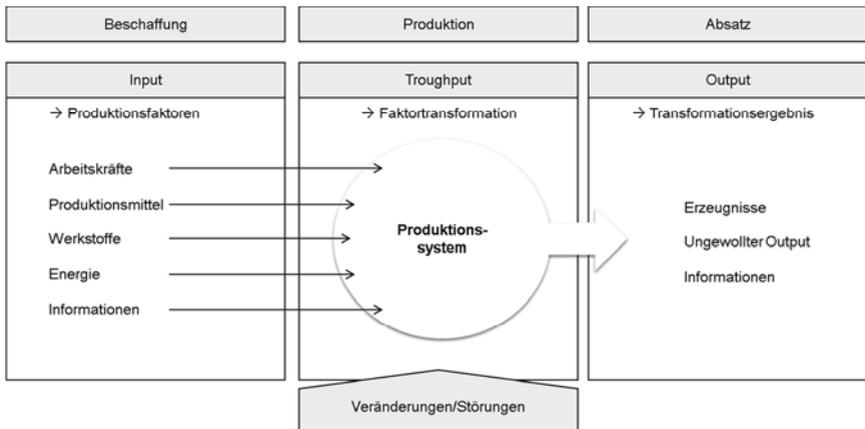


Bild 2: Makrostruktur des Produktionsprozesses⁷

⁵ vgl. Günther, Tempelmeier (2009).
 vgl. Dyckhoff (2006).
 vgl. Kiener, Maier-Scheubeck (2002).

⁶ vgl. Steven (2007).
 vgl. Nebl (2004).

⁷ in Anlehnung an Nebl (2004).

Produktionssysteme können als zielorientierte, soziotechnische, offene und dynamische Systeme verstanden werden:⁸

- Zielorientiert: Produktionssysteme sind kein Selbstzweck, sie sollen die Umsetzung der Unternehmensziele auf Produktionsebene ermöglichen.
- Soziotechnisch: Produktionssysteme stellen die Erreichung der Unternehmensziele durch den integrierten Einsatz von technischen Systemen und Mitarbeitern sicher.
- Offen: Produktionssysteme stehen in ständiger Interaktion mit der Systemumwelt, d.h. sie sind ständig Änderungen der Umwelt und Störungen ausgesetzt.
- Dynamisch: Die regelmäßige Anpassung des Produktionssystems zur Sicherstellung der Zielerreichung ist aufgrund der Offenheit erforderlich.

Jedes produzierende Unternehmen verfügt über ein Produktionssystem, aber nicht jedes produzierende Unternehmen analysiert und gestaltet bewusst die Produktion als System. Getrieben auf der einen Seite durch den zunehmend globalen Wettbewerb und den damit einhergehenden Kostendruck sowie auf der anderen Seite durch eine steigende Variantenvielfalt und die Komplexität der Produktion besteht für produzierende Unternehmen in Deutschland ein zunehmender Druck zur systematischen Sichtweise auf die Produktion.⁹

2.1.2 Definition und Abgrenzung „Schlanke Produktionssysteme“

Ein einheitliches Begriffsverständnis oder gar eine allgemein akzeptierte Definition schlanker Produktionssysteme besteht trotz deren Einführung in vielen Unternehmen weder in der Praxis noch in der wissenschaftlichen Literatur.¹⁰ Die Begriffsvielfalt wie „Ganzheitliche Produktionssysteme (GPS)“ oder „Toyota Produktionssystem (TPS)“ ist insbesondere in der Praxis enorm, adressiert im Kern jedoch immer „Schlanke Produktionssysteme“ und „Schlanke Produktion“.

Spath definiert Schlanke Produktionssysteme als methodische Regelwerke und Handlungsanleitungen zur Herstellung von Produkten.¹¹ Er begreift Schlanke Produktionssysteme als ganzheitlich und in diesem Zusammenhang als umfassend, durchgängig, bruchlos und alle Produktionsaspekte berücksichtigend. Ähnlich versteht die Deutsche MTM-Vereinigung darunter ein dynamisches Netzwerk von Methoden und Werkzeugen zur Planung, zum Betrieb und zur permanenten Verbesserung von Geschäftsprozessen, das von Menschen unter hoher Mitverantwortung betrieben wird.¹² Dombrowski definiert den Begriff auf Basis einer durchgeführten Untersuchung von Schlanke Produktions-

⁸ vgl. Petersen (2005).

⁹ vgl. Hoeschen (2007).

¹⁰ vgl. Hinrichsen (2002).

vgl. Dombrowski (2006).

¹¹ vgl. Spath (2003).

¹² vgl. MTM (2001).

systemen in Unternehmen sowie der Sichtung einschlägiger Literatur als ein unternehmensspezifisches, methodisches Regelwerk zur umfassenden und durchgängigen Gestaltung der Produktion.¹³

Allen Definitionen ist gemein, dass mit schlanken Produktionssystemen bewusst und fortlaufend der Produktionsprozess gestaltet werden soll durch die Anwendung von aufeinander abgestimmten Methoden. Methoden können in diesem Zusammenhang verstanden werden als „planmäßig angewandte, begründete Vorgehensweisen zur Erreichung von festgelegten Zielen im Rahmen festgelegter Prinzipien“¹⁴. Prinzipien sind wiederum Grundsätze, die man seinem Handeln zugrunde legt.¹⁵

In Bild 3 sind häufig in der Literatur genannte Methoden und Prinzipien der Schlanke Produktion (siehe auch Anlage A) den Gestaltungsfeldern und Subsystemen von klassischen Produktionssystemen (entsprechend 2.1.1) zugeordnet.¹⁶

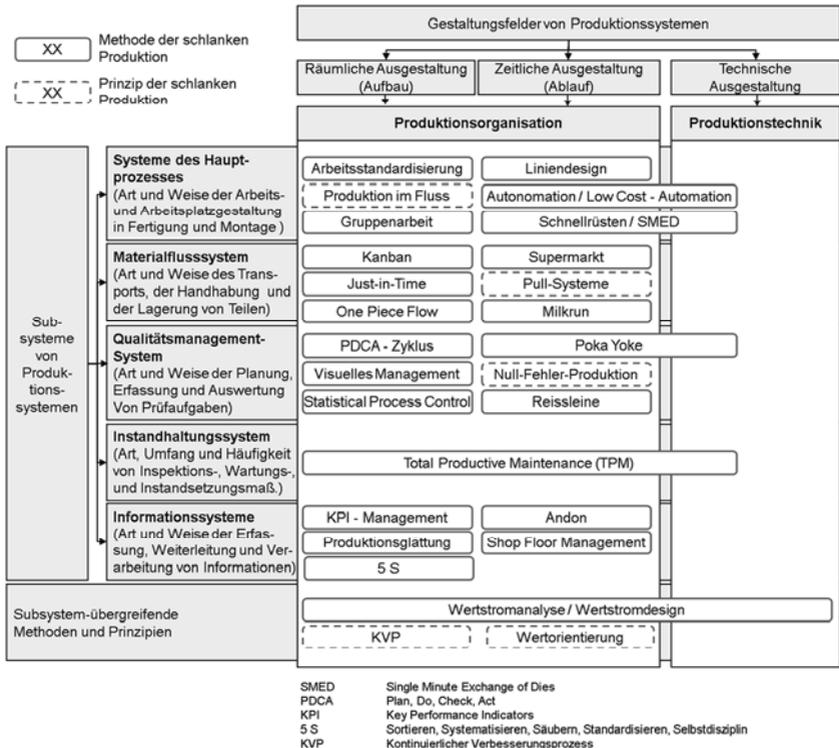


Bild 3: Methoden und Prinzipien der Schlanke Produktion als Gestaltungsinstrument von Produktionssystemen¹⁷

¹³ vgl. Dombrowski (2006).

¹⁴ vgl. Hesse, Merbeth, Frölich, Endres (1992).

¹⁵ vgl. Hesse, Merbeth, Frölich, Endres (1992).

¹⁶ vgl. Baszenski, Pierson (2003).

Wie in Bild 3 ersichtlich, gestalten die Methoden der Schlanke Produktion alle elementaren Subsysteme von Produktionssystemen. Der Fokus der Methoden liegt jedoch eindeutig auf der organisatorischen Gestaltung von Produktionssystemen, d.h. den räumlichen und zeitlichen Aspekten des Produktionsprozesses. Zwar werden auch vereinzelt technische Aspekte durch manche der zum Einsatz kommenden Methoden adressiert, z.B. die Nutzung einfacher technischer Hilfsmittel wie Negativschablonen zur leichten Fehlererkennung in der Methode „Poka Yoke“, jedoch deckt das nur einen Bruchteil der technischen Auslegung von klassischen Produktionssystemen ab. Insofern kann die Verwendung des Wortes Produktionssystem im Begriff „Schlankes Produktionssystem“ irritieren, da die Produktionstechnik von Produktionssystemen zwar analytisch im Rahmen von Wertstromanalysen berücksichtigt (z.B. in Form der verfügbaren Maschinenkapazität) aber nicht umfassend gestaltet wird (z.B. Verfahrensentwicklung, Maschinenauswahl, Inbetriebnahme usw.). In dieser Arbeit wird in diesem Sinne deshalb unter Schlanke Produktion ein **system- und methodenorientiertes Konzept zur kontinuierlichen Gestaltung der Produktionsorganisation** verstanden. Schlanke Produktionssysteme sind in diesem Zusammenhang das Ergebnis dieses Gestaltungsprozesses.

2.1.3 Ziel und Aufbau Schlanke Produktionssysteme

Trotz der Vielfalt unternehmensspezifischer Ausprägungen Schlanke Produktionssysteme kann ein zugrundeliegender modularer und hierarchischer Basisaufbau identifiziert werden.¹⁸ Die Methoden der Schlanke Produktion (im weiteren „Methoden“) sind die zentralen Bausteine eines jeden Schlanke Produktionssystems. Durch deren Einbettung in ein Gesamtsystem können negative Auswirkungen aufgrund eines unkoordinierten Methodeneinsatzes mit teilweise konkurrierenden Zielen vermieden und Synergien realisiert werden.¹⁹ In Bild 4 findet sich der Basisaufbau von Produktionssystemen. Das allgemeine Ziel jeder Produktion ist die Herstellung definierter Güter in der erforderlichen Qualität, innerhalb der vorgegebenen Durchlaufzeit und zu minimalen Kosten. Unter anderem wird in der produktionswissenschaftlichen Literatur durch ein „magisches Dreieck“ die Gegenläufigkeit dieser Ziele beschrieben und auf die Problematik der gleichzeitigen Verbesserung aller genannten Produktionsziele verwiesen.²⁰ Schlanke Produktionssysteme sollen durch die konsequente Ausrichtung auf Wertschöpfung und dem Streben nach Elimination nicht wertschöpfender Tätigkeiten diesen Zielkonflikt auflösen und zu einer simultanen Verbesserung aller Produktionsziele führen.²¹ Als nicht wertschöpfende Tätigkeiten bzw. Verschwendungen gelten Wartezeiten, Überproduktion, Transport, Bestände, Nacharbeit, Prozessübererfüllung und unnötige Bewegungen.²²

¹⁷ Gestaltungsfelder und Subsysteme in Anlehnung an Nebel (2004).

¹⁸ vgl. Ganzheitlich produzieren (2003).

vgl. Dombrowski, Palluck, Schmidt (2006).

vgl. Deuse, Stausberg, Wischniewski (2007).

¹⁹ vgl. Aurich, Drews, Fuchs, Wagenknecht (2006).

vgl. Dombrowski (2006).

²⁰ vgl. Kletti, Schumacher (2011).

vgl. Zahn (1993).

²¹ vgl. Erlach (2007).

vgl. Mittelhuber, Kallmeyer (2002).

²² vgl. Womack, Jones, Roos (1991).

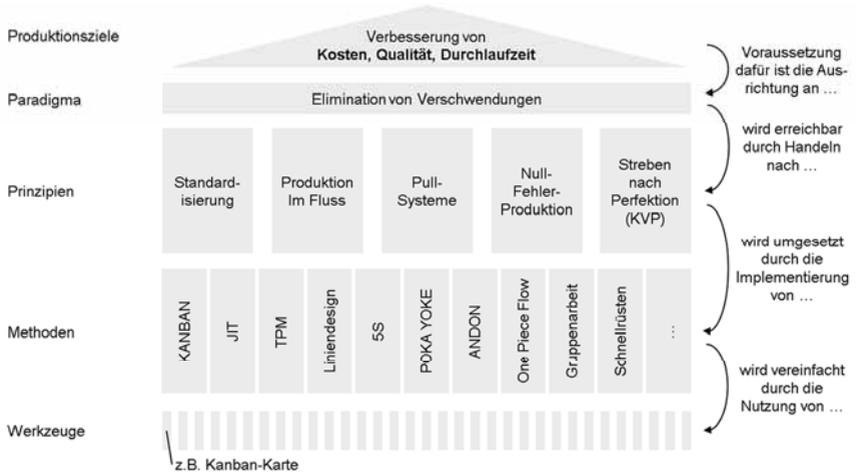


Bild 4: Basisaufbau von Schlanke Produktionssystemen²³

Zu Vermeidung von Verschwendungen in der Produktion lassen sich vielfältige Prinzipien identifizieren, die unternehmensspezifisch stärker oder schwächer betont werden. Die zentralen, weil originären und häufig in Schlanke Produktionssystemen genutzten Prinzipien sind folgend kurz dargestellt.²⁴

- Standardisierung:** Alle Prozesse in einem Produktionssystem sind hinsichtlich der Art und Weise der Ausführung definiert und dokumentiert. Dadurch können u.a. die Prozesszeiten und -qualität stabilisiert werden. Zudem dienen Standards als Multiplikator für Verbesserungen in anderen Unternehmensbereichen.
- Produktion im Fluss:** Alle Werkstoffe, Baugruppen und Zwischenprodukte im Produktionssystem sollen unterbrechungsfrei den Produktionsprozess durchlaufen. Der Einzelstückfluss ohne Zwischenlager ist das Ideal der Schlanke Produktion.
- Pull – Systeme:** Alle Prozesse im Produktionssystem sollen nachfrageorientiert ausgelöst werden. Einzig der konkrete oder abgeleitete Bedarf aus Kundensicht ist die Legitimation für den Anstoß eines Produktions- oder Logistikprozesses.

²³ in Anlehnung an Dombrowski, Lechnitz, Hanke (2008).

²⁴ in Anlehnung an Frei, Hugentobler, Alioth, Duell, Ruch (1996).
in Anlehnung an Womack, Jones, Roos (1991).
in Anlehnung an Becker (2008).
in Anlehnung an Zülch (1994).

Null – Fehler – Produktion: Alle Prozesse im Produktionssystem sollen so gestaltet sein, dass jegliche Quellen für Qualitätsmängel vermieden oder identifiziert, erfasst, ausgewertet und nachhaltig abgestellt werden können.

Streben nach Perfektion: Alle Prozesse im Produktionssystem werden systematisch und regelmäßig hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Verschwendungen überprüft und verbessert.

Die Umsetzung dieser Prinzipien in Schlanken Produktionssystemen wird operationalisiert durch den Einsatz der Methoden der Schlanken Produktion für bestimmte Prozesse oder Bereiche eines Produktionssystems (Beispiele siehe Bild 3). Die in sich selbstständigen Methoden werden wiederum durch Werkzeuge ergänzt, welche die Methodenimplementierung unterstützen.²⁵

2.1.4 Entwicklung Schlanker Produktionssysteme

Schlank Produktionssysteme sind das Ergebnis eines kontinuierlichen Entwicklungsprozesses von Produktionssystemen, der durch ständige Anpassungsprozesse an die dynamische Unternehmensumwelt gekennzeichnet ist. So können mit Beginn des 20. Jahrhunderts drei grundlegende Arten von Produktionssystemen unterschieden werden (siehe auch Bild 5).²⁶

1. Handwerkliche Produktion

Die handwerkliche Produktion ist durch eine lokale bzw. dezentrale Marktversorgung und kundenspezifische Auftragsabwicklung gekennzeichnet. Die Arbeitskraft führt zumeist den kompletten Produktionsprozess eigenständig durch, der Grad der Arbeitsteilung ist gering und die Anforderungen an die Qualifikation der Arbeitskraft sehr hoch. Der Hauptnachteil dieser Produktionssysteme sind die vergleichsweise sehr hohen Produktionskosten.

2. „Klassische“ industrielle Produktion

Eine rasante Zunahme technischer Neuerungen in der Produktion und die Verbesserung der logistischen Infrastruktur führten schon im 19. Jahrhundert zu ersten Fabriken, z.B. in der Textil- und Rüstungsindustrie. Eine flächendeckende Ausdehnung fanden Fabriken erst Anfang des 20. Jahrhunderts mit der Verbreitung von Werkzeugmaschinen. Die verwendeten Produktionssysteme sind durch eine zentrale Produktion mit hoher Stückzahl bei gleichzeitig hoher Spezialisierung der Arbeitskräfte und meist durch die Herstellung uniformer bzw. variantenarmer Produkte zu sehr geringen Produktionskosten gekennzeichnet. Zunehmende Standardisierung und Automatisierung waren die Schrittmacher zur Befriedigung des bestehenden Nachfrageüberhangs bis zu den 70ern des 20. Jahrhunderts.

²⁵ in Anlehnung an Dombrowski, Lechnitz, Hanke (2008).

²⁶ vgl. Dombrowski, Hennersdorf, Schmidt (2006).

3. Schlanke Produktion

Es waren die japanischen markt- und unternehmensspezifischen Randbedingungen (hohe Produktvielfalt, schlechte Finanzsituation, starke Marktsegmentierung) für den Automobilhersteller Toyota, die eine Anlehnung des eingesetzten Produktionssystems an westliche Vorbilder der „klassischen“ industriellen Produktion verhinderten. Toyota setzte darum Produktionssysteme ein, die sich durch eine hohe Arbeitsteilung in Verbindung mit hoher Flexibilität und einer strikten Wertschöpfungsorientierung auszeichnen. Solche Produktionssysteme bildeten einen Kompromiss zwischen der flexiblen handwerklichen Produktion und der kostengünstigen industriellen Produktion.

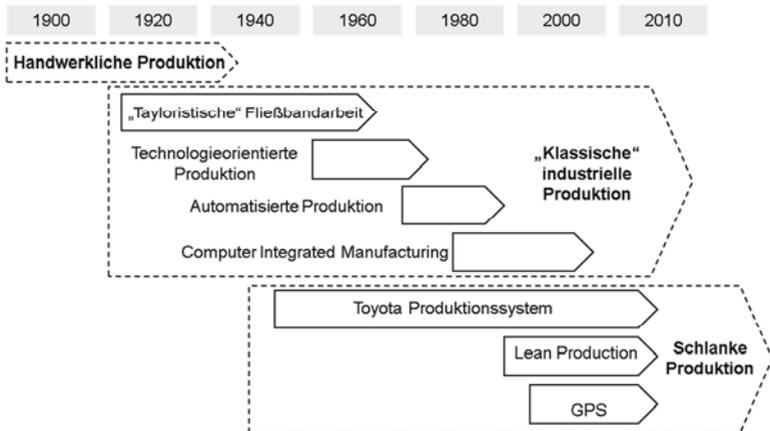


Bild 5: Gestaltung von Produktionssystemen im Wandel der Zeit²⁷

Heute finden sich alle der beschriebenen Produktionssysteme noch im Einsatz, wenn auch mit stark unterschiedlicher Verbreitung zu Gunsten der „klassischen“ industriellen Produktion. Bemerkenswert ist jedoch die zunehmende Verschiebung des Anteils der „klassischen“ industriellen Produktion hin zur Schlanke Produktion in Verbindung mit der Änderung der Randbedingungen vom Nachfrageüberhang zum Angebotsüberhang vieler Märkte am Ende des 20. Jahrhunderts. Die dadurch zunehmende Kundenindividualität und geforderte Mengen- und Variantenflexibilität führte die Vorteile Schlanker Produktionssysteme deutlich zu Tage. Ausgehend von Studien des Massachusetts Institute of Technology (MIT)²⁸ Anfang der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts finden Schlanke Produktionssysteme deswegen bis heute immer mehr Verbreitung.²⁹ Der daraus entwickelte Ansatz der „Lean Production“ orientierte sich an den Best Practices japanischer Hersteller, allen voran dem Toyota Produktionssystem und fand gerade im Automobilbe-

²⁷ vgl. Dombrowski, Hennersdorf, Schmidt (2006).

²⁸ vgl. Womack, Jones, Roos (1991).

²⁹ vgl. Barth (2005).

vgl. Kluge (2009).

vgl. Lanza, Peter, Ude (2008).

reich sehr viele Anwender. Um den langfristigen Erfolg der Optimierungsanstrengungen sicherzustellen, gingen Unternehmen dazu über, statt einzelner Rationalisierungsprojekte eine systematische Einführung ausgewählter und aufeinander abgestimmter Methoden im Rahmen eines „Ganzheitlichen Produktionssystems“ (GPS) vorzunehmen.³⁰

2.1.5 Verbreitung Schlanker Produktionssysteme

Schlank Produktionssysteme haben ihren Ursprung im Automobilbau. Auch mehr als 20 Jahre nach Veröffentlichung der ersten Ideen zur „Schlanken Produktion“ ist diese Herkunft an der Branchendurchdringung Schlanker Produktionssysteme ersichtlich. Bereits 2003 zeigte Becker die Schiefe Lage beim Einsatz Schlanker Produktion nach verschiedenen Branchen und Fertigungsarten (siehe Bild 6). So fanden sich vor einigen Jahren Schlank Produktionssysteme vornehmlich in der Großserienproduktion in großen Unternehmen des Fahrzeug- und Maschinenbaus.

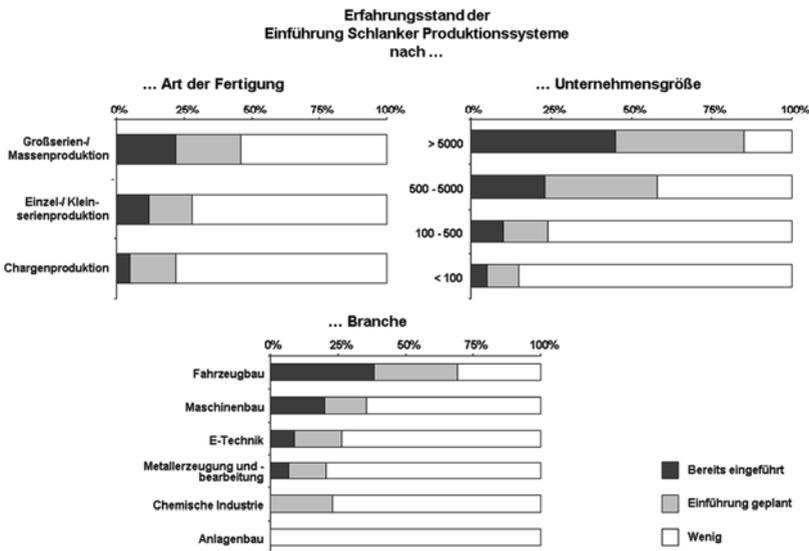


Bild 6: Verbreitungsprofil Schlanker Produktionssysteme³¹

In der Klein- und Mittelserie waren Schlank Produktionssysteme nur selten zu finden, in diese Unternehmenskategorie entfallen jedoch über 99% aller europäischen Unternehmen.³² Aktuelle Studien zeigen eine allgemeine Zunahme des Einsatzes Schlanker Produktionssysteme in allen Unternehmensgruppen, jedoch ist die Schiefe Lage weiterhin deutlich ausgeprägt.³³ So beträgt 2010 der Anteil der Nutzer Schlanker Produktionssys-

³⁰ vgl. Dombrowski, Hennersdorf, Schmidt (2006)

vgl. Hinrichsen (2002)

³¹ vgl. Becker, Korge, Scholtz (2003)

³² vgl. IFM (2010)

³³ vgl. Hämmerle, Rally (2010)

teme bei „Fließfertigern“ ca. 71 % und bei „Unternehmen über 5000 Mitarbeitern“ ca. 82 %. Die Nutzung Schlanker Produktionssysteme bei „Einzel- und Kleinserienfertigern“ ist mit 43 % oder bei „Unternehmen unter 1000 Mitarbeitern“ mit 50 % jedoch immer noch deutlich niedriger.³⁴

KMU sehen sich offensichtlich Hindernissen ausgesetzt beim Einsatz Schlanker Produktionssysteme (nähere Erläuterungen in Kapitel 2.2.3). Aufbauend auf diesen und anderen Studien haben deshalb verschiedene Forscher unabhängig voneinander die Notwendigkeit zur Beforschung der Thematik „Schlanke Produktionssysteme für KMU“ erkannt.³⁵

2.2 Gestaltung Schlanker Produktionssysteme in der Endmontage von KMU

Schlanke Produktion umfasst mittlerweile eine Vielzahl verschiedener funktionaler Einsatzbereiche von Unternehmen, so z.B. lean administration, lean development, lean management und lean logistics.³⁶ Im folgenden Kapitel sollen darum zunächst die Grenzen des Untersuchungsgegenstands der vorliegenden Arbeit, die Endmontage, formuliert werden. Danach wird auf die Gestaltung Schlanker Produktionssysteme für die Endmontage eingegangen und Schwachpunkte dieses Gestaltungsprozesses für den Einsatz bei KMU herausgearbeitet. Schließlich werden daraus allgemeine Anforderungen an einen Gestaltungsprozess Schlanker Produktionssysteme für KMU abgeleitet und verschiedene aktuelle Ansätze zur Gestaltung von Produktionssystemen für KMU daran gespiegelt.

2.2.1 Definition und Einordnung Endmontage

Als Montage wird der Zusammenbau von Teilen und/oder Baugruppen zu Zwischenerzeugnissen (Vormontage) oder Enderzeugnissen (Endmontage) im Produktionsprozess verstanden.³⁷ In der Montage kommen dazu vornehmlich Vorgänge des Fügens (DIN 8593), der Handhabung von Werkstücken (VDI-Richtlinie 2860), des Kontrollierens (VDI-Richtlinie 2860) und des Justierens (DIN 8580) zum Einsatz.³⁸

Die Montage ist damit ein technologisch bestimmter Produktionsprozess, der durch Transformation von Produktionsfaktoren mittels Fügen, Handhaben, Kontrollieren und Justieren zur Herstellung von Erzeugnissen dient. Wie in jedem Produktionsprozess bildet auch hier ein entsprechendes Produktionssystem den infrastrukturellen Rahmen der Montage. Zuweilen wird das Produktionssystem der Montage auch als Montagesystem bezeichnet.³⁹ In Folgendem soll jedoch aufgrund der begrifflichen Nähe zum „Schlanken Produktionssystem“ der Begriff „Produktionssystem“ verwendet werden.

Die meisten Produktionsprozesse in Deutschland sind aufgrund des großen Anteils der Produktion komplexer Erzeugnisse in Automobil- und Maschinenbau diskret und mehrstufig. Bei dieser Art von Produktionsprozessen findet sich fast immer eine Endmontage,

³⁴ vgl. Hämmerle, Rally (2010).

³⁵ vgl. Lay, Neuhaus (2005).

vgl. Dombrowski, Quack (2007).

vgl. Aurich, Drews, Fuchs, Wagenknecht (2006).

³⁶ vgl. Ullmann (2010).

³⁷ vgl. VDI 2815, 2860 (1978).

³⁸ vgl. Lotter, Wiendahl (2006).

³⁹ vgl. Kratzsch (2000).

der eine oder mehrere Teilefertigungen oder Vormontagen vorgelagert sein können. Gibt es eine Endmontage, ist diese oft die letzte materielle Wertschöpfungsstufe im Produktionsprozess, auf die der Versand des Erzeugnisses an den Kunden und/oder die Erbringung von Dienstleistungen, wie z.B. die Prozessauslegung bei Produktionsmitteln, steht. Bild 7 zeigt beispielhaft die Einordnung der Endmontage in einen mehrstufigen, diskreten Produktionsprozess sowie relevante Beziehungen zu vorgelagerten, nachgelagerten und übergeordneten Prozessen.

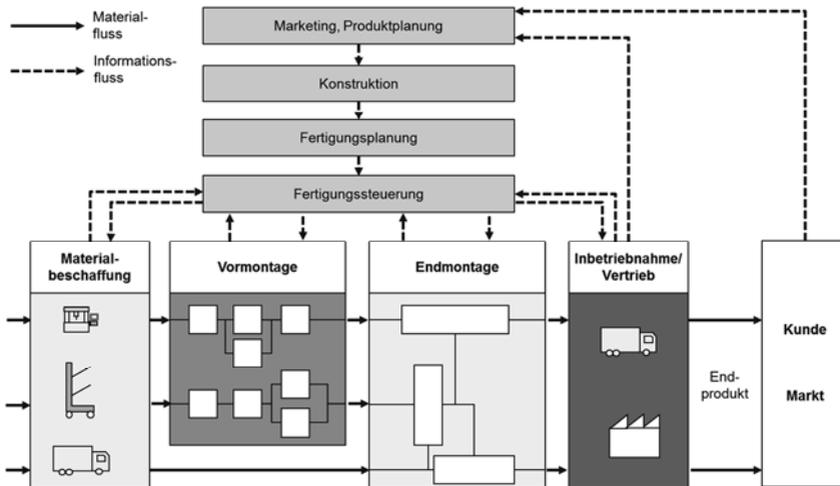


Bild 7: Einordnung und Schnittstellen der Endmontage im Produktionsprozess⁴⁰

Die unmittelbare zeitliche Nähe des Montageprozesses und der Auslieferung an den Kunden führt in der Schlanke Produktion durch zunehmende Kundenorientierung zu einer hohen Priorität bei der Effizienz der Endmontage. So ist die Endmontage der letztmögliche Produktionsschritt, um noch Einfluss z.B. auf die Produktqualität und die Termintreue auszuüben und deren Gewährleistung sicherzustellen. Ein Großteil der Methoden der Schlanke Produktion hat deswegen seinen Ursprung in der Montage, findet heute vorwiegend in der Vor- und Endmontage Anwendung und ist nur bedingt auf andere Bereiche, wie z.B. die Teilefertigung, übertragbar. Im Rahmen dieser Arbeit fällt die Auslegung des Produktionsprozesses, ggf. Dauerlauf und Inbetriebnahme der Werkzeugmaschinen nicht in den Untersuchungsbereich der Ausarbeitung.

2.2.2 Gestaltung Schlanke Produktionssysteme

Die Gestalt wird in der Organisationslehre als äußere Form oder Konfiguration verstanden, in der sich Elemente und deren Beziehungen zueinander widerspiegeln.⁴¹ Die Gestaltung kann in diesem Zusammenhang als zielgerichtete Zusammenführung definierter

⁴⁰ vgl. Willnecker (2000).

⁴¹ vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2009).

Elemente verstanden werden.⁴² Der Gestaltungsprozess von Schlanken Produktionssystemen umfasst demnach die Auswahl der einzelnen Methoden und Werkzeuge zur Gestaltung eines Schlanken Produktionssystems und leistet somit einen wesentlichen Beitrag zur erfolgreichen Implementierung von Schlanken Produktionssystemen.

Die Charakteristik des Gestaltungsprozesses Schlanker Produktionssysteme ist stark beeinflusst durch das jeweilige Anwendungsgebiet der Schlanken Produktion. Wie bereits beschrieben, gibt es mittlerweile eine Vielzahl unterschiedlicher Einsatzbereiche für Schlanke Produktion. Der Gestaltungsprozess Schlanker Produktionssysteme für die Endmontage muss deshalb auch die Charakteristik der Endmontage als Teilprozess der Produktion berücksichtigen (siehe Bild 8). So ist diese gekennzeichnet durch häufige, repetitive Prozesse mit einem relativ kleinen Spielraum zur Kostenfestlegung. Dieses originäre und namensstiftende Anwendungsgebiet der Schlanken Produktion fällt damit in den Bereich der kontinuierlichen, evolutionären Optimierung neben vielen anderen Konzepten, wie Total Quality Management oder Six Sigma.

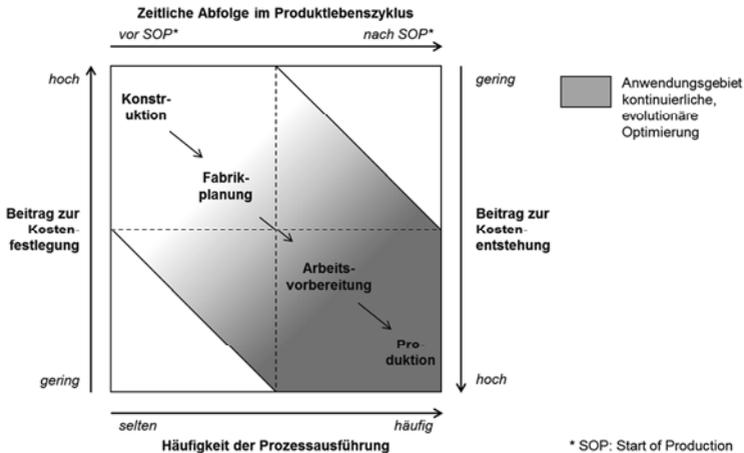


Bild 8: Charakterisierung der Produktion als Unternehmensprozess und Einordnung des Anwendungsgebiets der Produktionsoptimierung

Allen diesen Konzepten ist gemein, dass sie relativ häufig bzw. kontinuierlich eine systematische Analyse der Produktion, eines Produktionsbereichs oder eines spezifischen Produktionsproblems voranstellen, um daraus Lösungen zur Optimierung abzuleiten. Die dabei entwickelten Lösungen stellen für den Einzelprozess eher evolutionäre Verbesserungen relativ geringen Effekts dar, die jedoch durch die Häufigkeit der Prozessauführung und durch die regelmäßige Wiederholung des Evolutionszyklus erhebliche positive Auswirkungen auf die Erreichung der Optimierungsziele haben können. Wie bei jeder Produktionsoptimierung muss auch bei der Schlanken Produktion zur erfolgreichen Implementierung der Verbesserungen der Gestaltungsprozess um einen Umsetzungsprozess ergänzt werden (siehe Bild 9).

⁴² vgl. Günter (1995).

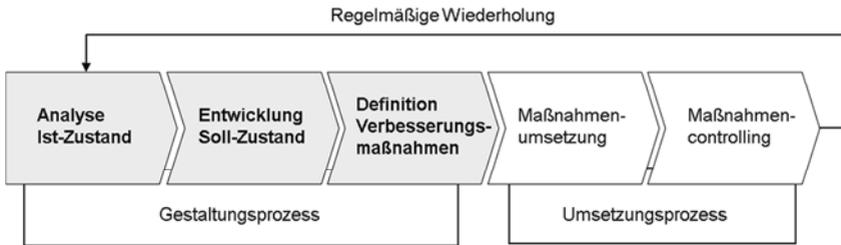


Bild 9: Prozess der Gestaltung und Umsetzung von Schlanken Produktionssystemen⁴³

Der Gestaltungsprozess dient der Konzeption des Produktionssystems, der Umsetzungsprozess ist auf die nachhaltige Integration des Konzepts in die bestehende Organisation fokussiert. Während sich der Umsetzungsprozess zwischen den verschiedenen Konzepten der Produktionsoptimierung ähnelt, zeichnet sich der Konfigurationsprozess in der Schlanken Produktion durch zwei Besonderheiten aus: Der holistischen, prozesszentrierten Betrachtung der Produktion in Wertströmen und der Orientierung an einem Soll-Zustand. Als zentrale Methoden dieser Gestaltung gelten in diesem Zusammenhang die Wertstromanalyse und das Wertstromdesign. Ein Wertstrom umfasst alle wertschöpfenden und nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten, die zur Produktion eines Erzeugnisses notwendig sind.⁴⁴ Die Entwicklung des Soll-Zustands (Wertstromdesign) erfolgt durch Anpassung des Ist-Wertstroms, als Ergebnis der Ist-Analyse (Wertstromanalyse), durch die schrittweise konzeptionelle Umgestaltung des Produktionssystems nach den Prinzipien und Methoden der Schlanken Produktion. Beschränkungen der Eignung von diesen Prinzipien und Methoden der Schlanken Produktion limitieren auch das Anwendungsfeld für Schlanke Produktion.

2.2.3 Herausforderungen bei der Implementierung Schlanker Produktionssysteme für KMU

Die in Kapitel 2.1.5 dargestellte Schiefelage bei der Verbreitung Schlanker Produktionssysteme in KMU wird in praxisorientierten Studien und in der wissenschaftlichen Diskussion immer wieder auf den gescheiterten Gestaltungs- und Umsetzungsprozess Schlanker Produktionssysteme zurückgeführt. Nachfolgend sollen die kritischen Anforderungen an diese Prozesse für die Endmontage in KMU in drei Kategorien dargestellt werden:

1. Kritische Anforderungen an den Gestaltungsprozess

- **Ganzheitliche** Betrachtung aller Gestaltungsfelder
Ein wesentlicher Erfolgsfaktor und Merkmal der Einführung eines Produktionssystems ist die ganzheitliche und vernetzte Sicht der einzelnen Methoden untereinander.⁴⁵ Zwar zeigen Studien, dass das Aktivitätsniveau zur Anwendung in-

⁴³ in Anlehnung an Wildemann, Baumgärtner (2006).

⁴⁴ vgl. Rother, Shook, Wiegand (2006).

⁴⁵ vgl. Zäh, Aull (2006).

novativer Methoden der Organisation und Unternehmensführung bei KMUs durchaus ausgeprägt ist. Die sukzessive Einführung einzelner, zum Teil willkürlich ausgewählter Methoden ohne gleichzeitige Einordnung in einen strukturgebenden Rahmen kann aber zu unbefriedigenden Nutzenpotentialen durch Entstehung von Insellösungen führen.⁴⁶ Eine Anforderung ist es deshalb, die **ganzheitliche Abstimmung der Methoden** zu forcieren.⁴⁷

- **Geringer Aufwand** des Gestaltungsprozesses
Der Know-how-Aufbau zur Erlangung eines umfassenden Überblicks über alle relevanten Methoden und Prinzipien Schlanker Produktionssysteme, um anschließend eine spezifische Konfiguration treffen zu können, fällt KMU aus finanziellen und personellen Gründen schwer.⁴⁸ Daher besteht für KMU die Anforderung eines **einfachen, verständlichen und aufwandsarmen Prozesses** zur Gestaltung Schlanker Produktionssysteme.

2. Kritische Anforderungen an das Gestaltungsergebnis (Soll-Zustand)

- Eignung des Produktionssystems für die betrachtete **Branche**
Durch die Entwicklung von Schlanken Produktionssystemen ausgehend vom Automobilbau besitzen auch die originären Methoden und Prinzipien eine entsprechende Branchenprägung. Somit ist deren Übertragung auf andere Branchen nicht in jedem Fall sinnvoll und umsetzbar.⁴⁹ Schließlich ist das Toyota Produktionssystem selbst eine Referenz für die Konfiguration ganzheitlicher Produktionssysteme im Automobilbau, die mit abnehmender Ähnlichkeit der Branchen- und Rahmenbedingungen immer weniger Orientierungsmöglichkeit bietet. Es fehlen **branchenspezifische Orientierungshilfen** für Schlanke Produktionssysteme.
- Eignung des Produktionssystems für **Rahmenbedingungen von KMU**
Bei Großserienfertigern erfolgreich eingeführte Methoden sind nicht unangepasst auf KMUs übertragbar. Hier sind andersartige Rahmenbedingungen für Produktion und damit andere Anforderungen an die Prozesse zu berücksichtigen.⁵⁰ Ursachen für typische Unterschiede in der Kleinserienproduktion stellen die höhere Produktvielfalt, kleinere Stückzahlen, größere Abweichungen der Bearbeitungsumfänge, stärkere Nachfrageschwankungen, eine höhere Fertigungstiefe und verhältnismäßig geringe Ressourcenkapazitäten dar.⁵¹ Eine wesentliche Anforderung ist deshalb die **einsatzspezifische Gestaltung** des Produktionssystems.

⁴⁶ vgl. Zäh, Aull (2006).

vgl. Lay, Zanker (2008).

⁴⁷ vgl. Lay, Zanker (2008).

⁴⁸ vgl. Lay, Zanker (2008).

vgl. Lay, Neuhaus (2005).

⁴⁹ vgl. Zäh, Aull (2006).

⁵⁰ vgl. Fleischer, Lanza, Peter (2008).

⁵¹ vgl. Aurich, Drews, Fuchs, Wagenknecht (2006).

vgl. Schuh, Gottschalk, Gulden, Koch (2007).

3. Kritische Anforderungen ab den Umsetzungsprozess

- Motivation und Qualifikation** der Mitarbeiter für die Umsetzung
 Auf die besondere Bedeutung des Faktors Mensch ist speziell bei tiefgreifenden Veränderungen der Organisation, wie sie eine Einführung eines Schlanke Produktionssystems darstellt, hinzuweisen. Sie müssen in die Veränderung des Arbeitsumfelds eingebunden und mithilfe umfangreicher Maßnahmen wie Schulungen, Trainings und Workshops von der Notwendigkeit eines Schlanke Produktionssystems überzeugt werden. Neben den genannten Herausforderungen stellt die begrenzte Anzahl von Mitarbeitern, die sich mit der Implementierung Schlanke Produktionssysteme befassen können, ein Problem speziell für viele KMU dar.⁵² Die **Schaffung der Bereitschaft** zur Einführung von Schlanke Produktionssystemen spielt somit eine zentrale Rolle für den Erfolg der Einführung.

Dass diese insbesondere in der wissenschaftlichen Literatur diskutierten Anforderungen an die Implementierung Schlanke Produktionssysteme in KMU auch aus Sicht der Industrieunternehmen relevant sind, zeigen Unternehmensbefragungen wie von Kluge (siehe Bild 10).

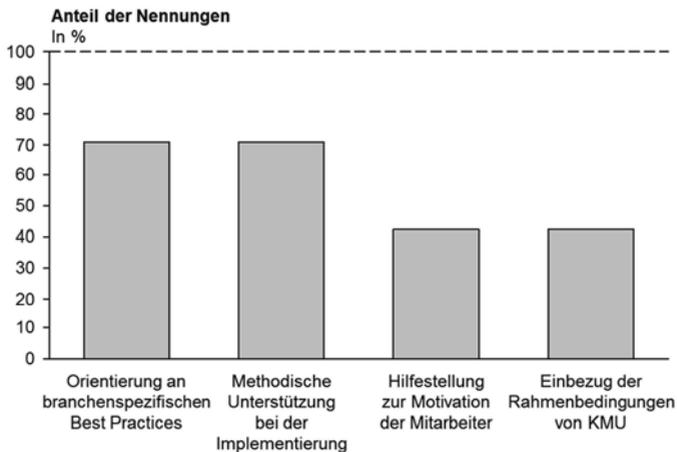


Bild 10: Prioritäre Maßnahmen zur Unterstützung der Implementierung Schlanke Produktionssysteme aus Unternehmenssicht⁵³

⁵² vgl. Kortmann, Uygun (2007).

⁵³ in Anlehnung an Kluge (2009).

2.2.4 Bestehende Ansätze zur Gestaltung Schlanker Produktionssysteme für KMU

Nachfolgend sollen verschiedene Ansätze zur Implementierung Schlanker Produktionssysteme aus der Wissenschaft und Anwendung skizziert und hinsichtlich ihrer Erfüllung der kritischen Anforderungen entsprechend des Kapitels 2.2.3 vergleichend gegenübergestellt werden.

2.2.4.1 Klassischer Ansatz

Mit der Feststellung der Überlegenheit von Produktionssystemen japanischer Hersteller, voran Toyota Anfang der 90er Jahre, erlangten die Prinzipien und Methoden der Schlanken Produktion großes Aufsehen.⁵⁴ Im Sinne eines klassischen Best-Practice-Vergleichs bestand der Gestaltungsprozess vornehmlich darin, die als erfolgversprechend identifizierten Methoden auf das eigene Unternehmen zu übertragen bzw. zu kopieren.⁵⁵ Die Spannweite reichte dabei von der Kopie einzelner Methoden bis hin zur Kopie des gesamten Toyota Produktionssystems. Die große Anzahl an gescheiterten Implementierungsversuchen der nachfolgenden zehn Jahre führte dazu, dass dieser „**Copy-Exactly**“-Ansatz heute kaum noch Anwendung findet. Vielmehr ist die Erkenntnis gereift, dass jedes Unternehmen ein Produktionssystem benötigt, das auf die individuellen Rahmenbedingungen des Unternehmens angepasst ist und dessen eingesetzte Methoden auch untereinander abgestimmt sind.⁵⁶

2.2.4.2 Moderne Ansätze

Die Konzepte des modernen Ansatzes der Implementierung von Schlanken Produktionssystemen greifen die Bestrebung der unternehmensspezifischen und ganzheitlichen Gestaltung Schlanker Produktionssysteme auf. Insbesondere gewinnen neben der organisatorischen Auslegung von Produktionssystemen immer mehr personelle Aspekte an Bedeutung.

Reinhart et al. schlagen ein Konzept vor, das vor allem auf die Einführungsreihenfolge und die Abhängigkeiten der verschiedenen Methoden fokussiert. Aus den Interdependenzen und Abhängigkeiten der Prinzipien, Methoden und Werkzeugen wird abhängig von der Größe des Einflusses einzelner Methoden auf das gesamte Produktionssystem sowie ihrer unterstützenden oder abhängigen Wirkung auf andere Methoden die zu wählende Implementierungsreihenfolge gewählt.⁵⁷ Die Methoden-basierten Abhängigkeitsgefüge sind sehr komplex, so dass die Unterstützung von Experten bei der Gestaltung des Produktionssystems notwendig ist.

Da statische Methodenzusammenstellung mit einem engem Fokus auf die Produktion den erhöhten Flexibilitätsanforderungen des Mittelstands nur bedingt gerecht werden, entwickelte **Aurich** ein Konzept zur Gestaltung und Einführung eines prozessorientierten

⁵⁴ vgl. Womack, Jones, Roos (1991).

⁵⁵ vgl. Dombrowski, Hennersdorf, Schmidt (2006).

⁵⁶ vgl. Lay, Zanker (2008).

vgl. Oeltjenbruns (2000).

⁵⁷ vgl. Reinhart, Zäh, Habicht, Neise (2003).

Produktionssysteme mit dem Fokus auf Flexibilität.⁵⁸ Im Vordergrund stehen im Rahmen dieses Konzepts vor allem die Nutzung unternehmensspezifischer Auswahl- und Anpassungsmöglichkeiten sowie die kontinuierliche Prüfung der Anwendbarkeit und Wirtschaftlichkeit der eingesetzten Methoden.⁵⁹ Voraussetzung für die Anwendung des Konzepts ist ein bestehendes Schlanke Produktionssystem.

Lay entwickelte im Projekt „Improve“ drei Instrumente zur ganzheitlichen Modernisierung von KMU: Das Improve-Cockpit stellt eine mit den vier Wettbewerbsfaktoren Kosten, Flexibilität, Qualität und Innovation kombinierte Balanced-Score-Card dar. Anhand der Improve-Beziehungslandkarte werden KMU bei der Aufdeckung von Zusammenhängen zwischen einzelnen verwirklichten oder geplanten Methoden unterstützt und in die Lage versetzt, Widersprüche und Zielkonflikte zwischen Methoden zu erkennen. Die Improve-Weiße-Felder-Suche dient schließlich zur Identifikation verfügbarer Managementkonzepte, Methoden und Instrumenten.⁶⁰ Das Konzept geht über die originären Ansätze der Schlanke Produktion hinaus. Der Aufwand zur Anwendung des Konzepts ist als hoch einzustufen, zudem fehlen branchenspezifische Orientierungsmöglichkeiten.

Deuse entwickelte ein Konzept zur Gestaltung von Produktionssystemen für KMU, das im Gegensatz zum typischen Aufbau von Produktionssystemen lediglich auf einfachen Gestaltungsleitsätzen aufbaut, deren Befolgung ohne ein Konstrukt aus Prinzipien und Methoden die Zielerreichung erlauben soll.⁶¹ Es wurden 15 Leitsätze formuliert, welche bei der Reorganisation von Produktionsprozessen Berücksichtigung finden sollten. Für die erfolgreiche Implementierung eines Produktionssystems wurde die Bedeutung der sechs Erfolgsfaktoren Mitarbeiter, (Unternehmens-)Führung, struktureller Aufbau des Produktionssystems, Umsetzungsmanagement, Kommunikation sowie Standardisierung hervorgehoben.⁶² Das Konzept ist einfach anwendbar, bietet aber lediglich auf einer abstrakten Ebene eine Orientierungsmöglichkeit, die für die praktische Anwendung operationalisiert werden muss.

Fleischer entwickelte ein Konzept, das auf die Quantifizierung der Wirkungszusammenhänge zwischen ausgewählten Methoden und den leistungsrelevanten Kennzahlen für unterschiedliche Typen der Kleinserienproduktion abzielt, um daraus Handlungsempfehlungen für den effizienten Einsatz von Methoden abzuleiten. Die Wirkzusammenhänge werden über Sensitivitätsanalysen auf Basis realer Unternehmensdaten abgeleitet. Aufgrund der Vielzahl von spezifischen Einflussfaktoren der Kleinserienfertigung werden Produktionssysteme in eine begrenzte Anzahl von charakteristischen Typen in der Praxis gruppiert, um trotz der Vielzahl an möglichen Ausprägungen dieser Faktoren nützliche Handlungsempfehlungen abzuleiten.⁶³ Die Typisierung der Kleinserienproduktion bietet eine einfache Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse. Der Lösungsraum des Konzepts ist allerdings auf die originären Methoden der Schlanke Produktion begrenzt.

⁵⁸ vgl. Aurich, Drews, Fuchs, Wagenknecht (2006).

⁵⁹ vgl. Aurich, Gomez K., Felipe A., Drews, Wagenknecht (2006).

⁶⁰ vgl. Lanza, Peter, Ude (2008).

⁶¹ vgl. Deuse, Stausberg, Wischniewski (2007).

⁶² vgl. Kortmann, Uygun (2007).

⁶³ vgl. Fleischer, Lanza, Peter (2008).

Die **MTM-Vereinigung e.V.** hat ebenfalls ein Konzept zur Konfiguration von Produktionssystemen entwickelt. Zunächst wird ein unternehmensspezifisches Zielsystem erzeugt, das Grundlage für die Auswahl von Methoden aus einem umfangreichen Methodenbaukasten mit über 80 Methoden ist.⁶⁴ Das Vorgehen steht für das Konzept der unternehmensindividuellen Produktionssystem-Konfiguration auf Basis der Einzelbewertung von Methoden und der späteren Zusammenführung zu einem Gesamtkonzept. Der Konfigurationsaufwand ist als hoch und Know-how-intensiv einzustufen, zudem ist ein eindeutiger KMU-Bezug nicht erkennbar.

Dombrowski unterscheidet zwischen der Neu- und Umplanung der Produktionssysteme und stellt diese insbesondere im Bezug zur Fabrikplanung dar.⁶⁵ Insbesondere die Systematisierung und Strukturierung praxisrelevanter Produktionssysteme stehen bei seinen Untersuchungen im Mittelpunkt. Ein KMU-spezifisches Konfigurationskonzept entwickelt Dombrowski nicht, ebenfalls ist die Systematisierung auf die originären Methoden der Schlanken Produktion begrenzt.

Wildemann schlägt die Zuordnung von Unternehmen zu bestimmten Typen von Unternehmensrahmenbedingungen vor, um basierend auf den Kriterien Systemkomplexität sowie dem Maß der Systemveränderung differenzierte Handlungsempfehlungen für die Einführung von Produktionssystemen zu geben. Die anschließende Einführung eines neuen Produktionssystems wird in ein sechs Phasenmodell gegliedert, welches als iterativer, zyklischer Prozess der Produktionssystemgestaltung mit Rekursionen und Verzweigungen von jeder Phase zu anderen Phasen zu verstehen ist.⁶⁶ Der Schwerpunkt des Konzepts liegt im Umsetzungsprozess der Implementierung.

Zusammenfassend lässt sich für die modernen Konzepte der Implementierung Schlanker Produktionssysteme feststellen (siehe auch Bild 11):

- Die Anforderung der Ganzheitlichkeit findet in allen Konzepten Beachtung und kann durch die gewählten Ansätze grundsätzlich realisiert werden.
- Der Aufwand, der zur Erreichung dieser Ganzheitlichkeit notwendig ist, ist durchweg als sehr hoch einzustufen. Einzige Ausnahme ist das Konzept nach Deuse, wobei hier der erforderliche Detaillierungsgrad zur Konzeption eines Produktionssystems nicht erreicht wird.
- Die branchenspezifische Orientierung fehlt bei den meisten Konzepten. Lediglich Fleischer kann durch einen Benchmarking und eine Typisierung eine Hilfe bieten.
- Die Gestaltungsergebnisse basieren zumeist auf den Methoden der Schlanken Produktion. Einzig Lay bietet mit seinem Konzept auch die Auswahl anderer Methoden oder Werkzeuge an.
- Die Anforderung der Motivation und Qualifikation der Mitarbeiter wird bei den Gestaltungskonzepten kaum integriert. Es gibt hier jedoch eigenständige Arbeiten, wie die von Wildemann, die ausschließlich diesen Aspekt behandeln.

⁶⁴ vgl. MTM (2001).

⁶⁵ vgl. Dombrowski, Palluck, Schmidt (2006).
vgl. Dombrowski, Hennesdorf, Schmidt (2006).

⁶⁶ vgl. Wildemann, Baumgärtner (2006).

Die modernen Ansätze zeichnen sich durch eine intensive, unternehmensspezifische und kontinuierliche Anpassung und Weiterentwicklung von Produktionssystemen aus. In Folgendem werden diese Ansätze deshalb als **KVP-Ansätze** bezeichnet.

Anforderungen	Wildemann	Reinhart	Aurich	Lay	Deuse	Fleischer	Dom-browski	MTM
Ganzheitliche Betrachtung aller Gestaltungsfelder	○	●	●	●	◐	◐	●	●
Geringer Aufwand des Gestaltungsprozesses	○	○	○	○	●	◐	○	○
Branchenspezifische Orientierungshilfen	○	○	○	○	○	●	◐	○
Einsatzspezifische Gestaltung	○	○	◐	●	◐	○	○	◐
Motivation/Qualifikation der Mitarbeiter für die Umsetzung	●	○	○	◐	○	○	◐	○

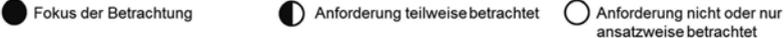

 ● Fokus der Betrachtung ◐ Anforderung teilweise betrachtet ○ Anforderung nicht oder nur ansatzweise betrachtet

Bild 11: Fokus verschiedener Ansätze der Gestaltung von Schlanken Produktionssystemen

2.2.4.3 Zusammenfassung

Vergleicht man den klassischen mit dem modernen Ansatz miteinander (siehe auch Bild 12), lässt sich feststellen, dass beide Ansätze gegensätzliche Vor- und Nachteile aufweisen. So kann mit dem modernen Ansatz ein Hauptproblem für das Scheitern der Implementierung Schlanker Produktionssysteme erfolgreich gelöst werden durch die bedingungs-spezifische Gestaltung von Produktionssystemen. Dieser Vorteil schlägt sich allerdings in einem hohen Aufwand für den Gestaltungsprozess Schlanker Produktionssysteme nieder. Die Durchdringung Schlanker Produktionssysteme bei KMU ist durch den KVP-Ansatz durchaus positiv beeinflusst worden, jedoch ist weiterhin ein großes Potential vorhanden durch eine höhere Verbreitung der Ansätze der Schlanken Produktion die Wettbewerbsfähigkeit von Produktionen in Deutschland zu steigern (siehe auch Kapitel 2.1.5 Verbreitung Schlanker Produktionssysteme). Zudem wurde der Vorteil des klassischen Ansatzes, eine Orientierungshilfe im Sinne eines Vorbilds zu bieten, im modernen Ansatz aufgegeben. Eine Bewertung der Leistungsfähigkeit des entwickelten Produktionssystems im Vergleich zu einem möglichen „optimalen“ Produktionssystem ist somit nicht mehr gegeben. Die Gefahr verborgenes Leistungspotential nicht zu entdecken, ist dadurch gewachsen.

Die Entwicklung eines Lösungsansatzes, der die Nachteile bestehender Ansätze reduziert bei gleichem oder besseren Gestaltungsergebnis, stellt eine sinnvolle Weiterentwicklungsmöglichkeit des Gestaltungsprozesses Schlanker Produktionssysteme dar und bietet das Potential die Effizienz und Verbreitung Schlanker Produktionssysteme weiter zu steigern.

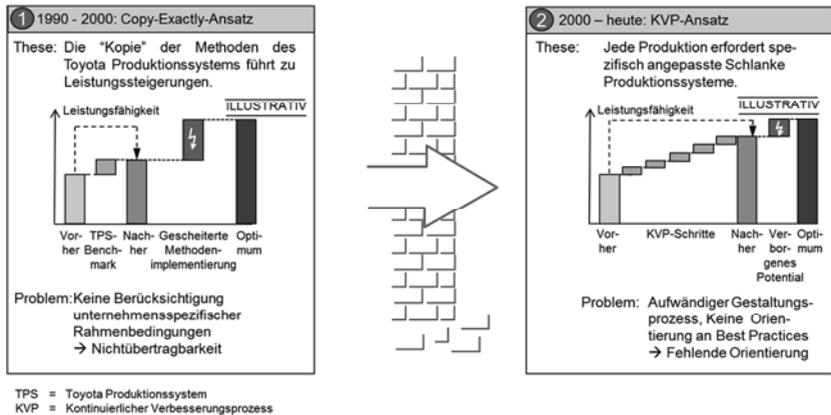


Bild 12: Zusammenfassung klassischer und moderner Ansatz

2.3 Schlanke Produktionssysteme im Werkzeugmaschinenbau

Der Werkzeugmaschinenbau ist die untersuchte Branche im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung, im speziellen die Branchenzweige Fräs-, Dreh-, Schleif- und Bearbeitungszentren. Bevor auf die Herausforderungen von Schlanke Produktionssystemen in diesen Branchenzweigen eingegangen wird, sollen der Werkzeugmaschinenbau in Deutschland und dessen allgemeine Herausforderungen kurz dargestellt und erläutert werden. Daraus soll sich der gewählte Fokus auf den zerspanenden Werkzeugmaschinenbau und vor allem die Notwendigkeit zum Einsatz Schlanke Produktionssysteme in Werkzeugmaschinenmontagen ableiten.

2.3.1 Werkzeugmaschinenbau in Deutschland

Unter Werkzeugmaschinen werden alle Fertigungseinrichtungen verstanden, die durch eine relative Bewegung zwischen einem Werkzeug und einem Werkstück eine vorgegebene Veränderung des Werkstücks herbeiführen.⁶⁷

Im Laufe der Zeit haben sich eine Vielzahl verschiedener Werkzeugmaschinenarten etabliert, die der Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 entsprechend der vorwiegend eingesetzten Verfahren benannt werden, z.B. Bohrmaschine für das technologische Verfahren Bohren (siehe Bild 13). Durch zunehmende Automatisierung von Werkzeugmaschinen wird heute aufbauend auf der Einteilung der Werkzeugmaschinen nach Verfahren auch der Automatisierungsgrad in der Bezeichnung abgebildet. Mit zunehmender Automatisierung wird so eine manuelle *Maschine* durch Integration einer NC-Steuerung und einen automatischen Werkzeugwechsler als *Fertigungszentrum* bezeichnet. Werden mehrere *Fertigungszentren* mit einem gemeinsamen automatisierten Werkzeug- und Werkstückfluss ergänzt, spricht man von einem *Fertigungssystem*. Diese Automatisierungsstufen werden ergänzt durch die eingesetzte Fertigungstechnologie, die in der Bezeichnung vorangestellt wird, z.B. Bohrzentrum. Vor allem höherautomatisierte

⁶⁷ vgl. DIN 69651 (1985).

Fertigungseinrichtungen sind heute in der Lage mehrere Fertigungsverfahren zu beherrschen. Solche Fertigungseinrichtungen bezeichnet man als Bearbeitungszentren.⁶⁸

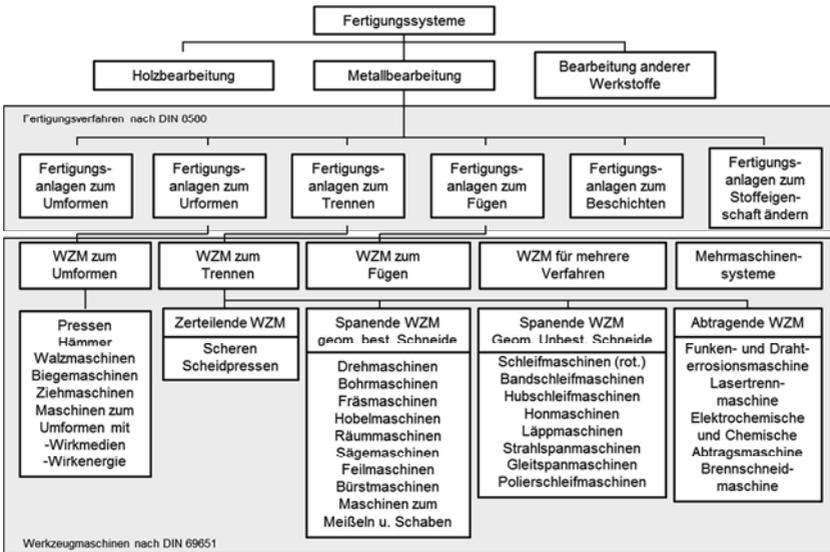


Bild 13: Gliederung der Werkzeugmaschinen nach DIN 69651⁶⁹

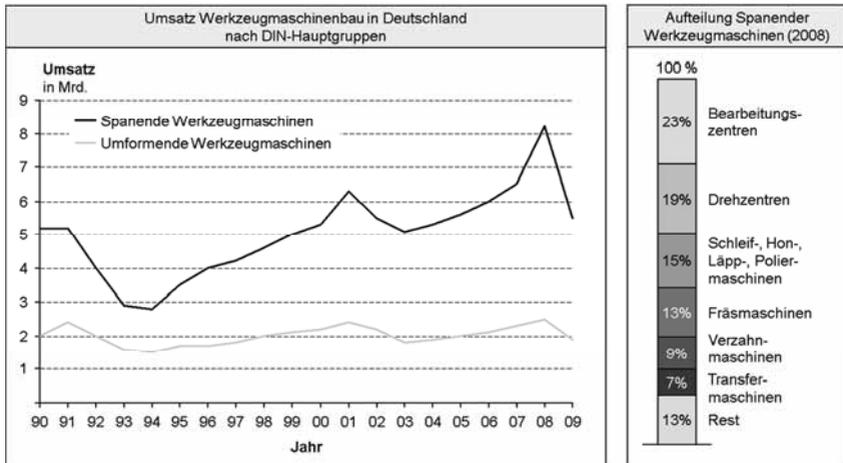
Alle diese Werkzeugmaschinenarten haben gemein zum Ziel ein Halbzeug oder Einzelteil bis hin zum kompletten Produkten herzustellen. Die Wirtschaftlichkeit und Qualität der so hergestellten Güter hängt in ganz entscheidendem Maße vom technischen Stand der eingesetzten Werkzeugmaschine ab.⁷⁰ Der hohe technische Stand der Werkzeugmaschinen aus Deutschland, als ein zentrales Produktionsmittel, trägt entscheidend zur internationalen Wettbewerbsfähigkeit deutscher Produktion und des deutschen Produktionsstandorts bei.⁷¹ Deutschlands Bruttoinlandsprodukt kommt zu ca. 24 % aus dem produzierenden Gewerbe mit steigender Tendenz. Das zeigt die enorme Bedeutung eines wettbewerbsfähigen Werkzeugmaschinenbaus für Deutschland als Industriestandort. Nicht alle Werkzeugmaschinenarten sind in diesem Zusammenhang von volkswirtschaftlich gleich großer Bedeutung für den in Deutschland ansässigen Werkzeugmaschinenbau. Insbesondere der Umsatz spanender Werkzeugmaschinen ist in Deutschland besonders hoch (siehe Bild 14). Innerhalb dieser Gruppe machen Bearbeitungszentren, Drehzentren, Schleifmaschinen und Fräsmaschinen mehr als 70 % des Gesamtumsatzes aus. Auf diese Gruppe soll in der weiteren Ausarbeitung der Fokus der Untersuchung erfolgen.

⁶⁸ vgl. Brecher, Weck (2005).

⁶⁹ vgl. Brecher, Weck (2005).

⁷⁰ vgl. Brecher, Weck (2005).

⁷¹ vgl. Abele, Reinhart (2011).

Bild 14: Umsatz nach Arten von Werkzeugmaschinen⁷²

Die Dominanz der spanenden Werkzeugmaschinen lässt sich zum einen durch den relativ hohen Umfang spanender Fertigungsaufgaben in der Produktion weltweit erklären, insbesondere getragen durch die Automobil- und Automobilzuliefererindustrie. Zum anderen aber auch durch eine international technologisch herausragende Stellung des spanenden Werkzeugmaschinenbaus in Deutschland. Dadurch hat sich der deutsche Werkzeugmaschinenbau einen Exportmarkt geschaffen, der den innerdeutschen Bedarf nach Werkzeugmaschinen um ein Vielfaches übersteigt. Damit zählt Deutschland zu den weltweit führenden Exporteuren von Werkzeugmaschinen. Insbesondere der chinesische Markt macht mit 1,3 Mrd. € Umsatz in 2009 den größten Abnehmer deutscher Werkzeugmaschinen vor den USA und Russland aus (siehe Bild 15).⁷³

Die doppelte Bedeutung des Werkzeugmaschinenbaus in Deutschland, einmal mittelbar als Fabrikaurüster für wettbewerbsfähige Produktion und einmal unmittelbar als wichtiger Markt innerhalb des deutschen Maschinenbaus, ist eine hinreichende Bedingung diese Branche als Untersuchungsobjekt dieser Arbeit zu adressieren.

Als notwendige Bedingung ist der Werkzeugmaschinenbau durch eine stark mittelständische Struktur gekennzeichnet. 77 % der Unternehmen beschäftigen weniger als 1000 Mitarbeiter.⁷⁴ Klassischerweise werden kleine Stückzahlen produziert, die von einigen wenigen bis zu ca. 200 Werkzeugmaschinen pro Jahr für eine Baureihe reichen.⁷⁵ Stückzahlen darüber hinaus produzieren lediglich die Großunternehmen der Branche. Der hohe Grad der Diversifikation der Rahmenbedingungen innerhalb der Branche und das eher untypische Umfeld für die Nutzung von Methoden der Schlanke Produktion sind geeignete Voraussetzungen zur Durchführung der angedachten Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit.

⁷² vgl. VDW (2010).

⁷³ vgl. VDW (2010).

⁷⁴ vgl. VDW (2010).

⁷⁵ eigene Untersuchungen.

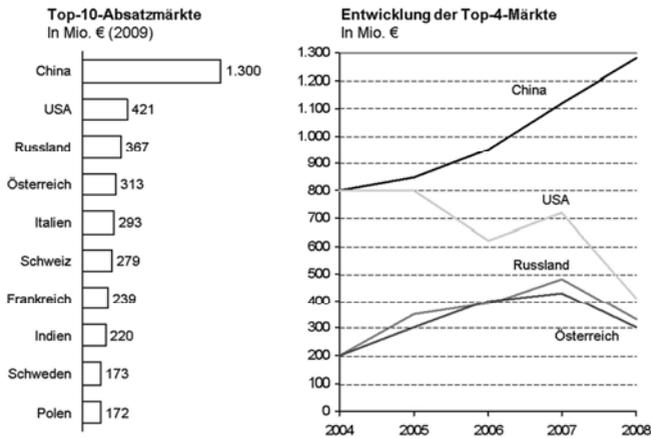


Bild 15: Größte Absatzmärkte von deutschen Werkzeugmaschinen im Vergleich⁷⁶

2.3.2 Herausforderung des Werkzeugmaschinenbaus in Deutschland

Wie im vorigen Kapitel gezeigt wurde, trägt der hohe Exportanteil der hiesigen Produktion entscheidend zum Umsatz des deutschen Werkzeugmaschinenbaus bei. Damit stehen Werkzeugmaschinenbauer aus Deutschland direkt in weltweiter Konkurrenz mit Werkzeugmaschinenbauern anderer Länder. Die Hauptwettbewerber kommen dabei aus Japan, Italien, Taiwan, Südkorea und China (siehe Bild 16).⁷⁷

China nimmt unter diesen Wettbewerbern eine besondere Position ein. Wie schon im vorigen Kapitel erwähnt, ist China der Hauptexportmarkt für deutsche Werkzeugmaschinen. Dies begründet sich vor allem durch das starke Wachstum des Industriesektors in China und der damit einhergehenden Nachfrage nach modernen Werkzeugmaschinen. Chinas Werkzeugmaschinenindustrie war bislang nicht in der Lage quantitativ aber vor allem qualitativ die eigene inländische Nachfrage zu befriedigen. Die Bedeutung der Werkzeugmaschinenindustrie wurde bereits frühzeitig von der chinesischen Regierung erkannt und 2006 durch einen 5-Jahresplan mit dem Ziel des Aufbaus einer High-Tech-Werkzeugmaschinenindustrie in China untermauert. Bestandteile dieses Plans sind unter anderem die strikte Beschränkung der zollfreien Einfuhr von ausländischen Werkzeugmaschinen nach China und die finanzielle Förderung der Übernahmen von ausländischen Werkzeugmaschinenbauern durch chinesische Unternehmen. Die Marktabschottung traf vor allem Werkzeugmaschinenhersteller im Mid-Tech-Bereich wie z.B. aus Japan und im Low-Tech-Bereich wie z.B. aus Taiwan und Südkorea. High-Tech-Maschinenhersteller, wie z.B. aus Deutschland, konnten sich trotz dieser Beschränkungen durch den bestehenden technologischen Know-how-Vorsprung am chinesischen Markt bisher durchsetzen. Dieser Know-how-Vorsprung ist durch die Übernahme- und Joint-Venture-Politik Chinas mittelfristig bedroht.⁷⁸

⁷⁶ vgl. VDW (2010).

⁷⁷ vgl. VDW (2010).

⁷⁸ vgl. Struktur Management Partner (2010).

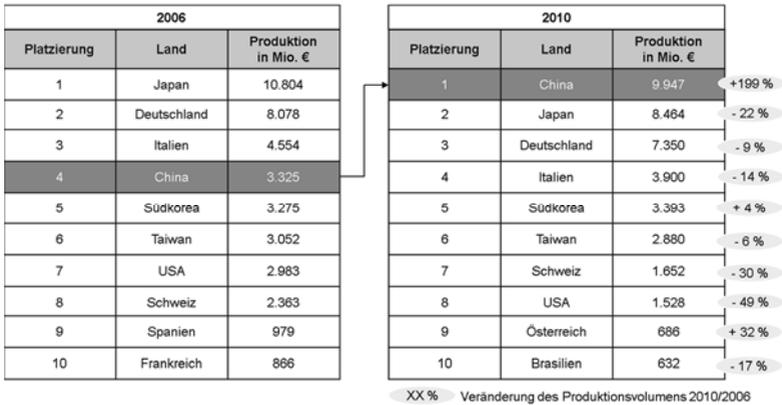


Bild 16: Weltrangliste der Werkzeugmaschinenproduktion nach Ländern⁷⁹

Von 2006 bis 2010 schafften Chinas Werkzeugmaschinenbauer so eine Verdreifachung des Produktionsvolumens und sind damit an der Spitze der Weltrangliste. Das weltweite Gesamtproduktionsvolumen blieb im gleichen Zeitraum fast konstant, so dass es zu einem Verdrängungswettbewerb gekommen ist, der in den nächsten Jahren an Schärfe gewinnen wird (siehe Bild 17).⁸⁰

Werkzeugmaschinenhersteller aus Japan, Taiwan und Südkorea werden in den High-Tech-Bereich verdrängt und damit in das direkte Wettbewerbsumfeld von Werkzeugmaschinenherstellern aus Deutschland. Inwieweit daraus eine Bedrohung entstehen kann, wird entscheidend durch die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Werkzeugmaschinen und deren Entwicklung im internationalen Vergleich bestimmt werden.

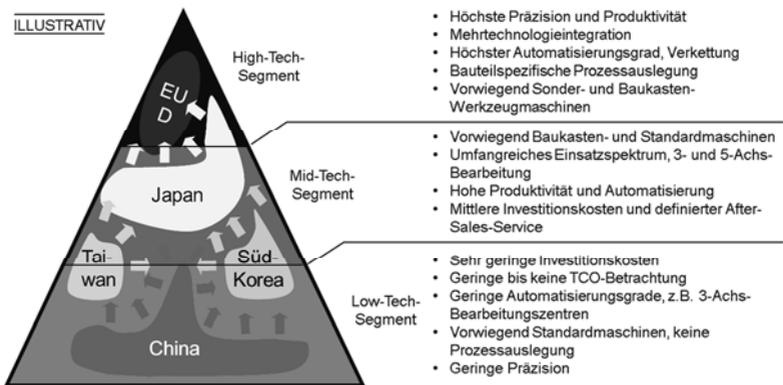


Bild 17: Verdrängungswettbewerb im internationalen Werkzeugmaschinenbau⁸¹

⁷⁹ vgl. VDW (2010).

⁸⁰ in Anlehnung an Abele (2011).

⁸¹ in Anlehnung an Abele (10.05.2011).

2.3.3 Wettbewerbsfähigkeit spanender Werkzeugmaschinen

Die Wettbewerbsfähigkeit einer Werkzeugmaschine wird durch ihre Leistungsfähigkeit und Kosten über den Lebenszyklus bestimmt. Beide Kriterien hängen ganz entscheidend von dem technischen Stand der jeweils eingesetzten Werkzeugmaschine ab. Dieser technische Stand wird maßgeblich bestimmt durch:

- die Auswahl des Fertigungsverfahrens zur Durchführung der Bearbeitungsaufgabe, z.B. Drehen, Fräsen oder eine Kombination.
- die bedarfsgerechte konstruktive Auslegung der Werkzeugmaschine unter Berücksichtigung der Bearbeitungsaufgabe, z.B. Bauraumgröße, und der einsatzspezifischen Rahmenbedingungen, z.B. Automatisierungsgrad, Anzahl Achsen, Genauigkeitsklasse, Fertigungsvolumen.
- die bedarfsgerechte Auslegung des Bearbeitungsprozesses, z.B. Schneidstoffauswahl, Prozessparameterwahl, Kühlmittelstrategie.

Die so konfigurierten Werkzeugmaschinen unterscheiden sich in den einzelnen Baugruppen, hinsichtlich ihres technologischen Verfahrens, des Arbeitsraums und ihrer Verketzung mit Fördermitteln. Einige Gebrauchswertparameter wie insbesondere hohe Produktivität, hohe Flexibilität und geringe Investitionskosten können meist nicht gleichzeitig maximiert werden. Es haben sich deshalb drei grundlegende Maschinentypen etabliert, die das Spannungsfeld zwischen konkurrierenden Gebrauchswertparametern beschreiben (siehe Bild 18).

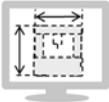
Maschinentypen	Anteil Sonderkomponenten*	Einfluss auf die konstruktive Auslegung der Werkzeugmaschine
Sondermaschine 	90 - 100 %	<ul style="list-style-type: none"> • Der Kunde erhält eine für seine spezifische Bearbeitungsaufgabe entwickelte Maschine • Jede bestellte Maschine ist eine „Neukonstruktion“ → Lange Durchlaufzeiten durch hohen Anteil Sonderkomponenten → Hoher Entwicklungsaufwand und damit hohe Investitionskosten für die Werkzeugmaschine
Baukastenmaschine 	40 - 60 %	<ul style="list-style-type: none"> • Kunde erhält eine für seine spezifische Bearbeitungsaufgabe zusammengestellte Maschine • Die Zusammenstellung erfolgt soweit möglich aus standardisierten, individuell kombinierbaren Modulen • Notwendige Sondermodule werden neuentwickelt → Verringerter Entwicklungsaufwand und Investitionskosten → Lösungsraum zum Teil eingeschränkt
Standardmaschine (mit Optionen) 	0 - 20 %	<ul style="list-style-type: none"> • Kunde erhält eine für seine spezifische Bearbeitungsaufgabe adaptierbare Standardmaschine • Maschine und Optionen sind fertig entwickelt, eine Konfiguration ist noch möglich → Lösungsraum stark eingeschränkt → Geringste Investitionskosten

Bild 18: Maschinentypen spanender Werkzeugmaschinen⁸²

Auf Ebene der Maschinenbaugruppen findet sich unabhängig vom Maschinentyp ein grundlegender Basisaufbau von spanenden Werkzeugmaschinen wieder (siehe Bild 19).

⁸² in Anlehnung an Abele (2011).

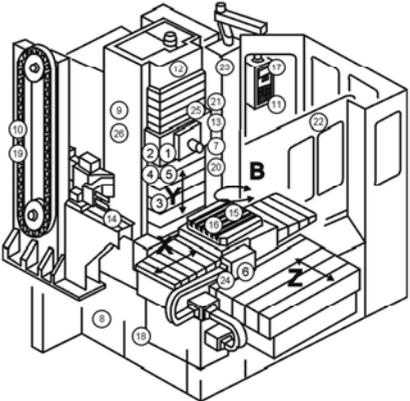
Gebrauchswertparameter	Baugruppen – gestaltung	Gesamtsystem
Hohe Produktivität	<ul style="list-style-type: none"> ① Hochdrehende Servomotoren ② Dynamische Getriebe ③ Schnelle Positionier- und Wechselsysteme ④ KSS-Systeme 	
Hohe Arbeitsgenauigkeit/ Maschinenfähigkeit	<ul style="list-style-type: none"> ⑤ Steifes Spindel-Lager-System ⑥ Spielfreie Vorschubantriebe mit Lageregelung ⑦ Automatische Schneidkorrektur ⑧ Steifes Maschinenbett ⑨ Thermosymmetrischer Maschinenaufbau 	
Hohe Verfügbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> ⑩ Ersatz-Werkzeuge ⑪ Automatische Standzeiterfassung ⑫ Reparaturfreundliche, zuverlässige Baugruppen ⑬ Sensoren für Werkzeugbruch 	
Durchgehende Automation	<ul style="list-style-type: none"> ⑭ Automatischer Werkzeugwechsler ⑮ Automatischer Werkstückwechsler ⑯ Automatische Spannmittel ⑰ CNC-Steuerung mit DNC-Anbindung 	
Hohe Flexibilität	<ul style="list-style-type: none"> ⑱ Transportable Einheit ⑲ Werkzeugspeicher ⑳ Mehrtechnologieintegration, z.B. Werkstückvermessung ㉑ Rekonfigurierbare Baugruppen 	
Arbeits- und Umweltschutz	<ul style="list-style-type: none"> ㉒ Gekapselter Arbeitsraum ㉓ Absaugeinrichtungen ㉔ Geräuscharme Antriebe 	
Energieeffizienz	<ul style="list-style-type: none"> ㉕ Energierückgewinnungssysteme ㉖ Effiziente Antriebe und Nebenaggregate, wie z.B. drehzahlgeregelte Pumpen 	

Bild 19: Gebrauchswertparameter und Werkzeugmaschinenkomponenten am Beispiel eines Bearbeitungszentrums⁸³

Die Leistungsfähigkeit im Verhältnis zu den Lebenszykluskosten einer Werkzeugmaschine, oft ausgedrückt in realisierbaren Stückkosten für das zu bearbeitende Teil, bestimmt maßgeblich die Wettbewerbsfähigkeit.⁸⁴ So lässt sich die Wettbewerbsfähigkeit erhöhen indem die Leistungsfähigkeit gesteigert wird und/oder die Lebenszykluskosten gesenkt werden können. Den größten Anteil an den Lebenszykluskosten mit 30 – 50 % haben die Beschaffungskosten, die wiederum fast ausschließlich durch den Entstehungsprozess einer Werkzeugmaschine verursacht werden. Eine Verringerung der Kosten im Entstehungsprozess ist demnach geeignet die Wettbewerbsfähigkeit von Werkzeugmaschinen zu erhöhen.

⁸³ in Anlehnung an Brecher, Weck (2005).
in Anlehnung an Borge (2007).

⁸⁴ vgl. Abele, Dervisopoulos (2008).

2.3.4 Entstehungsprozess spanender Werkzeugmaschinen

Der Produktentstehungsprozess von der Beauftragung einer Werkzeugmaschine durch den Kunden bis zur Auslieferung zum Kunden unterscheidet sich stark je nach Maschinentyp. Allen Maschinentypen ist gemein, dass zumeist eine technische Beratung zur Auswahl der Werkzeugmaschine und die Endabnahme beim Kunden durchgeführt werden, optional auch die Prozessauslegung und Prozessfähigkeitsabnahme (siehe auch Bild 20). Bei der Baukasten- und Sondermaschine ist zudem der Konstruktionsprozess durch den hohen Anteil an Sonderkomponenten ebenfalls stark durch Kundeninteraktion in den Entwicklungsprozess gekennzeichnet, wobei der Umfang bei Sondermaschinen nochmal deutlich höher ist. Diese Interaktion bewirkt eine Diversifizierung der Planungs- und Konstruktionsprozesse, so dass sich hier die Auftragsabwicklungsprozesse von Standard-, Baukasten- und Sondermaschinen signifikant unterscheiden. Diese Prozesse bestimmen vor allem die technologischen Gebrauchswertparameter von Werkzeugmaschinen, die Materialkosten der eingesetzten Baugruppen und den grundlegenden Personalaufwand für die Produktion.

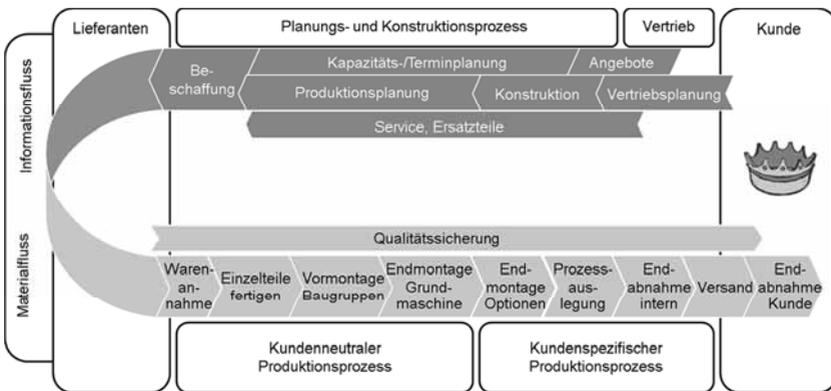


Bild 20: Entstehungsprozess einer Baukastenmaschine⁸⁵

Nach den Planungs- und Konstruktionsprozessen folgen die Produktionsprozesse. Zwischen den Unternehmen gibt es unabhängig vom Maschinentyp große Unterschiede bezüglich der Wertschöpfungsumfänge, die beginnen können bei der eigenständigen Fertigung des Maschinenbetts bis hin zur ausschließlichen Endmontage. Die Endmontage ist aber in allen Fällen ein fester Bestandteil des Produktentstehungsprozesses im Werkzeugmaschinenbau. Zwar beeinflusst die Art des Maschinentyps auch die Montageprozesse, z.B. in Form des Standardisierungs-niveaus der Prozessabläufe oder der Wahrscheinlichkeit von Auftragsänderungen während des Montageprozesses, jedoch ist durch den ähnlichen konstruktiven Grundaufbau der Werkzeugmaschinen ein immer prinzipiell ähnlicher Ablauf der Endmontage gegeben (siehe auch Bild 21): Ausgehend vom Maschinenbett werden zunächst die Achsen der Werkzeugmaschine montiert, danach die Haupt- und Nebenantriebe, die Versorgungssysteme, die Steuerung und

⁸⁵ vgl. Abele (2011).

schließlich die Maschinenabdeckung. Hinsichtlich der maschinenspezifischen Dauer des Montageablaufs und der Gestaltung des Montageablaufs gibt es hingegen große Unterschiede zwischen den einzelnen Werkzeugmaschinenherstellern.⁸⁶

Die Bedeutung der Montage für den Werkzeugmaschinenbau ist hoch. Zum einen ist die Montage nach dem zugekauften Material einer der wichtigsten Kostentreiber für die Herstellkosten einer Werkzeugmaschine, so werden im Beispiel aus Bild 22 je nach Maschinenart zwischen 22 und 40 % der Herstellkosten durch Montageprozesse verursacht. Der Umfang der Montagekosten bestimmt somit die Investitionskosten für den Kunden einer Werkzeugmaschine maßgeblich und ist damit wettbewerbsrelevant.

Zum anderen wird durch den hohen Anteil manueller Arbeiten im Montageprozess diese Kostenart stark durch das standortabhängige Lohnniveau bestimmt. Der hohe Preisdruck durch die Konkurrenz, insbesondere aus Niedriglohnländern wie China, wird maßgeblich getragen durch geringere Montagekosten, so wird beispielsweise der Investitionsvorteil eines in China gefertigten Bearbeitungszentrum von 26 % zur Hälfte durch geringere Lohnkosten für Produktionspersonal realisiert (siehe Bild 22).

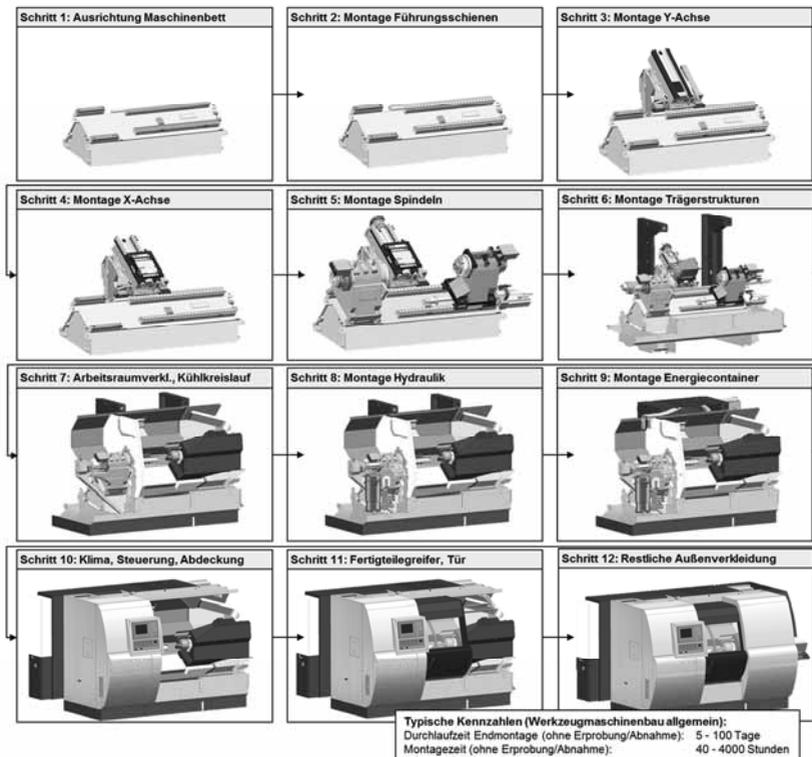


Bild 21: Ablauf der Endmontage am Beispiel eines Drehzentrums⁸⁷

⁸⁶ eigene Untersuchungen.

⁸⁷ vgl. Bilder EMCO in ENGINEERING DEVELOPMENT BOARD (2006).

Eine Werkzeugmaschine, die in Deutschland produziert wurde, ist aufgrund dieses mittelfristig stabilen Lohngefälles nur dann international wettbewerbsfähig, wenn sie gegenüber den in Niedriglohnländern hergestellten Werkzeugmaschinen technologisch überlegen ist oder die Effizienz des Produktionsprozesses allgemein und im speziellen die Effizienz der Montage entsprechend höher ist als am Niedriglohnstandort.

Beide Strategien werden aktiv von Werkzeugmaschinenherstellern verfolgt, wobei der Fokus der Werkzeugmaschinenhersteller oft auf der Steigerung der technologischen Leistungsfähigkeit von Werkzeugmaschinen aus Deutschland liegt. Vor dem Hintergrund der in Kapitel 2.3.2 geschilderten Wettbewerbsverschärfung soll in der vorliegende Arbeit vor allem ein Beitrag geleistet werden, Möglichkeiten zur Erhöhung der Effizienz von Montagen im Werkzeugmaschinenbau aufzuzeigen.

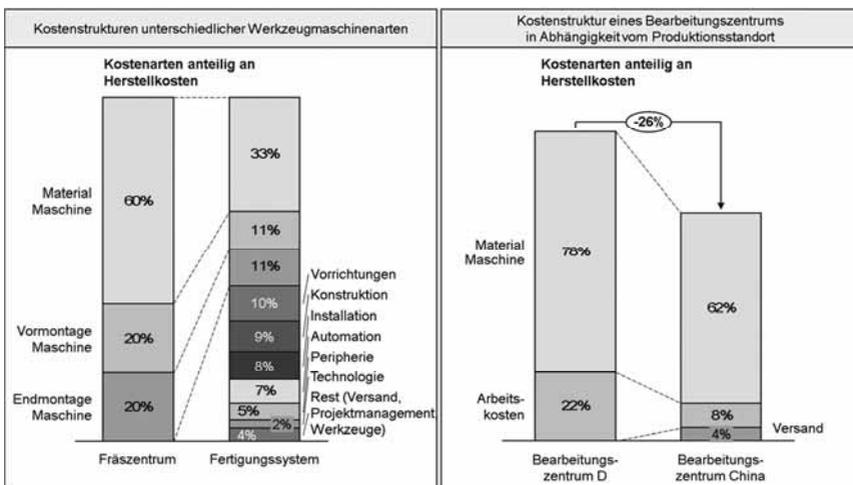


Bild 22: Beispielhafte Kostenstrukturen verschiedener Werkzeugmaschinen nach Art und Produktionsstandort ⁸⁸

2.3.5 Schlanke Produktion in der Montage von Werkzeugmaschinen

Schlanke, effiziente Montagen im Sinne der Schlanke Produktion sind heute bereits vereinzelt im Werkzeugmaschinenbau anzutreffen. Als Vorreiter der Diffusion Schlanke Produktionssysteme vom Automobil- zum Werkzeugmaschinenbau hat sich die Trumpf GmbH & Co. KG erstmals engagiert. Obwohl Trumpf vorwiegend Werkzeugmaschinen zum Trennen entwickelt und produziert und somit nicht originär zum Untersuchungsobjekt der Arbeit gehört, soll Trumpf folgend aufgrund der angemerkenen Pionierleistung auf dem Gebiet der Schlanke Produktion im Werkzeugmaschinenbau nicht ungeachtet bleiben. Als weltweit fünftgrößter Werkzeugmaschinenhersteller und zweitgrößter Werkzeugmaschinenhersteller Deutschlands hat Trumpf bereits 1998 Schlanke Produktions-

⁸⁸ Kostenstruktur Fräszentrum und Fertigungssystem vgl. Brecher, Weck (2005).
Kostenstruktur Bearbeitungs-zentrum vgl. VDW (2011).

systeme im Werkzeugmaschinenbau erstmals erfolgreich implementiert.⁸⁹ Drastische Durchlaufzeitreduzierungen und Produktivitätssteigerungen wurden durch Preise wie „Fabrik des Jahres 2002“ honoriert, die medienwirksame Vermarktung dieser Erfolge löste ein Umdenken in der Branche aus.⁹⁰ Schlanke Produktion nach dem Trumpf Synchro Produktionssystem wurde so zum Vorbild vieler Werkzeugmaschinenhersteller für effiziente Montageprozesse. Einige Werkzeugmaschinenhersteller versuchten sich durch den Erfolg von Trumpf motiviert an der Umsetzung Schlanke Produktion der eigenen Montage, vor allem durch Einführung einer getakteten Fließmontage. Wenige profitierten wirklich nachhaltig von dem System, z.T. wurden Montagen wieder auf das vorige System umgestellt.⁹¹ Es waren vor allem die Großunternehmen der Branche, die positive Effekte durch die Einführung des Systems erreichen konnten (siehe Bild 23). Einerseits zeigen diese Montagen, dass Schlanke Produktion im Werkzeugmaschinenbau möglich ist, andererseits konnte sich das Konzept, insbesondere bei KMU, nicht flächendeckend durchsetzen.

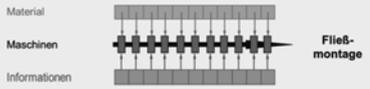
1. Gildemeister: DMU 60	2. Trumpf: TC 600/6000 L	3. MAG: XS 211/ XS 321
		
(Bild: DMG)	(Bild: Trumpf)	(Bild: Ex-Cell-O)
Output: ~1 Maschine pro Tag	Output: 2-3 Maschinen pro Tag	Output: ~1 Maschine pro Tag
Eingeführt: 2002	Eingeführt: 1998	Eingeführt: vor 2005
Effekte: Durchlaufzeit – 30% Flächenproduktivität + 40%	Effekte: Durchlaufzeit – 63% Flächenproduktivität + 40% Ware in Arbeit – 50%	Effekte: Durchlaufzeit – 63%
Grundprinzipien „Getaktete Fließmontage“: <ul style="list-style-type: none"> • Gerichteter Produktfluss • Verfahrbare Transporteinheiten • Hoher Grad an Arbeitsteilung bzw. Spezialisierung • Arbeitsplatzspezifische Bereitstellung von Baugruppen und Teilen • Modularer Werkzeugmaschinenaufbau • Geplätteter Auftragsengang • Hoher Anteil vormontierter Baugruppen 		
	 <p>(Bild: Trumpf)</p>	<p>Fließmontage</p>

Bild 23: Getaktete Fließmontagesysteme der drei größten deutschen Werkzeugmaschinenhersteller⁹²

Die Gründe für das Scheitern der Einführung Schlanke Produktionssysteme nach dem Trumpf-Vorbild im Werkzeugmaschinenbau sind denen ähnlich, die bereits in Kapitel 2.2.3 dargestellt wurden und die grundsätzlichen Probleme bei der Übertragung Schlanke Produktionssysteme von Großunternehmen auf KMU darstellen:

⁸⁹ vgl. Gardner Publications Inc. (2011).

⁹⁰ vgl. Trumpf (2003) und Trumpf Grüsch (2010).

⁹¹ eigene Untersuchungen.

⁹² vgl. Trumpf (2003).

vgl. Ex-Cell-O (2005).

vgl. Geissler (2007).

- Der Einsatz Schlanker Produktionssysteme wird abgelehnt, da die Prinzipien und Methoden den Rahmenbedingungen von KMU im Werkzeugmaschinenbau nicht gerecht werden.
- Die Implementierung von Schlanken Produktionssystemen scheitert: Es fehlt das Know-how und/oder die Ressourcen für die nachhaltige Umsetzung.

Es lässt sich also festhalten, dass hinsichtlich der Effizienzsteigerung in der Montage durch Schlanke Produktion im Werkzeugmaschinenbau Defizite bestehen. Es besteht auf der einen Seite ein starker Handlungsdruck zur Effizienzsteigerung durch zunehmenden Wettbewerb, auf der anderen Seite, insbesondere bei dem KMU der Branche, besteht gleichzeitig Desorientierung und Skepsis bezüglich der bestehenden Ansätze der Schlanken Produktion.

3. Forschungskonzeption

Die Konzeption der vorliegenden Arbeit umfasst zum einen die Zieldefinition und zum anderen die Beschreibung der Vorgehensweise zur Zielerreichung. Ebenfalls werden die dieser Arbeit zu Grunde liegenden Forschungsthese formuliert, die aufbauend auf dem Stand der Anwendung und Forschung das Weiterentwicklungspotential von heutigen Ansätzen zur Gestaltung Schlanker Produktionssysteme aufzeigen.

3.1 Forschungsziel

3.1.1 Zieldefinition

Der Stand der Anwendung zeigt deutlich, dass Schlanke Produktionssysteme ein hohes Potential zur Leistungssteigerung von Montagen auch im Werkzeugmaschinenbau bieten. Ebenfalls wird jedoch deutlich, dass nicht alle Unternehmen von diesem Potential Gebrauch machen bzw. Gebrauch machen können. Der Stand der Forschung zeigt, dass dieses Problem erkannt wurde und die Beseitigung der vordringlichen Hürden bei der Einführung Schlanker Produktionssysteme bereits vielfältig Gegenstand wissenschaftlicher Forschung war. Die so entstandenen modernen Ansätze zur Gestaltung Schlanker Produktionssysteme eröffneten auf der einen Seite einer Vielzahl unterschiedlicher Unternehmen die Anwendung Schlanker Produktionssysteme. Auf der anderen Seite bringen diese Ansätze jedoch auch Nachteile mit sich, die gerade klein- und mittelständische Unternehmen vor große Schwierigkeiten stellen, nachhaltig erfolgreich Schlanke Produktionssysteme zu nutzen. Dieses Problem ist auch im deutschen Werkzeugmaschinenbau beobachtbar.

Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird daher eine **Methode** entwickelt, die den **Gestaltungsprozess Schlanker Produktionssysteme für die Montage von Werkzeugmaschinen unterstützt**. Die Methode soll die Nachteile heutiger Gestaltungsprozesse vermeiden und insbesondere einen Beitrag leisten zur Anwendung Schlanker Produktion in klein- und mittelständischen Unternehmen. Die Methode adressiert sowohl Prozessoptimierer als auch Fabrikplaner von Montagen im Werkzeugmaschinenbau, die Übertragbarkeit auf andere Branchen ist wünschenswert.

Nachfolgend sollen die inhaltlichen Anforderungen an die zu entwickelnde Methode, im Sinne eines Leistungsumfangs, und die formalen Anforderungen, im Sinne von allgemeinen Grundsätzen der Methodenentwicklung, formuliert werden.

3.1.2 Inhaltliche Anforderungen

Der Leistungsumfang der Methode orientiert sich an den Anforderungen für den Gestaltungsprozess Schlanker Produktionssysteme (siehe Bild 24, siehe auch Kapitel 2.2.2):

1. Analyse des Ist-Zustands des Produktionssystems

Die zu entwickelnde Methode muss es erlauben, den derzeitigen Zustand des Produktionssystems zu beschreiben. Das umfasst eine Leistungsbewertung der Montage und eine Beschreibungsform der aktuellen Produktionsorganisation.

2. Entwicklung eines Ideal-Zustands des Produktionssystems

Die zu entwickelnde Methode muss es ermöglichen, konkrete Gestaltungsrichtlinien bezüglich eines Idealzustands der Produktionsorganisation zu geben. Dieser Soll-Zustand stellt die Vision und das Ziel aller Optimierungsanstrengungen dar.

3. Definition von Verbesserungsmaßnahmen

Die Methode muss es ermöglichen Maßnahmen zur Optimierung des Produktionssystems abzuleiten, mit denen die Entwicklung der Montage vom Ist-Zustand zum Ideal-Zustand gesteuert werden kann. Ggf. müssen Ziel-Zustände definiert werden, die im Rahmen einer schrittweisen Erreichung des Ideal-Zustands realistische Zwischentapen darstellen.

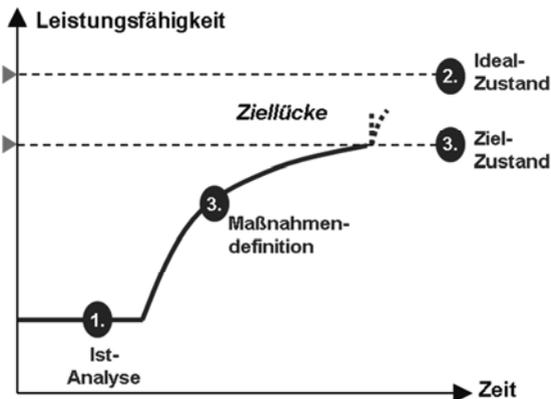


Bild 24: Gestaltungsprozess Schlanker Produktionssysteme⁹³

Die Funktionalität der zu entwickelnden Methode muss daneben insbesondere den industriellen Anforderungen, die in Kapitel 2.2.3 „Herausforderungen bei der Implementierung Schlanker Produktionssysteme für KMU“ identifiziert wurden, gerecht werden:

- Die Methode muss die **ganzheitliche Betrachtung** aller Gestaltungsfelder der Schlanken Produktion ermöglichen.
- Der **Aufwand** zur Anwendung der Methode muss deutlich geringer sein als die bestehenden Ansätze der Gestaltung Schlanker Produktionssysteme.
- Die Methode muss die Orientierung an unternehmensspezifisch **geeigneten Best Practices** ermöglichen.
- Die Methode muss den **unterschiedlichen Rahmenbedingungen** der unterschiedlichen Anwender (insbesondere KMU) Rechnung tragen.

⁹³ in Anlehnung an Wildemann, Baumgärtner (2006).

3.1.3 Formale Anforderungen

Neben den inhaltlichen Anforderungen an die zu entwickelnde Methode werden in Anlehnung an Patzak folgende Grundanforderungen für die Entwicklung und Nutzung der Methode gestellt:⁹⁴

- **Empirische und Formale Richtigkeit**
Die abgeleiteten Aussagen und Empfehlungen der Methode müssen widerspruchsfrei, reproduzierbar und nachprüfbar sein. Die Aussagen der Methodik sind mit der Realität hinsichtlich Richtigkeit empirisch zu überprüfen.
- **Vollständigkeit und Transparenz**
Bei der Entwicklung der Methode sollen alle wesentlichen Faktoren Berücksichtigung finden, die einen signifikanten Einfluss auf die Ableitung von Aussagen haben. Die Auswahl und Priorisierung der Einflussfaktoren soll transparent und nachvollziehbar im Rahmen der Methodenentwicklung dargestellt werden.
- **Handhabbarkeit und Zweckorientierung**
Die Anwendung der zu entwickelten Methode soll ohne Kenntnis des gesamten Methodenentwicklungsprozesses möglich sein. Die eigenständige Anwendung durch außenstehende Fachleute soll mit möglichst geringem Einarbeitungsaufwand möglich sein und eine sichere Ableitung von Aussagen zulassen.

3.2 Lösungsansatz und Forschungsthesen

Um eine Methode zu entwickeln, die den formulierten Anforderungen gerecht wird, soll eine Kombination des klassischen Copy-Exactly-Ansatzes und des moderneren KVP-Ansatzes zum Tragen kommen. Der **Kombinierte Ansatz** soll die Überwindung der jeweiligen Schwächen der bestehenden Ansätze ermöglichen (wie beschrieben in Kapitel 2.2.4.3). Die zentralen Forschungsthesen dieses Ansatzes lautet (siehe auch Bild 25):

1. Es existiert eine begrenzte Vielfalt an Gestaltungsmöglichkeiten für Schlanke Produktionssysteme.

Diese These unterstreicht somit die Kernerkenntnis des modernen Ansatzes, dass es nicht nur ein Schlanke Produktionssystem als Benchmark für alle Anwendungsfälle geben kann. Zugleich wird aber in Frage gestellt, dass es eine nahezu unendliche Anzahl optimaler und gleichzeitig signifikant unterschiedlicher Schlanker Produktionssysteme gibt. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass es eine begrenzte Anzahl von relevanten Typen Schlanker Produktionssysteme gibt.

2. Der effiziente Einsatz verschiedener Arten von Schlanken Produktionssystemen ist abhängig von allgemein gültigen Rahmenbedingungen der Montage.

Es wird davon ausgegangen, dass ähnlich gestaltete Schlanke Produktionssysteme unter ähnlichen Rahmenbedingungen ähnlich effizient sind. Lassen sich Rahmenbedingun-

⁹⁴ vgl. Patzak in Köhler (1977).

gen ermitteln, die zu einer Vergleichbarkeit verschiedener Montagen führen, können sich Unternehmen anhand dieser Rahmenbedingungen an Best Practices orientieren. Der Aufwand für die Entwicklung eines geeigneten Schlanke Produktionssystems könnte damit deutlich reduziert werden.

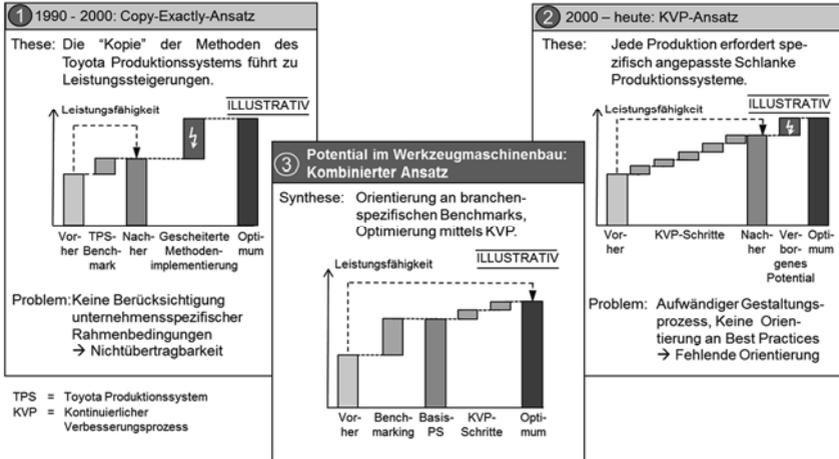


Bild 25: Bestehende Ansätze im Vergleich zum Lösungsansatz der vorliegenden Arbeit

3. Schlanke Produktionssysteme sind nicht zwangsläufig ein Konglomerat aus originären Methoden der Schlanke Produktion

Andere Rahmenbedingungen erfordern ggf. andere Methoden oder Gestaltungsprinzipien der Montage von Werkzeugmaschinen. Der Begriff der Schlankeheit von Produktionssystemen soll nicht an der Anwendung von Methoden gemessen werden, sondern an der Leistungsfähigkeit eines Produktionssystems im Sinne von Schlanke Produktion. Der Lösungsraum für die Gestaltung Schlanke Produktionssysteme ist damit offen.

Im Rahmen dieser Ausarbeitung werden alle Forschungsthesen empirisch an der Realität überprüft und einer objektiven, kritischen Reflexion unterzogen. Das forschungsmethodologische Vorgehen lässt sich somit beschreiben als Prüfstrategie empirischer Forschung, die als Teilbereich der anwendungsorientierten Forschung auf die Erzielung wissenschaftlicher Erkenntnisse durch die Analyse unbekannter bzw. ungewollter Wirkungen durch planvolles Handeln abzielt.⁹⁵

3.3 Vorgehensweise zur Zielerreichung

Die Vorgehensweise zur Entwicklung einer Methode zur Unterstützung bei der Gestaltung Schlanke Produktionssysteme orientiert sich an der Strategie der anwendungsorientierten Forschung nach Ulrich.⁹⁶ Als ersten Schritt sieht dieser die Erfassung praxisre-

⁹⁵ in Anlehnung an Kubicek in Köhler (1977).

⁹⁶ vgl. Geist (1981).

levanter Probleme und der Recherche problemrelevanter Theorien der Grundlagenwissenschaft wie bereits in Kapitel 2 dieser Ausarbeitung erfolgt. Danach stehen die analytische Ableitung von Regeln und Modellen zur Verbesserung des Verständnisses der relevanten Problemstellungen und die Konzeption von Problemlösungsverfahren vor, die anschließend durch eine Prüfung in der Praxis validiert werden.⁹⁷ Entsprechend wird die Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit in drei Hauptphasen unterteilt: Analysephase, Identifikationsphase und Umsetzungsphase (siehe Bild 26).

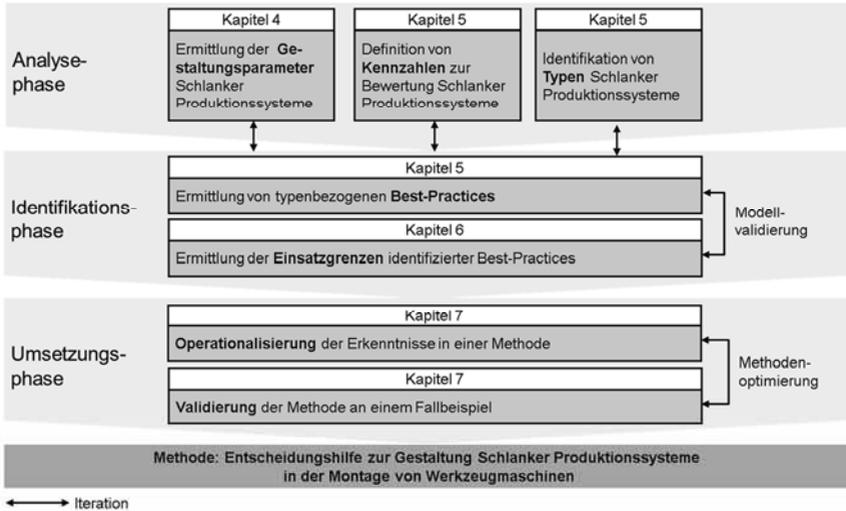


Bild 26: Vorgehensweise zur Methodenentwicklung

In der **Analysephase** werden die wesentlichen Einflussparameter für die Gestaltung und Bewertung von Produktionssystemen im Werkzeugmaschinenbau identifiziert. Damit sollen die Beschreibung eines Produktionssystems in der Praxis und der spätere Vergleich der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Produktionssysteme möglich sein. Ebenfalls in diese Phase fällt auch die Identifikation der relevanten Typen von Produktionssystemen anhand unterschiedlicher Rahmenbedingungen der Montage.

In der **Identifikationsphase** wird aufbauend auf den Ergebnissen der Analysephase eine empirische Studie in Form eines Benchmarking im Werkzeugmaschinenbau durchgeführt. Unterschiedliche Produktionssysteme werden erfasst und bezüglich Gestalt und Leistungsfähigkeit innerhalb der identifizierten Typen von Produktionssystemen verglichen. Die Produktionssysteme mit der höchsten Leistungsfähigkeit können somit typenspezifisch identifiziert werden als Schlanke Produktionssysteme.

Die Leistungsfähigkeit der identifizierten Schlanken Produktionssysteme wird weiter für sämtliche Rahmenbedingungen in einer Simulation überprüft. Dadurch werden grundlegende Wirkungszusammenhänge des Einsatzes Schlanker Produktionssysteme unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen ableitbar. Im Ergebnis entsteht ein Werkzeug

⁹⁷ vgl. Geist (1981).

mit dem für definierte Rahmenbedingungen der Montage geeignete Schlanke Produktionssysteme bestimmt werden können.

In der **Umsetzungsphase** erfolgt schließlich die Operationalisierung des entwickelten Werkzeugs in einer Methode, die für den Einsatz in der Praxis geeignet ist. Verschiedene Anwendungsbeispiele aus dem Werkzeugmaschinenbau aber auch anderen Branchen sollen die Anwendbarkeit der Methode zeigen und das Übertragungspotential aufzeigen. Eine kritische Reflektion der Methode nach Ergebnisgüte und Anwendungsfreundlichkeit schließt sich an.

Die wichtigsten Ergebnisse werden in der folgenden Zusammenfassung konzentriert vermittelt und Ausblicke zur zukünftigen Weiterentwicklung der Thematik gegeben.

4. Ermittlung der Gestaltungsparameter von Produktionssystemen

Die Ermittlung der Gestaltungsparameter von Produktionssystemen ist die Voraussetzung für die Durchführung des angestrebten Benchmarking im Werkzeugmaschinenbau. In diesem Benchmarking soll die Leistungsfähigkeit und der Aufbau verschiedener Produktionssysteme der Montage verglichen werden, um Aussagen zu deren Eignung für bestimmte Rahmenbedingungen zu machen. Die Beschreibung der Gestalt von Produktionssystemen soll in diesem Kapitel entwickelt werden. Dabei soll bewusst auf die übliche Beschreibungsform von Schlanke Produktionssystemen verzichtet werden, die sich an der bloßen Umsetzung von Methoden der Schlanke Produktion orientiert. Entsprechend der in Kapitel 3 formulierten Forschungsthesen soll die Schlanke von Produktionssystemen nicht an dem Einsatz originärer Methoden der Schlanke Produktion festgemacht werden, sondern an der Leistungsfähigkeit des eingesetzten Produktionssystems. Der Gestaltungsspielraum für Schlanke Produktionssysteme wird demnach bewusst erweitert, um auch Gestaltungsmöglichkeiten der Produktionssysteme zuzulassen, die bisher nicht als „schlanke“ wahrgenommen wurden, sofern deren Leistungsfähigkeit konventionelle Schlanke Produktionssysteme übersteigt.

4.1 Vorgehen und Hilfsmittel

Das Ziel dieses Kapitels ist die Entwicklung eines morphologischen Kastens für die Gestaltung von Produktionssystemen der Montage von Werkzeugmaschinen. Dabei soll es keine Rolle spielen, ob die Parameter dieser Morphologie im Sinne der Schlanke Produktion heute eine Bedeutung haben. Die Morphologie soll lediglich den allgemeinen Lösungsraum für die Gestaltung von Produktionssystemen in der Montage von Werkzeugmaschinen aufzeigen. Die Bewertung wie leistungsfähig verschiedene Kombinationen dieser Morphologie sind, wird in den folgenden Kapiteln betrachtet. Zur Erreichung dieses Ziels empfiehlt sich ein zweistufiges Vorgehen (siehe Bild 27).

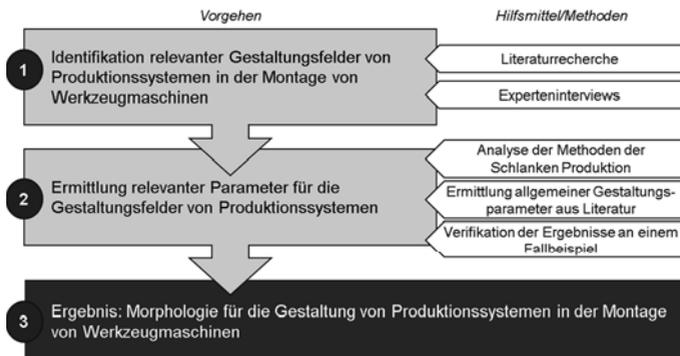


Bild 27: Vorgehen und Hilfsmittel im Kapitel 4

Da durch das angestrebte Ziel einer universellen Morphologie der Lösungsraum für Gestaltungsmöglichkeiten von Produktionssystemen sehr umfangreich ist, soll die Morphologie bewusst auf die einflussreichsten Gestaltungsfelder beschränkt werden, die in der Literatur und Praxis als wesentlich für die Gestaltung Schlanker Produktionssysteme im Werkzeugmaschinenbau gelten.

Zunächst wurden deshalb die Subsysteme von Produktionssystemen untersucht und deren Bedeutung für die Montage von Werkzeugmaschinen bewertet. Im Ergebnis konnte eine Fokussierung auf zwei zentrale Subsysteme erreicht werden.

Innerhalb der identifizierten Subsysteme wurden die Methoden der Schlanken Produktion analysiert und daraus Gestaltungsfelder abgeleitet. Die jeweilige Ausprägung der Methode der Schlanken Produktion in einem Gestaltungsfeld wird folgend als Parameter bezeichnet. So wurde z.B. aus der Methode Pull-Steuerung das Gestaltungsfeld „Steuerung der Materialbereitstellung“ abgeleitet. Die Möglichkeit der Steuerung der Teilebereitstellung nach dem Materialverbrauch (Pull) wurde als eine mögliche Ausprägungsform bzw. Gestaltungsparameter aufgenommen. Durch eine Recherche in der produktionswissenschaftlichen Literatur wurden alternative Parameter identifiziert und ergänzt, für das Beispiel wäre demnach ein weiterer Parameter die Steuerung der Teilebereitstellung nach Auftrag. Somit sollten die originären Gestaltungsparameter der Schlanken Produktion und deren alternative Gestaltungsparameter identifiziert werden.

Zudem wurden alle Gestaltungsfelder auf Ihre generelle Eignung für die Montage von Werkzeugmaschinen überprüft und so nochmals die Komplexität reduziert. So macht beispielsweise die Untersuchung des Gestaltungsfelds „Art und Weise der Auftragsterminierung“ mit seinen Gestaltungsparametern „Vorwärtsterminierung“ und „Rückwärtsterminierung“ im Werkzeugmaschinenbau wenig Sinn, da eine „Vorwärtsterminierung“ im Werkzeugmaschinenbau praktisch nicht relevant ist.

Die daraus abgeleitete Morphologie von Produktionssystemen der Montage für den Werkzeugmaschinenbau wurde schließlich an einem Fallbeispiel hinsichtlich der Eignung für die Beschreibung eines Produktionssystems validiert.

4.2 Priorisierung der Subsysteme von Schlanker Produktionssystemen

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, kann man Produktionssysteme in fünf Subsysteme unterteilen, die in Ihrer Gesamtheit die Gestaltung des Produktionssystems bestimmen:⁹⁸

- Systeme des Hauptprozesses (hier i.S.v. Systeme des Montageprozesses)
- Materialflusssystem
- Qualitätsmanagementsystem
- Instandhaltungssystem
- Informationssystem

Sowohl innerhalb als auch außerhalb der Systemgrenze Montage gibt es eine Vielzahl von Schnittstellen und Abhängigkeiten. Eine eindeutige Trennung der Subsysteme voneinander und von der Umwelt des Gesamtsystems Montage ist somit kaum möglich (sie-

⁹⁸ vgl. Nebl (2004).

he Bild 28). Um eine sinnvolle Priorisierung der Subsysteme von Produktionssystemen der Montage vornehmen zu können, ist es deshalb notwendig:

- das Abhängigkeitsgefüge der Subsysteme in seinen Grundzügen zu erkennen und entsprechend dieses Gefälles zu priorisieren.
- die Bedeutung jedes Subsystems für die allg. Rahmenbedingungen im Werkzeugmaschinenbau zu bewerten und entsprechend ihrer Relevanz zu priorisieren.
- trotz der Priorisierung im späteren Verlauf der Identifikation von Gestaltungsfeldern in den priorisierten Subsystemen abhängige und bedeutende Schnittstellen zu anderen Subsystemen zu beachten.

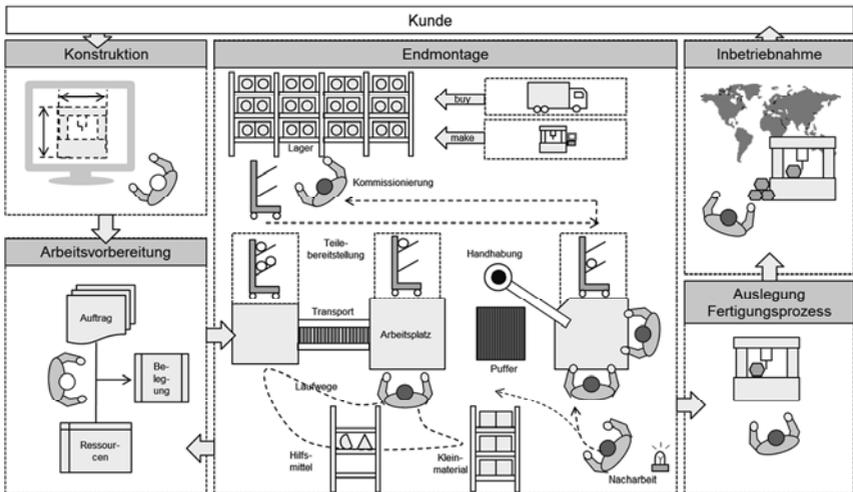


Bild 28: Schnittstellen und beispielhafte Gestaltungsfelder der Montage

Entsprechend dieser Anforderungen wurden die fünf Subsysteme hinsichtlich mehrerer Merkmalen verglichen und mit Produktionsplanern der am Benchmarking teilnehmenden Werkzeugmaschinenhersteller bewertet. Der Bewertungsgegenstand war entsprechend der Eingrenzung des Untersuchungsgegenstands dieser Arbeit allein die Organisation der Montage unterschieden in die fünf Subsysteme. Technische oder unternehmenskulturelle Aspekte der Produktionssystemgestaltung wurden innerhalb der Subsysteme nur betrachtet, wenn ein unmittelbarer Einfluss auf die Organisation der Montage vorlag.

Zur Bewertung der Subsysteme wurden vier Merkmale definiert, die eine Priorisierung für die Montage von Werkzeugmaschinen ermöglichen:

- die Charakterisierung des Subsystems bezüglich des Beitrags zur Wertschöpfung.
→ Identifikation von wertschöpfenden, im Sinne der Schlanke Produktion zu fokussierenden Prozessen.
- die Abhängigkeit der Gestaltung des Subsystems vom Wertschöpfungsprozess.
→ Identifikation von Subsystemen, die nicht unabhängig voneinander betrachtet werden dürfen.

- die Anzahl der Gestaltungsmöglichkeiten des Subsystems.
 - ➔ Identifikation von Subsystemen, die aufgrund relativ geringer Gestaltungsmöglichkeiten nicht betrachtet werden müssen.
- Die relative Höhe der Kostenverursachung des Subsystems im Montageprozess.
 - ➔ Identifikation von Subsystemen, deren Effizienzerhöhung einen bedeutenden Beitrag zur Kostensenkung der gesamten Montage leisten kann.

Das Ergebnis dieser Bewertung findet sich in Bild 29.

Merkmale	Systeme des Hauptprozesses	Materialflusssystem	Qualitätsmanagementsystem	Instandhaltungssystem	Informationssystem
Wertschöpfungscharakter i.S.v. Schlanker Produktion	wertschöpfend	nicht wertschöpfend	nicht wertschöpfend	nicht wertschöpfend	nicht wertschöpfend
Abhängigkeit vom Wertschöpfungsprozess	identisch	hoch	gering	gering	gering
Anzahl der Gestaltungsmöglichkeiten in der Montage	hoch	hoch	mittel	gering	mittel
Anteiliger Personalaufwand in der Endmontage	hoch	mittel	gering	gering	gering
	Fokus der Untersuchung				

Bild 29: Subsysteme von Produktionssystemen und deren Bedeutung für die Untersuchung

Das Subsystem des Hauptprozesses (bzw. Durchführung des Montageprozesses) zeichnet sich klar als wertschöpfender Prozess aus, der sich zudem durch eine relativ große Anzahl an Gestaltungsmöglichkeiten der Organisation des Subsystems auszeichnet und bezüglich der kostenmäßigen Bedeutung bzw. des Kostenhebels deutlich aus dem Vergleich heraussticht. Alle anderen Subsysteme sind bezüglich ihrer Bedeutung für die Leistungsfähigkeit der Montage absolut notwendig, im Vergleich jedoch niedriger zu priorisieren als der Hauptprozess. Zwischen den vier verbleibenden Subsystemen kann sich wiederum das Materialflusssystem nochmal deutlich von den anderen Subsystemen absetzen. So ist eine Betrachtung dieses Subsystems aufgrund der hohen Abhängigkeit zum Hauptprozess notwendig, aufgrund des mäßigen Beitrags zur Kostenentstehung immer noch lohnenswert und aufgrund der vielen Gestaltungsmöglichkeiten des Subsystems sinnvoll. Insofern bietet sich eine Priorisierung der Subsysteme Hauptprozess und Materialfluss an, um die Untersuchung fortzusetzen.

Das Ergebnis ist nachvollziehbar vor dem Hintergrund des Paradigmas der Wertschöpfungsorientierung der Schlanken Produktion (siehe Kapitel 2.1.3) und der daraus abgeleiteten Forderung zur Orientierung aller unterstützenden Funktionen an dem wertschöpfenden Prozess (hier Montageprozess). Somit ergibt sich ein Abhängigkeitsgefälle entlang des unmittelbaren Einflusses auf den Montageprozess und eine entsprechende Priorisierung der Subsysteme. Da das nicht nur charakteristisch für den Werkzeugmaschinenbau ist (z.B. im Automobilbau bekannt als Line-Back-Planungsprinzip)⁹⁹, ergibt sich so die Tatsache, dass auch die Mehrheit der Methoden der Schlanken Produktion genau auf die Gestaltung der Subsysteme „Hauptprozess“ und „Materialfluss“ zielen.

⁹⁹ vgl. Klug (2010).

Ebenfalls ist die Verknüpfung zwischen beiden Subsystemen so stark, dass es wenig Sinn machen würde diese unabhängig voneinander zu betrachten. So wurden schon vor Aufkommen der Methoden der Schlanken Produktion die Organisationsformen der Montage charakterisiert, indem Gestaltungsparameter der Systeme des Hauptprozesses und des Materialflusssystems miteinander kombiniert wurden, z.B. in Werkstattmontage, Standplatzmontage und Fließmontage. Diese klassischen Grundformen von Produktionssystemen der Montage sollen auch für die weitergehenden Untersuchungen die Grundlage darstellen. Eine Erweiterung dieser Grundformen um weitere Gestaltungsfelder wird zudem als zwingend notwendig angesehen, um das formulierte Ziel der hinreichenden Beschreibung schlanker Produktionssysteme zu ermöglichen (siehe Bild 30).

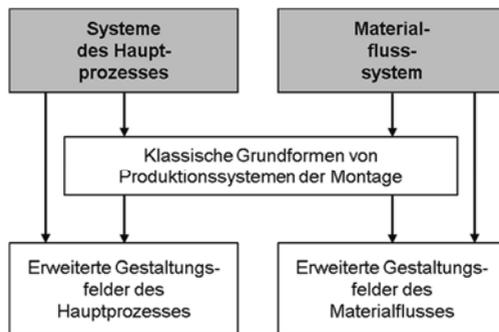


Bild 30: Abgeleitete Untersuchungsfelder

4.3 Klassische Grundformen von Produktionssystemen der Montage

Die klassischen Grundformen von Produktionssystemen in der Montage wurden bereits durch eine Vielzahl von Autoren wissenschaftlich beschrieben. Hier seien Eversheim¹⁰⁰, Nebl¹⁰¹, Wiendahl¹⁰² und Petersen¹⁰³ stellvertretend genannt. Alle hatten zum Ziel Organisationsformen der Montage zu klassifizieren, die in Folgendem auch als klassische Grundformen von Produktionssystemen der Montage bezeichnet werden. Obwohl sie zum Teil unterschiedliche Namen für die identifizierten Organisationsformen verwendeten, bleibt allen Ansätzen gemein auf ähnliche Gestaltungsfelder zur Generierung der unterschiedlichen Grundformen zurück zu greifen.

Zentrale Gestaltungsfelder entspringen so in allen Ansätzen der Beantwortung der Frage, welcher Produktionsfaktor (also Montageobjekt, Betriebsmittel und/oder Arbeitskraft) sich durch das Produktionssystem bewegt und welcher Produktionsfaktor stationär ohne Bewegung verbleibt. Weitere Gestaltungsfelder entstammen der Art und Weise der räumlichen Orientierung der Arbeitsplätze, z.B. ob es einen gerichteten Materialfluss gibt oder dieser variiert.

¹⁰⁰ vgl. Eversheim (1987).

¹⁰¹ vgl. Nebl (2004).

¹⁰² vgl. Lotter, Wiendahl (2006).

¹⁰³ vgl. Petersen (2005).

Die Kombination der unterschiedlichen Parameter können so bis zu neun Organisationsformen gebildet werden (siehe Bild 31).

	Werkstattmontage	Gruppenmontage (1)	Gruppenmontage (2)	Reihenmontage (1)	Reihenmontage (2)	Fließmontage (1)	Fließmontage (2)	Fließmontage (3)	Standplatzmontage
Gestaltungsfelder									
Begründung der räuml. Anordnung	Techn. Verfahren	BF variabel	BF variabel	BF variabel	BF variabel	BF starr	BF starr	BF starr	BF variabel
Orientierung der räuml. Anordnung	variierend	variierend	variierend	gerichtet	gerichtet	gerichtet	gerichtet	gerichtet	-
Bewegung der Montageobjekte	bewegt	bewegt	stationär	bewegt	stationär	bewegt	stationär	bewegt	stationär
Bewegung der Arbeitskräfte	stationär	stationär	bewegt	stationär	bewegt	stationär	bewegt	bewegt	stationär

BF – Bearbeitungsfolge(n)

Bild 31: Klassische Grundformen von Produktionssystemen der Montage¹⁰⁴

Je nach Autor werden auch weitere Kriterien zur Bildung von Organisationsformen der Montage herangezogen, die jedoch für die Montage im Werkzeugmaschinenbau weniger von Bedeutung sind, wie z.B. der Automatisierungsgrad von Arbeitsstationen.

Diese neun klassischen Grundformen von Produktionssystemen der Montage und ihre Gestaltungsfelder bilden in Folgendem den Ausgangspunkt für die Identifikation weiterer Gestaltungsfelder und ihrer Parameter, um die hinreichende Beschreibung schlanker Produktionssysteme zu ermöglichen.

4.4 Erweiterte Gestaltungsfelder von Produktionssystemen der Montage

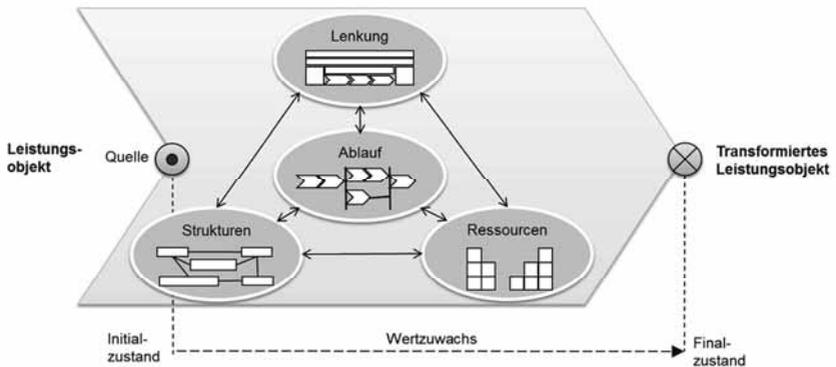
Schlanke Produktionssysteme sind durch eine starke Prozessorientierung gekennzeichnet. Bevor auf die erweiterten Gestaltungsfelder in den zwei zu untersuchenden Subsystemen „Hauptprozess“ und „Materialfluss“ eingegangen wird, soll zunächst beschrieben werden, was unter einem Prozess zu verstehen ist und welche Charakteristika einen Prozess bestimmen. Die daraus erwachsene Systematik soll genutzt werden um die identifizierten Gestaltungsfelder und Gestaltungsparameter in den folgenden Unterkapiteln zu klassifizieren.

4.4.1 Allgemeine Charakteristika von Prozessen

Ein Prozess im Sinne von Produktionsprozess ist eine zusammenhängende Aktivität zur Erbringung einer Leistung bzw. zur Erzielung eines Wertzuwachses. Prozesse finden dabei immer an einem Leistungsobjekt statt, das im Verlaufe der Aktivität zielgerichtet transformiert wird. Prozesse haben ein definiertes Anfang und ein definiertes Ende (siehe Bild 32).¹⁰⁵

¹⁰⁴ in Anlehnung an Petersen (2005).

¹⁰⁵ vgl. Arnold, Isermann, Kuhn, Tempelmeier, Furmans (2007).

Bild 32: Charakteristika und Elemente von Prozessen¹⁰⁶

Jeder Prozess lässt sich charakterisieren durch die Beschreibung von zwei Prozesseigenschaften

1. Prozessgegenstand: Was ist das Leistungsobjekt? An welchem Gegenstand wird die Transformation durchgeführt?
2. Prozessziel: Was ist das gewünschte Transformationsergebnis?

und vier Prozesselementen.¹⁰⁷

1. Lenkung: Wie wird der Prozess gesteuert und geregelt, auch im Hinblick auf externe Prozessschnittstellen?
2. Ablauf: In welcher Art und Weise erfolgt die zeitliche und sachliche Durchführung des Prozesses?
3. Ressourcen: Welche Ressourcen (z.B. Arbeitskräfte, Betriebsmittel, Hilfsstoffe) des Prozesses werden in welcher Form bereitgestellt?
4. Strukturen: Wie sind die Anordnung der Ressourcen und die Aufbauorganisation des Prozesses gestaltet?

In Folgendem sollen diese Prozesscharakteristika für „Hauptprozesse“ und „Materialfluss“ hinsichtlich Schlanker Produktionssysteme definiert werden.

¹⁰⁶ vgl. Arnold, Isermann, Kuhn, Tempelmeier, Furmans (2007).

¹⁰⁷ in Anlehnung an Arnold, Isermann, Kuhn, Tempelmeier, Furmans (2007).

4.4.2 Erweiterte Gestaltungsfelder des Hauptprozesses

Der Hauptprozess bzw. Montageprozess hat zur Aufgabe Werkzeugmaschinen aus Teilen und Baugruppen zu komplettieren.¹⁰⁸ Der Prozessgegenstand stellt in diesem Zusammenhang das Montageobjekt, also die Werkzeugmaschine, dar. Ziel des Hauptprozesses ist die Komplettierung der Werkzeugmaschine in der geplanten Qualität, in der geplanten Zeit und zu den geplanten Kosten zu realisieren.

Entsprechend der untersuchten Methoden der Schlanke Produktion für Hauptprozesse (siehe Anhang A) wurden für die vier Elemente von Prozessen 14 Gestaltungsfelder identifiziert und insgesamt 31 Gestaltungsparameter recherchiert. Drei der Gestaltungsfelder sind bereits Bestandteil klassischer Grundformen von Produktionssystemen der Montage (siehe Bild 33).

Prozesselement	Gegenstand	Aufgaben des Prozesselements	Gestaltungsfelder des Prozesselements	Parameter der Gestaltungsfelder			
Lenkung	Arbeitsauftrag	Auftragsplanung (alle vorbereitenden, einmalig auftretenden Maßnahmen für die Auftragsabwicklung)	Strategie der Auftragseinlastung	Emanzipation	Synchronisation	Eskalation	
			Management der Auftragseinlastung	zentral		dezentral	
		Auftragssteuerung (alle Maßnahmen, die für die Einhaltung der Auftragsabwicklung erforderlich sind)	Strategie der Störungsbeseitigung	Sofortige Beseitigung der Störung		Aussteuern der Störung	
			Management der Störungsbeseitigung	Aufstockung der Kapazitäten		Umverteilung der Kapazitäten	
Ablauf	Bauteile, Baugruppen	Durchführung Montage	Bewegung der Arbeitskräfte*	bewegt		stationär	
			Rhythmus der Bewegung	varierend		getaktet	
			Bestimmtheit der Bearbeitungsfolge	unspezifisch		standardisiert	
Resourcen	Arbeitskräfte	Bereitstellung prozessrelevanter Potentialfaktoren	Spezialisierung der Arbeitskräfte	Gewerk	Fachgruppe	Arbeitsplatz	
			Einsatzflexibilität der Arbeitskräfte	ein Arbeitsplatz		mehrere Arbeitsplätze	
			Kapazitive Flexibilität der Arbeitskräfte	konstant		flexibel	
Struktur	Arbeits-system, Arbeits-platz	räumliche Gestaltung des Arbeitssystems	Begründung der räumlichen Anordnung*	Technisches Verfahren	Bearbeitungs-folge variabel	Bearbeitungs-folge starr	
			Orientierung der räumlichen Anordnung*	varierend		gerichtet	
		räumliche Gestaltung des Arbeitsplatzes	Spezialisierung des Arbeitsplatzes	universell		variantenspezifisch	
			Systematisierung des Arbeitsplatzes	individuell		standardisiert	

* Gestaltungsfeld klassischer Grundformen von Produktionssystemen der Montage

Bild 33: Gestaltungsfelder und –parameter des Hauptprozesses

Die Zielsetzung bei der Identifikation der Gestaltungsparameter war es grundlegende Gestaltungsfelder von Produktionssystemen zu analysieren. Die Beschreibungsebene sollte demnach auf einem ähnlichen Niveau wie das der klassischen Grundformen für Produktionssysteme der Montage erfolgen und hatte nicht den Anspruch detailliert jede

¹⁰⁸ in Anlehnung an VDI 2815, 2860 (1978).

Auswirkung des Einsatzes aller Methoden der Schlanke Produktion zu beschreiben. Sowohl die steigende Komplexität als auch die fehlende Übersichtlichkeit würde die Erreichung des Hauptziels der Entwicklung einer praktikablen Entscheidungshilfe gefährden. Eine damit einhergehende Unschärfe bei der Beschreibung von Schlanke Produktionssystemen wurde in Kauf genommen und wird im späteren Verlauf der Arbeit detailliert hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Endergebnis analysiert. Die identifizierten Gestaltungsfelder sind im Einzelnen:

Strategie der Auftragseinlastung

Methoden der Schlanke Produktion, wie Auftragsglättung und Flexible Mitarbeitersysteme, zielen auf die Schaffung konstanter Kapazitätsbedarfe im Sinne der Emanzipation oder stufenweise konstanter Kapazitätsbedarfe im Sinne der Eskalation, um das Kapazitätsangebot darauf auszurichten. Neben diesen Ansätzen ist auch eine Synchronisation, also die flexible Anpassung des Kapazitätsangebots, anwendbar.

Management der Auftragseinlastung

Methoden der Schlanke Produktion, wie Auftragseinstuerung am Schrittmacherprozess, zielen auf die Steuerung des gesamten Montageprozesses ausgehend von einem zentralen Montageschritt. Dem gegenüber ist die grundlegende Möglichkeit der dezentralen Einstuerung der Aufträge an mehreren bzw. allen Arbeitsstationen anwendbar.

Steuerung der Störungsbeseitigung

Methoden der Schlanke Produktion, wie Reißleine oder Hansho, zielen auf die sofortige Beseitigung einer Störung noch während des regulären Montageprozesses. Dem gegenüber steht die Strategie der Aussteuerung von Störungen und deren Beseitigung nach oder neben dem Montageprozess.

Management der Störungsbeseitigung

Methoden der Schlanke Produktion, wie Taktung oder Hansho, zielen auf die Bereitstellung von Zusatzkapazitäten zur Störungsbeseitigung, um die Produktion im Takt sicherzustellen. Dem gegenüber steht die Strategie der Störungsbeseitigung durch die prozesseigenen Ressourcen, also durch Umverteilung der Kapazitäten.

Bewegung der Arbeitskräfte

Methoden der Schlanke Produktion, wie Fließlinie, zielen im Werkzeugmaschinenbau auf stationäre Arbeitskräfte und Betriebsmittel. Dem gegenüber steht die Möglichkeit diese Ressourcen von Arbeitsplatz zu Arbeitsplatz zu bewegen.

Rhythmus der Bewegung

Methoden der Schlanke Produktion, wie Fließlinie und Takt, zielen auf die standardisierte Taktung der Arbeitsinhalte und eine entsprechende Bewegung der Montageobjekte im Takt. Dem gegenüber steht die Möglichkeit diese Bewegung variierend durchzuführen.

Bestimmtheit der Bearbeitungsfolge

Methoden der Schlanke Produktion, wie Standardarbeitsanweisung, zielen auf die Ermöglichung immer gleicher Arbeitsabläufe und sich daraus ergebender Lerneffekte. Dem gegenüber steht die Möglichkeit Bearbeitungsfolgen variierend durchzuführen.

Spezialisierung der Arbeitskräfte

Methoden der Schlanke Produktion, wie Fließlinie, zielen im Werkzeugmaschinenbau auf eine relativ hohe Spezialisierung der Montagefachkräfte auf Arbeitsplatzebene, z.B. Aufbau X-Achse. Dem gegenüber steht die Möglichkeit einer Teilspezialisierung auf mehrere Arbeitsplätze in Fachgruppen, z.B. Aufbau Achsen, oder einer universellen Qualifikation in Gewerken, z.B. Mechanik oder Elektronik.

Einsatzflexibilität der Arbeitskräfte

Methoden der Schlanke Produktion, wie Gruppenarbeit, zielen auf die Ermöglichung einer begrenzten Einsatzflexibilität der Arbeitskräfte über mehrere Arbeitsplätze. Dem gegenüber steht die Möglichkeit der vollkommenen Spezialisierung auf einen Arbeitsplatz.

Kapazitive Flexibilität der Arbeitskräfte

Methoden der Schlanke Produktion, wie Gruppenarbeit und Springerarbeitsplätze, zielen auf die Ermöglichung einer kapazitiven Flexibilität des Produktionssystems, u.a. auch durch Einsatz externer Kapazitäten wie Zeitarbeiter. Dem gegenüber steht die Möglichkeit vergleichsweise konstante Kapazitäten von Arbeitskräften zu realisieren.

Begründung der räumlichen Anordnung

Methoden der Schlanke Produktion, wie U-Zelle und Fließlinie, zielen auf die Anordnung der Arbeitsplätze nach einer starren Bearbeitungsfolge. Dem gegenüber steht die Möglichkeit die Anordnung nach einer variablen Bearbeitungsfolge zu realisieren oder gar die Anordnung nach dem technischen Verfahren vorzunehmen, z.B. Mechanische Werkstatt, Elektrowerkstatt.

Orientierung der räumlichen Anordnung

Methoden der Schlanke Produktion, wie U-Zelle und Fließlinie, zielen auf die Anordnung der Arbeitsplätze in einer vorgegebenen Richtung bzw. entlang einer Kette. Dem gegenüber steht die Möglichkeit die Anordnung ungerichtet bzw. variabel ablaufen zu lassen.

Spezialisierung des Arbeitsplatzes

Methoden der Schlanke Produktion, wie Fließlinie und Takt, zielen auf die Gestaltung der Arbeitsplätze nach den Arbeitsinhalten. Dem gegenüber steht die Möglichkeit die Arbeitsplätze universell bzw. unabhängig vom Montageschritt zu gestalten.

Standardisierung des Arbeitsplatzes

Methoden der Schlanke Produktion, wie 5S, zielen auf die systematische und standardisierte Gestaltung von Arbeitsplätzen. Dem gegenüber steht die Möglichkeit die Arbeitsplätze individuell zu gestalten.

4.4.3 Erweiterte Gestaltungsfelder des Materialflusses

Der Materialfluss umfasst im Allgemeinen alle logistischen Prozesse im Unternehmen, die den Produktionsfaktor Werkstoffe betreffen. Im engeren Sinne wird für die Gestaltung von Produktionssystemen vor allem die Produktionslogistik adressiert. Diese umfasst das innerbetriebliche Transportieren, Handhaben und Lagern von Materialien durch das Produktionssystem. Ziel der Produktionslogistik ist die richtigen Güter, in der richtigen Menge, in der richtigen Qualität, am richtigen Ort und zur richtigen Zeit bereitzustellen.¹⁰⁹ Der Prozessgegenstand ist nicht eindeutig, da Materialflüsse sich auf mehrere Leistungsobjekte beziehen können. So lässt sich die Produktionslogistik nochmals nach dem Prozessgegenstand unterteilen:¹¹⁰

- **Produktlogistik** (Hauptfluss): Transport, Handhabung und Lagerung eines Zwischenprodukts oder eines Endprodukts von Arbeitsplatz zu Arbeitsplatz entlang der Bearbeitungsfolge.
- **Teilelogistik**: Transport, Handhabung und Lagerung eines Einzelteils oder einer Baugruppe vom Lager zum Arbeitsplatz.
- **Versorgungslogistik**: Transport, Handhabung und Lagerung von Hilfsstoffen, Vorrichtungen, Werkzeugen und Prüfmitteln.

Im Weiteren sollen jedoch nur die Produktlogistik und die Teilelogistik weiterführend betrachtet werden. Einerseits wird das den enormen Unterschieden der höheren Bedeutung der zwei untersuchten Materialflüsse im Gegensatz zur Versorgungslogistik für die Montage im Werkzeugmaschinenbau gerecht, andererseits verringert diese Fokussierung die Komplexität.

Die 12 identifizierten Gestaltungsfelder (siehe Bild 34) gelten sowohl für Produkt- als auch Teilefluss, wobei der Produktfluss bereits stark durch die Charakteristik des Hauptflusses bestimmt wird bzw. der allgemeine Gestaltungsspielraum bei der Wahl unterschiedlichen Parameter im Werkzeugmaschinenbau sehr beschränkt ist. So wird z.B. praktisch innerhalb der Bearbeitungsfolge in der Montage von Werkzeugmaschinen nicht gelagert, da es sich zumeist um Auftragsproduktion hochwertiger Produkte handelt. Die größte praktische Bedeutung hat demnach die Beschreibung des Teileflusses inne. Die identifizierten Gestaltungsfelder sind im Einzelnen:

Strategie der Bereitstellung

Methoden der Schlanke Produktion, wie JIT und JIS, zielen auf die möglichst direkte Versorgung der Arbeitsplätze mit Materialien ohne Zwischenlager. Ebenfalls wird aber auch die Bereitstellung aus Lagern durch Methoden der Schlanke Produktion wie z.B. Kanban adressiert.

Strategie der Steuerung

Methoden der Schlanke Produktion, wie Kanban, zielen auf verbrauchs- bzw. bestandsorientierte Bereitstellung von Material. Ebenfalls wird aber auch die Bereitstellung

¹⁰⁹ in Anlehnung an Arnold, Isermann, Kuhn, Tempelmeier, Furmans (2007).

¹¹⁰ in Anlehnung an Ulrich (1990).

nach Auftrag bzw. Bedarf durch Methoden der Schlanken Produktion wie z.B. JIS adressiert.

Prozesselement	Gegenstand	Aufgaben des Prozesselements	Gestaltungsfelder des Prozesselements	Parameter der Gestaltungsfelder		
Lenkung	Bereitstellungsauftrag	versorgung des Hauptprozesses	Strategie der Bereitstellung	Direktlieferung		Lagerlieferung
			Strategie der Steuerung	Bedarfsorientiert	Verbrauchsorientiert	
			Bereitstellungsform der Materialien	kommissioniert	Gebinde	
Ablauf	Bauteile, Baugruppen	Durchführung Versorgung	Bewegung der Materialien*	bewegt	stationär	
			Rhythmus der Bewegung	variierend	getaktet	
			Koordination der Bewegung	Punkt-zu-Punkt	Route	
Ressourcen	Arbeitskräfte	Bereitstellung prozessrelevanter Potentialfaktoren	Durchführung Materialfluss	Montagefachkraft	Logistikfachkraft	
			Einsatzflexibilität der Arbeitskräfte	universell	spezialisiert	
Struktur	Lager, Anstellung	räumliche Gestaltung der Lager	Anordnung der Lager	Kein Lager	zentral	dezentral
			Art der Lager	Kein Lager	chaotische Lagerung	Standardlager
			Behälterkonzept	Unspezifische Behälter	Standardbehälter	behälterlos
		räumliche Gestaltung Anstellung	Anstellung am Arbeitsplatz	undefiniert	standardisiert	

Bild 34: Gestaltungsfelder und –parameter des Materialflusses

Bereitstellungsform der Materialien

Methoden der Schlanken Produktion, wie Kanban, zielen auf Bereitstellung des Materials in Form von standardisierten Gebinden. Ebenfalls wird aber auch die kommissionierte Bereitstellung von Materialien durch Methoden der Schlanken Produktion wie z.B. JIS adressiert.

Bewegung der Materialien

Dieses Gestaltungsfeld hat nur für den Produktfluss eine praktische Bedeutung, da die Bewegung der Teile in allen Produktionssystemen des Werkzeugmaschinenbaus als notwendig vorausgesetzt werden kann. Methoden der Schlanken Produktion, wie Fließlinie, zielen auf Bewegung des Montageobjekts durch das Produktionssystem. Dem gegenüber steht die Möglichkeit Montageobjekte stationär zu bearbeiten.

Rhythmus der Bewegung

Methoden der Schlanken Produktion, wie Fließlinie und Takt, zielen auf die standardisierte Taktung der Arbeitsinhalte und eine entsprechende Bewegung der Montageobjekte im Takt. Auch der Teilefluss erfolgt durch Methoden der Schlanken Produktion, wie z.B. Milkrun, rhythmisch. Dem gegenüber steht die Möglichkeit Bewegungen der Teile und Montageobjekte variierend durchzuführen.

Koordination der Bewegung

Methoden der Schlanke Produktion wie Milkrun zielen in der Teilelogistik auf die Bildung fester Versorgungsrouten des Produktionssystems. Dem gegenüber steht die Möglichkeit Teile nur im Bedarfsfall von Lagerort zu Arbeitsplatz zu transportieren.

Durchführung Materialfluss

Prinzipien der Schlanke Produktion, wie Wertschöpfungsorientierung, zielen auf die Trennung von Montageinhalten und Logistikaufgaben. Dem gegenüber steht die Möglichkeit auch Montagefachkräfte für Logistikaufgaben einzusetzen.

Einsatzflexibilität Arbeitskräfte

Methoden der Schlanke Produktion, wie Gruppenarbeit, zielen auf die Ermöglichung einer begrenzten Einsatzflexibilität der Arbeitskräfte für alternative Aufgaben. Dem gegenüber steht die Möglichkeit der vollkommenen Spezialisierung auf Logistikaufgaben.

Anordnung der Lager

Methoden der Schlanke Produktion, wie Supermarkt, zielen auf Einrichtung wertschöpfungsnaher, dezentraler Lagereinheiten. Dem gegenüber steht die Möglichkeit auf zentrale Großlager zurückzugreifen.

Art der Lager

Methoden der Schlanke Produktion, wie Supermarkt und Standardisierung, zielen auf systematische und standardisierte Einlagerung von Teilen mit definiertem Platz und Mengen. Dem gegenüber steht die Möglichkeit chaotisch zu lagern.

Behälterkonzept

Prinzipien der Schlanke Produktion, wie Standardisierung, zielen auf die Nutzung einheitlicher Kleinteilebehälter oder bei Großteilen die behälterlose Bereitstellung. Dem gegenüber steht die Möglichkeit unspezifische Behältnisse wie z.B. die Originalverpackung zu nutzen.

Anstellung am Arbeitsplatz

Methoden der Schlanke Produktion, wie 5 S, zielen auf die systematische und standardisierte Gestaltung von Arbeitsplätzen und somit auch der Anstellung des Materials, z.B. auf speziell gestalteten Teilwagen. Dem gegenüber steht die Möglichkeit die Anstellung unsortiert und unsystematisch vorzunehmen, z.B. in Kisten.

Im Gegensatz zu den Gestaltungsparametern des Hauptprozesses fällt bei der genaueren Untersuchung der Gestaltungsparameter des Materialflusses auf, dass die Methoden der Schlanke Produktion hier nicht zwangsläufig die Gestaltung der Logistikprozesse vorschreiben, sondern je nach Eigenschaften der Teile auch unterschiedliche Gestaltungsprinzipien zum Einsatz kommen. Es kann z.B. also sehr wohl Teile im Produktionssystem geben, die mit Kanban gesteuert werden und andere Teile, die mit Einzelaufträgen just in time an den Arbeitsplatz geliefert werden. Eine Beschreibung eines Schlan-

ken Produktionssystems muss also dieser Unterschiedlichkeit der Teileigenschaften gerecht werden und eine Segmentierung unterschiedlicher Teile vornehmen. In der Literatur gibt es drei hauptsächlich angewandte Charakterisierungsformen von Teilen:¹¹¹

- nach Verbrauchswert (ABC-Analyse)
- nach Verbrauchsstetigkeit (XYZ-Analyse)
- nach Teilegröße (GMK-Analyse)

Für die Beschreibung des Einsatzes bestimmter Methoden der Schlanke Produktion haben sich insbesondere der Verbrauchswert und die Verbrauchsstetigkeit in der Literatur durchgesetzt.¹¹² Nichtsdestoweniger sind die Unterschiede in den daraus abgeleiteten Empfehlungen (z.B. „Bei welcher Art von Teilen setze ich Kanban ein?“) erheblich, zum Teil widersprüchlich und nicht überschneidungsfrei. Das mag nicht zuletzt daran liegen, dass je nach Branche und Produkt das Teilespektrum sehr differiert und deswegen Erfahrungen zwischen Branchen nur bedingt übertragbar sind.

Aufgrund des ähnlichen Aufbaus von Werkzeugmaschinen und ähnlichen Teilespektren wird diese Problematik im Benchmark nicht erwartet. Aufgrund der branchentypischen Rahmenbedingungen wie auftragspezifische Produktion, große Produkte und sehr hohe Variantenvielfalt wird erwartet, dass die Charakteristika Verbrauchswert und Verbrauchsstetigkeit in Kombination nicht die praktisch relevanten Kriterien zur Segmentierung unterschiedlicher Teilehandhabung im Werkzeugmaschinenbau darstellen. Vielmehr wurde sich deshalb an der unterschiedlichen Handhabung von Teilen in bereits eingeführten originären Schlanke Produktionssysteme des Werkzeugmaschinenbaus orientiert (siehe Bild 35).¹¹³

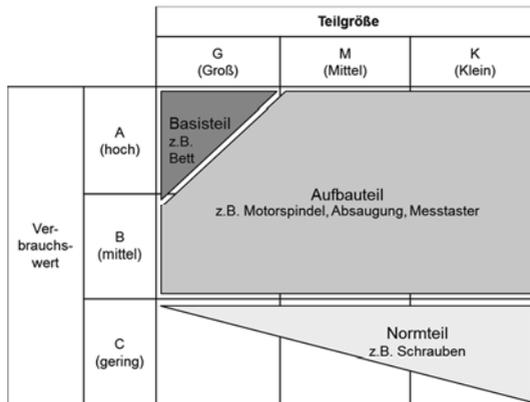


Bild 35: Teilearten im Werkzeugmaschinenbau

Bei diesen Produktionssystemen ist die Segmentierung der Teilearten nach dem Verbrauchswert und der Teilegröße durchgängig realisiert. So werden AG-Teile ohne Zwi-

¹¹¹ vgl. Kiener (2009).

¹¹² vgl. Heiserich (2002).
vgl. Dickmann (2009).
vgl. Jodlbauer (2007).

¹¹³ in Anlehnung an Geissler (2007).

schenlager direkt an den Arbeitsplatz geliefert, die restlichen A- und B-Teile kommissioniert auf Materialwagen aus einem Groß- und Kleinteilelager bereitgestellt und C-Teile als Schüttgut am Arbeitsplatz gelagert. Es können so drei Teileklassen generiert werden, deren Gestaltung im Benchmarking untersucht werden sollen:

- | | |
|-----------------|--|
| A) Basisteile: | Diese Teile sind hochwertig, kommen pro Maschine in geringen Mengen vor und sind relativ groß. Die Lagerung ist sehr teuer, die Möglichkeiten zur Handhabung eingeschränkt. Beispiele hierfür sind das Maschinenbett und -achsen. |
| B) Aufbauteile: | Aufbauteile sind unterschiedlicher Größe, mittlerer Häufigkeit und zeichnen sich durch einen mittleren bis hohen Verbrauchswert aus. Die Handhabbarkeit der Teile ist relativ gut. Beispiele hierfür sind Motorspindeln oder Messtaster. |
| C) Normteile: | Normteile sind klassische C-Teile, wie Schrauben, Clips und Verdrahtung. Sie sind zumeist klein, zeichnen sich durch einen sehr geringen Verbrauchswert aus und kommen in großen Mengen in der Werkzeugmaschine vor. |

Für jede dieser Teilearten soll im Benchmarking die Gestaltung des Teileflusses separat untersucht werden. Aus dem Produktfluss und den drei Teileflüssen ergeben sich so theoretisch 4 Prozessmorphologien des Materialflusses. Da der Produktfluss kaum unabhängig vom Hauptprozess parametrisierbar ist und in seinem wesentlichen Gestaltungsfeld „Bewegung der Materialien“ bereits hinreichend durch die klassischen Grundformen von Produktionssystemen der Montage beschrieben ist, soll auf weitere Untersuchungen dieser Prozessmorphologie aus Gründen der Vereinfachung verzichtet werden.

4.5 Zusammenfassung

Das Ziel dieses Kapitels war die Entwicklung eines morphologischen Kastens zur Beschreibung von Produktionssystemen. Insgesamt wurden 4 Prozessmorphologien ermittelt, um die Ausgestaltung von Produktionssystemen zu beschreiben:

- Klassische Grundformen von Produktionssystemen der Montage
- Gestaltungsfelder und –parameter des Teileflusses für Basisteile
- Gestaltungsfelder und –parameter des Teileflusses für Aufbauteile
- Gestaltungsfelder und –parameter des Teileflusses für Normteile

Die Gestaltungsfelder und –parameter der vier Prozessmorphologien wurden in eine Gesamtübersicht zusammengefasst. Zur ganzheitlichen und überschneidungsfreien Darstellung wurden Doppelungen in den Gestaltungsfeldern entfernt. Die so entstandene Gesamtübersicht der Gestaltungsfelder und –parameter schlanker Produktionssysteme wurde in einem Fallbeispiel auf die Anwendbarkeit zur Beschreibung eines Produktionssystems überprüft. Das Ergebnis ist in Bild 36 und Bild 37 zu finden. Das im folgenden Kapitel beschriebene Benchmarking wurde ebenfalls genutzt, um in mehreren Rekursionsschleifen die Morphologie weiter zu optimieren. Auf den folgenden Seiten ist bereits die optimierte Gesamtübersicht zu finden. Wie im späteren Verlauf der Arbeit herausgestellt wird, hat sich die Beschreibungsform als geeignet herausgestellt, um unterschiedliche Ausgestaltungen von Produktionssystemen miteinander zu vergleichen.

	Gegenstand	Aufgaben	Gestaltungsfelder	Parameter der Gestaltungsfelder					
Teilefluss Aufbautteile	Bereitstellungsauftrag	Versorgung des Hauptprozesses	Strategie der Bereitstellung	Lagerlieferung	Direktlieferung		24		
			Strategie der Steuerung	Verbrauchsorientiert	Bedarfsorientiert		25		
			Bereitstellungsform der Materialien	Gebinde	kommissioniert		26		
	Bauteile, Baugruppen	Durchführung Versorgung	Rhythmus der Bewegung	varierend		getaktet	27		
			Koordination der Bewegung	Punkt-zu-Punkt		Route	28		
	Arbeitskräfte	Bereitstellung prozessrelevanter Potentialfaktoren	Durchführung Materialfluss	Montagefachkraft		Logistikfachkraft	29		
			Einsatzflexibilität der Arbeitskräfte	universell		spezialisiert	30		
	Lager, Anstellung	räumliche Gestaltung der Lager	Anordnung der Lager	zentral	dezentral	Kein Lager		31	
			Art der Lager	chaotische Lagerung	Standardlager	Kein Lager		32	
			Behälterkonzept	Unspezifische Behälter	Standardbehälter	behälterlos		33	
			räumliche Gestaltung Anstellung	Anstellung am Arbeitsplatz	undefiniert		standardisiert		34
Teilefluss Normteile	Bereitstellungsauftrag	Versorgung des Hauptprozesses	Strategie der Bereitstellung	Lagerlieferung	Direktlieferung		35		
			Strategie der Steuerung	Verbrauchsorientiert	Bedarfsorientiert		36		
			Bereitstellungsform der Materialien	Gebinde	kommissioniert		37		
	Bauteile, Baugruppen	Durchführung Versorgung	Rhythmus der Bewegung	varierend		getaktet	38		
			Koordination der Bewegung	Punkt-zu-Punkt		Route	39		
	Arbeitskräfte	Bereitstellung prozessrelevanter Potentialfaktoren	Durchführung Materialfluss	Montagefachkraft		Logistikfachkraft	40		
			Einsatzflexibilität der Arbeitskräfte	universell		spezialisiert	41		
	Lager, Anstellung	räumliche Gestaltung der Lager	Anordnung der Lager	zentral	dezentral	Kein Lager		42	
			Art der Lager	chaotische Lagerung	Standardlager	Kein Lager		43	
			Behälterkonzept	Unspezifische Behälter	Standardbehälter	behälterlos		44	
			räumliche Gestaltung Anstellung	Anstellung am Arbeitsplatz	undefiniert		standardisiert		45

■ Beispielhafte Ausprägung eines Produktionssystems

Bild 37: Systematik der Gestaltungsfelder eines Produktionssystems in der Montage von Werkzeugmaschinen (2)

5. Identifikation von Arten Schlanker Produktionssysteme im Werkzeugmaschinenbau

Die Identifikation einer begrenzten Anzahl an Schlanken Produktionssystemen ist eine wesentliche Bedingung für die Bestätigung der in Kapitel 3.2 formulierten Forschungsthesen und somit die Grundlage für die Entwicklung einer Methode zur Vereinfachung des Gestaltungsprozesses von Schlanken Produktionssystemen.

5.1 Vorgehen und Hilfsmittel

Das Ziel der Identifikation der Arten Schlanker Produktionssysteme im Werkzeugmaschinenbau wird praxisnah in einem Benchmarking erreicht. Zunächst soll deshalb die allgemeine Vorgehensweise eines Benchmarking erläutert werden, um dann die spezifische Umsetzung in der vorliegenden Ausarbeitung aufzuzeigen.

5.1.1 Allgemeine Vorgehensweise beim Benchmarking

Benchmarking kann verstanden werden als „eine objektive, vergleichende Bewertung von Strategien, Prozessen, Funktionen und Verhaltensweisen mit Hilfe von quantitativen Indikatoren und qualitativer Messgrößen, die sich aus der direkten Analyse von Daten und Informationen einer repräsentativen Gruppe von ähnlichen oder konkurrierenden Unternehmen ergeben.“¹¹⁴ Das Ziel dabei ist es, Leistungslücken zwischen den Benchmarking-Partnern zu quantifizieren und Maßnahmen zur Schließung dieser Leistungslücken abzuleiten.¹¹⁵ Die Bedeutung dieses Konzepts für die Schlanke Produktion ist als sehr hoch einzustufen. So war es ein Benchmarking des Toyota Produktionssystems mit den Produktionssystemen anderer Automobilproduzenten, der überhaupt die Grundlage für die Formulierung der ersten Thesen der Schlanken Produktion war.

Benchmarking unterscheidet sich vor allem nach der Art des Objekts des Benchmarking und dem Typ des Benchmarking. Das Benchmarkingobjekt bestimmt den Gegenstand, der durch das Benchmarking verglichen, bewertet und verbessert werden soll. Es können theoretisch alle Aspekte eines Unternehmens in einem Benchmark untersucht werden, beispielhafte Objektklassen sind Produkte, Dienstleistungen, Prozesse, Organisationen und Strategien.¹¹⁶ Der Typ des Benchmarking beschreibt in welchem Umfeld bzw. mit welchen Vergleichspartnern das Benchmarking durchgeführt wird. Es lässt sich hier generell zwischen internem (also innerhalb eines Unternehmens z.B. mit anderen Abteilungen) und externem (also mit anderen Unternehmen) Benchmarking unterscheiden. Das externe Benchmarking kann weiterführend eingeteilt werden in konkurrenzbezogenes, branchenbezogenes und branchenübergreifendes Benchmarking.¹¹⁷

Die Möglichkeiten zur Wahl des Benchmarkingobjekts und des Typen sind vielfältig und bestimmen eine Reihe von Vor- und Nachteilen, die es im Prozess der Durchführung des Benchmarking zu beachten gilt. Trotz dieser Vielfalt ist die Vorgehensweise bei einem Benchmarking immer ähnlich (siehe Bild 38).¹¹⁸

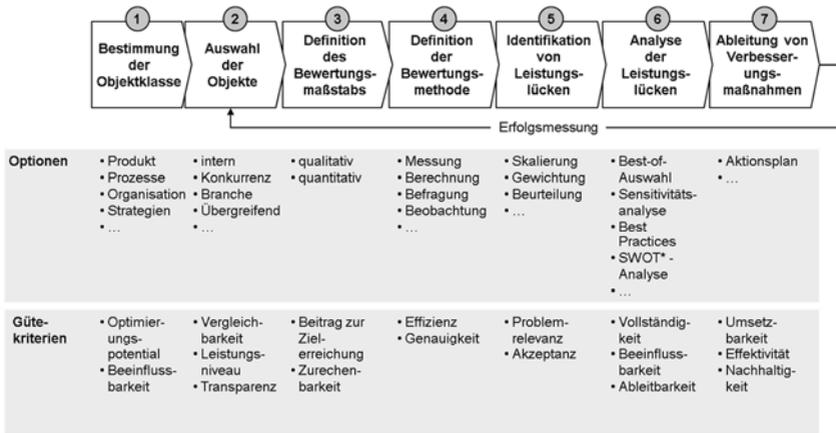
¹¹⁴ vgl. Kreuz (1995).

¹¹⁵ vgl. Simon (2007).

¹¹⁶ vgl. Ruehling (2008).

¹¹⁷ vgl. Simon (2007).

¹¹⁸ in Anlehnung an Krystek (2003).



*SWOT – Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Bedrohungen)

Bild 38: Vorgehensweise, Optionen und Gütekriterien beim Benchmarking¹¹⁹

5.1.2 Spezifische Vorgehensweise beim Benchmarking

Entsprechend der in Kapitel 5.1.1 definierten Vorgehensweise soll folgend aufgeführt werden nach welcher Maßgabe die Umsetzung des Benchmarking im Rahmen dieser Arbeit erfolgt ist.

1. Bestimmung der Objektklasse

Die Objektklasse der vorliegenden Untersuchung sind **Produktionssysteme** in der Montage von Werkzeugmaschinen. Das Optimierungspotential und auch die Beeinflussbarkeit dieser Objektklasse wurden bereits in den ersten Kapiteln hinreichend begründet.

2. Auswahl der Objekte innerhalb der Objektklasse

Als Vergleichsgruppe wurden verschiedene Produktionssysteme in der Montage von Werkzeugmaschinen ausgewählt, es handelt sich also um einen branchenweiten Benchmark. Da davon ausgegangen wird, dass die Vergleichbarkeit innerhalb der Branche nicht zwangsläufig gegeben ist, sondern vielmehr von den jeweiligen Rahmenbedingungen der Produktion abhängt, soll innerhalb der Branche nochmals eine Aufteilung der Produktionssysteme nach **Typen ähnlicher Rahmenbedingungen** durchgeführt werden (Kapitel 5.3). Insgesamt wurden sechs Unternehmen des Werkzeugmaschinenbaus in den Benchmark aufgenommen, die insgesamt 14 Produktionssysteme der Montage unterhalten, um darin 32 Werkzeugmaschinenbaureihen zu fertigen. Bei der Auswahl der Produktionssysteme wurde darauf geachtet möglichst auch unterschiedliche Rahmenbedingungen abzubilden, um die Auswirkung dieser Rahmenbedingungen im Schritt 6 beurteilen zu können (Kapitel 5.5).

¹¹⁹ vgl. Simon (2007) in Anlehnung an Krystek (2003).

3. Definition des Bewertungsmaßstabs

Der Bewertungsmaßstab ergibt sich aus der Zielstellung Schlanke Produktionssysteme zu identifizieren. Demzufolge muss die „**Schlankheit**“ von Produktionssystemen zunächst definiert werden um Kennzahlen zu deren Bewertung abzuleiten (Kapitel 5.2).

4. Definition der Bewertungsmethode

Als Bewertungsmethode wurde die Durchführung in Fallstudien gewählt. Die Fallstudien wurden im jeweiligen Produktionssystem über mehrere Tage bis hin zu mehreren Monaten vor Ort durchgeführt. Die **Fallstudien** wurden stets selbst vom Autor durchgeführt, wobei sich um die Erzielung eines möglichst objektiven Ergebnisses bemüht wurde. Die Durchführung als Fallstudie hatte den Vorteil der Möglichkeit Erkenntnisse direkt mit den Unternehmensverantwortlichen vor Ort besprechen zu können. Nachteilig war der relativ hohe Aufwand und damit einhergehend eine relativ geringe Anzahl an Fallstudien. Soweit Daten erhoben wurden, wurden diese über einen langfristigen Zeitraum von einem Jahr gesammelt. Der Erhebungszeitraum war bei allen Fallstudien gleich, um konjunkturelle Einflüsse weitgehend ausschließen zu können.

5. Identifikation der Leistungslücken

Die Identifikation der Leistungslücken erfolgte durch eine klassische **Best-of-Analyse**. Kapitel 5.5 gibt darüber genauer Aufschluss. Die Skalierung der Leistung der Produktionssysteme wurde bereits in Schritt 3 durch die entsprechende Definition branchenweit vergleichbarer Kennzahlen Rechnung getragen.

6. Analyse der Leistungslücken

Im Benchmarking soll die Beeinflussung der Leistungsfähigkeit von Produktionssystemen durch die Gestaltung von Produktionssystemen bei typischen Rahmenbedingungen untersucht werden. Es soll deshalb überprüft werden, inwieweit die unterschiedliche **Gestaltung der Produktionssysteme** entsprechend der entwickelten Morphologie aus Kapitel 4 einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Produktionssystems hat. Die Kennzahlen aus Schritt 3 wurden entsprechend so gewählt, dass ein unmittelbarer Rückschluss möglich ist.

7. Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen

Die Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen soll entgegen dem klassischen Konzept des Benchmarking nicht auf Unternehmensebene erfolgen. Die Erkenntnisse sollen verallgemeinert werden, um daraus **generelle Aussagen** zur Eignung von Produktionssystemen der Montage von Werkzeugmaschinen bei typischen Rahmenbedingungen zu treffen. Im späteren Verlauf der Arbeit soll daraus die Grundlage für die Entwicklung einer Entscheidungshilfe für die Auswahl Schlanker Produktionssysteme der Montage abgeleitet werden und dessen Anwendbarkeit an Fallbeispielen nachvollzogen werden.

5.2 Bewertung der Leistungsfähigkeit von Produktionssystemen

Um Schlanke Produktionssysteme in der Montage von Werkzeugmaschinen unter einer Vielzahl praktisch angewandter Produktionssysteme im Benchmarking-Prozess identifizieren zu können, muss ein Bewertungskriterium für die Leistungsfähigkeit eines Produktionssystems gefunden werden. Wie in Kapitel 2.1.3 bereits festgestellt, zielen Schlanke Produktionssysteme auf die konsequente Ausrichtung auf Wertschöpfung ab durch Elimination nicht wertschöpfender Tätigkeiten, also Verschwendungen. Demzufolge ist die Leistungsfähigkeit bzw. die „Schlantheit“ eines Produktionssystems umso größer desto weniger Verschwendungen in diesem Produktionssystem anzufinden sind. Man kann demnach die Leistungsfähigkeit von Produktionssystemen bewertbar machen, indem man das Ausmaß der Verschwendungen misst.

Zur Messung dieser Verschwendungen soll ein Kennzahlensystem entwickelt werden. Kennzahlen werden in diesem Zusammenhang verstanden als empirische Zahlenwerte, die betrieblich relevante Sachverhalte in bewusst verdichteter Form darstellen.¹²⁰ Mehrere Kennzahlen werden zu einem Kennzahlensystem zusammengefasst, sofern diese in einer rechnerischen oder inhaltlichen Verknüpfung zueinander stehen. In der Regel gehen Kennzahlensysteme von einer quantifizierbaren Gesamtkennzahl aus, die in mehrere Einzelkennzahlen heruntergebrochen wird.¹²¹

Eine geeignete Gesamtkennzahl stellt nach der obigen Argumentation die Verschwendung eines Produktionssystems dar. Zunächst soll deshalb der Begriff der Verschwendung im Sinne der Schlanke Produktion näher erläutert und als Kontrast zur Wertschöpfung dargestellt werden (siehe Bild 39).

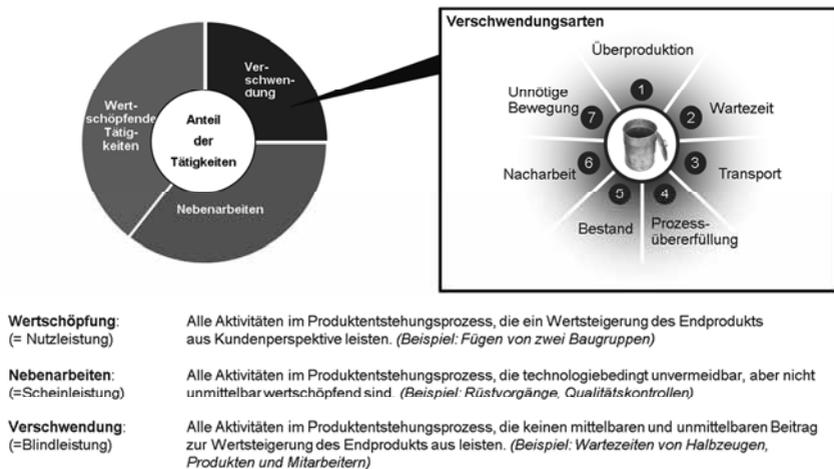


Bild 39: Verschwendung und Verschwendungsarten¹²²

¹²⁰ vgl. Weber, Schäffer (2000).

¹²¹ vgl. Meyer (2007).

¹²² in Anlehnung an Erlach (2007).

Es kann festgehalten werden, dass sich der Begriff der Verschwendungen vornehmlich auf Aktivitäten bezieht und verschwenderische Aktivitäten maßgeblich auf sieben Verschwendungsarten zurückzuführen sind. Ist es möglich die einzelnen Verschwendungsarten in allen Produktionsprozessen eines Produktionssystems zu messen, kann daraus die Gesamtverschwendung abgeleitet werden.

Produktionsprozesse in Produktionssystemen können nur durch oder an Produktionsfaktoren durchgeführt werden. Da wir zwei wesentliche Produktionsfaktoren in der Montage von Werkzeugmaschinen unterscheiden (Arbeitskraft und Montageobjekt; Betriebsmittel spielen eine unbedeutende Rolle), können alle wesentlichen Aktivitäten durch die Analyse des Aktivitätsprofils dieser zwei Produktionsfaktoren dargestellt werden (Beispiel siehe Bild 40).

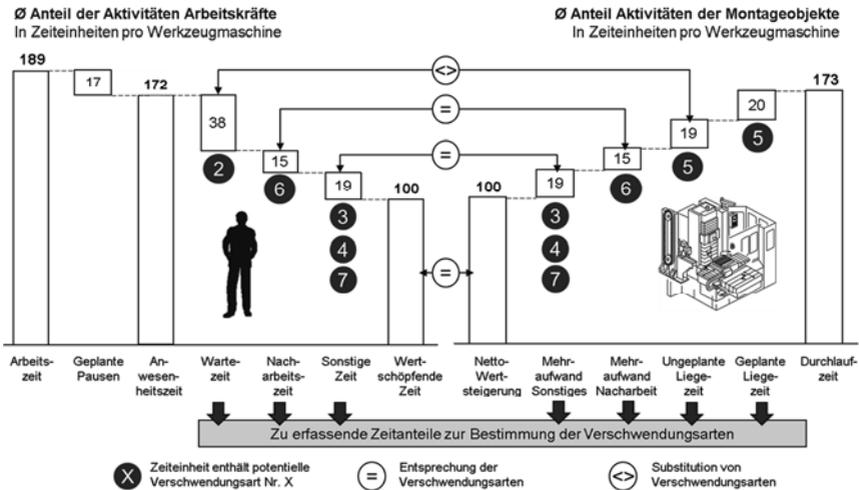


Bild 40: Verschwendung aus Sicht der Produktionsfaktoren (Zahlenwerte illustrativ)

So lassen sich einige Aktivitäten der Produktionsfaktoren eindeutig den Verschwendungsarten der Schlanken Produktion zuweisen, z.B. Wartezeit als Zeitbestandteil der Aktivitäten der Arbeitskraft oder Liegezeit als Maßstab für den Bestand von Werkzeugmaschinen in einem Produktionssystem. Da Arbeitskräfte und Montageobjekte in einem gemeinsamen Montageprozess zusammenwirken, ergibt sich der Vorteil, dass die durchschnittlichen Zeitanteile beider Aktivitätsprofile zum Teil deckungsgleich sind unter der Voraussetzung eines geschlossenen Systems und der Untersuchung in einem relativ langen Zeitraum. So kann z.B. die Wertschöpfung nur an der Werkzeugmaschine verrichten, gleichzeitig kann die Werkzeugmaschine netto (d.h. ohne den Einbezug des Wertes von Bauteilen und Baugruppen) nur Wertsteigerung durch die Verrichtung der Arbeitskraft erlangen. Eine Ausnahme sind hier die Verschwendungsarten Wartezeit (der Arbeitskräfte) und Bestände (im Sinne von Wartezeit des Montageobjekts). Das Ideal einer wartezeit- und bestandsfreien Montage kann nur realisiert werden, wenn beide Produktionsfaktoren kontinuierlich miteinander wirken. Sobald sich Kapazitätsangebot

(induziert durch anwesende Arbeitskräfte) und der Kapazitätsbedarf (induziert durch Montageinhalte der zu montierenden Werkzeugmaschinen) nicht decken, kommt es zwangsläufig dazu, dass Arbeitskraft oder Montageobjekt aufeinander warten müssen. Man kann in diesem Zusammenhang von einer teilweisen Substituierbarkeit der Wartezeiten ausgehen, d.h. die Erhöhung der Wartezeit eines Produktionsfaktors führt zur Verringerung des anderen Produktionsfaktors. Externe Störeinflüsse wie z.B. Lieferverzögerungen im Teilefluss können aber auch dazu führen können, dass beide Produktionsfaktoren warten müssen.

Ein Kennzahlensystem, das in der Lage ist die Zeitanteile der Verschwendungsarten zu erfassen, wäre geeignet ein Produktionssystem hinsichtlich seiner Schlankheit zu bewerten. Dabei muss das Kennzahlensystem folgenden Kriterien genügen:¹²³

- Zweckeignung der Kennzahlen
- Genauigkeit der Kennzahlen
- Konsistenz der Kennzahlen
- Fehlerfreiheit der Kennzahlen
- Kosten-Nutzen-Relation

Die Zweckeignung und Genauigkeit eines solchen Kennzahlensystems lässt sich damit begründen, dass die ermittelten Zeitbestandteile direkte Verknüpfung zu den Verschwendungsarten haben und deren Ausprägung in einem Produktionssystem umfassend beschreiben. Dadurch, dass die Kennzahlen rechnerisch miteinander in Verbindung stehen und von derselben Datenbasis ausgehen, kann ebenfalls von deren Konsistenz und Fehlerfreiheit ausgegangen werden. Ebenfalls wäre es praktisch möglich in einem Produktionssystem sämtliche Zeitbestandteile zu erfassen. So werden z.B. gerade im Automobilbau mit Zeitstudien derartige Aufgaben realisiert. Der Aufwand dafür ist jedoch enorm und ist gerade in der Klein- und Mittelserie oft unwirtschaftlich. Das wiederum begründet eine schlechte Verfügbarkeit solcher Zeitdaten im Werkzeugmaschinenbau. Der Aufwand der Durchführung von Zeitstudien im Rahmen dieser Arbeit ist nicht vertretbar.

Als branchenüblich sofort und regelmäßig verfügbare Kennzahlen mit Bezug zur Analyse der Verschwendungsarten haben sich herausgestellt:¹²⁴

- Daten der Arbeitskräfte (Kapazitätsangebot bzw. Anwesenheitszeit)
- Daten der Werkzeugmaschinen (geplante Montagezeit, tatsächliche Montagezeit, Durchlaufzeit)

Es wurde deshalb ein Ansatz zur indirekten Ermittlung der Kennzahlen gewählt, um Aussagen zur Höhe der Verschwendungen treffen zu können. Dieser Ansatz orientiert sich an einem Werkzeug der Schlanken Produktion: Overall Equipment Efficiency (OEE) oder auch Gesamtanlageneffektivität. Mit der OEE wird das Ziel verfolgt, die Verschwendungsarten im Betrieb von Produktionsanlagen zu messen, um nach deren Analyse Verbesserungspotentiale ableiten zu können.¹²⁵ Dabei erfolgt die Berechnung der OEE zweistufig. Ausgangspunkt für alle Berechnungen der ersten Stufe ist die Planbelegungszeit. Alle erfassten und zur Auswertung verfügbaren Zeitanteile werden zu Verschwendungsarten (Nacharbeit, Ausschuss, Wartezeiten) zusammengefasst und von der

¹²³ in Anlehnung an Meyer (2007).

¹²⁴ eigene Untersuchungen.

¹²⁵ vgl. Roenpage, Lunau (2007).

Planbelegungszeit abgezogen, es bleibt eine Restlaufzeit. Diese Restlaufzeit enthält einen wertschöpfenden Anteil und weitere Verschwendung. Allerdings sind diese restlichen Verschwendungen nicht direkt messbar. Deshalb wird in der zweiten Stufe der Berechnung diese Verschwendung indirekt ermittelt, indem der theoretische Wertschöpfungsanteil berechnet wird als Produkt von gefertigter Stückzahl und der wertschöpfenden Bearbeitungszeit pro Stück. Wird von der Restlaufzeit dieser Wertschöpfungsanteil abgezogen, erhält man indirekt die restliche Verschwendung der Produktionsanlage. Dieses Verfahren lässt sich ebenfalls auch die Zeitbestandteile der Aktivitätsprofile von Arbeitskräften und Montageobjekten übertragen. So ist die Ermittlung der Gesamtverschwendung eines Produktionssystems in der Montage von Werkzeugmaschinen ebenfalls ermittelbar, indem die bekannte Anwesenheitszeit der Arbeitskräfte ins Verhältnis gesetzt wird zu dem geplanten Montagezeitbedarf der Werkzeugmaschinen. Entsprechend dieser Überlegungen lassen sich folgende Kennzahlen unter Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit bilden (Alle Angaben beziehen sich auf einen definierten und einheitlichen Untersuchungszeitraum):

Kennzahlen der Aktivitäten des Produktionsfaktors Arbeitskraft:

$$(1) \quad WSA_{AK} = \sum_{n=1}^z MZ_n / AZ$$

mit

WSA_{AK} : Ø Wertschöpfungsanteil der Arbeitskräfte [%]

z : Gesamtanzahl montierter Werkzeugmaschinen

MZ_n : Geplante Montagezeit der Werkzeugmaschinen n [h]

AZ : Tatsächliche Gesamtanwesenheitszeit [h]

$$(2) \quad VA_{AK} = 1 - WSA_{AK}$$

mit

VA_{AK} : Ø Verschwendungsanteil der Arbeitskräfte [%]

Kennzahlen der Aktivitäten des Produktionsfaktors Montageobjekt:

$$(3) \quad WSA_{MO} = \sum_{n=1}^z MZ_n / \sum_n DLZ_n$$

mit

WSA_{MO} : Ø Wertschöpfungsanteil der Montageobjekte [%]

MZ_n : Geplante Montagezeit der Werkzeugmaschinen n [h]

DLZ_n :: Durchlaufzeit der Werkzeugmaschinen n [h]

$$(4) \quad VA_{MO} = 1 - WSA_{MO}$$

mit

VA_{MO} : Ø Verschwendungsanteil der Montageobjekte [%]

Durch die indirekte Berechnung der Verschwendungen von Arbeitskräften und Montageobjekten lässt sich die Gesamtverschwendung aller Aktivitäten bemessen. Nachteilig bei dieser Vorgehensweise ist zum einen die fehlende Möglichkeit Produktionssysteme nach unterschiedlichen Anteilen von Verschwendungsarten zu analysieren. Zum anderen wird die gesamte geplante Montagezeit der Werkzeugmaschinen als wertschöpfende Zeit

angenommen. Das impliziert, dass die Durchführung des unmittelbaren Fügeprozesses ohne Verschwendung abläuft. Das ist nicht zwangsweise gegeben, aber auch nur bedingt durch die Gestaltung des Produktionssystems beeinflussbar und eher Gegenstand der Arbeitsablaufplanung und Konstruktion. Insofern kann diese Ungenauigkeit akzeptiert werden.

Die Darstellung der Kennzahlen als ein Ergebnis des Benchmarking soll in Form eines Diagramms erfolgen (siehe Bild 41). Darin können unterschiedliche Produktionssysteme schnell und einfach miteinander verglichen werden.

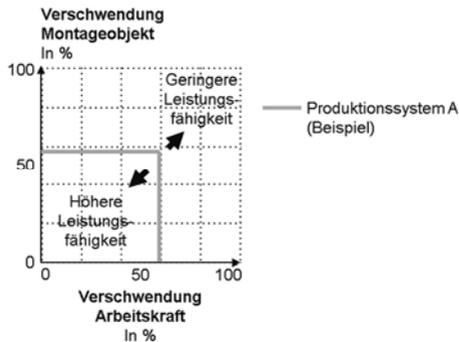


Bild 41: Visualisierung der Kennzahlen

Neben der Visualisierung der Kennzahlen ist die Berechnung einer Gesamtkennzahl für die Bestimmung des Benchmarks erforderlich. Dazu wurde sich für eine kostenmäßige Bewertung der beiden Kennzahlen entschieden:

$$(5) \quad V_K = (VA_{AK} * KS_{AK} + VA_{MO} * KS_{MO}) / KS_{AK}$$

mit

V_K : \emptyset Gesamtverschwendung im Produktionssystem [%]

KS_{AK} : Kostensatz der Arbeitskräfte [€/Untersuchungszeitraum]

KS_{MO} : Kostensatz der Montageobjekte [€/Untersuchungszeitraum]

Für den Benchmark ergibt sich daraus die Zielfunktion: $\min V_K$

Dazu ist es notwendig einen Kostensatz für Arbeitskräfte und Montageobjekte zu bestimmen. Während die Kosten der Arbeitskräfte für ein Produktionssystem relativ einfach über die direkten Personalkosten zu bestimmen sind, muss der Kostensatz der Montageobjekte berechnet werden. Von den theoretisch relevanten Kostenarten Flächenkosten, Bestandskosten, Handhabungskosten und Verwaltungskosten¹²⁶ sind nur die zwei ersteren Kostenarten für die Betrachtung interessant, da die Handhabungskosten und Verwaltungskosten fast ausschließlich Personalkosten sind und als solche bereits in den Gesamtkosten der Arbeitskräfte inkludiert sind.

¹²⁶ vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2009)

5.3 Systematisierung der Rahmenbedingungen für Produktionssysteme

Das Benchmarking soll in Abhängigkeit von unterschiedlichen Rahmenbedingungen für Produktionssysteme vorgenommen werden (siehe Kapitel 5.1.2). Diese Rahmenbedingungen sollen im Vorfeld der Datenerfassung identifiziert werden. Während die Analyse von Typen der Rahmenbedingungen im Verlaufe des Benchmarking mit empirischen Daten vorgenommen wird, soll in diesem Unterkapitel die Systematisierung und Auswahl der relevanten Rahmenbedingungen anhand einer Analyse möglicher Einflussfaktoren erfolgen.

Die Einflussfaktoren auf die Produktion und somit auch Montage sind sehr vielfältig, die Anzahl der externen Schnittstellen sehr hoch (siehe Bild 42).

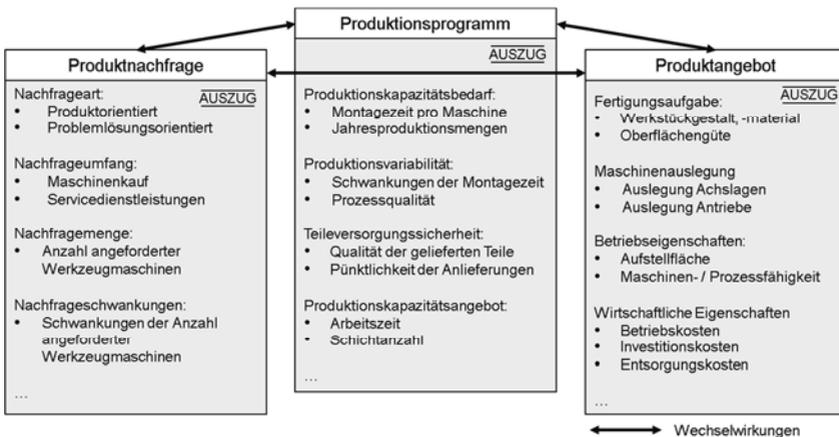


Bild 42: Einflussfaktoren auf die Gestaltung der Montage von Werkzeugmaschinen¹²⁷

Es soll deshalb eine Orientierung an bereits etablierten Systematisierungen von Rahmenbedingungen zur Auswahl von Produktionssystemen in der Literatur erfolgen. Diese Systematisierung fundieren zumeist auf der Zuordnung von klassischen Grundformen von Produktionssystemen (vgl. Kapitel 4.3) zu den Merkmalskombinationen von zwei zentralen Rahmenbedingungen: der Anzahl hergestellter Produkte und der Variantenzahl hergestellter Produkte (Beispiel siehe Bild 43).¹²⁸

Damit geben diese Systematisierungen Hinweise auf den wirtschaftlich sinnvollen Einsatzbereich von verschiedenen klassischen Organisationsformen der Montage. Vorteilhaft an der Art und Weise der Darstellung sind die Einfachheit und die Beschränkung auf wenige Bestimmungsfaktoren. Als nachteilhaft ist zu nennen, dass in keiner Systematisierung konkrete Merkmalsausprägungen der Rahmenbedingungen angegeben sind.

¹²⁷ in Anlehnung an Brecher, Weck (2005).

¹²⁸ vgl. Arnold, Isermann, Kuhn, Tempelmeier, Furmans (2007).

vgl. Nebl (2004).

vgl. Kempainen, Vepsa, Tinnila (2008).

Zuweilen wird bei der Stückzahl zwischen Einzel-, Serien- und Massenfertigung entschieden. Je nach Branche ist die stückzahlmäßige Definition dieser Merkmale jedoch sehr unterschiedlich. So ist eine Jahresproduktionsmenge von 1.000 Stück pro Jahr im Automobilbau eine Kleinserie, während die gleiche Menge im Werkzeugmaschinenbau schon als Großserienproduktion gilt. Die Abgrenzung gestaltet sich also als schwierig und damit auch die Aussagekraft des Hilfsmittels zur Wahl der idealen Organisationsform der Montage.

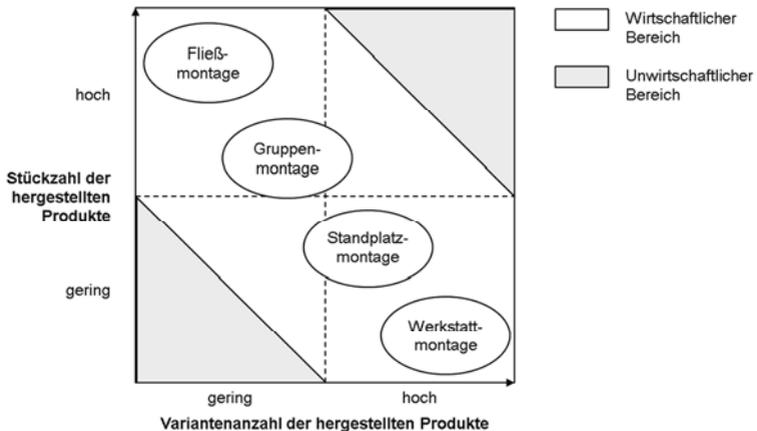


Bild 43: Klassische Grundformen von Produktionssystemen der Montage und deren Einsatzfelder¹²⁹

Der Autor sieht es deshalb als zielführend an, die bestehende Systematisierung zu modifizieren, damit diese als Grundlage für die Systematisierung von Rahmenbedingungen für Produktionssysteme dienen kann. Dabei sollen die genutzten Rahmenbedingungen ausgehend vom zentralen Betrachtungsobjekt, Schlanke Produktionssysteme, abgeleitet werden.

Bestehende Systematisierungen sind zumeist auf das Produkt fokussiert. Sie betrachten den Aspekt Häufigkeit und Varianz von Seiten des Produkts und leiten daraus Schlussfolgerungen für die Auswahl von Produktionssystemen ab. Aus Sicht der Verschwendungen im Sinne der Schlanke Produktion ist diese Sichtweise insofern unzureichend, da eine Produktvariante nicht zwingend Auswirkungen auf den Montageprozess haben muss. So ermöglichen beispielsweise Baukastensysteme eine hohe Variantenvielfalt von Produkten ohne den Montageprozess maßgeblich zu beeinflussen. Andererseits sind viele andere Störfaktoren, die zu einer Varianz im Prozess führen können gar nicht durch die Rahmenbedingung „Produktvarianten“ abgedeckt, wie z.B. Lieferverzögerungen bei der Materialbereitstellung. Es empfiehlt sich daher den Gegenstand der Betrachtung vom Produkt auf den Montageprozess zu lenken. Der grundlegende Gedanke der Systematisierungen hinsichtlich der als relevant identifizierten Aspekte „Häufigkeit“ und „Varianz“ soll auf den Betrachtungsgegenstand Montageprozess übertragen werden. Die dar-

¹²⁹ in Anlehnung an Kemppainen, Vepsa, Tinnila (2008).

aus abgeleiteten Rahmenbedingungen für die Einordnung von Produktionssystemen werden Prozessfrequenz und Prozessvarianz genannt (siehe auch Bild 45).

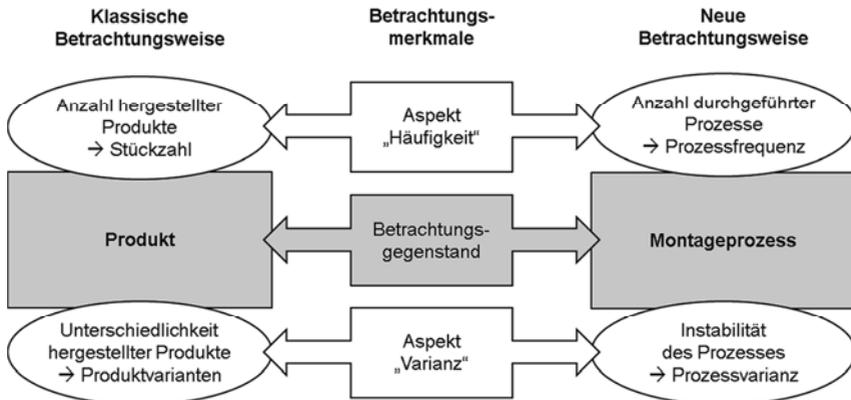


Bild 44: Vergleich der Betrachtungsweisen auf die Systematisierung der Rahmenbedingungen für Produktionssysteme

Prozessfrequenz

Die Prozessfrequenz ist ein Maß für die Anzahl der durchgeführten Montageprozesse in einem Zeitabschnitt. Die Anzahl der Prozesse ist entscheidend abhängig von der Anzahl der in einem Montagebereich hergestellten Werkzeugmaschinen (in der Schlanken Produktion ausgedrückt als Kundentakt in Stunden pro Maschine) und deren Durchlaufzeit durch den Montageprozess (siehe Bild 45).

Der Kundentakt berechnet sich dabei wie folgt:

$$(7) \quad KT_{MB} = ZS_{MB}/z$$

mit

KT_{MB} : Ø Kundentakt [h/Stück]

ZS_{MB} : Anzahl der verfügbaren Zeitstunden im Montagebereich [h]

z : Gesamtanzahl montierter Werkzeugmaschinen [Stück]

Der Kundentakt gibt somit die Zeitspanne zwischen der Auslieferung von zwei aufeinanderfolgenden Maschinen in einem bestimmten Zeitraum an. Der Kundentakt ist durch das genutzte Arbeitszeitsystem und die Produktionsmenge eindeutig bestimmt und unabhängig von der Gestaltung des Produktionssystems. Umgekehrt ist der Kundentakt gerade in der Schlanken Produktion der entscheidende Taktgeber in der klassischen Fließmontage.

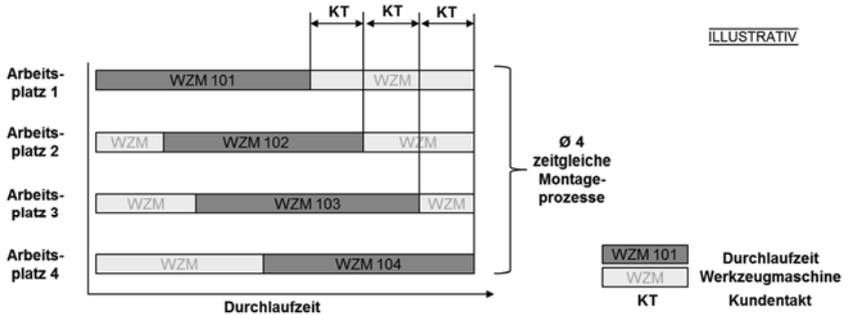


Bild 45: Einflussgrößen auf die Prozessfrequenz

So nimmt die Prozessfrequenz zu, wenn sich die Durchlaufzeit bei gleichem Kundentakt erhöht, da mehr Montageinhalte in der gleichen Zeit durchgeführt werden müssen. Aus gleichem Grund führt eine Verringerung des Kundentakts und damit der verfügbaren Zeit pro montierte Maschine ebenfalls zu einer Erhöhung der Prozessfrequenz. In einem idealen Produktionssystem ohne Störungen des Montageprozesses und immer denselben Maschinentypen entspricht die Höhe der Prozessfrequenz der Anzahl der verfügbaren Arbeitsplätze.

Zur Errechnung der Prozessfrequenz, also der Anzahl der zeitgleich ausgeführten Montageprozesse, muss der Kundentakt mit der Summe aller Zykluszeiten verrechnet werden. Die Zykluszeiten entsprechen dabei der Durchlaufzeit eines Montageobjekts an einem definierten Arbeitstakt:

$$(8) \quad PF_{MB} = (\sum_{k=1}^q ZZ_k) / KT_{MB}$$

mit

PF_{MB} : Prozessfrequenz im Montagebereich [Anzahl zeitgleicher Montageprozesse]

ZZ_k : Ø Zykluszeit des Arbeitstakts k [h]

q : Letzter Arbeitstakt real

Sowohl die Durchlaufzeit als auch der Kundentakt können die Prozessfrequenz beeinflussen. Das ist notwendig, da die Aussagekraft des Kundentakts allein über das zu gestaltende Montagesystem begrenzt ist. Eine Werkzeugmaschine mit einer Durchlaufzeit, die dem Kundentakt entspricht, hat nur einen Arbeitstakt im Montagesystem. Die Möglichkeiten zur Gestaltung eines solchen Montagesystems sind sehr begrenzt. Mit jedem Vielfachen der Durchlaufzeit bei konstantem Kundentakt steigen die Anzahl der Prozesse und potentiellen Arbeitstakte in dem Produktionssystem und damit die Möglichkeiten zur Gestaltung des Produktionssystems, z.B. durch Spezialisierung der Arbeitskräfte und differenzierter Materialversorgung.

Prozessvarianz

Die Prozessvarianz ist ein Maß für den unterbrechungsfreien und gleichförmigen Ablauf des Montageprozesses. Je kleiner der Wert der Prozessvarianz, desto stabiler läuft der Montageprozess. Mit zunehmendem Wert wirken vermehrt Prozessstörungen auf das betrachtete Produktionssystem. In Bild 46 wird der Zusammenhang zwischen Zykluszeit, Kundentakt und Arbeitstakten veranschaulicht.

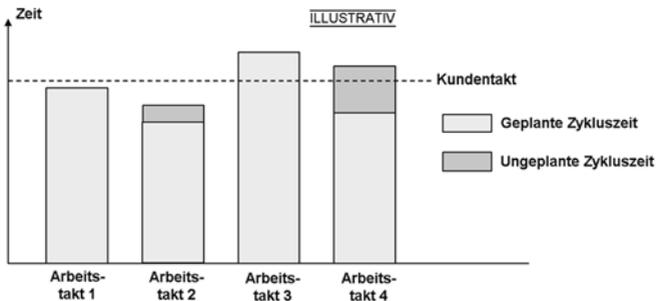


Bild 46: Begriffe im Zusammenhang mit der Varianz von Prozessen

Grundsätzlich gilt jedes Ereignis als Störung des Prozesses, das dazu führt, dass Arbeitstakt und Kundentakt nicht deckungsgleich sind. Liegt der Kundentakt über der Summe aus ungeplanter und geplanter Zykluszeit, kommt es ggf. zu Wartezeiten der Arbeitskräfte, im entgegengesetzten Fall kann der Kundentakt nicht gehalten werden, es kommt zu Lieferverzögerungen. Durch die Wahl des Produktionssystems kann die Robustheit gegenüber solchen Prozessstörungen eingestellt werden. Es ergibt sich ein Zielkonflikt aus dem Umstand, dass robustere Produktionssysteme oft Produktivitätsnachteile mit sich bringen.

Folgende grundsätzlichen Störungsquellen lassen sich ableiten:

- Schwankungen der durchschnittlichen Zykluszeit, z.B. durch variantenbedingte Montagezeitunterschiede
- Auftreten ungeplanter Zykluszeiten, z.B. durch Nacharbeit oder ausgefallene Betriebsmittel
- Schwankungen des Kundentakts, z.B. durch variierenden Auftragseingang

Das typische Störungsprofil eines Arbeitstakts in der Montage von Werkzeugmaschinen ergibt sich aus der Summe des Einflusses Störungen, wobei das Muster der Störungen immer ähnlich ist (siehe Bild 47). So führt die Kombination verschiedener Störeinflüsse sowohl zu Unter- und Überschreitungen des Kundentakts. Die Überschreitungen des Kundentakts sind jedoch zum einen deutlich stärker ausgeprägt und zum anderen für die Untersuchung wesentlich interessanter: Unterschreitungen des Kundentakts haben in starr verketteten Produktionssystemen lediglich eine Auswirkung auf den Arbeitstakt, in dem die Störung auftritt. Es können so Verschwendungen durch Wartezeit entstehen. Überschreitungen des Kundentakts hingegen bergen das Risiko eine ganze Produktionslinie zum Stillstand zu bringen.

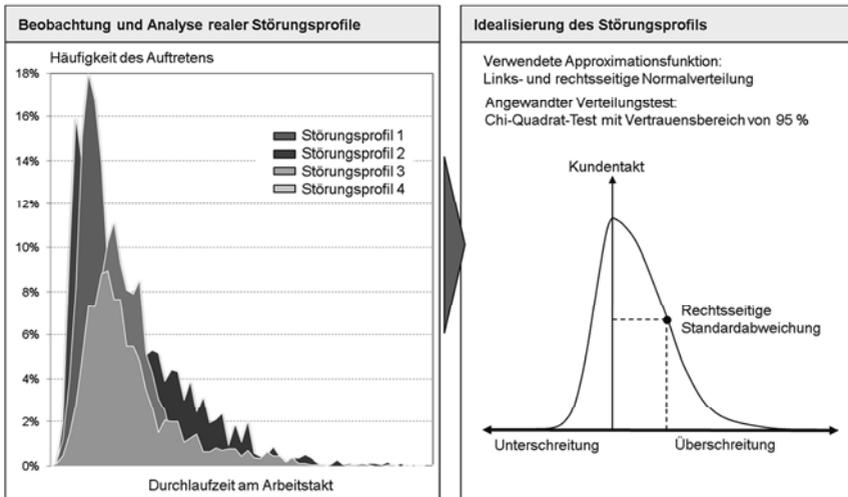


Bild 47: Typisches Störungsprofil eines Arbeitstakts¹³⁰

Insofern soll als Messgröße der Prozessvarianz die rechtsseitige Standardabweichung der Störungen am Arbeitstakt im Verhältnis zum Kundentakt herangezogen werden und damit die prozentuale Zeitüberschreitung des Kundentakts.

Wie im Benchmarking gezeigt werden konnte, lassen sich die Verteilungsfunktionen der verschiedenen Störungsarten mit hinreichender Genauigkeit durch Normalverteilungen und rechtsseitige Normalverteilungen approximieren (siehe auch Anlage B).

Entsprechend lässt sich das statistische Gesetz der Linearkombination von Zufallsvariablen für die Berechnung der gesamten Standardabweichung des Arbeitstakts anwenden:¹³¹

$$(9) \quad \sigma_{AT}^2 = \sigma_{S1}^2 + \sigma_{S2}^2 + \dots + \sigma_{Sn}^2$$

mit

σ_{AT} : rechtsseitige Standardabweichung Arbeitstakt gesamt

σ_{S1} : rechtsseitige Standardabweichung des Störeinflusses 1

σ_{S2} : rechtsseitige Standardabweichung des Störeinflusses 2

σ_{Sn} : rechtsseitige Standardabweichung des Störeinflusses n

wobei gilt:

Die Zufallsvariablen der Verteilungen sind paarweise stochastisch unabhängig!

Somit ergibt sich die Prozessvarianz aus:

¹³⁰ eigene Untersuchungen durch Fallstudien.

¹³¹ vgl. Hartung, Elpelt, Klösener (2005).

$$(10) \quad PV_{MB} = \sigma_{AT} / KT_{MB}$$

mit

PV_{MB} : Prozessvarianz des Montagebereichs [%]

Die Identifikation und Priorisierung der wichtigsten Störeinflüsse in der Montage von Werkzeugmaschinen soll bei der Durchführung des Benchmarkings erfolgen.

Aus Prozessfrequenz und Prozessvarianz lässt sich ein zweidimensionales Diagramm entwerfen (siehe Bild 48), die für das Benchmarking und darin insbesondere für die Ableitung von Typen von Rahmenbedingungen genutzt werden soll. Die Entwicklung des Diagramms erfolgte anhand hypothetischer Überlegungen und muss im Prozess des Benchmarking validiert werden.

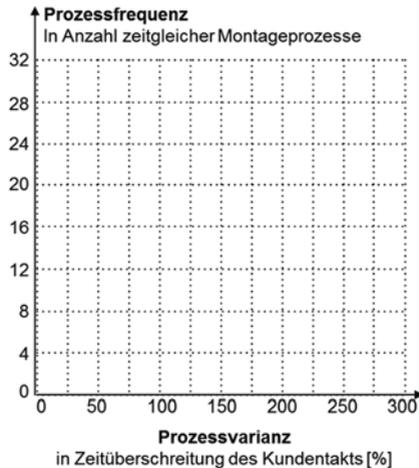


Bild 48: Diagramm zur Darstellung der Rahmenbedingungen für Produktionssysteme

5.4 Datenerhebung Benchmarking

Mit der Systematisierung der Rahmenbedingungen für Produktionssysteme (Kapitel 5.3), der Bestimmung eines Kennzahlensystems (Kapitel 5.2) und der Identifikation der Gestaltungsparameter von Produktionssystemen im Werkzeugmaschinenbau (Kapitel 4.4) ist der inhaltliche Rahmen des Benchmarking vervollständigt. In diesem Kapitel soll die Vorgehensweise bei der Datenerfassung dargestellt werden.

Entsprechend der aufgeführten Kapitel ist zur Durchführung des Benchmarking die Erhebung von drei Merkmalen von Produktionssystemen notwendig:

- Erfassung von Prozessfrequenz und -varianz
- Erfassung der Verschwendungsanteile von Arbeitskräften und Montageobjekten
- Erfassung der Gestaltungsparameter der Produktionssysteme

Jedes Merkmal wird durch die Analyse einer spezifischen Datenquelle bestimmt (siehe Bild 49). Wie bereits im Kapitel 5.1.2 beschrieben, erfolgte die Datenerhebung im Rahmen von Fallstudien von 14 Produktionssystemen der Montage verschiedener Werkzeugmaschinenbauer. Die Durchführung der Fallstudien erfolgte immer persönlich durch den Verfasser über mehrere Tage vor Ort beim Werkzeugmaschinenbauer und für denselben Untersuchungszeitraum über ein Jahr. So konnte ein Höchstmaß an Objektivität und Vergleichbarkeit der Daten sichergestellt werden. Obwohl die Datenquellen hinsichtlich ihrer Erhebung relativ unabhängig voneinander sind, wurden stets alle Daten parallel erfasst. Fragen zur Plausibilität und Konsistenz der Daten konnten so direkt vor Ort geklärt werden, die Datenqualität konnte überprüft und sichergestellt werden.

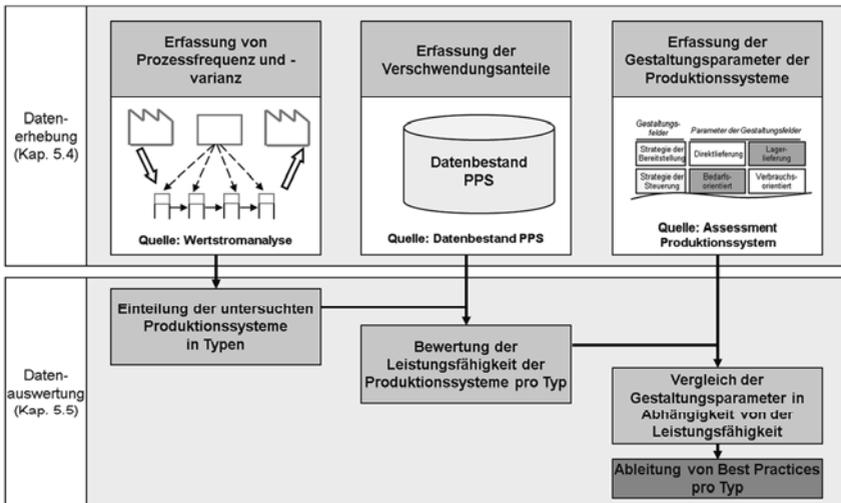


Bild 49: Schritte bei der Datenerhebung und -auswertung

Erfassung von Prozessfrequenz und -varianz

Als Datenquelle für die Bestimmung von Prozessfrequenz und –varianz war eine Wertstromanalyse (Methodensteckbrief siehe Bild 50), die für jedes untersuchte Produktionssystem durchgeführt wurde.

In einer Standard-Wertstromanalyse wird bereits einen Großteil der in Kapitel 5.3 definierten Kennzahlen erfasst: Die geplanten Zykluszeiten, der Kundentakt und grundlegende Störgrößen wie Nacharbeitszeit und Zeitspreizungen werden für jeden einzelnen Arbeitstakt im Montageablauf ermittelt. Weitere notwendige Kennzahlen wurden ergänzt. Insbesondere wurden sämtliche Störgrößen erfasst, die im Untersuchungszeitraum für den jeweiligen Arbeitstakt angefallen sind und einen Einfluss auf die Prozessvarianz haben könnten. Die Ermittlung von Störarten und deren Ausprägungen erfolgte mit dem Montageleiter und/oder Arbeitstaktverantwortlichen direkt im Montagebereich.

Die Datenbasis ist bei den verschiedenen Studienteilnehmern unterschiedlich gut ausgeprägt. Während in einigen Unternehmen statistisch valide Daten für sämtliche Kennzahlen vorlagen, konnten in anderen Unternehmen insbesondere bei der Aufteilung von Störgrößen nur mit Erfahrungswerten gearbeitet werden. Eine Unsicherheit bei der Ermittlung der Prozessvarianz ergibt sich daraus kaum, da die Gesamtauswirkungen der Störungen über den gesamten Montageprozess, z.B. ausgedrückt in Lieferzeitverzögerungen, in jedem Fall den Unternehmen bekannt war. Die angestrebte Analyse dieser Gesamtauswirkungen zur Identifikation von Hauptstörarten ist aber hinsichtlich dieses Einflusses mit einer Unsicherheit behaftet.

Erfassung der Verschwendungsanteile von Arbeitskräften und Montageobjekten

Die Datengrundlage zur Berechnung der Verschwendungsanteile konnten bei der Datenerhebung über die Auswertung von Daten des Produktionsplanungs- und -steuerungssystems abgebildet werden.

Alle Unternehmen verfügten über ein derartiges System. Die Datenverfügbarkeit und -qualität kann als sehr gut eingestuft werden, da es sich um zentrale Daten handelt, die im Standard-Geschäftsbetrieb ebenfalls von großer Bedeutung sind (z.B. Anzahl montierter Werkzeugmaschinen, Geleistete Arbeitsstunden pro Jahr).

Erfassung der Gestaltungsparameter der Produktionssysteme

Die Grundlage für die Identifikation der eingesetzten Gestaltungsparameter in den untersuchten Produktionssystemen war der morphologische Kasten zur Beschreibung von Produktionssystemen, der in Kapitel 4 entwickelt wurde. Im Rahmen eines Assessments in der jeweiligen Montage begleitend zur Wertstromanalyse wurden die Ausprägungen der Gestaltungsparameter mit den Montageverantwortlichen vor Ort bestimmt.

Die Parameter waren gerade im fortgeschrittenen Verlauf der Datenerhebung eindeutig zuordnungsfähig. Durch direkte Diskussion mit den Montageverantwortlichen wurde der morphologische Kasten in iterativen Schritten stetig optimiert und vervollständigt. Bei bereits untersuchten Produktionssystemen wurden nach solchen Optimierungsschritten ggf. Daten nacherhoben.

Insgesamt hat sich sowohl die Verfügbarkeit und Qualität der Daten als ausreichend herausgestellt, so dass sinnvolle Ergebnisse bei der Datenauswertung zu erwarten sind.

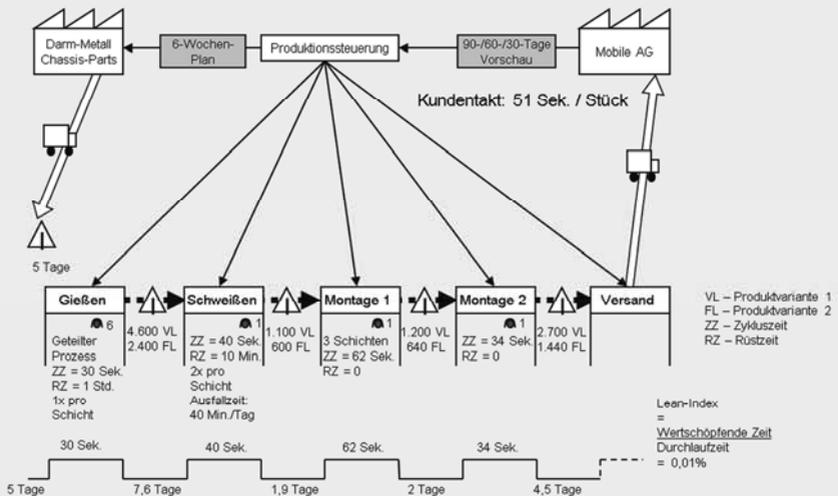
Methodensteckbrief Wertstromanalyse

Definition Wertstrom: Alle Aktivitäten, sowohl wertschöpfend als auch nicht wertschöpfend, die zur Herstellung eines Produktes notwendig sind.

Definition Wertstromanalyse: Methode der Schlanken Produktion zur schematischen und standardisierten Visualisierung eines Wertstroms, unterteilt in Material- und Informationsfluss.

Ziel Wertstromanalyse: Identifikation von Verschwendungen im Wertstrom und Grundlage für die Ableitung von Verbesserungspotentialen im Sinne der Schlanken Produktion.

Beispielhafter Wertstrom:



- Ablauf der Wertstromanalyse:**
- 1) Kundenanforderungen ermitteln
 - 2) Prozessschritte einzeichnen und Daten ermitteln
 - 3) Bestände zwischen Prozessschritten erfassen
 - 4) Externe Material- und Informationsströme bestimmen
 - 5) Interne Material- und Informationsströme bestimmen
 - 6) Liege- und Durchlaufzeiten ermitteln
 - 7) Verschwendungen identifizieren

Bild 50: Methodensteckbrief Wertstromanalyse¹³²

¹³² in Anlehnung an Rother, Shook, Wiegand (2006), hier auch weiterführende Darstellung. vgl. Erlach (2007).

5.5 Datenauswertung Benchmarking

Die Datenauswertung erfolgt in vier logisch aufeinander aufbauenden Schritten (siehe auch Bild 49). Zunächst werden Produktionssysteme entsprechend unterschiedlicher Rahmenbedingungen zu Typen zusammengefasst. Innerhalb der Typen wird die Leistungsfähigkeit der Produktionssysteme miteinander verglichen. Schließlich wird versucht die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der einzelnen Produktionssysteme in Beziehung zu setzen mit den Ausprägungen der Gestaltungsparameter der Produktionssysteme. So soll es möglich sein Best Practices der Schlanken Produktion für die definierten Typen zu identifizieren.

5.5.1 Einteilung der untersuchten Produktionssysteme nach Typen

Entsprechend der in Kapitel 3.2 formulierten Forschungshypothesen wird vermutet, dass die Wahl des geeigneten Schlanken Produktionssystems abhängig von den Rahmenbedingungen für das Produktionssystem ist. Die Rahmenbedingungen sollen durch die beiden Kennzahlen Prozessfrequenz und Prozessvarianz wiederum hinreichend genau abgebildet werden können (Kapitel 5.3). In der Datenerhebungsphase war es möglich diese Kennzahlen für die 14 untersuchten Fallbeispiele zu generieren und in das Prozessfrequenz-Prozessvarianz-Diagramm einzuordnen.

Das Ergebnis sind 14 Datenpunkte, die sich über die Quadranten I, III und IV des Diagramms verteilen (siehe auch Bild 52). Auffällig ist schon in diesem Schritt, dass es eine Häufung der Datenpunkte im Quadranten III gibt, während kein einziges Produktionssystem dem Quadranten II zugeordnet werden konnte. Beide Beobachtungen untermauern die Aussagekraft des Diagramms:

Die Häufung im Quadranten III ist darauf zurückzuführen, dass ein Großteil der Werkzeugmaschinenbauer in relativ geringen Stückzahlen Produktionssysteme (50 – 100 Stück pro Jahr) betreibt. Demzufolge ist eine Häufung der Datenpunkte in Quadranten III und IV zu erwarten. Mittel- und Großserien (Quadrant I und II) sind eher die Ausnahme. Der Quadrant II wurde in der Untersuchung nicht belegt. Das war zu erwarten: Ein Produktionssystem in diesem Quadranten würde mit sehr hohen Stückzahlen arbeiten, aber gleichzeitig sehr vielen Prozessstörungen ausgesetzt sein. Da gerade bei hohen Stückzahlen zumeist Standardwerkzeugmaschinen montiert werden, sind auch die Prozesse dort stabilisiert und standardisiert.

Die Bildung von Typen ähnlicher Rahmenbedingungen soll mittels einer Clusteranalyse erfolgen. Mit Clusteranalysen sollen Datensätze so gruppiert werden, dass die Objekte in einem Cluster möglichst ähnliche Eigenschaften besitzen und die Objekte verschiedener Cluster möglichst unähnlich sind.¹³³ Man unterscheidet bei den Clusterverfahren zwischen scharfen Verfahren (Jedes Objekt fällt nur in einen Cluster) oder unscharfen Verfahren bzw. fuzzy-Verfahren (Ein Objekt kann auch in mehreren Clustern enthalten sein). Unscharfe Verfahren kommen insbesondere dann zum Einsatz wenn die Objektverteilung fließend ineinander übergeht oder ein starkes Rauschen der Daten zu erwarten ist.¹³⁴ Für die untersuchten Datensätze treffen beide Aussagen nicht zu. Vielmehr soll ein Verfahren angewandt werden, das die aus den Datensätzen intuitiv ableitbare Clus-

¹³³ vgl. Skodowski (2008).

¹³⁴ vgl. Neeb (1999).

tereinteilung wissenschaftlich absichert. Es wurde sich für eines der am häufigsten angewandten scharfen Clusterverfahren entschieden, dem k-means-Verfahren.

Das k-means-Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass jeder Datensatz einem Cluster zugeordnet wird und jedes Cluster mindestens einen Datensatz enthält. Jedes Cluster ist durch einen Mittelpunkt, den sogenannten Centroiden gekennzeichnet. Dieser stellt den geometrischen Mittelpunkt aller Datensätze im Cluster dar. Abhängig von einer vorher festgelegten Anzahl an Clustern kann die Clustergüte an der Summe der quadrierten euklidischen Einzeldistanzen der Datensätze zum Centroiden gemessen werden.¹³⁵

Zur Anwendung des k-means-Verfahrens auf die Datensätze im Prozessfrequenz-Prozessvarianz-Diagramm wurden zunächst die Skalen der Diagrammachsen normiert. Das ist notwendig, da die Skalen im Original-Diagramm sehr unähnlich sind (Prozessfrequenz: 0 ... 32, Prozessvarianz: 0 ... 300 %). Im k-means-Verfahren werden die metrischen Abstände zwischen den Datenpunkten als Maßstab verwendet. Nicht normierte Skalen führen zu einer Verzerrung der Distanzen, im vorliegenden Fall würde der Einfluss der Prozessfrequenz überwiegen. Da angenommen wird, dass beide Kennzahlen die Auswahl eines Produktionssystems in ähnlichem Maße beeinflussen, soll eine derartige Gewichtung im Rahmen der Clusteranalyse nicht vorgenommen werden.

Ein Nachteil des k-means-Verfahrens ist, dass die Anzahl der Cluster vor der Analyse ausgewählt werden muss. Gerade bei größeren Datensätzen erfolgt die Festlegung der Clusteranzahl oft willkürlich. Im vorliegenden Fall war es durch die geringe Anzahl an Datenpunkten möglich alle möglichen Cluster zu bilden: So wurde die Clusteranzahl von 1 (alle Datenpunkte sind in einem Cluster) bis 14 (Jeder Datenpunkt ist ein eigener Cluster) und somit alle möglichen scharfen Cluster im Verfahren untersucht. Bild 51 gibt einen Überblick über das Ergebnis als Dendrogramm (Baumdiagramm), das mit WINSTAT in Excel generiert wurde.

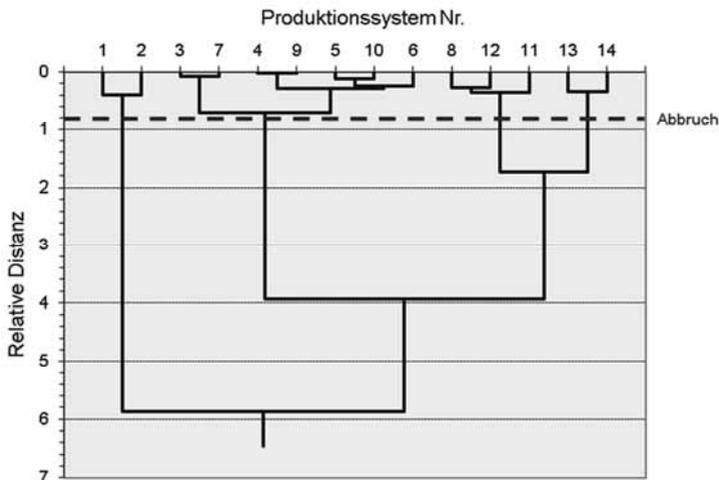


Bild 51: Ergebnisse der Clusteranalyse im k-means-Verfahren

¹³⁵ vgl. Ester (2000).

Das Dendrogramm zeigt die euklidische Distanz aller Datensätze in einem Cluster in Abhängigkeit von der Anzahl der Cluster. Die Anzahl der Zweige bei einer bestimmten Distanz entsprechen der Anzahl der Cluster. Bei einer Distanz von 6,5 findet sich beispielsweise nur ein Cluster (Monocluster), bei einer Distanz von 1,0 finden sich vier Cluster.

Wie zu erkennen ist, nimmt die Distanz mit zunehmender Anzahl der Zweige bzw. Cluster zunächst schnell ab und damit die Clustergüte zu. Eine signifikante Verringerung der Distanz unter 1,0 ist kaum noch durch eine Erhöhung der Clusteranzahl zu erreichen. Als Abbruchkriterium wurde diejenige Clusteranzahl definiert, deren Distanzverringering gegenüber der Vorgängerclusteranzahl weniger als 5 % zur Basis der Monoclusterdistanz beträgt. Dadurch sollte es möglich sein Cluster mit hoher Güte und gleichzeitig mindestens zwei Datensätzen zu identifizieren, um die weiterführenden Untersuchungen sinnvoll durchführen zu können.

Es konnten so vier Cluster identifiziert werden, die als Typen von Rahmenbedingungen im Weiteren die Vergleichsgruppen für das Benchmarking darstellen. Bild 52 visualisiert die Zuordnung der erhobenen Datensätze zu den Clustern.

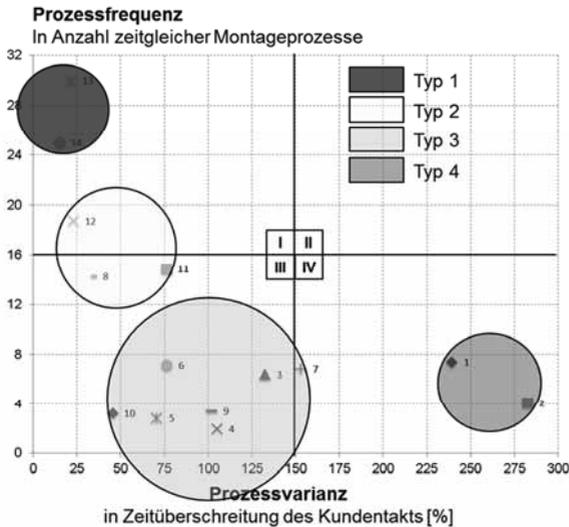


Bild 52: Einordnung der untersuchten Produktionssysteme und deren Einteilung in Typen

5.5.2 Bewertung der Leistungsfähigkeit der Produktionssysteme

Die Leistungsfähigkeit jedes Produktionssystemes wurde entsprechend der in Kapitel 5.2 entwickelten Kennzahlen „Verschwendung Montageobjekt“ und „Verschwendung Arbeitskraft“ bewertet. Ein geringer Verschwendungsanteil in beiden Dimensionen kennzeichnet demnach besonders leistungsfähige Produktionssysteme. In Folgendem soll die Darstellung der Ergebnisse für die 14 Produktionssysteme entsprechend der Zugehörigkeit zu den vier identifizierten Typen dargestellt werden (siehe Bild 53).

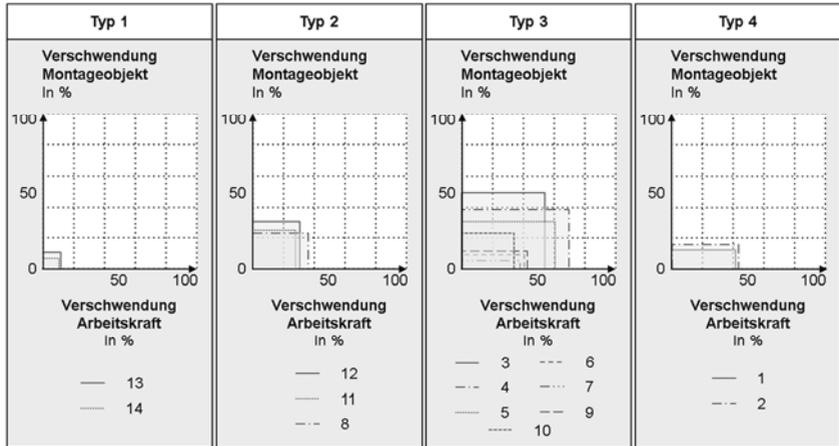


Bild 53: Leistungsfähigkeit der untersuchten Produktionssysteme nach Typen

Zunächst lässt sich festhalten, dass das Ausmaß der Verschwendungen sowohl innerhalb der Typen als auch zwischen den Typen zum Teil stark variiert. Es lassen sich also definitiv signifikante Leistungsunterschiede beobachten. Damit wird eine Grundvoraussetzung für das Benchmarking erfüllt.

Betrachtet man die Verschwendungsdimensionen über die Typen hinweg im Detail, lässt sich weiterhin feststellen, dass die Verschwendung von Arbeitskraft bei den jeweils leistungsfähigsten Produktionssystemen vom Typ 1 bis zum Typ 4 zunimmt. Das deckt sich mit der Erwartungshaltung, dass die Rahmenbedingungen für eine effiziente Produktion mit zunehmender Prozessvarianz ungünstiger werden. Die daraus resultierenden Störungen für den Produktionsprozess führen zu einer Senkung der Leistungsfähigkeit. Die Prozessvarianz nimmt von Typ 1 bis Typ 4 stufenweise zu. Der Anstieg der Verschwendung ist dabei jedoch nicht im direkten proportionalen Verhältnis mit dem Anstieg der Prozessvarianz. Die Produktionssysteme in Typ 3 und 4 scheinen besser mit den hohen Prozessvarianzen umgehen zu können.

Für die Verschwendung im Bereich Montageobjekt lässt sich diese Entwicklung ebenfalls erwarten, ist jedoch nicht eindeutig zu beobachten. Erwartungsgemäß ist Typ 1 auch in dieser Dimension am leistungsfähigsten. Diesem folgen jedoch die Typen 3 und 4, Typ 2 schneidet am schlechtesten ab. Dieses Verhalten ist allein durch die Veränderung von Prozessfrequenz und -varianz kaum zu erklären und soll deshalb im Kapitel 5.5.3 in Zusammenhang mit der Gestaltung der Produktionssysteme nochmals beleuchtet werden. Im Speziellen lässt sich gerade im Typ 3 beobachten, dass es sehr große Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der Produktionssysteme gibt. Es ist aber auch gleichzeitig der Beweis, dass auch bei vermeintlich ungünstigen Rahmenbedingungen relativ effizient produziert werden kann.

5.5.3 Vergleich der Gestaltungsparameter in Abhängigkeit von der Leistungsfähigkeit

In diesem Kapitel soll untersucht werden, inwieweit die beobachteten Leistungsunterschiede der untersuchten Produktionssysteme in Zusammenhang mit der jeweiligen Gestaltung der Produktionssysteme steht. Im Ergebnis sollen allgemeine und typenspezifische Best-Practices abgeleitet werden.

Dafür muss zunächst die Frage diskutiert werden, inwieweit die Gestaltung des Produktionssystems überhaupt als Ursache für die Leistungsunterschiede der unterschiedlichen Produktionssysteme verantwortlich gemacht werden kann. Dabei ist festzustellen, dass es sich bei Montagen um komplexe Systeme mit einer Vielzahl interner und externer Schnittstellen handelt. Die Gestaltung des Produktionssystems und somit die Gestaltung des Montageprozesses ist definitiv eine zentrale Ursache für Leistungsunterschiede, aber nicht die Einzige (siehe Bild 54).

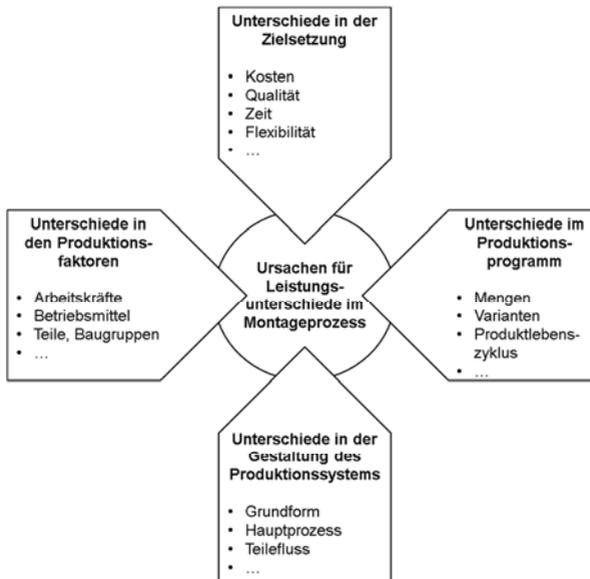


Bild 54: Ursachen für Leistungsunterschiede im Montageprozess

So lassen sich Verschwendungen im Montageprozess auch durch Unterschiede in den eingesetzten Produktionsfaktoren erklären. Unterschiede im Einsatz von Betriebsmitteln spielen in der Endmontage von Werkzeugmaschine eine untergeordnete Rolle, dafür ist jedoch der Einsatz von Arbeitskräften umso intensiver. Unterschiede in Verschwendungen können durch eine unterschiedliche Verfügbarkeit, Produktivität und Arbeitsqualität von Arbeitskräften entstehen. Insbesondere weiche Faktoren wie Motivation sind kaum unternehmensübergreifend vergleichbar. Weiter ist die Verfügbarkeit und Qualität von Teilen und Baugruppen für die Leistungsfähigkeit des Montageprozesses signifikant.

Im Benchmarking sollen diese Einflüsse berücksichtigt werden durch die Typisierung der Rahmenbedingungen für Produktionssysteme. Der Untersuchungsrahmen ist auf das Produktionssystem eingegrenzt, die Verfügbarkeits- und Qualitätsunterschiede von Produktionsfaktoren werden durch die Prozessfrequenz als Input für das Produktionssystem definiert. Hohe Lieferzeitverzögerungen bei Teilen sind so beispielsweise eine Rahmenbedingung für das Produktionssystem, die durch die richtige Ausgestaltung des Montageprozesses beherrscht werden will. Allerdings wird die Produktivität der Montageprozesse selbst im Benchmarking nicht bewertet. Sämtliche Montagearbeiten direkt an der Werkzeugmaschine sind als wertschöpfende Tätigkeiten erfasst worden. Es ist deswegen nicht auszuschließen, dass es „versteckte“ Verschwendungen im so deklarierten Wertschöpfungsanteil gibt. Sind die Unterschiede in der Produktivität der wertschöpfenden Prozesse signifikant, kann das zu einer Fehlinterpretation der Kennzahlen für die Messung der Leistungsfähigkeit führen. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist diese Unsicherheit zu berücksichtigen.

Ebenfalls kann eine unterschiedliche Zielsetzung für den Montageprozess mittelbar zu unterschiedlichen Leistungsfähigkeiten führen. So kann durch unterschiedliche Ziele für den Montageprozess hinsichtlich Lieferzeit, Qualität oder Flexibilität bewusst ein Produktionssystem gewählt werden, das nicht verschwendungsoptimal bzw. kostenoptimal arbeitet zu Gunsten eines anderen Ziels. Diese Unterscheidungsmöglichkeit hat sich jedoch nicht als praxisrelevant herausgestellt. In den Fallstudien haben stets die geforderte Qualität, Flexibilität und Durchlaufzeit den Zielrahmen für die Montage gesetzt, die möglichst kostenminimal realisiert werden sollte. Insofern waren die Kosten stets das zu optimierende Kriterium und die Vermeidung von Verschwendungen in der Montage das unternehmensübergreifende Hauptziel.

Unterschiede im Produktionsprogramm haben ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Verschwendungen im Montageprozess. Einem Teil dieser Einflüsse wurde Rechnung getragen indem diese wiederum bei der Definition der Rahmenbedingungen berücksichtigt wurden, wie z.B. die Produktionsmenge in Form des Kundentakts und die Produktvarianten in Form von Prozessvarianzen durch variantenbedingte Montagezeitunterschiede. Andere Unterschiede im Produktionsprogramm mussten im Verlaufe des Benchmarking durch Ausschluss der entsprechenden Datensätze berücksichtigt werden. So verhalten sich gerade Produktionssysteme im An- oder Auslauf des Produktionslebenszyklus hinsichtlich ihrer Verschwendungen untypisch. Solche Datensätze wurden deshalb nicht für das Benchmarking verwendet. Weiterhin können auch externe Störeinflüsse, wie der rapide Einbruch des Auftrageingangs durch konjunkturelle Einflüsse, ein signifikanter Treiber für Verschwendungen sein. Es wurde im Benchmarking deshalb ein einheitlicher Zeitraum gewählt, der zwischen einem konjunkturellen Tief und Hoch lag. Zudem wurden Datensätze mit anderweitig starken externen Einflüssen ebenfalls ausgeschlossen.

Schließlich lässt sich festhalten, dass der Versuch unternommen wurde, sämtliche Einflüsse auf die Leistungsunterschiede von Produktionssystemen außerhalb der Gestaltung von Produktionssystemen entweder als Rahmenbedingung zu berücksichtigen oder auszuschließen. Trotzdem bleiben Rückschlüsse aus Unterschieden der Leistungsfähigkeit auf die Gestaltung eines Produktionssystems mit Unsicherheiten behaftet. Bei der Identifikation der Benchmark-Produktionssysteme soll diesem Umstand durch Definition eines entsprechend hohen Schwellenunterschieds bei der Bestimmung eines Benchmarks Rechnung getragen werden.

Entsprechend der vorangegangenen Argumentation hat die Gestaltung des Produktionssystems in einem bestimmten Typen den Haupteinfluss auf die Leistungsfähigkeit der untersuchten Produktionssysteme. In Kombination mit der Feststellung, dass große Leistungsunterschiede der Produktionssysteme vor allem in Typ 3 zu beobachten sind, führt das wiederum zu der Erwartung, dass es ebenfalls große Unterschiede bei der Gestaltung der untersuchten Produktionssysteme geben muss. Tatsächlich lässt sich diese Vermutung schon bezüglich der Wahl der klassischen Grundform von Produktionssystemen der Montage nachweisen (siehe Bild 55).

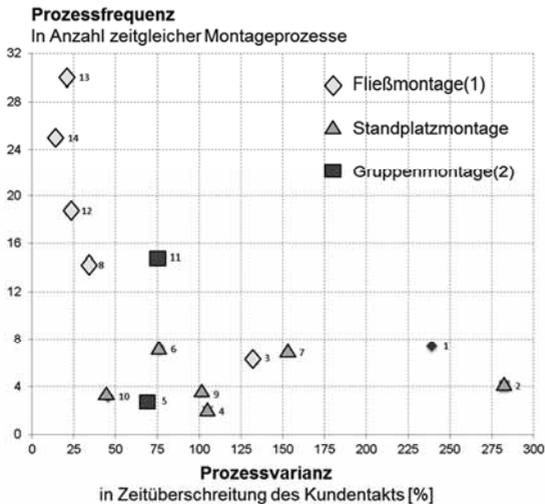


Bild 55: Einsatz klassischer Grundformen von Produktionssystemen im Werkzeugmaschinenbau

Es kann festgestellt werden, dass nur drei klassische Grundformen von Produktionssystemen entsprechend Kapitel 4.3 im Benchmarking beobachtet werden konnten: Fließmontage(1), Standplatzmontage und Gruppenmontage(2).

Weiterhin kann festgestellt werden, dass die Typen 1 und 4 eindeutig einer Grundform zugeordnet werden können. Das war zu erwarten, da in diesen Extrempunkten die Beobachtung den Empfehlungen der betriebswirtschaftlichen Literatur entspricht (siehe Kapitel 5.3). Beachtlich ist in diesem Zusammenhang, dass sogar die erweiterten Gestaltungsparameter von Produktionssystemen innerhalb der beiden Typen wesentlich übereinstimmen. Es kann mit Blick auf die Profile der Verschwendungsanteile in Kapitel 5.5.2 ebenfalls gezeigt werden, dass sich die Leistungsfähigkeit gleicher klassischer Grundformen innerhalb der Typen sowohl qualitativ als auch quantitativ sehr ähnelt. Das kann ebenfalls als Indiz gewertet werden, dass Rückschlüsse von der Gestaltung des Produktionssystems auf die Leistungsfähigkeit des Produktionssystems im beschriebenen Konzept möglich und sinnvoll ist.

Des Weiteren sind Typ 2 und Typ 3 nicht eindeutig einer klassischen Grundform zuzuordnen. Geht man davon aus, dass die Typenbildung bezüglich der Rahmenbedingungen korrekt ist, muss man daraus schließen, dass entweder

- die Werkzeugmaschinenbauer nicht immer das für sie optimale Produktionssystem wählen.
- mehrere optimale Produktionssysteme für jeden Typ von Rahmenbedingungen existieren.

Diese Frage soll durch einen Vergleich der Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Produktionssysteme in den Typen folgend vorgenommen werden. Die Analyse der Daten fällt in den Rahmen der qualitativen bzw. kategorialen Datenanalyse. Dabei steht ein Zielwert (Leistungsfähigkeit) insgesamt 45 kategorialen Variablen (Gestaltungsparameter) gegenüber. Bei einer Gesamtzahl von 14 Datensätzen ist die Voraussetzung für die Anwendung multivariater Analysen nicht erfüllt. Es soll sich deshalb auf eine Best-of-Auswahlbeschränkt werden.¹³⁶

In der Best-of-Auswahl wird ein Schwellwert definiert, in dem vorliegenden Fall für den Zielwert der Leistungsfähigkeit. Erreicht oder übersteigt die Leistungsfähigkeit eines Produktionssystems diesen Schwellwert, gehört es zu den Benchmark-Produktionssystemen im jeweiligen Typen. Die Ausprägung der Variablen (Gestaltungsparameter) des Produktionssystems sind damit auch automatisch die Ausprägungen des Benchmarks. Die Einfachheit dieses Verfahrens und Anwendbarkeit auch bei einer geringen Anzahl von Datensätzen ist als vorteilig zu nennen. Nachteilig ist, dass auf diesem Wege statistisch keine Zusammenhänge zwischen den einzelnen Variablen und dem Zielwert ermittelbar sind. Es obliegt zunächst einer auf logischen Gesichtspunkten basierten Analyse der Unterschiede in den Gestaltungsparametern der unterschiedlichen Produktionssysteme, um die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der Produktionssysteme zu erklären. Eine weitergehende Verifizierung der so ermittelten Wirkungszusammenhänge, z.B. durch Simulation, ist empfehlenswert und wird in Kapitel 6 vorgenommen.

Zum Vergleich der Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Produktionssysteme wurden die zwei Verschwendungsanteile aus Montageobjekt und Arbeitskraft monetär entsprechend der Formel 5 aus Kapitel 5.2 bewertet. Dabei ergab sich über alle Fallbeispiele eine deutlich höhere Gewichtung der monetären Auswirkungen des Verschwendungsanteils der Arbeitskraft. Aus Geheimhaltungsgründen wird an dieser Stelle nur das Verhältnis der ermittelten Kostensätze aufgezeigt, die im Rahmen der empirischen Untersuchung bestimmt wurden:

$$E(KS_{AK} / KS_{MO}) = 4,5$$

$$\sigma(KS_{AK} / KS_{MO}) = 0,3$$

Die ermittelten Liegekosten des Montageobjekts liegen damit im Erwartungsbereich und in großer Übereinstimmung zu typischen Liegekosten des Maschinen- und Anlagenbaus von ca. 16 – 26% des Produktwerts.¹³⁷ Die Streuung erklärt sich zum einen aus regionalen Unterschieden, z.B. in den Gehaltsstrukturen der Arbeitskräfte im Produktionssystem und zum anderen aus Unterschieden in der Montagezeit, der Durchlaufzeit und der Grö-

¹³⁶ vgl. Simon (2007).

¹³⁷ vgl. Stölzle, Hensler, Karrer (2004).

ße der Werkzeugmaschinen. Für die Durchführung des Leistungsvergleichs wurde der Erwartungswert von 4,5 verwendet, um insbesondere den Einfluss von regionalen Gehaltsunterschieden auf die Gesamtverschwendung zu minimieren.

Für den Typ 1 ergeben sich Gesamtverschwendungen von PS13 = 17 % und PS14 = 13 %. Der Unterschied in der Leistungsfähigkeit von 4 % zwischen den beiden Produktionssystemen ist bei der Ermittlung eines Benchmarks als nicht signifikant einzustufen. Ob dieser aus den unterschiedlichen Rahmenbedingungen oder den beschriebenen Unsicherheit durch das Benchmarkingkonzept resultiert, kann an dieser Stelle nicht abschließend beurteilt werden. In diesem Fall stellen demnach beide Produktionssysteme den Benchmark dar. Ergänzend zur Untersuchung der klassischen Grundformen von Produktionssystemen der Montage (Bild 55) wird weiterhin festgestellt, dass auch die erweiterten Gestaltungsparameter von Produktionssystemen bei diesen beiden Datensätzen übereinstimmen. Dieser Vergleich soll in Bild 56 durch die grafische Darstellung der Ausprägungen der Gestaltungsparameter visualisiert werden. Dabei werden die Gestaltungsfelder von Produktionssystemen entsprechend der Nummerierung in Bild 36 und Bild 37 auf der horizontalen Achse dargestellt, die Parameter der Gestaltungsfelder sind auf der vertikalen Achse aufgetragen. Die möglichen Parameter der Gestaltungsfelder sind als graue Felder aufgetragen. Jedes graue Feld entspricht einem Parameter. Die Reihenfolge der Parameter im Bild 56 von unten nach oben entspricht der Reihenfolge der Parameter aus der Übersicht in Bild 36 und Bild 37 von links nach rechts. Eine Linie entlang der unterschiedlichen Gestaltungsfelder zeigt die jeweiligen Ausprägungen der Gestaltungsparameter eines Produktionssystems. In Bild 56 entspricht demnach beispielsweise für das Gestaltungsfeld 16 (Rhythmus der Durchführung der Teileversorgung mit Basisteilen) die Ausgestaltung des Benchmark-Produktionssystems dem ersten Gestaltungsparameter, also dem variierenden Rhythmus. Die Reihenfolge der Parameter wurde dabei so gewählt, dass ein höherer Parameter einer besseren Überdeckung mit den Idealvorstellungen des Autors von konventionellen Produktionssystemen Schlanker Produktion bedeutet. Eine Linie, die sich durch die obersten grauen Felder zieht, wäre demnach die Darstellung eines klassischen Schlanken Produktionssystems wie man es in hoher Verbreitung in der Automobilindustrie findet.

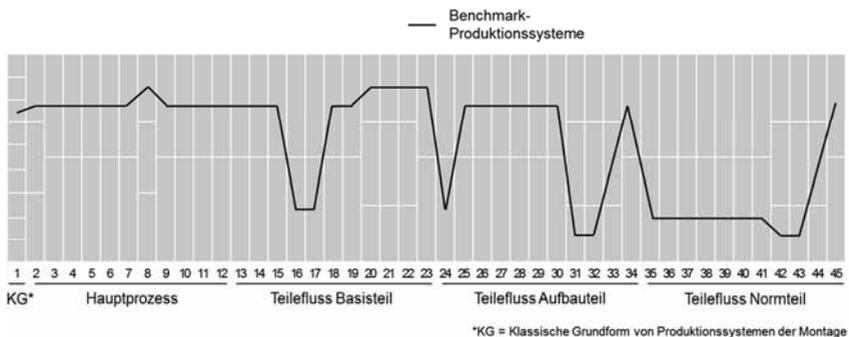


Bild 56: Gestaltung der Produktionssysteme in Typ 1

Wie in Bild 56 zu sehen ist, befindet sich ein Großteil der Gestaltungsparameter auf einem sehr hohen Niveau und kommt konventionellen Schlanken Produktionssystemen relativ nahe. Als Grundform findet sich eine Fließmontage, in der sich die Montage der Werkzeugmaschine getaktet von Arbeitsplatz zu Arbeitsplatz vollzieht. Die Arbeitsplätze und Arbeitsgänge zeichnen sich durch eine hohe Standardisierung und Spezialisierung aus. Werkzeuge und Material haben ihren festen Platz und sind arbeitsganggerecht angeordnet, die Arbeitskräfte sind zum Großteil auf einen Arbeitstakt spezialisiert (z.B. Aufbau Z-Achse). Es gibt eine klare Trennung von wertschöpfenden und nicht wertschöpfenden Aufgaben der Monteure und Logistiker für Basis- und Aufbauteile, die kommissioniert am Arbeitsplatz zur Montage bereitgestellt werden. Lediglich Normteile werden selbst von den Monteuren am Anfang oder Ende einer Schicht in standardisierten Wägen abgeholt und die Vorräte der Gebinde aufgefüllt. Bei Störungen des Montageprozesses steuert der Linienverantwortliche die Nacharbeit in Form der Bereitstellung von Zusatzkapazitäten, um die Takteinhaltung zu ermöglichen. Kann der Arbeitstakt nicht gehalten werden, wird ggf. die Werkzeugmaschine angesteuert. Das als Benchmark identifizierte Produktionssystem für Typ 1 wird fortan als **Schlankes Fließmontage** bezeichnet. Im Vergleich zu den Produktionssystemen der anderen Typen lässt sich festhalten, dass die Leistungsfähigkeit der Schlanken Fließmontage unter den Rahmenbedingungen des Typ 1 am höchsten ist.

Für den Typ 2 ergeben sich Gesamtverschwendungen von $PS8 = 41\%$, $PS11 = 32\%$ und $PS12 = 40\%$. Die Spreizung der unterschiedlichen Leistungsfähigkeiten ist kleiner als 10% und vor dem Hintergrund der beschriebenen Unsicherheiten bei der Ermittlung eines Benchmarks ebenfalls als nicht signifikant einzustufen. Alle drei Produktionssysteme sind deshalb als ähnlich gut geeignet zu werten innerhalb des Typen 2 effizient zu produzieren. In Bild 57 werden die Ausprägungen der Gestaltungsparameter der Produktionssysteme dargestellt.

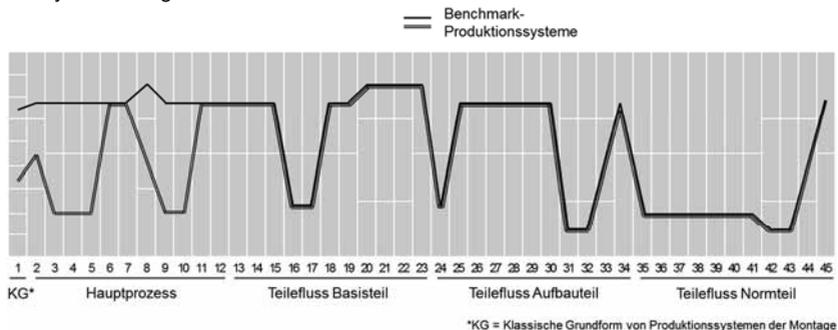


Bild 57: Gestaltung der Produktionssysteme in Typ 2

Im Typ 2 können zwei grundsätzliche Produktionssysteme identifiziert werden. Das erste entspricht der Schlanken Fließmontage, wobei festgestellt werden muss, dass die Gesamtverschwendung dieses Produktionssystems um mehr als das doppelte im Vergleich zu den gleichen Produktionssystemen in Typ 1 zugenommen hat. Als Erklärung dafür sind die veränderten Rahmenbedingungen geeignet. So ist eine starke Reak-

tion der Leistungsfähigkeit einer getakteten Fließmontage auf eine Verringerung der Stückzahl und gleichzeitige Erhöhung der Prozessstörungen durch die starre Verkettung auch theoretisch zu erwarten.

Das zweite beobachtete Produktionssystem gleicht in vielen Parametern der Schlanken Fließmontage. Insbesondere bei der Gestaltung der verschiedenen Teileflüsse gibt es keine prinzipiellen Unterschiede. Im Detail sind solche Unterschiede sehr wohl zu finden, z.B. kann ein standardisierte Bearbeitungsreihenfolge auf Arbeitsgangebene (z.B. Stecker X in Anschluss B einstecken) erfolgen oder nur anhand grober Arbeitsinhalte (z.B. Montage KSS-System vor Montage Werkzeugwechsler). Im Benchmarking zählen beide Gestaltungsvarianten als Parameter „Standardisierte Bearbeitungsreihenfolge“ im Gegensatz zur „unspezifischen Bearbeitungsreihenfolge“. Diese Unterschiede werden zugelassen, da dieses Benchmarking auf die prinzipielle Gestaltung eines Produktionssystems zielt und nicht auf die Feingestaltung der Produktionssysteme.

Die Hauptunterschiede der prinzipiellen Gestaltung des beobachteten Produktionssystems liegen im Hauptprozess und der Grundform. Die Grundform entspricht einer Gruppenmontage, in der sich die Arbeitskräfte von Arbeitsplatz zu Arbeitsplatz bewegen. Im Sinne eines erweiterten Produktionssystems handelt es sich bei diesen Arbeitskräften um spezialisierte Fachgruppen (z.B. Aufbau Achsen), die sich getaktet von Arbeitsplatz zu Arbeitsplatz bewegen. Der Arbeitstakt ist relativ grob auf Tagesebene ausgelegt, die Koordination der Fachgruppen erfolgt zentral. Das bietet eine Flexibilität des Produktionssystems, um ggf. nach Schichtende noch Nacharbeiten vorzunehmen oder auch durch eine flexible, bedarfsgerechte Verteilung von Arbeitskräften der Fachgruppe auf verschiedene Arbeitsplätze. Im Grunde ermöglicht dadurch dieses Produktionssystem einen Flexibilitätsvorteil im Vergleich zur Schlanken Fließmontage bei gleichzeitigem Verlust von Spezialisierungs- und Skalenvorteilen. Diese Form der Gruppenmontage wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit als **Virtuelle Fließmontage** bezeichnet.

Für den Typ 3 ergeben sich Gesamtverschwendungen von PS3 = 67 %, PS4 = 78 %, PS5 = 66 %, PS6 = 37 %, PS7 = 38 %, PS9 = 42 % und PS10 = 34 %. Legt man den gleichen Schwellwert von 10 % Leistungsunterschied an wie beim Typ 2, lassen sich zwei Gruppen von Datensätzen bilden. Die erste Gruppe liegt im Bereich von 37 – 42 % und bildet die Benchmark-Produktionssysteme ab, die zweite Gruppe liegt im deutlich schlechteren Bereich von 66 % - 78 %. In Bild 58 sind die Ausprägungen der Benchmark-Produktionssysteme und der übrigen Produktionssysteme abgebildet.

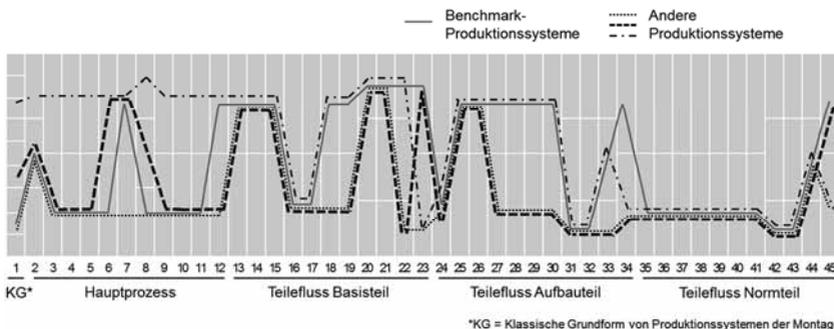


Bild 58: Gestaltung der Produktionssysteme in Typ 3

Zunächst fällt auf, dass die Vielfalt an unterschiedlichen Produktionssystemen in diesem Typen sehr hoch ist, aber es trotzdem nur ein Benchmark-Produktionssystem gibt. Dieses Benchmark-Produktionssystem unterscheidet sich wiederum gegenüber den bisher beobachteten Benchmark-Produktionssystemen der Typen 1 und 2.

Das Benchmark-Produktionssystem basiert auf der Grundform der Standplatzmontage, also der Montage an einem festen Ort mit ebenfalls stationären Arbeitskräften. Im Sinne der erweiterten Gestaltungsparameter von Produktionssystemen zeichnet sich dieses Produktionssystem weiterhin aus durch eine geringe Spezialisierung der Arbeitskräfte in Gewerke (z.B. Mechanik, Elektronik). Die Aufträge werden dezentral auf die Arbeitsplätze verteilt und sind relativ unabhängig voneinander. Die Anzahl freier Arbeitsplätze und die Anzahl der verfügbaren Arbeitskräfte sind die begrenzenden Kapazitäten dieses Produktionssystems. Das Produktionssystem ist sehr flexibel, z.B. bei auftretenden Prozessvarianzen, zu Lasten von Spezialisierungs- und Skaleneffekten. Eine Standardisierung von Arbeitsplätzen, der Bearbeitungsreihenfolge und dem Teilefluss findet in diesem Produktionssystem ebenfalls statt, wenngleich auch auf geringerem Niveau als das der Benchmark-Produktionssysteme der Typen 1 und 2. Beachtlich bei diesem Vergleich ist, dass die Gestaltung der Teileflüsse der Benchmark-Produktionssysteme über alle Typen sich sehr ähnelt. Insbesondere das grundlegende Prinzip der Trennung von wertschöpfenden und nicht wertschöpfenden Tätigkeiten scheint unabhängig von verändernden Rahmenbedingungen möglich und effektiv zu sein. Das identifizierte Produktionssystem wird als **Schlanke Standplatzmontage** bezeichnet.

Die übrigen Produktionssysteme des Typen 3 sind insofern interessant, da sie Abwandlungen aller beobachteten Benchmark-Produktionssysteme darstellen. So finden sich z.B. in einem Fall große Übereinstimmungen mit der Schlanken Fließmontage. Wenngleich in Typ 1 und Typ 2 dieses Produktionssystem die höchste Leistungsfähigkeit zeigte, kann unter den Rahmenbedingungen des Typen 3 dieses Produktionssystem seine Leistungsvorteile nicht realisieren. Das lässt sich als weiteres Indiz werten, dass die Rahmenbedingungen einer Montage den entscheidenden Einfluss auf die Wahl eines effizienten Produktionssystems haben. Weiterhin finden sich Abwandlungen der Virtuellen Fließmontage und der Schlanken Standplatzmontage. Beide zeichnen sich insbesondere im Bereich der Teileflussgestaltung für Basis- und Aufbauteile durch eine deutlich unterschiedliche Ausprägung im Vergleich zu allen Benchmark-Produktionssystemen aus. So wird beispielsweise die bereits beschriebene Trennung von wertschöpfenden und nicht wertschöpfenden Tätigkeiten nicht umgesetzt. Es gibt dadurch sehr viele Akteure in der Materialversorgung, Standards existieren kaum, Spezialisierungseffekte wie Wegebündelung können nicht genutzt werden. Daraus resultiert Verschwendung.

Die Unterschiede in Gestaltung der Produktionssysteme im Vergleich zum Benchmark-Produktionssystem oder die unterschiedlichen Rahmenbedingungen der Montage ermöglichen eine Erklärung der gemessenen Leistungsunterschiede.

Für den Typ 3 ergeben sich Gesamtverschwendungen von $PS1 = 41\%$ und $PS2 = 33\%$. Auch hier ist der Unterschied in der Leistungsfähigkeit als nicht signifikant einzuschätzen und liegt unter 10% . Beide Datensätze werden folglich als Benchmark behandelt, deren Gestaltung wird in Bild 59 dargestellt.

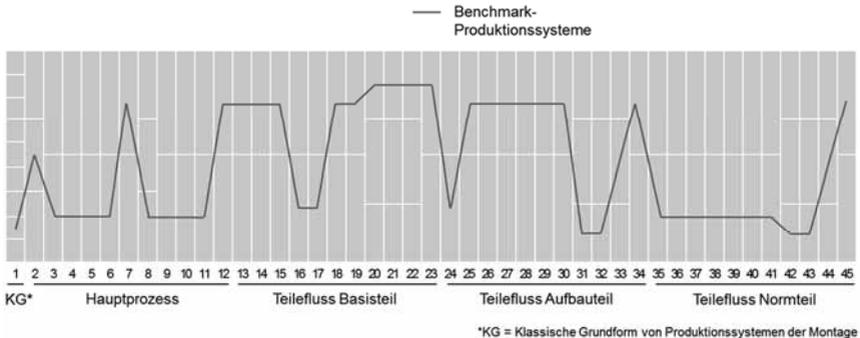


Bild 59: Gestaltung der Produktionssysteme in Typ 4

Beide Datensätze des Typen 4 entsprechen der Gestaltung der Schlanken Standplatzmontage wie bereits für Typ 3 dargestellt.

Über alle betrachteten Typen, deren Leistungsfähigkeit und der Ausgestaltung der zugehörigen Produktionssysteme lassen sich zusammenfassend drei Arten von Schlanken Produktionssystemen in der Montage von Werkzeugmaschinen ermitteln:

- Schlanke Fließmontage (Typ 1, Typ 2)
- Virtuelle Fließmontage (Typ 2)
- Schlanke Standplatzmontage (Typ 3, Typ 4)

Neben der jeweils individuellen Charakterisierung lassen sich zudem folgende Schlussfolgerungen für die Benchmark-Produktionssysteme treffen:

1. Die Benchmark-Produktionssysteme unterscheiden sich teilweise beachtlich von konventionellen Schlanken Produktionssystemen (insbesondere Virtuelle Fließmontage und Schlanke Standplatzmontage).
2. Die Benchmark-Produktionssysteme können nicht gleichermaßen effizient bei allen Rahmenbedingungen eingesetzt werden (z.B. Schlanke Fließmontage unter den Rahmenbedingungen des Typs 3).
3. Die Benchmark-Produktionssysteme sind unter bestimmten Rahmenbedingungen aber auch austauschbar bzw. ähnlich effizient (z.B. Schlanke Fließmontage und Virtuelle Fließmontage in Typ 2).
4. Die Benchmark-Produktionssysteme unterscheiden sich hauptsächlich hinsichtlich der Gestaltung von Hauptprozess und Grundform des Produktionssystems.
5. Die Benchmark-Produktionssysteme gleichen sich hinsichtlich der prinzipiellen Gestaltung ihres Teileflusses.

Nachfolgend sollen nochmal die konkreten Unterscheidungsmerkmale der identifizierten Benchmark-Produktionssysteme für die Wahl der Grundform und der Gestaltung des Hauptprozesses vergleichend gegenübergestellt werden (siehe Bild 60).

Klassische Grundform von Produktionssystemen der Montage			Schlanke Fließmontage	Virtuelle Fließmontage	Schlanke Standplatzmontage	
			Fließmontage(1)	Gruppenmontage(2)	Standplatzmontage	①
Hauptprozess	Auftragsplanung (alle vorbereitenden, einmally auftretenden Maßnahmen für die Auftragsabwicklung)	Strategie der Auftragseinlastung	Eskalation	Eskalation	Eskalation	②
		Management der Auftragseinlastung	zentral	zentral	dezentral	③
	Auftragssteuerung (alle Maßnahmen, die für die Einhaltung der Auftragsabwicklung erforderlich sind)	Strategie der Störungsbeileitigung	Sofortige Beileitigung/ Aussteuern	Sofortige Beileitigung	Sofortige Beileitigung	④
		Management der Störungsbeileitigung	Aufstockung Kapazitäten	Umverteilung Kapazitäten	Umverteilung Kapazitäten	⑤
	Durchführung Montage	Rhythmus der Bewegung	getaktet	getaktet	variiierend	⑥
		Bestimmtheit der Bearbeitungsfolge	standardisiert	standardisiert	standardisiert	⑦
	Bereitstellung prozessrelevanter Potentialfaktoren	Spezialisierung der Arbeitskräfte	Arbeitstakt	Fachgruppe	Gewerk	⑧
		Einsatzflexibilität der Arbeitskräfte	ein Arbeitsplatz	mehrere Arbeitsplätze	mehrere Arbeitsplätze	⑨
		Kapazitive Flexibilität der Arbeitskräfte	konstant	flexibel	flexibel	⑩
	räumliche Gestaltung des Arbeitsplatzes	Spezialisierung des Arbeitsplatzes	variantenspezifisch	variantenspezifisch	universell	⑪
		Systematisierung des Arbeitsplatzes	standardisiert	standardisiert	standardisiert	⑫

Bild 60: Vergleich der Benchmark-Produktionssysteme hinsichtlich der Gestaltung von Grundform und Hauptprozess

5.6 Zusammenfassung

Mit den Ergebnissen des Benchmarkings können die zentralen Forschungsthese des Kapitels 3 gestützt werden. Es konnte gezeigt werden, dass eine überschaubare Anzahl an praktisch relevanten Arten von Schlanken Produktionssystemen für die Montage von Werkzeugmaschinen existiert. Die hohe Bedeutung der Rahmenbedingungen für die Auswahl des „richtigen“ Produktionssystemes konnte praxisnah nachgewiesen werden und auch die Eignung unkonventioneller Produktionssysteme zur Erreichung der Ziele der Schlanken Produktion wurde belegt.

Das Forschungsziel der Entwicklung einer Methode zur Auswahl von Schlanken Produktionssystemen kann damit jedoch noch nicht erreicht werden. Insbesondere

- sind die ableitbaren Empfehlungen zur Auswahl von Produktionssystemen aus dem Benchmark mehrdeutig (siehe Typ 2).
- bestehen große Bestimmungslücken, da die betrachteten Typen nicht alle möglichen Kombinationen von Rahmenbedingungen abdecken.
- ist der Bestimmtheitsgrad der Empfehlungen aufgrund der geringen Menge an Fallstudien relativ ungenau.
- können die Wirkungszusammenhänge der unterschiedlichen Gestaltung von Produktionssystemen bisher nur logisch abgeleitet werden.

Es soll deshalb im nächsten Kapitel die weiterführende Untersuchung der drei identifizierten Schlanken Produktionssysteme für die Montage von Werkzeugmaschinen erfolgen.

6. Verhalten und Einsatzgrenzen der Arten von Schlanken Produktionssystemen

Mit der Identifikation der Arten von Schlanken Produktionssystemen ist die Grundlage für die Entwicklung einer Methode zur Auswahl Schlanker Produktionssysteme geschaffen. Die Analyse der Einsatzgrenzen von Schlanken Produktionssystemen und der Begründung für diese Begrenzung soll in diesem Kapitel beleuchtet werden.

6.1 Vorgehen und Hilfsmittel

Das Ziel der folgenden Untersuchung ist es, die Leistungsfähigkeit der drei identifizierten Schlanken Produktionssysteme für jede Merkmalskombination von Prozessfrequenz und Prozessvarianz zu bestimmen. Damit wird es möglich für jede definierte Merkmalskombination das leistungsfähigste Produktionssystem zu bestimmen und damit die Entscheidung für die Wahl eines Produktionssystems zu fällen. Da die Bestimmung der Leistungsfähigkeit der drei betrachteten Schlanken Produktionssysteme für alle Merkmalskombinationen nicht durch Felddaten möglich ist, soll eine Simulation der Produktionssysteme unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen erfolgen.

6.1.1 Definition und Zielsetzung Simulation

Die Simulation nach der VDI-Richtlinie 3633 umfasst das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. [...]“¹³⁸. Simulation dient so zur Erprobung von Verfahren, Ermittlung von Kenngrößen oder der Überprüfung von Hypothesen, wenn die Durchführung der Untersuchungen an einem realen System nicht möglich ist (z.B. zu hohe oder zu geringe Geschwindigkeit des Experiments) oder aus verschiedenen Gründen nicht sinnvoll ist (z.B. aus wirtschaftlichen Gründen, aus Gründen der Sicherheit). Den Kern der Simulation bildet ein Modell, das ein reales System für einen bestimmten Zweck repräsentiert. Die Ausrichtung des Modells an diesem Zweck ist notwendig, da ein Modell zumeist eine unvollständige Abbildung der Realität darstellt. Gerade komplexe Systeme, wie Produktionssysteme, sind praktisch unmöglich in allen Facetten in vollkommener Übereinstimmung mit der Realität zu modellieren. So ermisst sich die Güte von Simulationen und deren -ergebnisse daran wie akzeptabel das Modell die Realität hinsichtlich des Untersuchungszwecks abbildet.¹³⁹

Das zu modellierende System kann real bestehend oder erdacht sein, wobei sich jedes System durch definierte Systemgrenzen, Ein- und Ausgangsgrößen, Aufbaustrukturen, Ablaufstrukturen, Zustandsgrößen und deren Verhalten auszeichnet.¹⁴⁰ Simulationen und Modelle lassen sich in vielfacher Weise unterscheiden. Häufige Unterscheidungsmerkmale sind u.a. kontinuierliche vs. diskrete Simulation (Unterscheidung nach der Art der verwendeten Modellparameter) und deterministische vs. stochastische Simulation (Unterscheidung nach der Bestimmtheit der verwendeten Modellparameter und -ergebnisse).¹⁴¹ Simulationen von Produktionsprozessen und -systemen fallen in den

¹³⁸ vgl. VDI 3633 (2010).

¹³⁹ vgl. Rabe (2008).

¹⁴⁰ vgl. Kudlich (2010).

¹⁴¹ vgl. Fröming (2009).

Bereich der hybriden (diskreten und kontinuierlichen) Simulation, werden aber zumeist diskret durchgeführt. Kontinuierliche Modellparameter werden ggf. durch eine Diskretisierung des spezifischen Parameterverhaltens berücksichtigt.

Reale Problemstellungen in Produktion und Logistik zeichnen sich weiterhin in der Regel dadurch aus, dass sie stochastischen Einflüssen unterliegen, die nur unzureichend deterministisch quantifiziert werden können.¹⁴² Die stochastischen Modellparameter führen zu einer Streuung des Simulationsergebnisses, so dass es notwendig ist, mehrere Simulationsläufe mit variierenden Zufallszahlen durchzuführen, um robuste Simulationsergebnisse zu erhalten. Ein Simulationslauf ist in diesem Zusammenhang „die Nachbildung des Verhaltens eines Systems [...] mit einem Modell [...] über einen bestimmten Zeitraum [...]“¹⁴³.

Für die beschriebene Zielstellung gilt es demnach, geeignete Modelle für Schlanke Produktionssysteme zu entwickeln und diese in mehreren diskret-stochastischen Simulationsläufen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen zu überprüfen.

6.1.2 Vorgehensweise bei der Simulation

Die zielgerichtete Untersuchung eines Modells in einer Simulation mit einem oder mehreren Simulationsläufen wird als Simulationsexperiment bezeichnet. Die Planung bzw. Vorbereitung, die Durchführung und die Auswertung von Simulationsexperimenten wird u.a. in der VDI 3633 beschrieben (siehe auch Bild 61).¹⁴⁴

In der Vorbereitung eines Simulationsexperiments wird zunächst die Simulationswürdigkeit eines bestimmten Problems festgestellt. Dabei entscheiden sowohl die Notwendigkeit der Simulation zur Lösung einer Problemstellung (z.B. aus Ermangelung analytischer Lösungsverfahren), die Aufwandsbewertung für die Erfassung notwendiger Daten, die Bewertung der Kompetenz des Anwenders der Simulation und der erwartete Nutzen der Simulationsergebnisse. Im konkreten Fall der Untersuchung begründet gerade die bereits vorhandene Datenbasis an relevanten Felddaten ein sehr gutes Aufwand-Nutzen-Verhältnis der angestrebten Simulation.

Sodann wird eine Ziel- oder Fragestellung definiert, die untersucht werden soll. Dabei lassen sich in der Simulation von Produktionsprozessen grundsätzlich zwei Kategorien von Fragestellungen unterscheiden. Zum einen die „Was-wäre-wenn“-Analyse (Ermittlung eines Zielwerts) und die „Was-tun-zur-Zielerreichung“-Analyse (Ermittlung und Bewertung von Maßnahmen).¹⁴⁵ Die angestrebte Untersuchung im Sinne der Aufgabenstellung ist eine klassische „Was-wäre-wenn“-Analyse, die das Systemverhalten der unterschiedlichen Schlanken Produktionssysteme unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen untersucht.

Besonders bedeutsam für die Güte der Simulation ist die Datenerfassung und -aufbereitung. Zu den relevanten Datentypen für ein Simulationsexperiment zählen Daten zur Beschreibung der Systemelemente, Daten zur Beschreibung der Ablauf- und Aufbauorganisation und Daten zur Beschreibung der Systemlast.¹⁴⁶ Die Datengrundlage für

¹⁴² vgl. Sachs (2004).

¹⁴³ vgl. VDI 3633 (2010).

¹⁴⁴ vgl. Arnold (2004).

¹⁴⁵ vgl. Arnold (2004).

¹⁴⁶ vgl. Arnold (2004).

alle Datentypen kann dazu aus der bereits durchgeführten Analyse der Produktionssysteme (insbesondere Wertstromanalysen) abgeleitet werden. Dabei ist der Detaillierungsgrad der Daten soweit anzupassen, wie es die Zielstellung der Simulation erfordert.

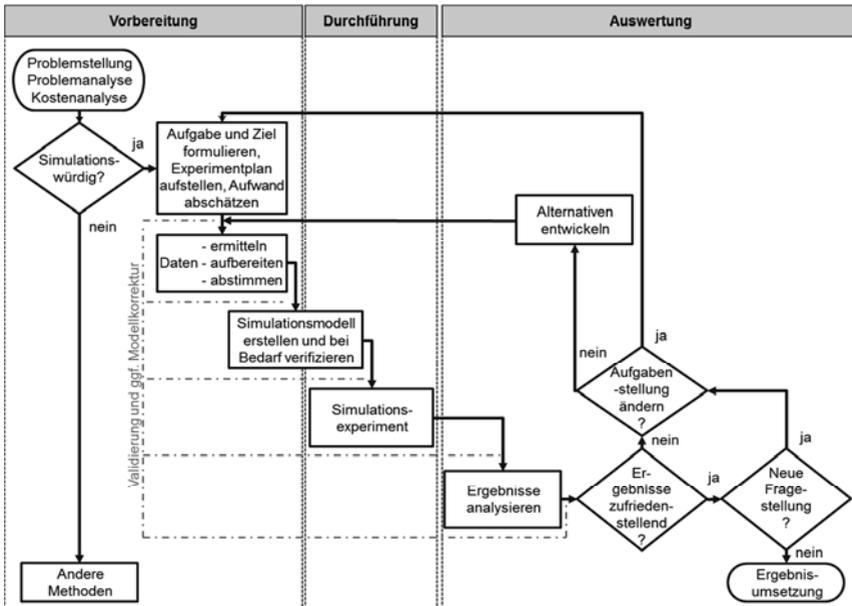


Bild 61: Ablauf eines Simulationsexperiments¹⁴⁷

Die Erstellung des Simulationsmodells umfasst die Umsetzung der Daten in ein softwaretechnisches Abbild unter Verwendung eines Simulationswerkzeugs. Unter Umständen kann eine Validierung des Modells mit subjektiven (z.B. Sensitivitätsanalyse, Animation, Untersuchung an Extrempunkten) oder objektiven (z.B. statistische Prüfverfahren) Verfahren erforderlich sein, um die Übereinstimmung von Modell und Realität zu überprüfen.¹⁴⁸

Die Durchführung des Experiments bzw. der Experimente erfolgt anhand eines Versuchsplans, der aus der definierten Zielstellung abgeleitet wird. Anhand mehrerer Simulationsläufe pro Experiment wird das Systemverhalten des Modells durch geeignete Messgrößen beschrieben.

In der anschließenden Analysephase werden die Ergebnisse der Simulation untersucht und bewertet. Einerseits umfasst das nochmals die Plausibilität der erhaltenen Ergebnisse als auch die Güte der Zielerreichung. Ggf. ergeben sich neue Fragestellungen, die durch Adaption des Simulationsverlaufs untersucht werden können.

¹⁴⁷ vgl. VDI 3633 (2010).

¹⁴⁸ vgl. Arnold (2004).

6.1.3 Validierung der Ergebnisse

Die durchzuführende Simulation von Schlanken Produktionssystemen unterliegt einigen Unsicherheiten, die sich insbesondere ergeben aus:

- der Abstraktion der Wirklichkeit eines realen komplexen Systems in einem Modell
- der Ableitung von Modell- und Simulationslaufparametern aus ausgewählten Fallstudien, die nicht zwangsläufig die Gesamtheit aller möglichen Parameterausprägungen darstellen müssen

Zur Sicherstellung der Modellkonformität und Einschätzung des Geltungsbereichs der Simulationsergebnisse kommen eine Reihe von subjektiven und objektiven Validierungstechniken zum Einsatz, die in Bild 62 gekennzeichnet sind. In RABE (2008) sind die einzelnen Techniken detailliert beschrieben.



Bild 62: Übersicht Validierungstechniken nach dem Grad der Subjektivität¹⁴⁹

Eine besondere Stellung bei der Validierung der Simulationsergebnisse nimmt die Sensitivitätsanalyse ein. In einer Sensitivitätsanalyse wird die Beziehung zwischen dem Informationsfluss in und aus dem Modell untersucht. Durch Variation eines oder mehrerer Modellparameter kann somit die Reaktionsintensität des Modells auf eine Änderung dieses Parameters eingeschätzt werden.¹⁵⁰ Damit ist es nicht nur möglich die Wirkungszusammenhänge von unterschiedlichen Rahmenbedingungen auf Schlanke Produktionssysteme zu erfassen sondern auch zulässige Grenzbereiche für Parameterschwankungen zu definieren, damit Simulationsergebnis und Realität hinreichend übereinstimmen.

¹⁴⁹ vgl. Rabe (2008).

¹⁵⁰ vgl. Saltelli (2004).

6.2 Modellbildung

Die Bildung eines Simulationsmodells ist das Herzstück des Simulationsexperiments. Es beschreibt die Beziehungen und das Zusammenspiel der einzelnen Elemente von Schlanken Produktionssystemen. In Folgendem sollen Umfang und Ausprägung der verwendeten Modelle detailliert beschrieben und begründet werden.

6.2.1 Ziele des Simulationsexperiments und Modellumfang

Das Ziel des Simulationsexperiments ist es, die Leistungsfähigkeit der drei identifizierten Schlanken Produktionssysteme für jede Merkmalskombination von Prozessfrequenz und Prozessvarianz zu bestimmen. Dazu sollen einerseits die drei Schlanken Produktionssysteme hinsichtlich ihrer Aufbau- und Ablauforganisation modelliert werden und andererseits die unterschiedlichen Rahmenbedingungen auf alle entwickelten abgebildet werden können.

Es gilt dabei vor allem die Unterschiedlichkeit der verschiedenen Schlanken Produktionssysteme abzubilden und den Praxisbezug der Untersuchung sicherzustellen. Insofern werden folgende Vereinfachungen bzw. Einschränkungen für die Modellbildung getroffen:

- Hinsichtlich der Gestaltungsprinzipien Schlanker Produktionssysteme werden nur Gestaltungsparameter des Hauptprozesses modelliert. Da im Benchmarking hinsichtlich der Materialflusssysteme keine signifikanten Unterschiede bei den Benchmark-Produktionssystemen festgestellt wurden, sind die unterschiedlichen Systemleistungen für verschiedene Einsatzbereiche durch eine Betrachtung dieses Teilsystems nicht zu erwarten.
- Hinsichtlich der Rahmenbedingungen der Montage wird der Untersuchungsbe-
reich auf den praktisch relevanten, weil beobachteten, Anwendungsbereich von [Prozessfrequenz: 0 ... 32; Prozessvarianz: 0 ... 300%] eingeschränkt. Rahmenbedingungen außerhalb dieses Bereichs sind theoretisch möglich, aber im Werkzeugmaschinenbau in Deutschland kaum zu erwarten.

6.2.2 Simulationswerkzeug Plant Simulation

Zur Durchführung des Simulationsexperiments kommt das Simulationswerkzeug „Plant Simulation“ in der Version 10 zum Einsatz. Die Gründe für die Auswahl des Simulationswerkzeugs liegen in der Eignung zur Lösung der beschriebenen Zielstellung, der Einfachheit der Anwendung durch große Standardbibliotheken und der praktischen Verfügbarkeit während der Erstellung der vorliegenden Arbeit.

Plant Simulation ist ein Materialflusssimulator, der die Durchführung von Simulationsexperimenten an strukturierten, hierarchischen und objektorientierten Modellen von Produktionsprozessen ermöglicht.¹⁵¹ Der Aufbau von Modellen in Plant Simulation lässt sich beispielhaft an einem einfachen Ebenenmodell darstellen (siehe auch Bild 63).

Auf oberster Ebene finden sich zahlreiche Hilfsmittel zur Steuerung und Auswertung des Simulationsexperiments. Insbesondere der Experimentverwalter ermöglicht die einfache Definition von Simulationsläufen, die festgelegte Durchführung von Versuchsreihen, das automatische Starten und Stoppen von Simulationsläufen, eine Auswertungsfunktion und

¹⁵¹ vgl. Kühn (2006).

selbst die Programmierung genetischer Algorithmen zur evolutionären Bestimmung einer geeigneten Lösung für eine Problemstellung. Ebenfalls können globale Variablen auf dieser Stufe definiert werden, um die Parameter des Modells zu ändern.

Auf der zweiten Modellebene findet sich die globale Aufbau- und Ablauforganisation für das Modell wieder. Der Anwender wird bei der Entwicklung von Modellen dabei durch eine Vielzahl von Standardbibliotheken für Anwenderbausteine, z.B. für Produktionsfaktoren oder Steuerungsprinzipien, unterstützt. Die Verwendung dieser Bausteine hat neben dem Vorteil der Zeitersparnis bei der Modellbildung ebenfalls den Vorzug einer implementierten 2D-Animation. Das ist nützlich, um Teilmodelle testen zu können und auf Plausibilität zu prüfen. Daneben ist jedoch auch die eigenständige und weitgehend freie Programmierung von Bausteinen möglich.¹⁵²

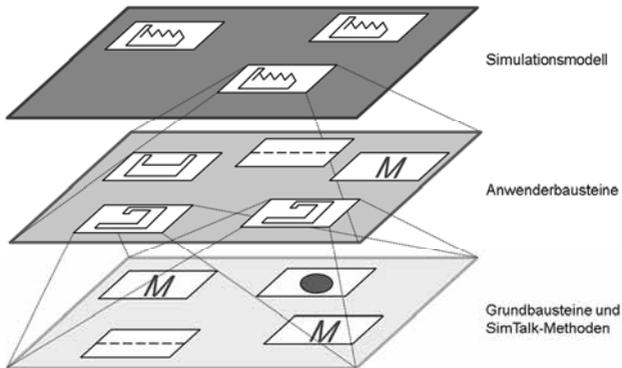


Bild 63: Hierarchischer Grundaufbau eines 3-Ebenen-Modells mit Plant Simulation¹⁵³

Die Gestaltung des jeweiligen Anwenderbausteins erfolgt auf der dritten Ebene von Plant Simulation. Das umfasst die Parametrisierung des Bausteins für eine Vielzahl von Eigenschaften (z.B. Bearbeitungszeit, Fehlverhalten, Eingangsverhalten) mit Festwerten, Wahrscheinlichkeitsverteilungen oder eigenständig programmierten Methoden mittels einer eigenen Programmiersprache SimTalk. Der Vorzug von SimTalk liegt insbesondere in einer Vielzahl bereits definierter Funktionen und dem einfachen Zugriff auf alle Parameter sämtlicher Anwendungsbausteine.

6.2.3 Modellbildung für Gestaltungsprinzipien der Montage

Das Ziel der Bestimmung der Leistungsunterschiede Schlanker Produktionssysteme für verschiedene Gestaltungsprinzipien und unterschiedliche Rahmenbedingungen der Produktion kann mit nur einem Modell nicht erreicht werden. So ändern sich mit den unterschiedlichen Gestaltungsprinzipien zentrale Steuerungsmechanismen im Produktionsablauf, die die Effektivität von Produktionssystemen beeinflussen können. Unterschiedliche Rahmenbedingungen, insbesondere Änderungen der Prozessfrequenz, erfordern die kapazitive Neuauslegung des Modells, um realitätsnahe Ergebnisse zu generieren.

¹⁵² vgl. Kühn (2006).

¹⁵³ vgl. Kudlich (2000).

Um die Vielfalt der vielzählig zu entwickelnden Modelle einzuschränken, wurde deshalb ein Modellbaukasten entwickelt, der auf einem zentralen Grundbaustein aufbaut und somit die aufwandsarme Anpassung des jeweils zu untersuchenden Modells erlaubt (siehe Bild 64).

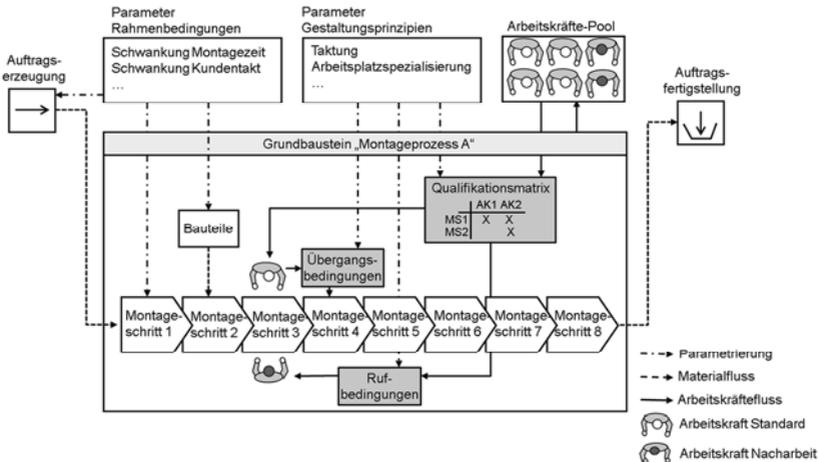


Bild 64: Baukasten zur Modellierung der Produktionssysteme (vereinfachte Darstellung)

Im Mittelpunkt des Baukastens findet sich ein Referenz-Montageprozess einer Werkzeugmaschinenmontage im Grundbaustein „Montageprozess“. Der Montageprozess entspricht hinsichtlich Anzahl der Arbeitsplätze, Montagezeitbedarf, Durchlaufzeit und Arbeitskräftebedarf einem realen Vorbild aus der Praxis (siehe Tabelle 1). Da die Spannweite der möglichen Ausprägungen dieser Kennwerte in der Praxis sehr stark schwankt, ist es zum einen nicht möglich allgemeingültige Kennwerte für das Modell zu bestimmen. Auf der anderen Seite ist die Prüfung aller möglichen Kennwertausprägungen hinsichtlich des Simulationaufwands praktisch nicht durchführbar. Es soll deshalb der Ansatz verfolgt werden auf Grundlage der Referenz-Kennwerte das Simulationsexperiment durchzuführen und mit einer folgenden Sensitivitätsanalyse die Robustheit der Ergebnisse bei andersartigen Kennwertausprägungen zu überprüfen und ggf. Gültigkeitsbereiche zu definieren.

Der Grundbaustein „Montageprozess“ interagiert mit einer Quelle und einer Senke, die den Auftragsfluss darstellen. Die Quelle dient dabei zur Erzeugung eines Montageauftrags und bildet somit die Höhe des Kundentakts ab. Die Senke entspricht in einem Produktionssystem dem Verlassen der Werkzeugmaschine aus der Montage.

Der Arbeitskräfte-Pool bildet die verfügbaren (und begrenzten) Kapazitäten des Produktionssystems hinsichtlich der Arbeitskräfte ab. Die Zuteilung der Arbeitskräfte zu bestimmten Montageaufgaben wird über eine Qualifikationsmatrix geregelt. Somit ist es möglich die Spezialisierung von Arbeitskräften für bestimmte Montageschritte abzubilden.

Tabelle 1: Modellannahmen und Felddaten für zentrale Kennwerte im Vergleich

	Montagezeit [h]	Durchlaufzeit [d]	Anzahl Arbeitsstationen	Arbeitskräfte pro Arbeitsstation	Anzahl Schichten
Spannweite Benchmarking	40 ... 4000	5 ... 100	3 ... 30	1 ... 6	1 ... 2
Median Benchmarking	490	27	18	3	1
Referenzsystem Simulationsmodell	196	9	8	3	1

Neben der Qualifikationsmatrix sind in den Anwenderbaustein weitere Parameteroptionen eingebaut, die mithilfe von globalen Parametern zur Festlegung der Gestaltungsprinzipien genutzt werden. Somit ist es möglich durch True/False-Auswahl die relevanten Gestaltungsparameter der Produktionssysteme einfach zu wechseln (z.B. Taktung der Montageschritte, Steuerungslogik des Nacharbeiters). Die Umsetzung der Gestaltungsprinzipien in den einzelnen Schlanken Produktionssystemen wird folgend skizziert:

Schlanke Fließmontage

Die klassische Grundform Fließmontage(1) wird durch eine Besetzung aller Montageschritte des Grundbausteins „Montageprozess A“ im Modell erreicht. Damit sind alle Montageschritte miteinander starr verkettet. Die Taktung entspricht dem Kundentakt und kann im Fall von Störungen zurückgesetzt werden. So wird verhindert, dass sich störungsbedingte Nichteinhaltung von Taktungen über die Simulationslaufzeit aufschaukeln und das zu praxisfernen Ergebnissen des Simulationsexperiments führt. Die Werkzeugmaschine bewegt sich entsprechend der Montageschritte durch das Produktionssystem, die Arbeitskräfte verlassen ihren Arbeitsplatz innerhalb einer Schicht nicht. Weiterhin findet sich eine Montageschrittsspezialisierung der Arbeitskräfte durch die Qualifikationsmatrix. Das heißt auch, dass diese Arbeitskräfte bei Störungen und damit Mehrarbeit an anderen Montageschritten nicht aushelfen können. Das Management der Störungsbeseitigung wird modellseitig so umgesetzt, dass es eine definierte Anzahl von Arbeitskräften für Nacharbeit gibt, die universell für alle Arbeitsplätze qualifiziert sind und im Störfall zusätzlich für einen Montageschritt angefordert werden können. Die Prioritätssteuerung der begrenzten Kapazitäten zur Störungsbeseitigung ist derart formuliert, dass bei mehreren Störungen immer derjenige Montageschritt zuerst unterstützt wird, der die Takteinhaltung am ehesten gefährdet.

Virtuelle Fließmontage

Modellseitig wird die klassische Grundform der Gruppenmontage(2) durch eine Erweiterung der Fließmontage(1) abgebildet. Die Transportzeiten von Werkzeugmaschinen von Arbeitsplatz zu Arbeitsplatz bzw. Wegezeiten der Arbeitskräfte von Arbeitsplatz zu Arbeitsplatz sind im Verhältnis zur Gesamtmontagezeit zu vernachlässigen. Insofern sind das zentrale Gestaltungsprinzip der Virtuellen Fließmontage weniger die Laufwege der Arbeitskräfte von Arbeitsplatz zu Arbeitsplatz, sondern deren flexiblere Einsatzmöglich-

keit für mehrere Montageschritte, um beispielsweise Störungen auszugleichen. Im Simulationsmodell für die Virtuelle Fließmontage gibt es deshalb mehrere Grundbausteine von Montageprozess A bis Montageprozess X. Innerhalb der Grundbausteine werden nicht alle Montageschritte mit Arbeitskräften besetzt, sondern es kann zu einem Zeitpunkt immer nur ein Montageschritt durchgeführt werden. Somit entspricht jeder Grundbaustein einem Standplatz, modellseitig umgesetzt durch „Tore“ am Ein- und Ausgang des Anwenderbausteins, die nur einen Auftrag gleichzeitig in einem Montageprozess zulassen. Dadurch wird die Anzahl der Montageaufträge in dem System nicht durch die Anzahl der Montageschritte definiert, sondern durch die Anzahl der Grundbausteine. Die Flexibilität der Arbeitskräfte wird in der Qualifikationsmatrix entsprechend von Felddaten definiert, die durchschnittlich den flexiblen Einsatz für einen (nicht zwangsläufig direkten) vorgelagerten und nachgelagerten Montageschritt vorsehen (also insgesamt drei Montageschritte). Spezielle Arbeitskräfte für Nacharbeit gibt es in der Virtuellen Fließmontage nicht, Standard- Arbeitskräfte helfen im Störfall aus. Taktung und Prioritätssteuerungen für das Störungsmanagement entsprechen der Schlanken Fließmontage.

Schlanke Standplatzmontage

Die klassische Grundform der Standplatzmontage wird analog zur Virtuellen Fließmontage durch eine Vervielfachung der Grundbausteine und die Limitierung der Auftragsanzahl pro Grundbaustein auf einen Auftrag modelliert. Im Gegensatz zur Virtuellen Fließmontage verfügen die Arbeitskräfte der Schlanken Standplatzmontage über eine universelle Qualifikation und können an jedem Montageschritt mitwirken. Ebenfalls existieren keine Taktung und keine Sonderkapazitäten von Arbeitskräften zur Nacharbeit. Die Prioritätssteuerung für das Störungsmanagement orientiert sich nicht an der Takteinhaltung, sondern an der Realisierung möglichst kurzer Durchlaufzeiten.

Weitere Gestaltungsprinzipien wie die Standardisierung der Arbeitsreihenfolge oder die Systematisierung des Arbeitsplatzes sind explizit nicht modellseitig berücksichtigt. Zum einen ist diese Betrachtung zu vernachlässigen, da sich die identifizierten Schlanken Produktionssysteme nicht wesentlich in diesen Gestaltungsprinzipien unterscheiden. Zum anderen werden durch die Nichtberücksichtigung jedoch implizit auch Annahmen zu diesen Gestaltungsprinzipien getroffen. So wird im Modell im Fall der Standardisierung der Arbeitsreihenfolge implizit angenommen, dass diese immer gleichartig und ideal abläuft (was auch dem Zweck der Standardisierung entspricht). Die Materialanstellung wird implizit ebenfalls als ideal angenommen, d.h. es treten z.B. keine Suchzeiten oder gar Laufwege zum Material auf. Solche Annahmen entsprechen auch bei bester Umsetzung Schlanker Produktionsprinzipien nicht immer und vollständig der Praxis. Diese Ungenauigkeit wird jedoch aus Gründen der Einfachheit und Handhabbarkeit der Simulationsmodelle in Kauf genommen. Ein noch durchzuführender Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Praxiswerten aus den Felddaten soll unter anderem den Einfluss solcher impliziten Annahmen abschätzbar machen.

Neben den Parametern der Gestaltungsprinzipien umfasst der Baukasten zur Modellierung von Schlanken Produktionssystemen ebenfalls die Parameterauswahl zur Definition der Rahmenbedingungen der Montage. Diese sollen in folgendem Unterkapitel dargestellt werden.

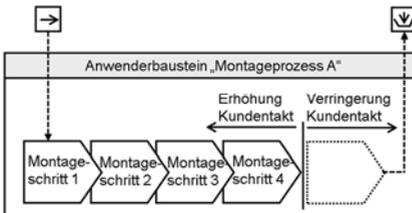
6.2.4 Modellbildung für Rahmenbedingungen der Montage

Die Modellierung der Rahmenbedingungen der Montage umfasst die Anpassung der Modelle für Schlanke Produktionssysteme hinsichtlich der Prozessfrequenz und der Prozessvarianz.

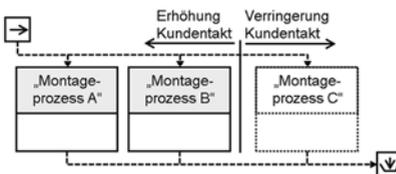
Modellierung der Prozessfrequenz

Die Prozessfrequenz ist entsprechend der Formel 8 in Kapitel 5.3 definiert und demnach entscheidend abhängig vom Kundentakt und den Zykluszeiten des Montageprozesses. Der Kundentakt ist wiederum abhängig von der verfügbaren Arbeitszeit im Montagebereich und der Anzahl der herzustellenden Werkzeugmaschinen in einem definierten Zeitraum von einem Jahr. Die Schichtanzahl ist im Referenzmodell als konstant angenommen, so dass die Haupteinflussgröße für die Anpassung des Kundentakts die zu montierende Stückzahl pro Jahr ist. Im Benchmarking hat sich dies ebenfalls als Haupteinflussfaktor für die Bestimmung der Prozessfrequenz herausgestellt. Dabei hängt der Kundentakt indirekt proportional von der montierten Anzahl an Werkzeugmaschinen ab. Modellseitig musste die Änderung des Kundentakts durch eine Anpassung der Anzahl an Montageschritten für die Schlanke Fließmontage oder eine Anpassung der Anzahl von Grundbausteinen für die Schlanke Standplatzmontage und die Virtuelle Fließmontage umgesetzt werden. Im Untersuchungsbereich der Prozessfrequenz von 0 bis 32 Arbeitstakten wurden von jedem der drei untersuchten Produktionssystemarten jeweils 6 Modelle gebildet, die einen möglichst großen Bereich der zu untersuchenden Rahmenbedingungen abdecken (siehe Bild 65). Definitionslücken sollen im Rahmen der Auswertung durch Approximation von Zwischenwerten geschlossen werden.

1) Anpassung Kundentakt in Schlanke Fließmontage



2) Anpassung Kundentakt in Virtueller Fließmontage und Schlanke Standplatzmontage



Übersicht Modelle nach unterschiedlichem Kundentakt

Simulierter Kundentakt [montierte Maschinen/h]	Anzahl montierte Maschinen pro Jahr	Anzahl Montageschritte (SFM) bzw. Grundbausteine (SPM, VFM)
1	1760	32
2	880	16
4	440	8
Referenzsystem		
8	220	4
16	110	2
32	55	1

Bild 65: Berücksichtigung des Kundentakts in den Simulationsmodellen

Neben dem Kundentakt hat die Summe der Zykluszeiten im Montageprozess einen Einfluss auf die Bestimmung der Prozessfrequenz. Erste Simulationsläufe zu Validierungszwecken der Modelle wurden zunächst unter der Annahme durchgeführt, dass Kundentakt und Zykluszeit voneinander unabhängig sind. Diese Annahme hat sich schnell als nicht haltbar erwiesen. So würde aus dieser Annahme folgen, dass die Effizienz verschiedener Produktionssysteme ebenfalls relativ unabhängig von der Prozessfrequenz ist. Sowohl die Daten des Benchmarking als auch theoretische Überlegungen führten schließlich zu der Einsicht, dass es einen Zusammenhang zwischen Kundentakt und Zykluszeit bzw. Ausbringungsmenge eines Produktionssystems und Montageaufwands pro Maschine gibt, der modellseitig berücksichtigt werden muss.

In der produktionswissenschaftlichen Theorie lässt sich dieser Zusammenhang über Lernkurven beschreiben. Mittels Lernkurven lässt sich quantifizieren wie sich die Bearbeitungszeit pro Bauteil in Abhängigkeit von der Wiederholhäufigkeit der Bearbeitungsaufgabe ändert. Eine grundlegende Beschreibung der Lernkurvenmethode findet sich in Bild 67. Für die Modellierung der Lerneffekte in Abhängigkeit von der Wahl eines Produktionssystems muss zunächst eine allgemeingültige Lernkurve für die Montage von Werkzeugmaschinen definiert werden. Dabei wurde sich hinsichtlich der Form der Lernkurve für die Standard-Lernkurve nach Wright entschieden, da zum einen sowohl die Berechnung als auch die Anwendung relativ einfach sind. Zum anderen sind für diese Lernkurvenform umfangreiche Erfahrungswerte in der produktionswissenschaftlichen Literatur vorhanden und für die Modellierung nutzbar. Der wesentliche Parameter bei der Lernkurvenberechnung ist die Lernrate. Diese wurde durch einen hybriden Ansatz aus Literatur und Fallbeispielen aus dem Benchmarking entsprechend Bild 66 ermittelt.

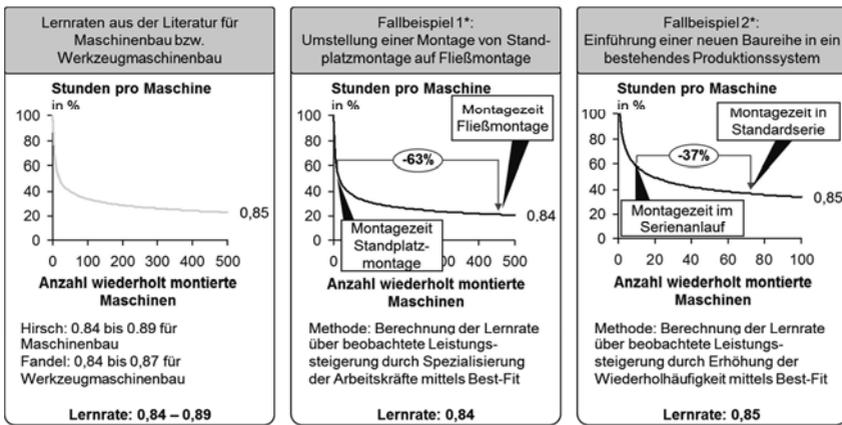


Bild 66: Bestimmung der Lernrate für die Simulation aus Literatur und Fallstudien¹⁵⁴

Für das Simulationsexperiment wird die Lernrate auf 0,85 festgelegt. Eine beobachtete leichte Streuung der Lernrate um $\pm 0,01$ soll ebenfalls in der Sensitivitätsanalyse untersucht werden. Entsprechend dieser Lernkurve wird der Leistungsgrad der Werker in den

¹⁵⁴ vgl. Fandel (2005).
vgl. Hirsch (1952).

verschiedenen Modellen in Abhängigkeit von deren Spezialisierungsgrad im Produktionssystem (Schlanke Standplatzmontage – alle Montageschritte, Virtuelle Fließmontage – drei Montageschritte, Schlanke Fließmontage – ein Montageschritt) bestimmt (siehe Tabelle 2). Da der Leistungsgrad erheblichen Einfluss auf das Kapazitätsangebot eines Produktionssystems hat, erfolgt eine zum Leistungsgrad indirekt proportionale Anpassung der Anzahl der jeweiligen Montageschritte bzw. Grundbausteine in den verschiedenen Simulationsmodellen.

Tabelle 2: Leistungsgrad der Standard-Werker nach Lernkurve in versch. Modellen

Leistungsgrad in ...	Kundentakt [h/montierte Maschine]:					
	32	16	8	4 (Referenz)	2	1
Schlanker Standplatzmontage	61 %	61 %	61 %	61 %	61 %	61 %
Virtueller Standplatzmontage	61 %	61 %	66 %	77 %	91 %	107 %
Schlanker Fließmontage	61 %	72 %	85 %	100 %	118 %	138 %

Lernkurve: Mathematische Beschreibung des degressiven Verlaufs des Fertigungsaufwands bei ständiger Wiederholung gleicher oder ähnlicher Fertigungsvorgänge.

Berechnung (Formel 10):
nach T.P. Wright

$$y(x) = a * x^{\frac{\log b}{\log 2}}$$

mit

- y: Ø Aufwand zur Produktion des x-ten Bauteils [h]
- a: Aufwand zur Produktion des ersten Bauteils [h]
- x: Anzahl der zu produzierenden Bauteile
- b: Lernrate [%]

Darstellung:

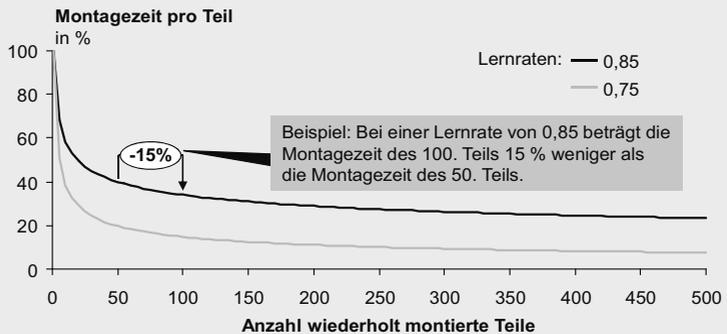


Bild 67: Steckbrief Lernkurvenmethode¹⁵⁵

¹⁵⁵ vgl. Liebau (2002).

Modellierung der Prozessvarianz

Die Prozessvarianz ist entsprechend der Formel 10 in Kapitel 5.3 definiert und demnach entscheidend abhängig vom Kundentakt und den geplanten sowie ungeplanten Störeinflüssen des Montageprozesses. Die Anpassung der Simulationsmodelle bezüglich des Kundentakts wurde bereits im letzten Abschnitt beschrieben, die Berücksichtigung der Störeinflüsse soll folgend dargestellt werden.

Im Benchmarking haben sich über alle Werkzeugmaschinenhersteller hinweg vier wesentliche Störeinflüsse herausgestellt:

- Schwankungen der Bearbeitungszeit
Insbesondere durch die oftmals hohe Produktvielfalt getrieben, gelingt es Werkzeugmaschinenbauern selbst durch ausgereifte Baukastensysteme nicht die Bearbeitungszeiten für jeden Montageschritt konstant zu halten.
- Störungen durch Nacharbeit
Ebenfalls auf die Produktvielfalt zurückzuführen in Verbindung mit der relativ hohen Komplexität von Werkzeugmaschinen, finden fast an jeder Werkzeugmaschine Nacharbeiten zusätzlich zur geplanten Bearbeitungszeit statt.
- Störungen durch Lieferverzug
Die mit Abstand größte Herausforderung für die Montagebereiche im Benchmarking war das Bereitstellen der richtigen Baugruppen oder Teile zur richtigen Zeit in der richtigen Qualität. Lediglich begrenzte Möglichkeiten zur Einflussnahme auf externe Zulieferer erschweren es diese Störungsart nachhaltig abzustellen.
- Schwankungen des Kundentakts
Der Auftragsingang im Werkzeugmaschinenbau ist wie jeder kundenindividuelle Maschinenbau gewissen Schwankungen unterlegen. Damit kommt es zu Überlastungen und Unterauslastungen des Produktionssystems.

Die vier Störeinflüsse in ihrer Gesamtheit bilden die Grundlage für die Berechnung der Prozessvarianz nach Formel 10 im Benchmarking und im Simulationsmodell. Zur Simulation der Störungen mussten zunächst die Verteilungsform und der Ort der Störung definiert werden. Dazu wurden im Rahmen des Benchmarking bei mehreren Studienteilnehmern die relevanten Daten für alle Werkzeugmaschinen in einem einjährigen Zeitraum erfasst, hinsichtlich ihrer Verteilung untersucht und einem Verteilungstest (Chi-Quadrat-Test) unterzogen. Die verschiedenen Störungsarten werden im Simulationsexperiment entsprechend der ermittelten Normalverteilungen und praktisch relevanten Störungsorten modelliert, wie in Bild 68 dargestellt (siehe auch Anhang B).

Die Bestimmungsparameter der Normalverteilungen stellen globale Variablen im Modell dar, die in den verschiedenen Simulationsläufen variiert werden können. Der Mittelwert entspricht in allen Fällen dem Kundentakt, da dieser auch im Benchmarking schon als Bezugsgröße für die Berechnung der verschiedenen Varianzen diente. Die Standardabweichungen sind maßgeblich für die Höhe der Abweichungen vom Kundentakt und damit das Ausmaß der Störungen. Sie gelten pro Simulationslauf gleichermaßen für alle Anwenderbausteine im jeweiligen Simulationsmodell. So kann die Effizienz eines bestimmten Modells für einen definierten Kundentakt und ein definiertes Schlankes Produktionssystem hinsichtlich einer stufenweisen Veränderung der Prozessvarianz untersucht werden. Das erlaubt es ein Verständnis zu gewinnen, wie sensitiv sich die jeweiligen Produktionssysteme hinsichtlich Änderungen und absoluter Höhe der Prozessvarianz verhalten.

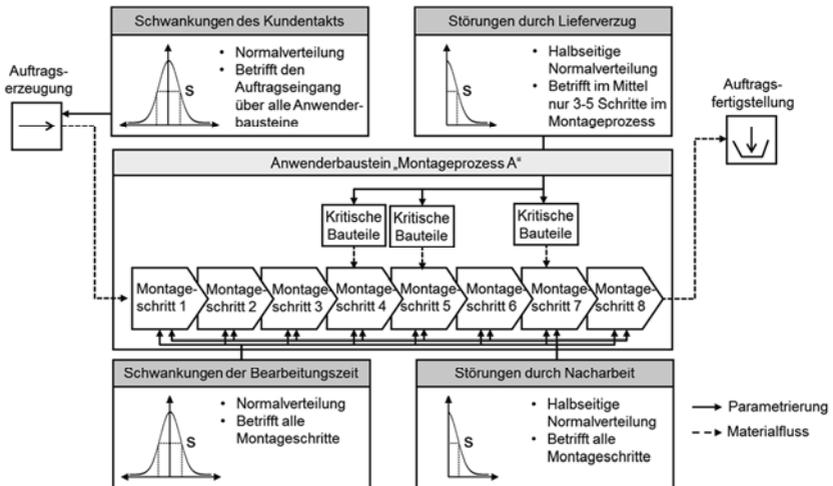


Bild 68: Modellierung der Prozessvarianz im Simulationsexperiment

Die umgesetzten Modelle von Produktionssystemen in Plant Simulation inkl. Gestaltungsparameter, Prozessfrequenz und Prozessvarianz finden sich in Anhang C.

6.3 Experimentplanung

Die Experimentplanung umfasst die Festlegung der Zielkennwerte zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit der simulierten Produktionssysteme, die Festlegung des Simulationsablaufs und des Auswertungsablaufs des Simulationsexperiments.

6.3.1 Definition Zielkennwerte

Die Zielkennwertdefinition soll sich an der Bestimmung der Leistungsfähigkeit der Produktionssysteme im Rahmen des Benchmarking orientieren. Das ist zielführend, um die Güte der erstellten Modelle hinsichtlich hinreichender Abbildung der Realität direkt vergleichen zu können. Analog Kapitel 5.2 soll die Beurteilung der Leistungsfähigkeit der simulierten Produktionssysteme durch die Ermittlung von Verschwendungen insbesondere aus Perspektive der Arbeitskräfte und des Produkts erfolgen.

Im Gegensatz zum Benchmarking erlaubt es die Durchführung eines Simulationsexperiments nicht nur die absoluten Anteile von Verschwendung und Wertschöpfung im Produktionsprozess zu identifizieren, sondern darüber hinaus die Anteile der einzelnen Verschwendungsarten zu ermitteln. Durch Analyse des Verlaufs der Verschwendungsanteile können wiederum Wirkungszusammenhänge zwischen eingesetztem Produktionssystem und den Rahmenbedingungen der Produktion identifiziert und belegt werden. Beispielhaft wird in Bild 69 die Auswertung eines Testlaufs dargestellt für ein definiertes Simulationsmodell und seiner Leistungsfähigkeit bei unterschiedlichen Prozessvarianzen. In diesem Fall handelt es sich um eine Fließmontage. Der Anteil der Verschwendung (Summe der Flächen ohne Wertschöpfung) steigt bei wachsender Prozessvarianz mit

abnehmendem Grenzwert an. Gerade im Vergleich zu anderen Produktionssystemen zeigt sich die hohe Sensitivität der Fließmontage gegenüber Prozessstörungen und ein schneller Abfall des Wertschöpfungsanteils. Weiterhin ist zu beobachten, dass die Wartezeit der Arbeitskräfte den größten Anteil an der Verschwendung bei hohen Prozessvarianzen hat. Neben dieser Verschwendungsart werden weiterhin Verschwendungen durch Nacharbeit ermittelt (die nur nachrichtlichen Wert hat durch die Definition dieser Verschwendungsart in den Rahmenbedingungen eines Simulationslaufs), Verschwendungen durch Liegezeit (bewertet nach Verschwendungen der Arbeitskraft entsprechend Kapitel 5.5.3 im Benchmarking) und Verschwendungen durch Effizienzverluste (als relative Verschwendungen durch geringere Wiederholhäufigkeit von Montageschritten pro Arbeitskraft im Vergleich zur maximalen Spezialisierung von Arbeitskräften bei einer Prozessfrequenz von 32 und einer Prozessvarianz von 0%).

Die Summe aller Verschwendungen an jedem Punkt der Prozessvarianz-Achse kennzeichnet die Leistungsfähigkeit eines Produktionssystems für eine bestimmte Prozessfrequenz. Über mehrere solche Auswertungen gleichartiger Simulationsläufe Schlanker Produktionssysteme für verschiedene Prozessfrequenzen lassen sich Bewertungen zur Leistungsfähigkeit dieser Produktionssysteme über einen breiten Bereich der Rahmenbedingungen der Montage treffen.

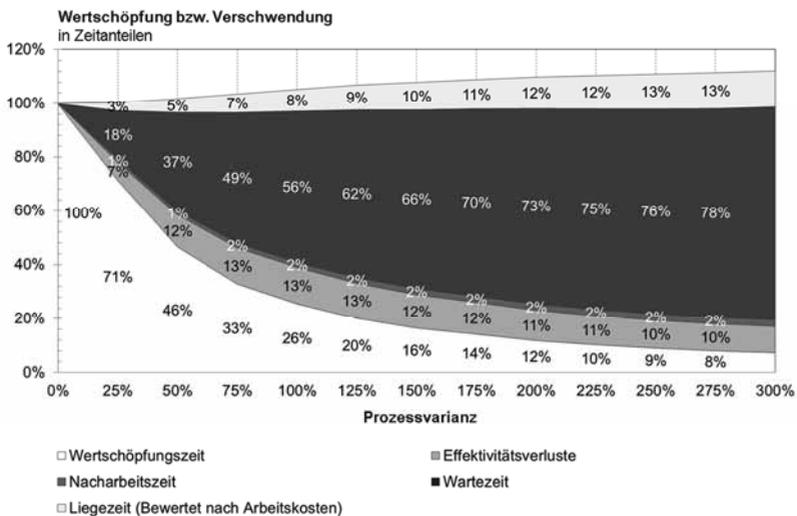


Bild 69: Beispielhafte Darstellung der Zielkennwerte eines Simulationslaufs

Die technische Umsetzung der Kennzahlenerfassung wird über die Simulationsobjekte (SimTalk: BE), welche die zu montierenden Werkzeugmaschinen darstellen, vorgenommen. So werden von der Erzeugung des Objekts in der Quelle des Modells bis zur Vernichtung des Objekts in der Modellsenke alle Zeitwerte für Bearbeitungsvorgänge (als Wertschöpfung), Nacharbeiten, Liegezeiten und Wartezeiten (Liegezeiten mit wartender Arbeitskraft am Montageschritt) erfasst. Der Durchschnitt aller Zeitanteile aller Objekte in einem Simulationslauf bildet die Datenbasis für einen Wert der Prozessvarianz.

6.3.2 Experimentablauf

Das Simulationsexperiment besteht aus einer Vielzahl von Simulationsläufen. Wie bereits beschrieben, wurden insgesamt 16 Modelle entwickelt, die unterschiedliche Arten von Schlanken Produktionssystemen bei verschiedenen Kundentakten bzw. Prozessfrequenzen darstellen. Alle Simulationsläufe innerhalb eines Modells werden als Simulationsserie bezeichnet. In den 16 Simulationsserien wird die Charakteristik der Verschwendungen im Modell bei unterschiedlichen Prozessvarianzen untersucht. Dabei erfolgt eine stufenweise Erhöhung der Prozessvarianz von 0 bis 300 % in 12 Schritten. Ein Simulationslauf stellt in diesem Zusammenhang die Untersuchung eines Modells bei einer bestimmten Prozessvarianz dar. Jeder Simulationslauf wird außerdem 10 Mal wiederholt, wobei die Zufallszahlen bei jeder Wiederholung neu und unabhängig voneinander berechnet werden. Das Sicherheitsniveau für die Ausgabewerte wurde mit 99% festgelegt, die Ergebnisse erwiesen sich als stabil. Insgesamt wurden so mindestens 120 Simulationsläufe pro Simulationsserie durchgeführt. Bei 16 Simulationsserien ergibt sich eine Gesamtzahl von fast 2000 Simulationsläufen.

Der Aufwand zur Durchführung des Simulationsexperiments ist durchaus umfangreich. Es mussten zur Begrenzung des Aufwands auch beim Experimentablauf Vereinfachungen vorgenommen werden, um die Komplexität des Simulationsexperiments auf einem beherrschbaren Niveau zu belassen. Die im Hinblick auf das Ergebnis einflussreichste Vereinfachung im Experimentablauf betrifft die Berücksichtigung der Prozessvarianz. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wird die Prozessvarianz in 12 Schritten abgebildet. Wie in Kapitel 6.2.4 beschrieben, setzt sich die Prozessvarianz jedoch aus vier unterschiedlichen Rahmenbedingungen zusammen. Die möglichen Kombinationen dieser Rahmenbedingungen sind nahezu unendlich, deswegen wurde diese Komplexität auf eine feste Zusammensetzung reduziert, die sich an der mittleren, typischen Verteilung der Felddaten orientiert (siehe Bild 70). Die Bestimmtheit der ermittelten Zusammensetzung ist hinreichend für diese Annahme, aber nicht absolut scharf. In der Sensitivitätsanalyse soll deshalb eine abweichende Zusammensetzung der Rahmenbedingungen untersucht werden, um diesen Einfluss auf das Ergebnis bewertbar zu machen.

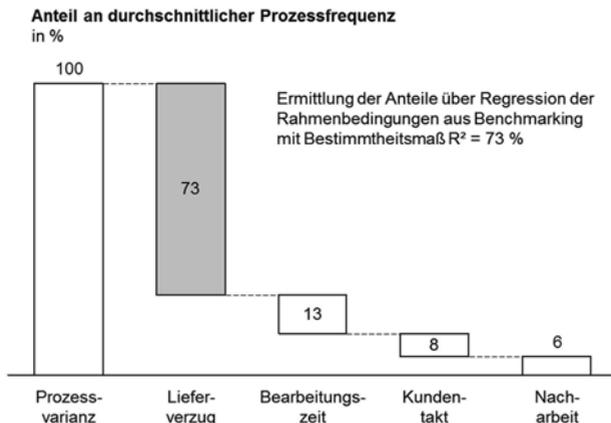


Bild 70: Zusammensetzung der Prozessfrequenz im Simulationsexperiment

In jedem Simulationslauf werden mit den jeweiligen Parametern der Rahmenbedingungen 220 Arbeitstage simuliert. Das entspricht dem Erfassungszeitraum für die Felddaten des Benchmarking. Weiterhin wird vor jeden Simulationslauf eine Rücksetzung der Simulation vorgenommen. Dabei läuft das System in der Anfangsphase der Simulation mit Montageaufträgen voll und stabilisiert sich nach einiger Zeit. Die Ermittlung der Leistungsdaten soll von dieser Einschwingphase unberührt bleiben, genauso wie im Benchmarking neu anlaufende bzw. auslaufende Werkzeugmaschinenbaureihen ebenfalls nicht berücksichtigt wurden. Zur Ermittlung der Einschwingzeit wurde das Modell der Schlanken Fließmontage bei maximaler Prozessvarianz genutzt, da aufgrund der hohen Anzahl an Prozessstörungen und der Sensitivität des Produktionssystems die längste Einschwingzeit erwartet werden kann. Als Messpunkt diente der letzte Montageschritt der Linie, da dieser am Ende des Prozesses auch zum Schluss einschwingt. Wie in Bild 71 dargestellt, wurde eine Einschwingdauer von 19 Tagen über mehrere Testläufe mit unterschiedlichen Zufallszahlenreihen ermittelt. Mit einem ausreichendem Sicherheitszuschlag wurde die Einschwingphase auf 25 Tage festgelegt, d.h. alle Messungen der Leistungsfähigkeit der Produktionssysteme starten ab dem 26. Tag der Simulation die 220 Tage währende Messphase des Simulationslaufs, aus dem die Kennzahlen ermittelt werden.

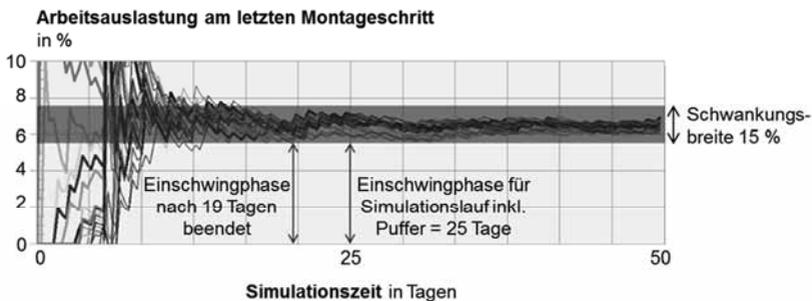


Bild 71: Bestimmung der Einschwingdauer für die Simulationsläufe¹⁵⁶

6.3.3 Auswertungsablauf

Die Experimentauswertung erfolgt zum einen über die Interpretation der Verschwendungsarten der einzelnen Simulationserien für die drei Arten Schlanker Produktionssysteme, wie in Kapitel 6.3.1 beschrieben. Zum anderen soll für die gesamte Prozessfrequenz-Prozessvarianz-Matrix das Verhalten der gesamten Verschwendung für jedes Schlanke Produktionssystem untersucht werden.

Dazu wird zunächst aus den einzelnen Simulationserien der Verlauf der Gesamtverschwendung als Summe der einzelnen Verschwendungsarten ermittelt. Eine Simulationsserie bildet dabei eine Messreihe für einen bestimmten Kundentakt ab, entsprechend Bild 72 oben. Im Bild sind nur die Messreihen dargestellt, die Gesamtverschwendung wurde als dritte Dimension als Summe der einzelnen Verschwendungsarten gebildet. Wie zu erkennen ist, decken die Messreihen nicht die gesamte Prozessfrequenz-

¹⁵⁶ vgl. Meudt (2011).

Prozessvarianz-Matrix ab. Fehlende Messwerte wurden deshalb in einem zweiten Schritt durch Approximation der Zwischenwerte ermittelt, entsprechend Bild 72 Mitte.

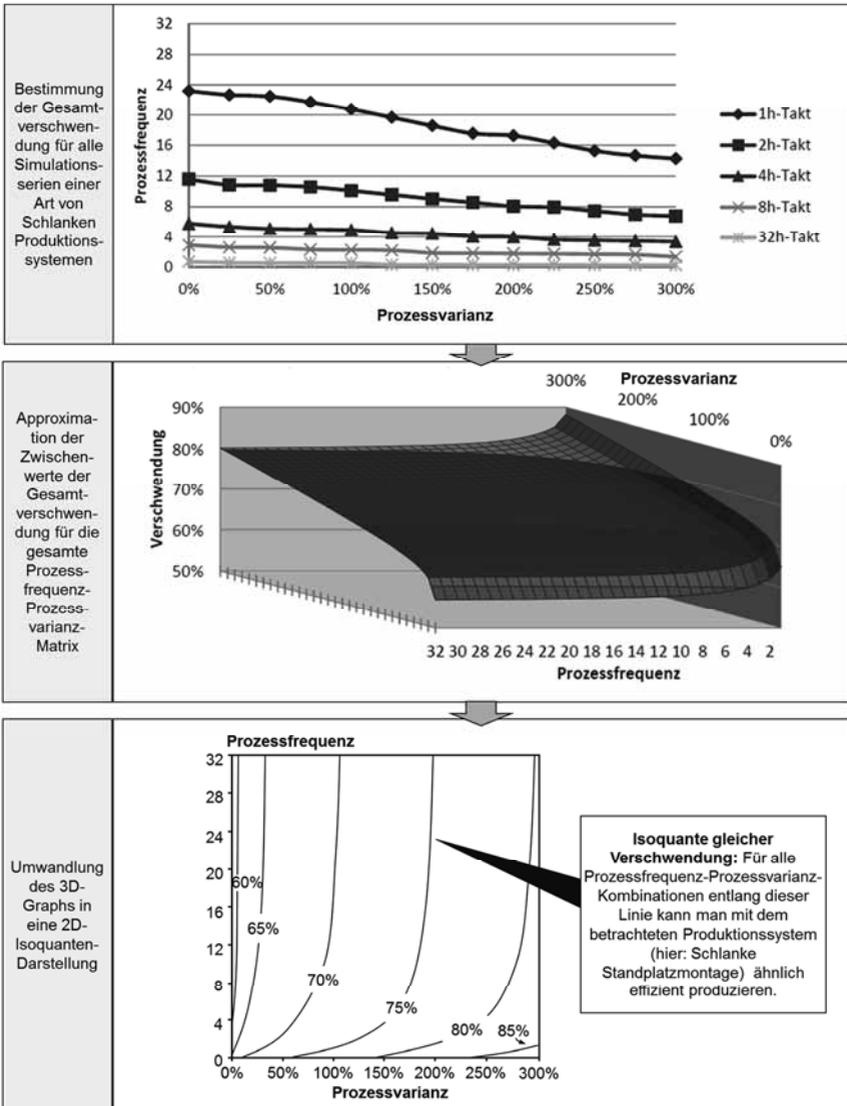


Bild 72: Ablauf der Experimentauswertung für ein Schlanke Produktionssystem¹⁵⁷

¹⁵⁷ vgl. Meudt (2011).

Die Flächenapproximation erfolgte mit dem Programm „TableCurve 3D v. 4.0“, das aus beliebigen Punktwolken über 500 verschiedene Flächengleichungen entwickelt (polynomisch, logarithmisch und Kombinationen) und diese dem Nutzer vorschlägt. Als Kriterien zur Auswahl einer geeigneten Flächengleichung wurden folgende Kriterien zu Grunde gelegt:¹⁵⁸

- Wähle die Flächengleichung mit der höchsten Bestimmtheit (Gütekriterium)
- Wähle die Flächengleichung, die Polstellen im Untersuchungsbereich ausschließt (Gütekriterium)
- Wähle die Flächengleichung, bei der mit steigender Prozessvarianz die Gesamtverschwendung zunimmt (Logikkriterium, siehe auch Ergebnisse Benchmarking)
- Wähle die Flächengleichung, bei der mit sinkender Prozessfrequenz die Gesamtverschwendung zunimmt (Logikkriterium, siehe auch Ergebnisse Benchmarking)

Als Ergebnis konnte jeweils eine Gleichung für jede Art Schlankes Produktionssystem gefunden werden, die mit einer Bestimmtheit von über 97 % das Verhalten der Gesamtverschwendung in der Prozessfrequenz-Prozessvarianz-Matrix abbildet (siehe auch Anhang D). Zur übersichtlicheren Darstellung wurde in einem letzten Schritt die 3D-Flächendarstellung in eine 2D-Isoquantendarstellung umgewandelt, entsprechend Bild 72 unten.

6.4 Ergebnisauswertung

In Folgendem sollen die Ergebnisse des Simulationsexperiments für jede Art von Schlanken Produktionssystem analysiert werden. Dabei wird anhand des spezifischen Verschwendungsmusters der einzelnen Produktionssysteme deren Verhalten bei verschiedenen Kombinationen von Prozessfrequenz und Prozessvarianz charakterisiert. Letztlich soll aus diesen Ergebnissen eine vergleichende Übersicht abgeleitet werden, die geeignete Einsatzgebiete der untersuchten Arten von Schlanken Produktionssystemen visualisiert – der ProduktionsSystemKompass.

6.4.1 Darstellung der Verschwendungscharakteristik

In Bild 73 sind drei Diagramme dargestellt, die für jede simulierte Art von Schlanken Produktionssystem im Simulationsexperiment die jeweilige Gesamtverschwendung im Untersuchungsbereich visualisieren.

Dabei fällt zunächst auf, dass das Verhalten der jeweiligen Produktionssysteme sehr unterschiedlich ist. Insbesondere finden sich Unterschiede im Wertebereich der Isoquanten, im Definitionsbereich der Isoquanten und in der Steigung und Richtung der Isoquanten.

• Unterschiedlicher Wertebereich der Isoquanten

Eine Verschwendung von 0% wird nur in der Schlanken Fließmontage erreicht, zugleich findet sich dort auch die höchste verzeichnete Verschwendung von 110 %. Das hat vor allem mit der Berechnung der Verschwendung zu tun. So wurde die minimal erreichte Verschwendung im Simulationsexperiment als Vergleichswert für alle anderen Ergebnisse verwendet. Das beste Ergebnis wurde mit einer Schlanken Fließmontage bei einer Prozessfrequenz von 32 Arbeitstakten

¹⁵⁸ in Anlehnung an Meudt (2011).

und einer Prozessvarianz von 0% erreicht. Da der für den Werkzeugmaschinenbau relevante Definitionsbereich bei 32 Arbeitstakten endet, wurde diese Leistung als erreichbares Maximum gesetzt. Es ist aber davon auszugehen, dass bei steigender Prozessfrequenz die Montage noch effektiver durchführbar wäre, z.B. durch steigende Lerneffekte. Eine Verschwendung von über 100% ist dadurch möglich, dass nicht nur die reine Verschwendung der Arbeitskraft in die Berechnung der Gesamtverschwendung eingeht sondern auch die Verschwendung durch Liegezeiten entsprechend Kapitel 6.3.1 und Kapitel 5.2. Somit kann die Verschwendung die Bezugsbasis, die gesamten Arbeitskosten im Montagebereich theoretisch übersteigen.

Minimale und maximale Verschwendung sind also nur in der Schlanken Fließmontage zu erreichen. Im Vergleich zu den anderen Produktionssystemen zeigt die Schlanke Standplatzmontage den engsten Wertebereich für Verschwendung: den schlechtesten Anfangswert für die minimal erreichbare Verschwendung und zugleich eine maximale Verschwendung relativ geringen Ausmaßes. Die Virtuelle Fließmontage befindet sich bezüglich Wertebereich und Wertehöhe im Mittelfeld.

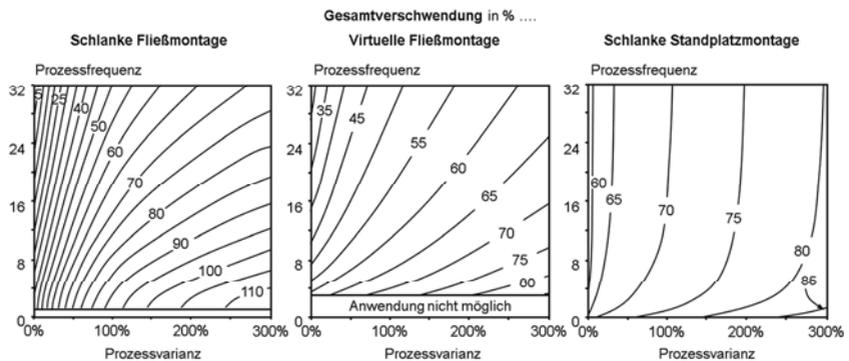


Bild 73: Verschwendungscharakteristik der simulierten Produktionssysteme¹⁵⁹

- **Unterschiedlicher Definitionsbereich der Isoquanten**

Bei der Schlanken Fließmontage und der Virtuellen Fließmontage ist der Definitionsbereich kleiner als der Untersuchungsbereich. Allein die Standplatzmontage ist im gesamten Untersuchungsbereich einsetzbar.

Die Fließmontage ist erst ab einer Prozessfrequenz von 2 Arbeitstakten einsetzbar. Diese Begrenzung ergibt sich definitionsgemäß dadurch, dass eine Fließmontage mit einem Arbeitsplatz einer Standplatzmontage entspricht. Es gibt in diesem Fall weder Arbeitsteilung noch einen Produktfluss. Fließmontagen sind erst ab mindestens 2 getrennten Arbeitstakten realisierbar.

Die Einschränkung der Virtuellen Fließmontage ergibt sich ebenfalls aus deren Definition. So ist die Flexibilität der Arbeitskräfte innerhalb einer Virtuellen Fließmontage minimal mit 3 Montageschritten definiert. Bei einem Montageschritt wür-

¹⁵⁹ vgl. Abele, Rumpel, Meudt (2011).

de die Organisationsform wieder der Schlanken Fließmontage entsprechen, bei zwei Montageschritten würde die Flexibilitätsforderung dazu führen, dass alle Arbeitskräfte alle Arbeitstakte beherrschen und sich wieder genauso verhalten wie in der Schlanken Standplatzmontage. Die Untergrenze für den Einsatz der Virtuellen Fließmontage ist deshalb eine Prozessfrequenz von 3.

- **Unterschiedliche Steigung und Richtung der Isoquanten**

Im Vergleich ist bei der Schlanken Fließmontage die größte Steigung zu beobachten, wobei die Richtung des Gefälles stark von der Prozessvarianz abhängt. Erwartungsgemäß führen Störungen des Prozess zu einer erheblichen Leistungsminderung des Produktionssystems, so dass im weiteren Verlauf auch das Verschwendungsniveau der anderen Produktionssysteme überschritten wird. Aufgrund der hohen Sensitivität des Produktionssystems sind solche Schlanken Fließmontagen vorrangig bei niedrigen Prozessvarianzen wirtschaftlich einsetzbar, dort aber mit einer deutlich höheren Effizienz als die anderen Produktionssysteme. Die Schlanke Standplatzmontage ist im Vergleich zu den anderen Produktionssystemen fast vollkommen unabhängig von der Prozessfrequenz und nur geringfügig sensitiv bezüglich der Prozessvarianz. Lediglich im Bereich minimaler Prozessfrequenzen, insbesondere unterhalb von 1, ist ein starker Leistungsabfall zu verzeichnen, da nun die Auslastung des Produktionssystems durch eine zu geringe Auftragsanzahl einfällt. Dieses Produktionssystem scheint sich vor allem für Rahmenbedingungen zu eignen, die schlecht beherrschbar sind.

Die Virtuelle Fließmontage zeigt sich ähnlich wie für den Wertebereich auch hier in der Mitte der beiden Extreme zwischen Schlanker Fließmontage und Schlanker Standplatzmontage: Mittlere Leistungsfähigkeit bei mäßiger Sensitivität gegenüber Prozessvarianz und Prozessfrequenz. Der optimale Einsatzbereich dieses Produktionssystems ist deshalb zwischen den optimalen Einsatzbereichen der anderen Produktionssysteme zu erwarten.

6.4.2 Erklärung der Verschwendungscharakteristik

Die Bewertung der Verschwendungsniveaus aus der Simulation ist im Vergleich zu den ermittelten Niveaus des Benchmarking insbesondere für die Schlanke Standplatzmontage relativ hoch. Das liegt vor allem daran, dass für die Simulation und die Bewertung der Verschwendung von Produktionssystemen eine weitere Verschwendungsart ermittelt wurde, die man in Feldversuchen kaum ermitteln kann: die Effektivitätsverluste durch Arbeitskräftflexibilisierung. Werkzeugmaschinenhersteller, die ein Produktionssystem beispielsweise erfolgreich von einer Standplatzmontage in eine Fließmontage transformiert haben, wissen von Effektivitätssteigerung in der berechneten Größenordnung zu berichten (siehe Bild 23). Werkzeugmaschinenhersteller, die diese Erfahrung nicht gemacht haben, können diesen Effekt kaum abschätzen. Die Effektivitätsverluste stellen deshalb opportune Verschwendungen dar, die durch Wahl eines Produktionssystems bestimmt werden und deshalb für die korrekte Auswahl eines Produktionssystems berücksichtigt werden müssen. In Bild 74 findet sich eine Gegenüberstellung dieser und weiterer Verschwendungsarten, mit dem Ziel das Verhalten der Verschwendung der unterschiedlichen Produktionssysteme ergründbar zu machen.

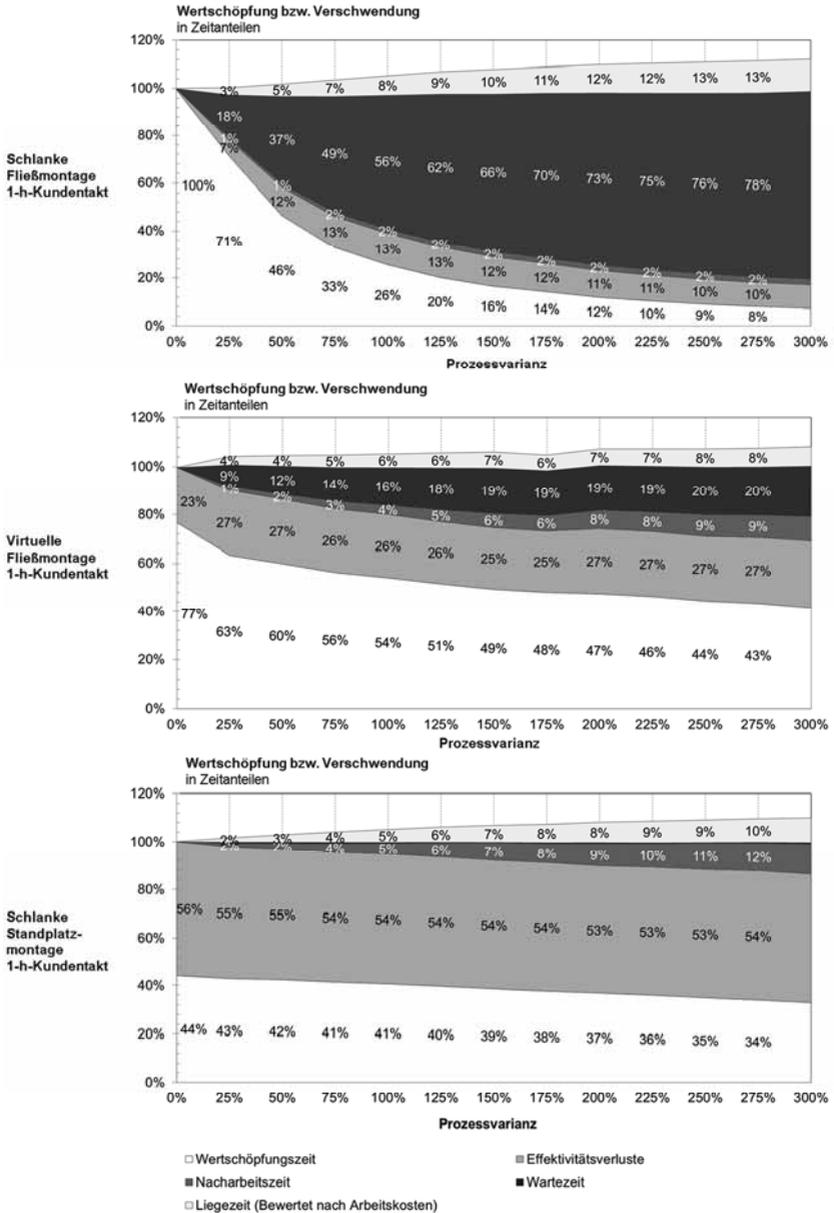


Bild 74: Verschwendungsmuster von unterschiedlichen Produktionssystemen¹⁶⁰

¹⁶⁰ vgl. Meudt (2011).

In Bild 74 ist für jede Art von Produktionssystem das Ergebnis einer Simulationsserie stellvertretend abgebildet. Simulationsserien anderer Kundentakte verhalten sich prinzipiell sehr ähnlich zu den dargestellten Mustern.

So lässt sich die von der Schlanken Fließmontage gezeigte hohe Sensitivität im Vergleich zu den anderen Produktionssystemen auch im oberen Bild nachvollziehen. Ein mit zunehmender Prozessvarianz stark abfallender Anteil der Wertschöpfung ist die Entsprechung des stark steigenden Verschwendungsanteils. Die Hauptverschwendungsart in diesem Produktionssystem ist auftretende Wartezeit. Durch die starre Verkettung der Montageschritte wirken sich Prozessstörungen nicht nur auf den einzelnen Montageschritt aus, sondern auch auf andere Montageschritte. Durch die hohe Montageschrittsspezialisierung, ist die Möglichkeit der gegenseitigen Unterstützung bei Prozessstörungen nur auf einige universelle Nacharbeiter beschränkt. Überschreitet das Ausmaß der Störungen deren Kapazität, bricht die Leistungsfähigkeit schnell zusammen. Ebenso finden sich die geringsten Effektivitätsverluste, da durch die hohe Spezialisierung der Arbeitskräfte die Auswirkungen des Lerneffekts stark zum Tragen kommen. Auf die hohe Störungsanfälligkeit zurückzuführen, findet sich in diesem Produktionssystem der höchste Anteil der Verschwendungen durch Liegezeit. Verschwendungen durch Nacharbeit sind relativ gering, was auf die begrenzte Kapazität der Nacharbeiter zurückzuführen ist. Das untere Bild kennzeichnet das Verschwendungsmuster der Schlanken Standplatzmontage. Wie zu sehen ist, findet sich nur ein leichter und stetiger Abfall der Wertschöpfung in diesem Produktionssystem. Zunehmende Prozessstörungen erhöhen kontinuierlich den Verschwendungsanteil an Nacharbeit und Liegezeit. Diese Verschwendungen werden aber durch die Effektivitätsverluste dominiert. Die hohe Universalität der Arbeitskräfte führt dazu, dass kaum Wartezeiten im Produktionssystem auftreten, zum Preis einer geringen Effektivität der Montageschritte im Vergleich zu spezialisierten Produktionssystemen. Die geringe Effektivität ist dabei nahezu unabhängig von dem Ausmaß der Prozessstörungen.

Die in der Isoquanten-Darstellung gezeigte mittlere Sensitivität auf Prozessstörungen der Virtuellen Fließmontage ist auch im mittleren Bild wiederzufinden. So sind nicht nur der Anteil der Gesamtverschwendung, sondern auch alle anderen Verschwendungsarten vom Verlauf und vom Wert genau zwischen den beiden anderen Produktionssystemen. Einzige Ausnahme bildet die Liegezeit, die bei Prozessstörungen in diesem Produktionssystem sogar noch unter dem Niveau der Schlanken Standplatzmontage ist. Das ist damit zu erklären, dass in diesem Fall (1h-Kundentakt) die Summe aller anderen Verschwendungen der Virtuellen Fließmontage niedriger ist als die Summe der Verschwendungen der Schlanken Standplatzmontage.

Die Analyse der Verschwendungsanteile der unterschiedlichen Produktionssysteme bestätigt damit zwei bereits bekannte Grundsätze der Produktion: (Varianten- und Mengen-)Flexible Produktionssysteme haben Kostennachteile gegenüber spezialisierten Produktionssystemen, sind aber definitionsgemäß robuster gegenüber Änderungen der Unternehmensumwelt.¹⁶¹ Darüber hinaus ist mit den Ergebnissen nun die Quantifizierung dieser Grundsätze möglich. Es kann erstmals die Grenze zwischen wirtschaftlicher Flexibilität und Spezialisierung in Schlanken Produktionssystemen für den konkreten Anwendungsfall „Montage von Werkzeugmaschinen“ verortet werden.

¹⁶¹ vgl. Nebl (2004).

6.5 Einsatzgrenzen Schlanker Produktionssysteme (ProduktionsSystemKompass)

6.5.1 Entwicklung und Darstellung des ProduktionsSystemKompass

Der ProduktionsSystemKompass ist eine Darstellung der verschwendungsminimalen Einsatzgrenzen der drei untersuchten Schlanken Produktionssysteme entsprechend ihrer Rahmenbedingungen im Untersuchungsbereich der Prozessfrequenz-Prozessvarianz-Matrix.

Dazu wurden die ermittelten Verschwendungscharakteristika der drei Schlanken Produktionssysteme miteinander verglichen. Für über 900 Datenpunkte der Prozessfrequenz-Prozessvarianz-Matrix wurden anhand der ermittelten Flächengleichungen für die Gesamtverschwendung die jeweiligen Verschwendungswerte ermittelt und gegenübergestellt. Für jeden Datenpunkt wurde das Produktionssystem als optimal ausgewählt, dessen Verschwendungswert minimal war. Daraus ergeben sich rechnerisch scharfe Einsatzgrenzen für die Auswahl eines Produktionssystems.

Es wurde in der Beschreibung des Simulationsexperiments vielfach auch Unsicherheiten, Vereinfachungen und Annahmen hingewiesen. Um die Auswirkungen dieser Unsicherheiten abschätzen zu können, wurden hier die Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen des Benchmarkings verglichen. Das sollte Aussagen zur Ergebnisqualität der Simulation ermöglichen und damit zur Aussagekraft des ProduktionsSystemKompass. Verglichen wurden die als Benchmark identifizierten Produktionssysteme und die Simulationsergebnisse der jeweiligen Modelle, also für einen spezifischen Datenpunkt der Prozessfrequenz-Prozessvarianz-Matrix. In Bild 75 findet sich eine Gegenüberstellung von drei ausgewählten Fallbeispielen, wobei beispielhaft eine gute, eine mittlere und die schlechteste Übereinstimmung abgebildet sind.

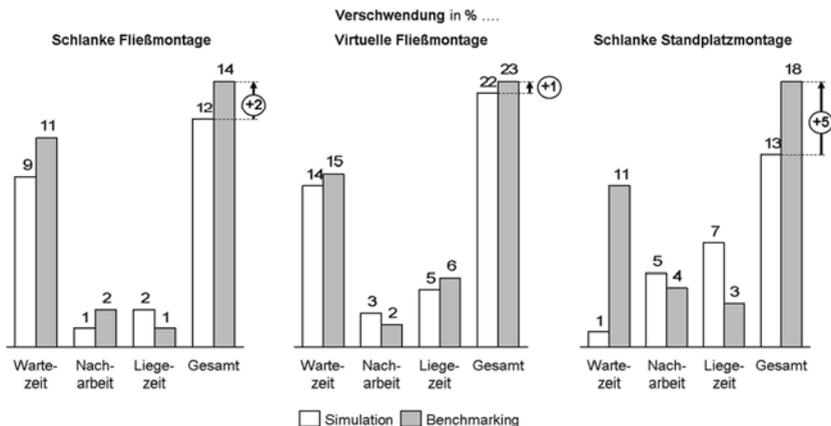


Bild 75: Vergleich Simulations- und Benchmarkergebnisse

Die seltenen, teilweise sehr großen Abweichungen bei der Standplatzmontage sind darauf zurückzuführen, dass die Auftragslage des Werkzeugmaschinenherstellers im Un-

tersuchungszeitraum deutlicher eingebrochen ist, als durch die standardisierten Prozessstörungen im Simulationslauf angenommen. Dadurch ist es vermehrt zu Wartezeiten gekommen, bei gleichzeitiger Verringerung der Verschwendung durch Liegezeiten. Die Verschwendungsarten haben sich also gegenseitig kompensiert, wenn auch nicht vollständig. In Kapitel 6.5.2 wird diese Abhängigkeit bzw. Austauschbarkeit von Parametern unterschiedlicher Rahmenbedingungen noch genauer zu untersuchen sein.

Im Vergleich aller Einzelverschwendungen wurde der Mittelwert der Abweichung mit 3,1 Prozentpunkten bemessen bei einer Standardabweichung von 2,1 Prozentpunkten. Die Unsicherheit des ProduktionsSystemKompass wurde mit $3,1 + 2,1 = 5,2$ Prozentpunkten bemessen und umfasst somit statistisch ca. 84 Prozent aller ermittelten Einzelabweichungen aus dem Vergleich von Simulations- und Benchmarkdaten. Praktisch kompensieren sich Verschwendungsarten bei Abweichungen gegenseitig, so dass selbst die maximale gesamte Abweichung von 5 Prozentpunkten im Bild 75 bei dieser Bemessungsgrenze Berücksichtigung findet.

Für die systemspezifischen Verschwendungswerte der 900 Datenpunkte der Prozessfrequenz-Prozessvarianz-Matrix wurde aus diesem Grund ein Abstand der ermittelten Verschwendungsniveaus von mindestens 5,2 Prozentpunkten definiert, um eine klare Empfehlung für die Auswahl eines Produktionssystems geben zu können. Damit ergeben sich entsprechend Bild 76 aber auch unscharfe Einsatzgrenzen für einige Bereiche der Prozessfrequenz-Prozessvarianz-Matrix.

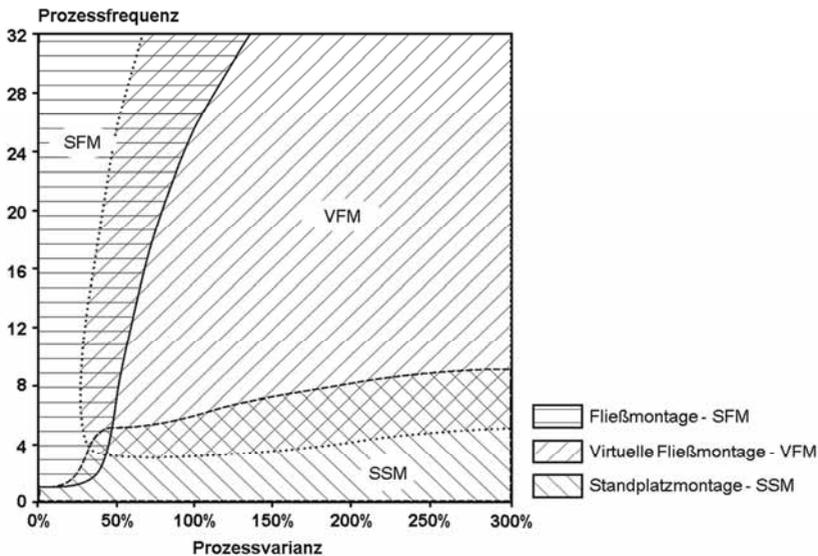


Bild 76: Einsatzgrenzen Schlanker Produktionssysteme
(ProduktionsSystemKompass)¹⁶²

¹⁶² vgl. Abele, Rumpel, Meudt (2011).

Wie zu erkennen ist, sind die optimalen Einsatzbedingungen der Schlanken Fließmontage vorwiegend im Bereich geringer Prozessvarianz, also stabiler Prozesse. Für geringe Prozessfrequenzen und mittlere bis hohe Prozessvarianzen eignet sich vorwiegend die Schlanke Standplatzmontage. Für mittlere Prozessfrequenzen und Prozessvarianzen ist der Einsatz der Virtuellen Fließmontage verschwendungsminimal. Die eindeutigen Empfehlungsbereiche sind flächenmäßig am größten, wobei der Bereich höchster Prozessfrequenzen und gleichzeitig höchster Prozessvarianzen eher von geringer praktischer Bedeutung ist. Es existiert nur ein kleiner Bereich in denen alle drei Produktionssysteme ähnliche Leistungsfähigkeiten aufweisen. Der höchste Anteil unscharfer Bereiche ist zumindest dadurch gekennzeichnet, dass lediglich zwei Produktionssysteme in Konkurrenz zueinander stehen.

Vergleicht man diese Ergebnisse mit den Benchmarking-Daten des Kapitel 5 stellt man fest, dass sich die Simulationsergebnisse stark mit den Feldbeobachtungen überdecken (siehe Bild 77). So ist zu erkennen, dass Fließmontagen innerhalb des Empfehlungsbereich des ProduktionssystemKompass immer den Benchmark darstellten. Die beobachtete Fließmontage außerhalb des Empfehlungsbereichs zeigte eine deutlich höhere Verschwendung als die empfohlenen Produktionssysteme. Auch für die Virtuelle Fließmontage und die Schlanke Standplatzmontage sind gleichartige Beobachtungen zu treffen. Das spricht für die Richtigkeit der Aussagen des ProduktionssystemKompass. Einzige Schlanke Standplatzmontage liegt außerhalb des Empfehlungsbereichs. Das spricht jedoch nicht zwangsweise für die Unrichtigkeit des ProduktionssystemKompass. Die Schlanke Standplatzmontage kann bei allen Produktionsbedingungen mit der im Vergleich niedrigsten Leistungsfähigkeit eingesetzt werden. Insofern könnte die beobachtete Montage unter Einsatz einer Virtuellen Fließmontage sogar weitere Leistungslücken schließen.

Neben der Richtigkeit des ProduktionssystemKompass belegt dieser Vergleich auch, dass fast ein Drittel aller untersuchten Produktionen nicht mit dem optimalen Produktionssystem produziert. Das zeigt u.a. die Notwendigkeit der zu entwickelnden Methode.

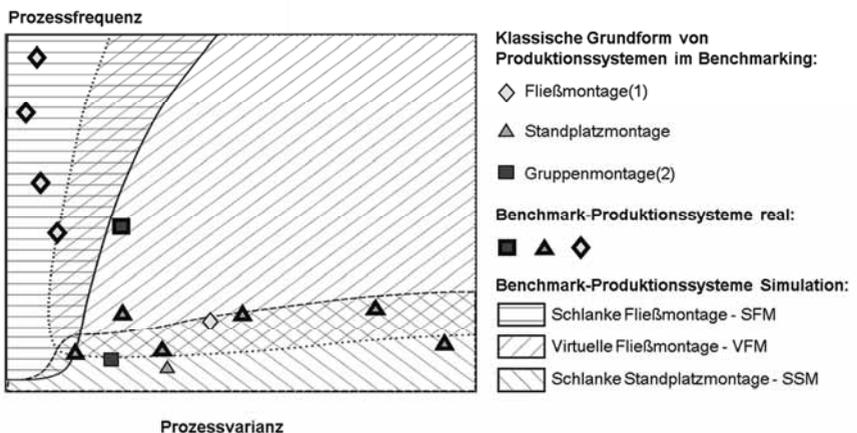


Bild 77: Vergleich der Produktionssystemausprägung des Benchmarking mit den Simulationsergebnissen

Es bleibt festzuhalten, dass der ProduktionsSystemKompass eine gute Orientierungshilfe bieten kann, um bei gegebenen Rahmenbedingungen die Entscheidung für ein verschwendungsminimales Produktionssystem zu erleichtern. Damit ist er geeignet den Kern einer Methode zu bilden, die den Auswahlprozess für Schlanke Produktionssysteme praktisch handhabbar macht.

6.5.2 Anwendungsbereich des ProduktionsSystemKompass

Dass der ProduktionsSystemKompass und damit die Kernergebnisse des Simulationsexperiments eine praktische Vergleichbarkeit mit den Benchmarkergebnissen aufweisen, konnte bereits gezeigt werden. Die wesentlichen Parameter der verifizierten Produktionssysteme bilden daher den originären Anwendungsbereich des ProduktionsSystemKompass (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Anwendungsbereich des ProduktionsSystemKompass

Parameter Produkt- eigenschaften	Untersuchter Wertebereich	Parameter Prozess- eigenschaften	Untersuchter Wertebereich
Produkt- komplexität	Hoch	Fertigungsart	Montage
Produkt- individualität	Mittel - Hoch	Fertigungsweise	Diskret/Stückgut
Produkt- konfiguration	Baukasten	Automatisierungs- grad	Manuell
Auftragsart	Make-to-Order	Anzahl Arbeitsstationen	2 ... 30
Produktvolumen	> 2 m ³	Anzahl Mitarbeiter pro Arbeitsstation	1 ... 6
Produktgewicht	0,5 – 30 Tonnen	Anzahl Schichten	1 ... 2
Montagezeit	40 ... 4000 h	Störungsprofil am Arbeitstakt	Rechtsseitig normalverteilt
Durchlaufzeit	5 ... 100 d	Zusammensetzung Prozessvarianz	Siehe Seite 119
Gesamtfertigungs- tiefe	ca. 20 – 50 %	Mitarbeiter- qualifikation	Hoch (mind. Fach- arbeiter)
Jahres- produktionsmengen	5 ... 1800 Stk.	Ø Bestands- kosten p.a.	20 – 25 % des Bestandswerts

Eine Anwendung des Produktionskompass außerhalb des angegebenen Bereichs ist möglich und kann bei hinreichender Ähnlichkeit der Parameter ebenfalls eine Hilfestellung bieten. Diese Übertragbarkeit wurde aber im Rahmen dieser Arbeit in praktischen Fallbeispielen erfolgreich getestet, jedoch nicht abschließend untersucht.

Abgesehen von den dargestellten Parametern ließen sich insbesondere zwei kritische Annahmen nicht bzw. nicht vollständig durch einen Vergleich der Simulationsdaten mit den Benchmarkdaten verifizieren: die Lernrate (und damit insbesondere die Effektivitätsverluste der einzelnen Produktionssysteme) und die Zusammensetzung der Prozessvarianz (und damit der Gefahr von Abweichungen des ProduktionsSystemKompass über

5,2 %). Beide Einflussmöglichkeiten sollen folgend mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse hinsichtlich ihres Einflusses auf das Simulationsergebnis untersucht werden.

Einfluss von Abweichungen der Lernrate

Die Lernrate wurde entsprechend von Untersuchungen der Literatur und durch Fallstudien auf 0,85 festgelegt (siehe Kapitel 6.2.4). Ebenfalls wurde aber auch gezeigt, dass eine Schwankungsbreite von $\pm 0,01$ praktisch relevant ist.

Zur Bestimmung der Sensitivität der Simulationsergebnisse auf diesen Unsicherheitsfaktor wurden mehrere Simulationsläufe mit angepassten Modellen verschiedener Produktionssysteme durchgeführt und mit den Ergebnissen der Simulationsläufe mit einer Lernrate von 0,85 verglichen. Dabei wurde ein Wertebereich von 0,83 bis 0,87 untersucht an den Modellen der Schlanken Fließmontage und der Schlanken Standplatzmontage, da hier die Auswirkungen des Lerneffekts am größten sind. Für die Schlanke Fließmontage kann festgestellt werden, dass im gesamten Wertebereich die absolute Abweichung der angepassten Lernrate unter dem Unsicherheitsfaktor von 5,2 Prozentpunkten geblieben ist. Für die Schlanke Standplatzmontage waren die Auswirkungen einer Lernratenänderung teilweise größer als 5,2 Prozentpunkte (siehe in Bild 78).

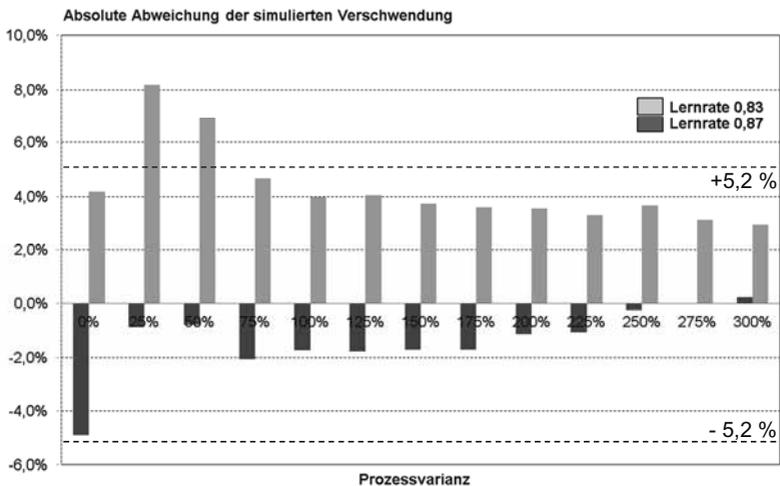


Bild 78: Einfluss von Abweichungen der Lernrate auf das Simulationsergebnis

So ist zu erkennen, dass eine Erhöhung der Lernrate einen geringeren Einfluss hat auf die ermittelte Abweichung als eine Senkung. Bei einer Lernrate von 0,83 übersteigen so zwei Werte der Prozessvarianz von 25 % und 50 % die Marke von 5,2 Prozentpunkten. Für den ProduktionsSystemKompass ist diese Abweichung insofern hinnehmbar, dass die Empfehlung für die Schlanke Standplatzmontage bei so geringen Prozessvarianzen kaum eine Bedeutung hat. Eine weitere Erhöhung der Verschwendung der Schlanken Standplatzmontage in diesem Bereich würde die Empfehlung des ProduktionsSystemKompass nicht ändern.

Insofern kann festgehalten werden, dass die erforderliche Toleranz der Lernrate von $\pm 0,01$ durch den ProduktionsSystemKompass vollkommen berücksichtigt wird und selbst eine Schwankung der Lernrate von $\pm 0,02$ c.p. zu keinen Falschaussagen führt. Die Bedeutung der Erkenntnis eines breiten Toleranzbereichs der Lernrate ist für die praktische Anwendbarkeit des ProduktionsSystemKompass als hoch einzustufen, da die Ermittlung der Lernrate des eigenen Unternehmens nicht immer möglich oder sehr aufwendig ist.

Einfluss von Abweichungen der Standardzusammensetzung der Prozessvarianz

Wie in Kapitel 6.5.1 gezeigt wurde, kann eine Zusammensetzung der Parameter der Prozessvarianz, die nicht der Standardzusammensetzung nach Bild 70 entspricht, zu einem Genauigkeitsverlust der Ergebnisse des Simulationsmodells führen. Deshalb wurde mit einer Sensitivitätsanalyse untersucht, wie groß der Spielraum für Abweichung von der Standardzusammensetzung sein darf, um noch innerhalb des Toleranzbandes von 5,2 Prozentpunkten Verschwendungsunterschied zu liegen.

Wiederrum wurde für mehrere unterschiedliche Modelle von Schlanken Fließmontagen und Schlanken Standplatzmontagen die Parametrisierung mit gegenüber dem Standard abweichenden Zusammensetzungen der Prozessvarianz vorgenommen. Die ermittelte Gesamtverschwendung wurde mit dem originären Wert verglichen und daraus die jeweilige Abweichung der ermittelten Ergebnisse abgeleitet. Es wurden insgesamt drei Versuchsreihen in diesem Zusammenhang gefahren:

1. Variation eines Parameters der Standardzusammensetzung bis zu 20 %
2. Variation mehrerer Parameter der Standardzusammensetzung bis zu 20 %
3. Simulation zufälliger Zusammensetzungen der Prozessvarianz

Die erste Versuchsreihe zeigte kaum Auswirkungen auf die Ergebnisqualität des ProduktionsSystemKompass und blieb in allen untersuchten Produktionssystemen deutlich unter der Grenze von 5,2 Prozentpunkten.

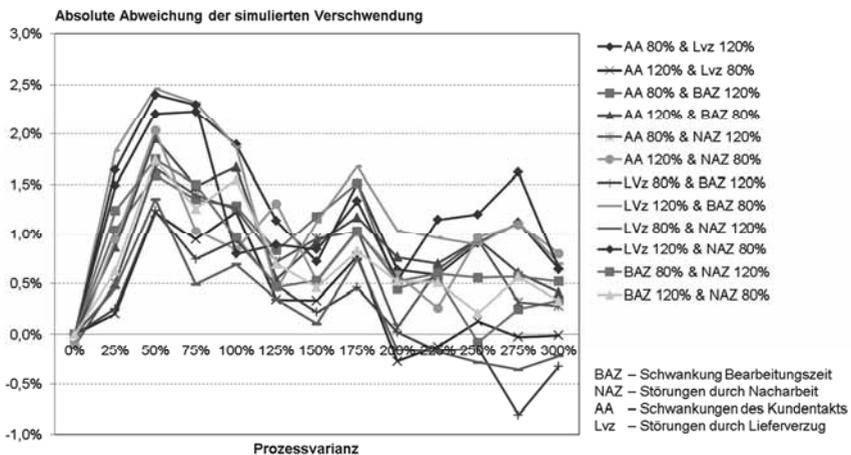


Bild 79: Kreuzvarianz der Standardzusammensetzung bei 20% Abweichung für die Schlanke Fließmontage

Bei der Variation mehrerer Parameter veränderte sich das Verhalten allmählich. So kann beispielhaft für die Untersuchung in Bild 79 beobachtet werden, dass insbesondere für die Schlanke Fließmontage die Zusammensetzung der Prozessvarianz große Auswirkungen haben kann. So werden gerade im Bereich niedriger Prozessvarianzen die höchsten Abweichungen erreicht. Diese liegen immer noch unter 50% der maximal zulässigen Abweichung, zeigen aber den großen Einfluss der Zusammensetzung der Prozessvarianz deutlich auf. Bei Virtueller Fließmontage und Schlanker Standplatzmontage waren die Abweichungen nicht in diesem Umfang zu beobachten. In der dritten Versuchsreihe wurde schließlich die Orientierung an der Standardzusammensetzung komplett fallen gelassen und eine Vielzahl von Datenpunkten mit zufälligen Zusammensetzungen für alle Modelle untersucht, jedoch mit besonderem Schwerpunkt auf der Schlanke Fließmontage. Dabei konnte für die Schlanke Standplatzmontage festgestellt werden, dass in keinem Fall die Grenze von 5,2 Prozentpunkten Abweichung erreicht wurden. Lediglich die Schlanke Fließmontage wies unter anderem erhebliche Abweichungen auf (siehe Bild 80).

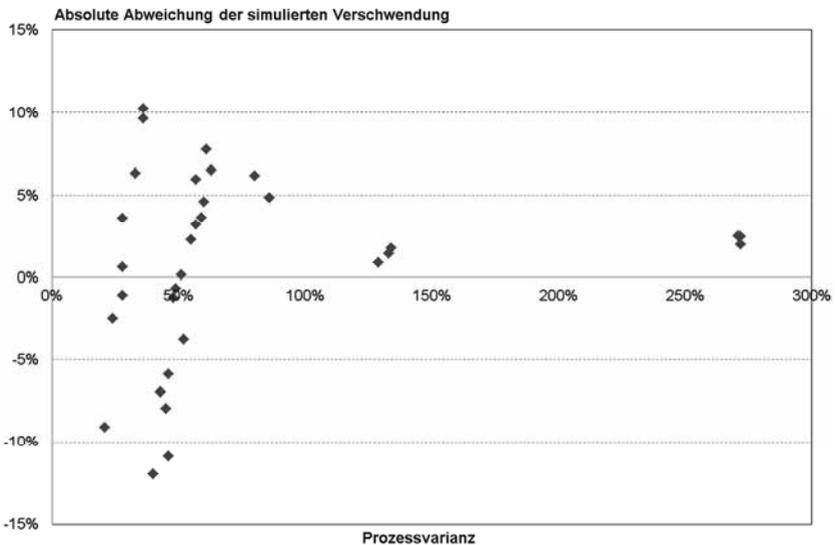


Bild 80: Abweichungen der Zusammensetzung bei zufälligen Parametern für die Schlanke Fließmontage

Teilweise sind somit in der Schlanke Fließmontage durch stark von der Standardzusammensetzung der Prozessvarianz abweichende Parameter verringerte oder vermehrte Verschwendungen von mehr als 10 Prozent möglich, eine Begrenzung des Gültigkeitsraums für die Parameter der Prozessvarianz ist deshalb notwendig.

Die Analyse der zufälligen Parametervariationen hat gezeigt, dass die Grenze von 5,2 Prozentpunkten immer dann eingehalten wurde, wenn die Anteile der unterschiedlichen Parameter der Prozessvarianz innerhalb folgender Grenzen liegen

50 %	< Störungen durch Lieferverzug	< 90 %
4 %	< Schwankungen Bearbeitungszeit	< 30 %
2 %	< Schwankungen Kundentakt	< 20 %
1 %	< Störungen durch Nacharbeit	< 20 %

und es gilt: Die Schwankungen der einzelnen Varianzen sind rechtsseitig annähernd normalverteilt.

Insofern gelten für jede Produktion, in der der ProduktionsSystemKompass zum Einsatz kommen soll, diese Bedingungen für die Anwendbarkeit desselben. Die zu entwickelnde Methode muss die Prüfung dieser Anwendungsbeschränkungen berücksichtigen.

6.6 Zusammenfassung

Das Ziel dieses Kapitels war es die Einsatzgrenzen der drei identifizierten Arten von Schlanken Produktionssystemen durch Simulation abzuleiten und das jeweilige Verhalten der Produktionssysteme bei verschiedenen Rahmenbedingungen der Produktion näher zu untersuchen. Dieses Ziel ist erfolgreich umgesetzt worden. Der Aufbau von Modellen zur Darstellung der verschiedenen Produktionssysteme hat sich als machbar herausgestellt sowie die Parametrisierung der Modelle mit den definierten Rahmenbedingungen der Prozessfrequenz-Prozessvarianz-Matrix.

Bei der Modellentwicklung mussten Vereinfachungen und Annahmen hingenommen werden. Die Auswirkungen dieser Annahmen wurden durch einen Vergleich der Simulationsergebnisse mit dem Benchmarkergebnissen bewertet. Diesen Unsicherheiten wurde durch eine entsprechende Berücksichtigung in den Simulationsergebnissen sowie einer Beschränkung des Gültigkeitsbereiches für die Übertragbarkeit der Ergebnisse Rechnung getragen. Die für den Praktiker grundlegenden Ergebnisse der Simulation konnten zudem erfolgreich zu einem einfachen und leicht verständlichen Instrument, dem ProduktionsSystemKompass, aggregiert werden, das den Kern einer Methode bilden kann, um Auswahlentscheidungen für ein Produktionssystem zu unterstützen.

7. Operationalisierung der Erkenntnisse in einer Methode zur Auswahl Schlanker Produktionssysteme

Mit dem ProduktionsSystemKompass ist ein geeignetes Instrument zur Auswahl Schlanker Produktionssysteme entwickelt worden. Um dieses Wissen potentiellen Anwendern zugänglich zu machen, soll in diesem Kapitel die Operationalisierung der Anwendung des Instruments in einer Methode erfolgen.

7.1 Ziele und Anwendungsbereiche der Methode

Dem im Kapitel 3 formulierten Ziel entsprechend, soll eine Methode entwickelt werden, die eine Entscheidungshilfe zur Konfiguration Schlanker Produktionssysteme für die Montage von Werkzeugmaschinen bietet. Ebenfalls soll sich diese Methode durch eine einfache Handhabung und Praktikabilität auszeichnen. Die dieser Methode zugrunde liegenden Erkenntnisse wurden bereits in den Kapiteln 4 bis 6 erarbeitet, jedoch mit dem Fokus auf die wissenschaftliche Herleitung dieser Ergebnisse. Damit ein potentieller Anwender auch ohne die genauen Hintergründe der wissenschaftlichen Ausarbeitung die Methode nutzen kann, soll sich die Ausarbeitung der Methode auf die anwendungsorientierten Kernergebnisse dieser Ausarbeitung konzentrieren.

Die Adressaten dieser Methode sind in der Zielstellung dieser Ausarbeitung formuliert worden mit

- Produktionsoptimierern (Kontinuierliche Verbesserung eines Produktionssystems)
- Fabrikplanern (Neu- und Umgestaltung von Produktionssystemen)

in der Montage von Werkzeugmaschinen. Die Methode ermöglicht es diesen Adressaten sich an einem Idealzustand eines Produktionssystems unter gegebenen Rahmenbedingungen (Prozessfrequenz, Prozessvarianz) zu orientieren. Die etwaige Anpassung des idealen Produktionssystem an die realen Bedingungen (z.B. baulich, personell) und der Weg zur Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen sind nicht Gegenstand der Methodenentwicklung, jedoch als notwendige Schritte in ihr berücksichtigt.

Darüber hinaus bietet die Methode ebenfalls Anwendungsmöglichkeiten für

- Konstrukteure (Auswirkungen von Produktänderungen bzw. Neuprodukten auf die Leistungsfähigkeit des Produktionssystems)
- Disponenten (Auswirkungen von Effekten des Lieferantenmanagement auf die Leistungsfähigkeit des Produktionssystems)
- Vertriebsmitarbeiter (Auswirkungen von Effekten der Nachfrageerhöhung und der Nachfrageglättung auf die Leistungsfähigkeit des Produktionssystems) sowie
- Qualitätsingenieure (Auswirkungen von Effekten einer erhöhten Prozesssicherheit auf die Leistungsfähigkeit des Produktionssystems)

Anders als bei den Produktionsoptimierern und Fabrikplanern geht es bei diesen Adressaten nicht um die konkrete Gestaltung oder Änderung eines Produktionssystems sondern um eine Sensibilisierung der Adressaten. Diese Adressaten tragen dazu bei die Rahmenbedingungen der Produktion mitzugestalten. Mit der Kenntnis der kritischen Rahmenbedingungen für eine Produktion, die z.B. das Unternehmen daran hindern in einem verschwendungsärmeren Produktionssystem zu produzieren, können gezielt Maßnahmen abgeleitet werden, um eine Anpassung der Rahmenbedingungen zu erwir-

ken. Dabei können mit der Methode ganz konkrete Verbesserungsziele abgeleitet werden (z.B. Reduzierung der Nacharbeit um 20 %), die sich an der schlichten Notwendigkeit und nicht an einem unerreichbaren Ideal orientieren (z.B. 0 – Fehler).

7.2 Darstellung der Methode

Die Art und Weise der Nutzung der Methode orientiert sich an klassischen Workshops im Rahmen der Schlanke Produktion: In einem multidisziplinären Team mit Teilnehmern der operativen Ebene, Fachspezialisten und Entscheidungsträgern des zu untersuchenden Bereichs wird zunächst die Analyse des Produktionssystems durchgeführt. Mit Hilfe des ProduktionssystemKompass werden daraufhin die Gestaltungsvorschläge auf Umsetzbarkeit bzw. Anpassungsbedarf diskutiert und sodann ein gemeinsames Konzept zur Umsetzung abgestimmt.

Die Durchführung der Methode ist in vier verschiedene Phasen untergliedert, die jeweils mehrere Schritte enthalten (siehe Bild 81). Je nach Zielsetzung für den Einsatz der Methode unterscheidet sich die Durchführung der einzelnen Schritte in Art und Umfang. Die unterschiedlichen Schritte sind im Bild als Methodenpfad A und B gekennzeichnet. In Folgendem werden die einzelnen Schritte erklärt und Hilfestellungen zur Anwendung gegeben.

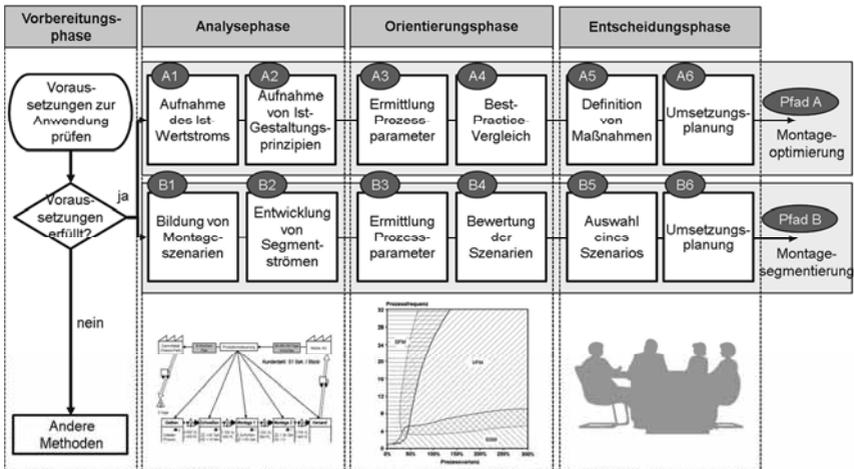


Bild 81: Methodendarstellung - Gesamtübersicht

7.2.1 Vorbereitungsphase

Obwohl sich die einzelnen Methodenpfade im Detail sehr unterscheiden, bleibt ihnen die gemeinsame Basis gemein: der ProduktionssystemKompass. Wie insbesondere in Kapitel 6 gezeigt wurde, kann das Konzept des ProduktionssystemKompass nicht ohne Einschränkungen genutzt werden. Nur so ist sichergestellt, dass die empfohlenen Einsatzgrenzen zur Auswahl des verschwendungsminimalen Produktionssystems auch für die zu untersuchende Produktion gelten. Die zu prüfenden Kriterien finden sich in „Tabelle 3:

Anwendungsbereich des ProduktionsSystemKompass“ auf Seite 115 dieser Ausarbeitung. Je mehr Kriterien nicht eingehalten werden und je größer die absolute Abweichung der einzelnen Kriterien ist, desto weniger Aussagekraft besitzt der ProduktionsSystemKompass für die zu untersuchende Produktion. Sind die Abweichungen in Anzahl und/oder Umfang sehr stark, muss davon abgeraten werden die Methode anzuwenden.

Ist hingegen die Gültigkeit der Methode für die zu untersuchende Produktion bestätigt, muss spätestens an dieser Stelle das Ziel der Untersuchung festgelegt werden. Dabei gilt für die folgenden Zielstellungen der vermerkte Methodenpfad:

- Vergleich der untersuchten Produktion mit den Benchmark-Produktionssystemen zur Ableitung von Optimierungsmaßnahmen (Methodenpfad A)
- Analyse der Rahmenbedingungen der untersuchten Produktion hinsichtlich Möglichkeiten zur Verbesserung derselben (Methodenpfad A)
- Identifikation der verschwendungsminimalen Segmentierung der Montage (Methodenpfad B)
- Untersuchung der Auswirkung von Produktneuentwicklungen auf die Leistungsfähigkeit der Montage (Methodenpfad B)

Grundsätzlich sind eine Reihe weiterer Zielstellungen denkbar. Der Methodenpfad A ist immer dann zu wählen, wenn ein einzelnes Produktionssystem auf Verbesserungen hin untersucht werden soll. Der Methodenpfad B kommt immer dann zur Anwendung, wenn die Segmentierung der Montage grundlegend untersucht werden soll.

In Folgendem sollen die Schritte der weiterführenden Methodenpfade einzeln vorgestellt werden.

7.2.2 Methodenpfad A „Montageoptimierung“

A1 – Aufnahme des Ist-Wertstroms

In klassischen Workshops im Rahmen von Optimierungen nach den Prinzipien der Schlanken Produktion hat sich vor allem die Wertstromanalyse als zentrales Instrument (Erläuterung und weiterführende Literatur in Bild 50 auf Seite 74) zur Erfassung des Ist-Zustands einer Produktion etabliert. Im Benchmarking-Prozess, wie beschrieben in Kapitel 5, wurde im Rahmen der Felddatenerhebung ebenfalls die klassische Wertstromanalyse als Datenerfassungswerkzeug genutzt und um wesentliche Parameter erweitert, um im späteren Verlauf des Benchmarking relevante Kennwerte zu berechnen. In vereinfachter Form soll dasselbe Verfahren auch für die Methodendurchführung angewandt werden. Somit wird die Konsistenz zwischen Methodenanwendung und Methodenentwicklung im Rahmen dieser Ausarbeitung sichergestellt. Darüber hinaus ist der Anspruch gegenüber dem Benchmarking geringer, da nicht mehr alle möglichen Parameter erfasst werden müssen, sondern nur noch die als hauptsächlich eingestuften Parameter aufgenommen werden. Im Gegensatz zu klassischen Wertstromanalysen ist hinzuzufügen, dass nicht ein einzelnes Produkt der Betrachtungsgegenstand ist, sondern ein gesamtes Produktionssystem bzw. ein Montagesegment und somit ggf. mehrere Baureihen bzw. Produkte. Die Datenaufnahme der Wertstromanalyse wird um vier Kennwerte entsprechend Bild 82 erweitert.

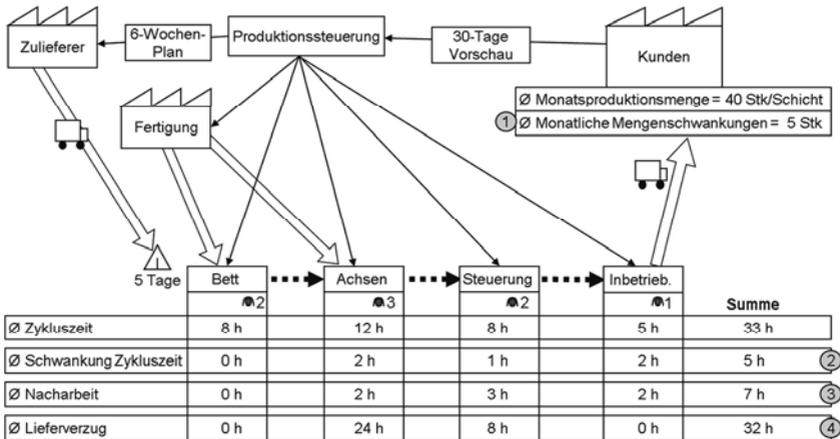


Bild 82: Datenerfassung mittels modifizierter Wertstromanalyse (Beispiel, vereinfacht)

Parameter 1 wird prozessübergreifend erhoben, Parameter 2, 3 und 4 für jeden einzelnen Montageschritt. Die Parameter charakterisieren den Einfluss der unterschiedlichen Störungsquellen von Montageprozessen in Form der jeweiligen Standardabweichung um die durchschnittliche Zykluszeit (Parameter 2, 3, 4) bzw. die durchschnittliche Monatsproduktionsmenge (Parameter 1). Damit schließen die Parameter denjenigen Wertebereich ein, der ca. 2/3 aller Einzelbeobachtungen abdeckt.

Die Datenherkunft ist bestenfalls auf statistischen Daten begründet, die über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr ausgewertet werden. Gerade bei Neuplanungen von Produktionssystemen existieren solche Daten noch nicht. In diesem Fall muss auf Erfahrungswerte mit anderen Produktionssystemen zurückgegriffen werden, im schlechtesten Fall wird mit Schätzwerten gearbeitet. Zu beachten ist hierbei, dass die Aussagekraft der Empfehlung für die Auswahl von Produktionssystemen stark von der Datenqualität abhängt, die im Verlauf der modifizierten Wertstromanalyse erhoben werden.

A2 – Aufnahme der Ist-Gestaltungsprinzipien

Die Aufnahme der Gestaltungsprinzipien soll dabei helfen das aktuell eingesetzte Produktionssystem im weiteren Verlauf der Methode mit den als Best Practice identifizierten Produktionssystemen zu vergleichen. Die Ermittlung der Gestaltungsprinzipien kann parallel zur Wertstromanalyse durch Zuordnung der Ausprägungen des Ist-Zustandes der untersuchten Montage entsprechend Bild 36 und Bild 37 ab Seite 54 ff. dieser Ausarbeitung erfolgen. Dabei ist jedem Gestaltungsfeld nur ein Gestaltungsparameter zuzuordnen. Die Zuordnung kann entweder durch Beobachtung, durch Befragung oder eine Kombination beider Möglichkeiten erfolgen.

A3 – Ermittlung der Prozessparameter

Die Ermittlung der Rahmenbedingungen der untersuchten Produktion dient der Einordnung in die Prozessfrequenz-Prozessvarianz-Matrix. Die Berechnung der dazu notwendigen Parameter für Prozessfrequenz und Prozessvarianz ist in Bild 83 dargestellt.

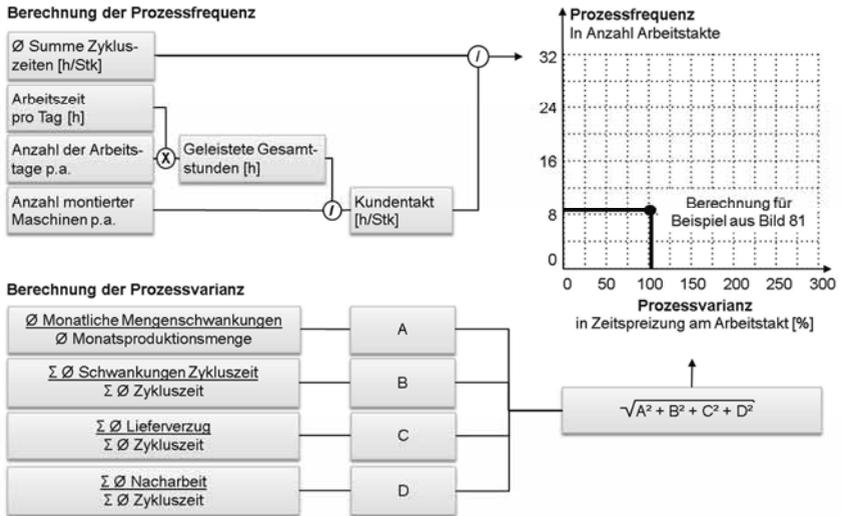


Bild 83: Vereinfachte Berechnungsvorschrift Prozessfrequenz und Prozessvarianz

A4 –Best-Practice-Vergleich

Mit der Einordnung in die Prozessfrequenz-Prozessvarianz-Matrix kann die Nutzung des ProduktionsSystemKompass erfolgen. Die Parameter der zu untersuchenden Montage werden dazu in den ProduktionsSystemKompass übertragen. Der Schnittpunkt der Parameter stellt das verschwendungsminimale Produktionssystem für die ermittelten Rahmenbedingungen dar (siehe Beispiel in Bild 84).

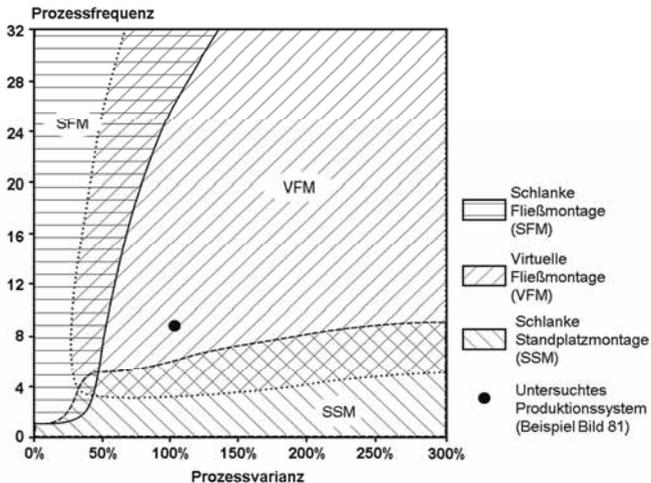


Bild 84: Ermittlung des Best-Practice-Produktionssystems

A5 – Definition von Maßnahmen

Nachdem das Best-Practice-Produktionssystem bzw. mehrere Best-Practice-Produktionssysteme ermittelt wurden, erfolgt der Vergleich der Gestaltungsprinzipien der ermittelten Produktionssysteme mit dem zu untersuchenden Produktionssystem. Dieser erfolgt durch eine Gegenüberstellung der Gestaltungsprinzipien von untersuchter Montage und Best-Practice-Montage (siehe Bild 56: Schlanke Fließmontage, siehe Bild 57: Virtuelle Fließmontage, siehe Bild 58: Schlanke Standplatzmontage) zur Aufdeckung von Abweichungen (siehe Beispiel Bild 85). Die erkannten Abweichungen stellen eine Orientierungshilfe dar, die in einem Workshop zur Optimierung einer Montage Hinweise liefern kann für die an den spezifischen Rahmenbedingungen orientierte Umgestaltung bzw. Optimierung der untersuchten Montage.

Die Empfehlung stellt in diesem Zusammenhang ein Ideal dar. Es ist nicht in allen Fällen möglich dieses Ideal zu erreichen aufgrund etwaiger externer Gegebenheiten, z.B. bauliche Restriktionen. Ebenfalls gibt das Ideal nur Auskunft über die Leistungsfähigkeit des Produktionssystems in der Betriebsphase. Etwaige Investitionskosten, die in Zusammenhang mit einer Reorganisation des Produktionssystems stehen, müssen separat untersucht werden. Ggf. ist eine Wirtschaftlichkeitsrechnung erforderlich, um die Übertragbarkeit der Empfehlung für die spezifische Situation fundiert bewerten zu können. Weiterführende und ergänzende Methoden zu diesen Fragestellungen finden sich in der aktuellen Literatur zur Fabrikplanung, insbesondere in den jeweiligen Abschnitten zur Realplanung bzw. Feinplanung.¹⁶³ Insbesondere bei mehrdeutigen Empfehlungen bieten Instrumente der Real- und Feinplanung entscheidende Hinweise für eine ggf. notwendige Anpassung des Best-Practice-Produktionssystems.

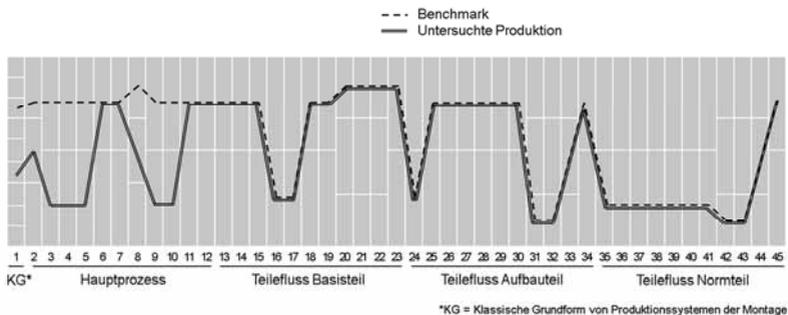


Bild 85: Ermittlung der Abweichungen in der Produktionssystemgestaltung (Beispiel)

A6 – Umsetzungsplanung

Die Umsetzungsplanung der definierten Maßnahmen ist standardisiert kaum möglich. Vielmehr ist die Umsetzung von der Art der definierten Maßnahmen, der Anzahl und der Wirkungszusammenhänge der Maßnahmen untereinander abhängig. Der vorgeschlagene Workshop, in dem die Methode durchgeführt wird, muss daher Diskussionsraum für die Entwicklung einer effektiven Umsetzungsstrategie mit allen beteiligten Interessensgruppen bieten.

¹⁶³ siehe z.B. Eversheim (1989) und Wiendahl (2006).

7.2.3 Methodenpfad B „Montagesegmentierung“

Die anspruchsvollste Anwendung der Methode findet sich im Methodenpfad B. Im Gegensatz zu Methodenpfad A gilt es nicht ein bestehendes Produktionssystem mit Best Practices zu vergleichen, sondern die Segmentierung der Montage selbst zum Entscheidungsgegenstand der Untersuchung zu machen. Montagesegmente stellen im Verständnis dieser Ausarbeitung Teilbereiche einer Montage dar, die jeweils organisatorische Einheiten bzw. Subsysteme von Produktionssystemen darstellen. So ist es möglich, dass in einer Montage verschiedenen Produktionssysteme koexistieren, die zudem auch unterschiedlich ausgestaltet sein können.

Das Potential für die Optimierung eines Produktionssystems kann mit diesem zusätzlichen Freiheitsgrad deutlich höher sein als in einem einfachen Best-Practice-Vergleich. Der Aufwand der Untersuchung steigt jedoch gleichermaßen.

B1 - Bildung von Montagesegmenten

Bei einer gegebenen Anzahl von zu realisierenden Montageprozessen innerhalb eines Unternehmens stellt sich die Frage, welche Prozesse in welchem Produktionssegment bzw. Produktionssystem durchgeführt werden sollten, um verschwendungsminimal zu produzieren. Dabei unterscheiden sich die durchzuführenden Prozesse vor allem hinsichtlich des Arbeitsinhalts bzw. des Montageschritts und hinsichtlich des Arbeitsobjekts bzw. des Produkts an dem der Montageprozess durchgeführt wird.

Mit dem entwickelten ProduktionsSystemKompass kann die Leistungsfähigkeit verschiedener Kombinationen dieser Montageprozesse beurteilt werden. Dabei gibt der ProduktionsSystemKompass bereits generelle Hinweise zur Art und Weise der Auslegung derartiger Segmente und zeigt das zentrale Dilemma der Montagesegmentierung auf:

Die geringste Verschwendung kann erreicht werden bei höchster Prozessfrequenz und geringster Prozessvarianz. Auf der einen Seite gilt es also so viele Prozesse wie möglich in ein Produktionssystem zu integrieren damit die Prozessfrequenz steigt. Auf der anderen Seite führt jeder integrierte Prozess in einem Produktionssystem zu einer Zunahme der Prozessvarianz und damit zu Verschwendung.

Eine weit verbreitete Lösung dieses Dilemmas in der Praxis ist die Segmentierung der Montage in ein Montagesegment mit hohen Stückzahlen und immer ähnlichen Montageprozessen (Renner) und in ein Montagesegment für alle Sonderausführungen in geringen Stückzahlen (Exoten).¹⁶⁴ Ob diese Lösung besser ist als z.B. ein einziges Montagesegment für alle Baureihen oder ein separates Montagesegment für jede Baureihe, kann mit dem ProduktionsSystemKompass nun bewertet werden. Die unterschiedlichen Konfigurationen verschiedener Montagesegmente werden fortan als Montageszenarien bezeichnet.

Da die Überprüfung alternativer Szenarien relativ aufwendig ist, sollte der Nutzer der Methode schon frühzeitig eine Fokussierung auf wenige Szenarien vornehmen. Theoretisch ist die Anzahl möglicher Szenarien sehr groß, praktisch lässt sich die Anzahl sinnvoller Szenarien schon im Vorfeld stark einschränken. Zusätzlich zu den beiden Extremszenarien eines einzigen Montagesegments in dem alles montiert wird und mehreren

¹⁶⁴ vgl. Wildemann (1989).

Montagesegmente für eine einzige Baureihe, bietet es sich an, sinnvolle Zwischenszenarien zu bilden. Dafür kann folgendes Instrument genutzt werden (siehe Bild 86). Im Grunde hilft das Instrument eine grobe Bewertung der Ähnlichkeit einzelner Montageschritte über alle Baureihen eines Unternehmens, gemessen anhand eines Referenzprozesses, aufzustellen. Die Baureihen sind links nach der produzierten Jahresstückzahl angeordnet, wobei das Renner-Produkt zunächst den initialen Referenzprozess bildet. Damit ist es möglich, bei ausreichender Ähnlichkeit mit Prozessen anderer Baureihen die höchste Prozessfrequenz zu erzielen. Die Bewertung selbst bezieht sich auf die Beurteilung der Stabilität und Ähnlichkeit der unterschiedlichen Prozesse und damit der Prozessvarianz. Stabilität meint dabei insbesondere, ob ein Prozess regelmäßig oder selten ausgeführt wird und ob dieser störungsfrei läuft oder störungsanfällig ist. Ähnlichkeit meint, ob es eine inhaltliche Verwandtschaft oder Gleichartigkeit zu dem zugehörigen Referenzprozess gibt.

Nach Durchführung dieser Bewertung können visuell auf einfache Weise ähnliche Prozessschritte erkannt werden. Sinnvolle Segmentierungen ergeben sich aus der Bildung möglichst großer Gruppen zusammenhängender Prozesse, die sehr ähnlich sind. Diese Gruppen stellen Produktionssegmente eines Szenarios dar, die im weiteren Verlauf der Methode hinsichtlich ihrer Effizienz beurteilt werden können.

Baureihe	Jahresproduktionsmengen	Montageschritt							
		Vorbereitung Bett	X-Achse	Y-Achse	Z-Achse	Steuerung	Option Wechsler	Option Halter	Option Kühlung
WZM 1	250	1 ●	●	●	●	2 ○	○	○	○
WZM 2	120	●	●	●	●	○	○	○	○
WZM 3	50	●	●	●	●	●	○	○	○
WZM 4	10	3 ○	○	○	●	○	○	○	○

Ausführung Referenzprozess:

- Immer und störungsfrei
- Selten oder störungsanfällig

Ausführung Vergleichsprozess:

- Immer und störungsfrei und gleichartig zu Referenzprozess
- Immer und störungsfrei und ähnlich zu Referenzprozess
- Selten oder störungsanfällig oder unterschiedlich zu Referenzprozess

1 2 3 Beispielhaftes Szenario für drei Produktionssegmente

Bild 86: Beispielhafte Anwendung eines Instruments zur Konzeption von Montage-segmenten

Führt die Orientierung an dem Renner-Produkt nicht zu sinnvollen Segmenten, kann in einem iterativen Prozess eine andere Baureihe als Referenzprozess definiert werden. Als Ergebnis sollten 3 bis 4 Szenarien mit jeweils einem bis fünf Segmenten (Erfahrungswert aus Benchmarking und Fallbeispielen) definiert werden. Ein Hinzufügen weiterer Szenarien im späteren Verlauf der Methode ist möglich.

B2 - Entwicklung von Segment-Wertströmen

Für jedes Montage-segment jedes Szenarios muss ein Wertstrom erfasst bzw. entwickelt werden. Jeder Segment-Wertstrom wird gebildet entsprechend dem modifizierten Wert-

strom aus Schritt A1. Die Herausforderung besteht darin eine ggf. hohe Anzahl an Wertströmen aufzunehmen. Bei Neuplanungen kommt erschwerend die Datenverfügbarkeit hinzu, so dass hier ggf. mit Schätzwerten gearbeitet werden muss. Bei der späteren Bewertung der Alternativen muss eine daraus entstehende Unsicherheit berücksichtigt werden.

B3 – Ermittlung der Prozessparameter

Die Ermittlung der Prozessfrequenz und der Prozessvarianz erfolgt analog Schritt A3 für jedes Monatesegment jedes Szenarios aus den Segment-Wertströmen.

B4 – Bewertung der Szenarien

Die Bewertung der Szenarien erfolgt anhand der in dieser Ausarbeitung ermittelten Verschwendungsniveaus der Benchmark-Produktionssysteme. Daraus folgt, dass nur der Einsatz der drei Arten Schlanker Produktionssysteme bewertet werden kann. Der Einsatz alternativer Produktionssysteme kann nicht beurteilt werden.

Das Bewertungsverfahren ist dreistufig und erfolgt separat für jedes Szenario (siehe Bild 87Bild 87: Ablauf der Bewertung von Montageszenarien an einem Beispiel). Zunächst werden alle Montagesegmente eines Szenarios in den ProduktionsSystemKompass eingeordnet, um das ideale Produktionssystem unter den gegebenen Rahmenbedingungen zu bestimmen. Dann wird anhand der Verschwendungsmuster der jeweiligen empfohlenen Produktionssysteme (siehe Bild 74) das Verschwendungsniveau für das jeweilige Montagesegment bestimmt. Im letzten Schritt werden die jeweils ermittelten Verschwendungen gewichtet und daraus die Gesamtverschwendung des Szenarios abgeleitet. Als Gewichtungsfaktor empfiehlt sich die jeweilige Montagezeit des Montagesegments p.a., da diese auch die Bezugsgröße für die Feststellung der Verschwendungsniveaus in dieser Ausarbeitung war.

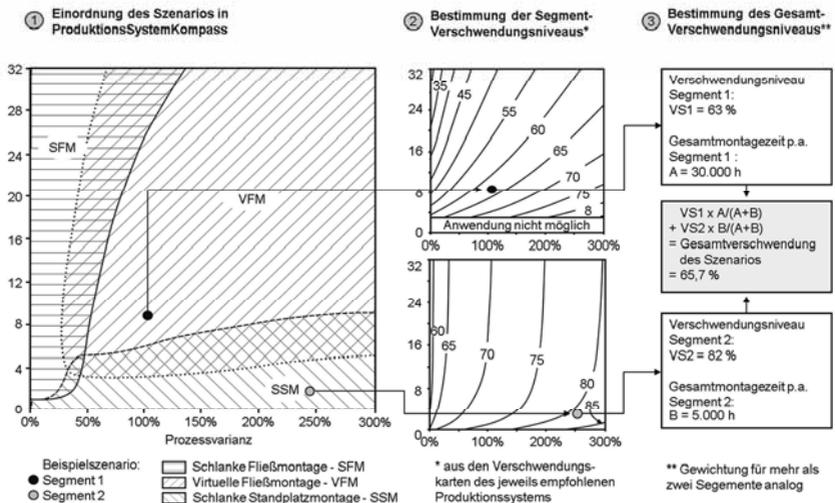


Bild 87: Ablauf der Bewertung von Montageszenarien an einem Beispiel

Es ist weiterhin zu beachten, dass die ermittelten Verschwendungsniveaus sich auf eine Referenzproduktion mit einer Prozessfrequenz von 32 und einer Prozessvarianz von 0% beziehen. Das Erreichen einer Gesamtverschwendung von 0% ist bei allen anderen Rahmenbedingungen im Definitionsbereich des ProduktionsSystemKompass nicht möglich. Insofern hat das absolute Verschwendungsniveau vor allem eine Bedeutung für den relativen Vergleich von Szenarien.

B5 – Auswahl eines Szenarios

Die Gesamtverschwendung für jedes Szenario wird in diesem Schritt verglichen, um das verschwendungsminimale Szenario auszuwählen. Dabei ist zu beachten, dass der ProduktionsSystemKompass einen Ungenauigkeitsbereich von ca. 5 % Verschwendung berücksichtigt (siehe Kapitel 6.5.1). Bei der Ermittlung der Verschwendungsniveaus muss diese Unsicherheit ebenfalls berücksichtigt werden. Insofern gilt beim Vergleich der Szenarios eine geringere Gesamtverschwendung von mehr als 5 % als signifikant (siehe Bild 88). Sollte die Gesamtverschwendung mehrerer Montageszenarios sich innerhalb dieses Bereichs befinden, so gelten all diese Szenarien als vergleichbar.

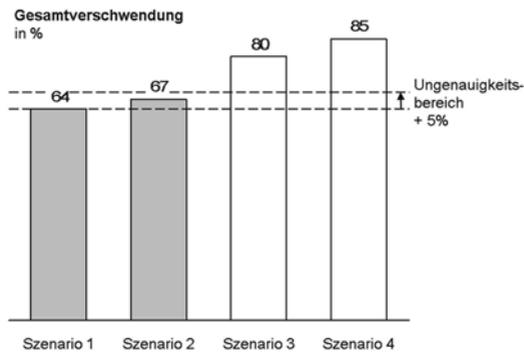


Bild 88: Vergleich mehrerer Montageszenarios

Da die Methode die Auswahl spezifischer schlanker Produktionssysteme unterstützt, ist analog zum Schritt A5 die Überprüfung der Umsetzbarkeit der Gestaltungsprinzipien ein wichtiger Bestandteil für die Auswahl eines Szenarios. Kann das Szenario mit der geringsten Gesamtverschwendung nicht umgesetzt werden, ist das nächstbeste Szenario zu wählen. Im Fall von mehreren vergleichbaren Szenarien, kann die Realplanung analog Schritt A5 helfen, ein umsetzbares Szenario mit der geringsten Gesamtverschwendung auszuwählen.

Sich aus dieser Planungsphase ergebende Szenarien können darüber hinaus in einem iterativen Prozess durch Wiederholung der Schritte des Methodenpfads das Lösungsspektrum ergänzen.

B6 - Umsetzungsplanung

Die Umsetzungsplanung sollte analog Schritt A6 ergebnis- und situationsabhängig in dem einem interdisziplinären Workshop erfolgen.

Die beiden Methodenpfade zeigen grundsätzliche Möglichkeiten zur Anwendung des ProduktionsSystemKompass auf, jedoch nicht die ausschließlichen Möglichkeiten. Wann immer eine Auswahlentscheidung für ein Produktionssystem unter den gegebenen Anwendungsbedingungen zu treffen ist, kann der ProduktionsSystemKompass eine nützliche Hilfestellung bieten.

7.3 Beispielhafte Anwendung der Methode: Neuplanung einer Montage

Zur Validierung der Anwendbarkeit der entwickelten Methode wurde eine Fallstudie über einen Zeitraum von mehr als vier Monaten durchgeführt. Im Folgenden soll nach einer kurzen Schilderung der Ausgangssituation im Fallbeispiel die Anwendung der Methode beschrieben werden.

7.3.1 Ausgangssituation und Aufgabenstellung

Die Fallstudie erfolgte bei einem mittelständischer WZM-Hersteller von Fräsmaschinen in Deutschland. Der Hersteller produziert hauptsächlich fünf Baureihen von Werkzeugmaschinen (BR1 bis BR5) mit einer Gesamtjahresproduktionsmenge von über 100 Maschinen. Dabei reicht das Produktspektrum von einfachen 3-Achs-Maschinen bis hochgenauen 5-Achs-Maschinen für verschiedene Anwendungsbereiche vom Maschinenbau bis zur Medizintechnik.

Der Werkzeugmaschinenhersteller konnte in den letzten Jahren eine stark positive Entwicklung des Umsatzes verzeichnen, so dass er nun vor der Aufgabe stand die Produktionskapazitäten deutlich zu erweitern. Im Zuge dieser Erweiterung sollte die komplette Montage hinsichtlich ihrer Effizienz beurteilt werden und Vorschläge zur zukünftigen Gestaltung der Produktionssysteme entwickelt werden. Dabei sollte sich an den Prinzipien der Schlanke Produktion und aktuellen Best Practices der Branche orientiert werden. Insbesondere sollte geprüft werden, inwiefern eine Fließmontage nach den Prinzipien der Schlanke Produktion umsetzbar ist. Die zu entwickelten Produktionssysteme sollten zudem auch entsprechend den positiven Absatzprognosen erweiterungsfähig sein. Zu diesem Zweck unterstützte der Verfasser dieser Ausarbeitung das Unternehmen unter Anwendung der entwickelten Methode zur Auswahl Schlanke Produktionssysteme.

Die Ausgangssituation der Montage stellte den typischen Entwicklungsstand eines Unternehmens dar, das an der Schwelle zur Produktion in mittleren bis großen Stückzahlen steht. Die Produktionsstruktur war gekennzeichnet durch weit verteilte Produktions- und Lagerorte. Lange Transportwege und isolierte Funktionalbereiche behinderten eine effiziente Montage. Die Montage selbst war ebenfalls klassisch organisiert in einfachen Standplatzmontagen für jede Baureihe, wobei die Anwendung von Prinzipien der Schlanke Produktion bisher noch keine breite Anwendung gefunden hat.

Im Vorfeld hat sich das Unternehmen entschlossen die räumlichen Restriktionen der bisherigen Produktion aufzulösen und den Produktionsstandort an einen Ort zu verlagern, der den aktuellen Raumbedarf abdeckte und Platz für zukünftige Erweiterungen bot. Dieser neue Produktionsstandort soll auch die Montagen der fünf Baureihen beherbergen. Neben den dadurch ergebenden räumlichen Restriktionen für die Auslegung der Montage, standen für die Entwicklung geeigneter Produktionssysteme sämtliche Daten der bisher existierenden Montage zur Verfügung sowie die Schätzungen der zukünftigen Absatzentwicklung jeder Baureihe.

7.3.2 Anwendung der Methode und Ergebnisse

Zur Lösung der Aufgabenstellung wurde ein interdisziplinäres Team aus Montagesteuerung, Montageleitung, Prozessoptimierern und Geschäftsleitung gebildet, die kontinuierlich die Durchführung der Methode sicherstellten. Weitere Spezialisten, z.B. die operativ tätigen Fachkräfte in der Montage, wurden bedarfsweise hinzugezogen. Der Umfang der Methodenanwendung umfasste sowohl Methodenpfad A als auch B, da sowohl eine neue Segmentierung der Montage als auch die Optimierung der Produktionssysteme angestrebt war. Der Aufwand für die Methodenanwendung erstreckte sich auf ca. 20 Tage, wovon ca. 10 Tage in Form von Workshops durchgeführt wurden.

Zunächst stand die Prüfung der Anwendungsbedingungen der Methode an. Der Werkzeugmaschinenhersteller lag mit allen fünf Baureihen innerhalb der Anwendungsgrenzen, so dass es keine Einschränkungen der Anwendbarkeit und Aussagekraft des ProduktionsSystemKompass zu erwarten waren.

Beginnend wurde der Methodenpfad B durchgeführt, um die richtige Wahl der Montagesegmente zu erschließen. Dazu wurden drei Montageszenarien gebildet:

- 1) 5 Produktionssysteme, eins für jede Baureihe (Ist-Zustand)
- 2) Ein einziges Produktionssystem für alle Baureihen
- 3) Vier Produktionssysteme, entsprechend der Ähnlichkeit der einzelnen Montageprozesse (in Anlehnung an Bild 86)

Für die Montageszenarien wurden die einzelnen Wertströme erfasst. Dabei stellte sich die Schwierigkeit heraus, dass keine statistischen Daten zur Verfügung standen, so dass auf Erfahrungswerte der Mitarbeiter an den einzelnen Montageprozessen zurückgegriffen werden musste. Mit diesen Daten ließen sich sowohl Prozessfrequenz als auch Prozessvarianz der einzelnen Montagesegmente bewerten und in den ProduktionsSystemKompass einordnen. Die folgende Berechnung der Gesamtverschwendung stellte insbesondere das dritte Szenario als klaren Sieger des Vergleichs heraus. Mit einer Gesamtverschwendung von 70 % lag es deutlich vor dem Szenario 1 (83 %). Das Szenario 2 (Multiproduktlinie) lag durch die hohe Prozessvarianz weit außerhalb des Definitionsbereichs des ProduktionsSystemKompass und kann als untauglich angesehen werden.

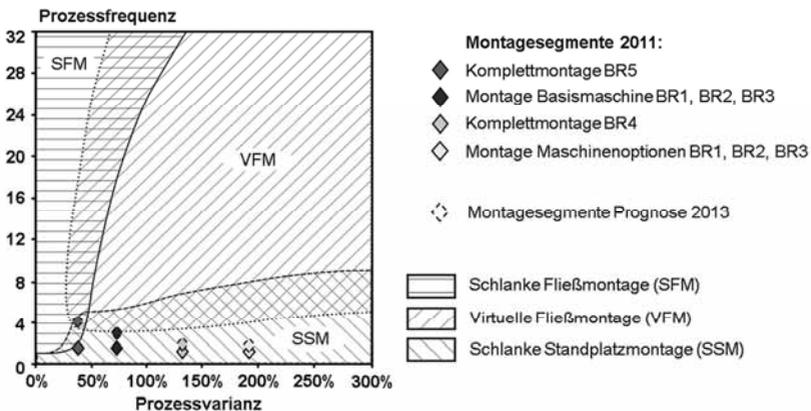


Bild 89: Szenario 3 der Untersuchung inkl. Prognose

Das Ergebnis ist nachvollziehbar vor dem Hintergrund, dass von den fünf Baureihen drei durch eine enge konstruktive Verwandtschaft gekennzeichnet sind (BR1, BR2, BR3), zwei Baureihen stellen separate Neuentwicklungen dar, die nur grundsätzliche Gemeinsamkeiten zueinander und den anderen Baureihen aufweisen. Die Kombination der ersten ca. 50 % der Montageschritte der Baugruppen BR1, BR2 und BR3 konnte zu einer deutlichen Erhöhung der Prozessfrequenz beitragen bei relativ geringer Prozessvarianz. Im weiteren Montageverlauf jedoch erhöht sich die Prozessvarianz derart durch die Vielfalt möglicher Montageoptionen, dass eine Splittung des Montageprozesses sinnvoll war. Im beschriebenen Szenario sind für alle Montagesegmente Schlanke Standplatzmontagen laut ProduktionsSystemKompass verschwendungsminimal. Damit konnte die Frage nach der Möglichkeit einer Fließmontage vorerst beantwortet werden. Weiterhin wurde eine Prognose durchgeführt, wie sich die Prozessfrequenz in naher Zukunft verändern wird. Diese zeigt gerade für die BR5 eine deutliche Erhöhung der Prozessfrequenz, so dass ein späterer Umbau des Produktionssystems in eine Schlanke Fließmontage sinnvoll ist und so auch bei der anschließenden Layoutplanung des Produktionssystems berücksichtigt wurde durch eine linienförmige Anordnung der Standplätze. Das sollte den späteren Umbau des Produktionssystems im Bedarfsfall erleichtern.

Die so ermittelten Montagesegmente wurden in mehreren Workshops mit positivem Ergebnis auf Umsetzbarkeit überprüft. Insbesondere wurden entsprechend des Methodenpfads A auch die Gestaltungsprinzipien der derzeitigen Produktionssysteme mit den Empfehlungen des ProduktionsSystemKompass verglichen. Dabei wurden die konventionellen Standplatzmontage mit den Schlanken Standplatzmontagen verglichen. Es eröffnete sich dabei vor allem, dass der Materialfluss deutliches Verbesserungspotential bot (siehe Bild 90), die Organisation des Hauptprozesses unterschied sich prinzipiell kaum. Die Verbesserungspotentiale wurden ebenfalls im Team verabschiedet und deren Umsetzung angestoßen.

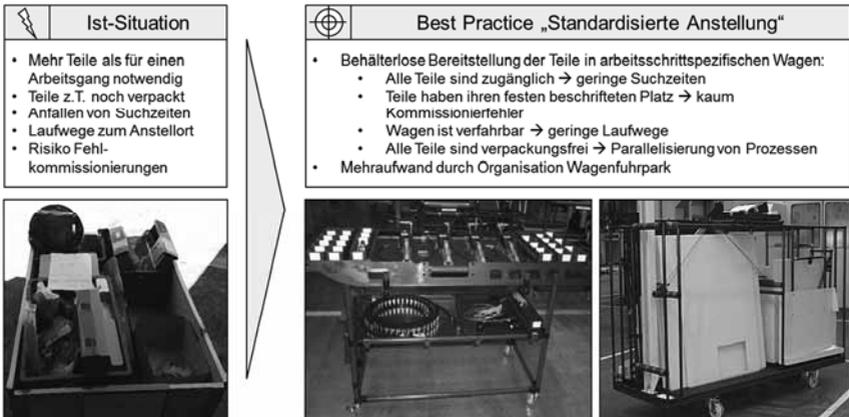


Bild 90: Beispielhafte Optimierungsmaßnahme Teileanstellung¹⁶⁵

¹⁶⁵ Best Practice-Bilder aus Trumpf (2003).

7.3.3 Diskussion der Anwendbarkeit

Die entwickelte Methode hat sich als anwendbar herausgestellt. Dabei hat sich die zentrale Stellung des einfach nachvollziehbaren ProduktionsSystemKompass als ein Hauptfaktor für die erfolgreiche Anwendung der Methode herausgestellt, genauso wie die Erarbeitung der Ergebnisse in enger Zusammenarbeit mit dem Unternehmen. Ebenfalls kann auch die Ergebnisqualität aus dem Fallbeispiel überzeugen. So wurden die Ergebnisse von den Entscheidern durch die gute Nachvollziehbarkeit akzeptiert und getragen. Der Umzug der neuen Montage wurde sodann verabschiedet und soll bis Mitte 2012 abgeschlossen sein. Abschließend kann die real umgesetzte Leistungssteigerung der gesamten Montage erst dann bewertet werden. Es konnte aber bereits in der Schlussphase dieser Ausarbeitung ein Teil des Konzepts verwirklicht werden: die gemeinsame Montage der Grundmaschinen von BR1, BR2 und BR3. Hier haben sich bereits die positiven Effekte der Neusegmentierung in einer deutlichen Reduzierung der Durchlaufzeit um mehrere Tage gezeigt.

Ebenso positiv hervorzuheben ist die Tatsache, dass die anfängliche Vision von dem Aufbau einer Fließmontage (wie sie von vielen Herstellern zum Ziel erklärt und häufig später wieder revidiert wurde) sachlich bewertet werden konnte. So wurde gezeigt, dass für einen Großteil der Prozesse die Prozessvarianz zu hoch ist und in allen Fällen die Stückzahl nicht ausreicht, um zum Zeitpunkt der Untersuchung einer solchen Organisation umzusetzen. Gleichzeitig konnte aber auch konkret aufgezeigt werden, wie die Prozessvarianz verringert werden kann und ab welchen Stückzahlen die Einrichtung einer Fließmontage sinnvoll ist. Damit sind dem Hersteller Parameter an die Hand gegebenen, die für einen Zielbildungsprozess geeignet und nachverfolgbar sind. Im konkreten Fall hat sich aus der Untersuchung eine Vielzahl von Maßnahmen ergeben, die durch das Unternehmen angestoßen wurden, um die Varianz der Montageprozesse zu verringern.

7.4 Zusammenfassung

Das Ziel dieses Kapitels war die Einbettung des ProduktionsSystemKompass in eine einfach anwendbare Methode, um die Auswahl von schlanken Produktionssystemen für Werkzeugmaschinenhersteller zu ermöglichen. Dazu wurde basierend auf den Hauptzielgruppen dieser Ausarbeitung eine Methode entwickelt, die zwei Methodenpfade vorsieht – die Optimierung einer bestehenden Montage und die Neusegmentierung einer Montage. Die Methodenpfade und deren Anwendung wurden beschrieben und mit Anwendungsbeispielen angereichert. Insbesondere wurde in einem umfangreichen Fallbeispiel die Anwendbarkeit der Methode belegt und die Ergebnisqualität bestätigt. Neben diesem Fallbeispiel wurden noch zwei weitere Fallbeispiele durchgeführt, die aus Platzgründen nicht in diese Ausarbeitung aufgenommen wurden. Eines dieser Fallbeispiele wurde branchenfremd im Yachtbau durchgeführt. Die enge Verwandtschaft der Art des Montageprozesses (große Produkte, ähnliche Jahresproduktionsmengen, lange Montagezeiten, lange Durchlaufzeiten, Fertigung nur nach Kundenbestellung) führte auch hier zu einer Erfüllung der Anwendungsbedingungen der Methode. Beide Fallbeispiele bestätigten ebenfalls die Anwendbarkeit und die Ergebnisqualität des beschriebenen Ansatzes und zudem die Übertragbarkeit der Methode auf Branchen mit ähnlichen Montagebedingungen.

8. Schlussbetrachtung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methode zur Auswahl Schlanker Produktionssysteme für die Montage im Werkzeugmaschinenbau entwickelt. Die Methode gründet auf einem umfangreichen Benchmarking von Produktionssystemen im Werkzeugmaschinenbau und auf die Durchführung eines Simulationsexperiments. Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz des ProduktionsSystemKompass stellt ein einfaches System zur Auswahl von Schlanken Produktionssystemen unter definierten Rahmenbedingungen dar. Der ProduktionsSystemKompass konnte letztlich in eine Methode überführt werden, die sich in verschiedenen Fallbeispielen als geeignet herausgestellt hat, einen Beitrag zur Beantwortung der Fragestellung nach dem optimalen Produktionssystem zu leisten.

Im Ergebnis konnte insbesondere gezeigt werden:

- wie „Schlanke Produktionssysteme“ inhaltlich von „Klassischen Produktionssystemen“ abgegrenzt sind, da sie vor allem nicht-technische, organisatorische Felder der Produktion gestalten.
- dass die Schlankeit einer Produktion nicht ausschließlich durch die Anwendung oder Nichtanwendung von klassischen Methoden der Schlanken Produktion definiert werden kann, da die Einsatzfähigkeit der Methoden branchen- und unternehmensspezifisch ist.
- wie der Grad der Schlankeit von Endmontagen gemessen werden kann, indem ein Kennzahlensystem zur Beurteilung der Verschwendung von Produktionssystemen entwickelt wurde.
- wie Produktionssysteme und deren Ausgestaltung beschrieben und verglichen werden können, unabhängig von Methoden der Schlanken Produktion und offen für alternative Gestaltungsoptionen.
- dass es zumindest drei Arten von Produktionssystemen im Werkzeugmaschinenbau gibt, die abhängig von deren Einsatzbedingungen bzw. Rahmenbedingungen der Montage als „schlank“ zu bezeichnen sind.
- welche Rahmenbedingungen, nämlich die Prozessfrequenz und die Prozessvarianz, den optimalen Einsatz unterschiedlicher Arten von Schlanken Produktionssystemen bestimmen.
- unter welchen Rahmenbedingungen die drei Arten von Schlanken Produktionssystemen eingesetzt werden können, um „schlank“ bzw. verschwendungsminimal zu produzieren.

Mit diesen Ergebnissen konnten alle in Kapitel 3 formulierten Forschungsthesen bestätigt werden. Damit konnte ein wissenschaftlicher Beitrag zum Verständnis Schlanker Produktionssysteme geleistet werden, der insbesondere in der Erkenntnis begründet liegt, unter welchen Rahmenbedingungen der Montage welche Art von Produktionssystem einzusetzen ist, um eine hohe Leistungsfähigkeit der Produktion bzw. niedrige Verschwendung in der Produktion zu erreichen. Die Erkenntnisse wurden im industriellen Umfeld positiv hinsichtlich Anwendbarkeit und Nutzenstiftung überprüft.

Obwohl das Resümee dieser Ausarbeitung und die Bestätigung der getroffenen Forschungsthese als positiv beurteilt werden kann, sei an dieser Stelle nochmal auf die Einschränkungen der entwickelten Methode hingewiesen, um insbesondere auch das Weiterentwicklungspotential aufzuzeigen.

Als wesentlicher Erfolgsfaktor für die Umsetzbarkeit dieser Arbeit und zugleich als größte Einschränkung der zu entwickelten Methode ist die Fokussierung auf den Funktionalbereich der Montage und die Branche des Werkzeugmaschinenbaus. Zwar hat sich gezeigt, dass die Methode grundsätzlich auch auf andere Branchen übertragbar ist, eine abschließende Bewertung der Übertragbarkeit der Methode ergibt sich daraus jedoch nicht. So liegen große Potentiale in einer Erweiterung der Methode hinsichtlich anderer Funktionalbereiche eines Unternehmens, wie z.B. Teilefertigung oder Logistik, und weiterer Branchen, wie z.B. Automobilbau, Gerätebau, Medizintechnik. Die Erweiterung um andere Funktionalbereiche sollte dabei mit einer jeweils separaten Auswahllogik erfolgen, um die Komplexität der Methodenanwendung so gering wie möglich zu halten. Die Erweiterung auf andere Branchen sollte zunächst durch eine Erweiterung des bestehenden Produktionssystemkompass vorgenommen werden und damit seiner Grenzen für die Rahmenbedingungen der Montage (Prozessfrequenz, Prozessvarianz) und der Vielfalt möglicher schlanker Produktionssysteme (Schlanke Fließmontage, Virtuelle Fließmontage, Schlanke Standplatzmontage).

Hinsichtlich der Ergebnisqualität ist festzustellen, dass die erzielten Ergebnisse geeignet sind eine Entscheidung bezüglich einer Auswahl eines Produktionssystems zu unterstützen. Damit stellt die Methode eine Entscheidungshilfe dar. Die erzielbare Ergebnisqualität beim Einsatz der Entscheidungshilfe reicht unter Umständen nicht aus, um in allen Fällen zu einer klaren Auswahl von Produktionssystemen zu kommen. Aus Sicht des Verfassers lässt sich die Ergebnisqualität des Produktionssystemkompass zumindest steigern. Ein wesentlicher Treiber für die Unsicherheiten der Ergebnisse resultiert aus der Nutzung des Benchmarking zur Zielerreichung. Das garantiert zwar zum einen die praktische Relevanz der erzielten Ergebnisse, zum anderen beschränkt es aber auch den Lösungsraum. So kann es sowohl praktisch als auch theoretisch weitere Produktionssysteme geben, die neben den drei identifizierten Produktionssystemen unter gewissen Rahmenbedingungen als „schlank“ gelten können. Insbesondere in Kombination mit der Erweiterung der Untersuchung auf andere Branchen zu einer Erweiterung des Lösungsraums führen. Des Weiteren erfolgte die Modellierung der Produktionssysteme im Simulationsexperiment bewusst reduziert auf den Hauptprozess von Produktionssystemen. Eine Erweiterung der Simulationsmodelle um den Teilefluss, die Instandhaltung und Qualitätsprozesse kann zu einer weiteren Erhöhung der Ergebnisqualität beitragen.

„Eine gute Idee erkennt man daran, dass sie kopiert wird.“¹⁶⁶ Die entwickelte Methode zur Auswahl schlanker Produktionssysteme bietet großes Potential zur direkten Anwendung als auch zur substantiellen Weiterentwicklung. Insofern bleibt die Hoffnung des Verfassers mit der entwickelten Methode sowohl Industrie als auch Wissenschaft zur Nutzung anzuregen.

¹⁶⁶ Zitat Rudolf Wijbrand Kesselaar alias Rudi Carrell (1934-2006)

Literaturverzeichnis

- ABELE, E. (2011): Integrierte Produkt- und Prozessentwicklung: Methoden, Defizite und Herausforderungen im Werkzeugmaschinenbau. Würzburg 10.05.2011 (Konferenzbeitrag für „Intelligenter Produzieren“).
- Abele, E.; Dervisopoulos, M. (2008): CO\$TRA – life cycle costs transparent. URL: http://www.stiftung-indutrieforschung.de/images/stories/dokumente/forschung/life_cycle/abschlussbericht_costra.pdf, zuletzt besucht am 09.05.2012.
- ABELE, E.; REINHART, G. (2011): Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München 2011.
- ABELE, E.; RUMPEL, G.; MEUDT, T. (2011): Schlanke Montage von Werkzeugmaschinen: Ein typenorientierter Gestaltungsansatz für Lean Production. In: wt-online 101 (2011) 9 S. 585 ff.
- ARNOLD, D. (2004): Handbuch Logistik. 2., aktualisierte und korrigierte Auflage, Berlin [u.a.] 2004.
- ARNOLD, D.; ISERMANN, H.; KUHN, A.; TEMPELMEIER, H.; FURMANS, K. (2007): Handbuch Logistik. 3., neu bearbeitete Auflage, Berlin 2007.
- AURICH, J. C.; DREWS, O.; FUCHS, C.; WAGENKNECHT, C. (2006): Produktionssysteme für den Mittelstand: Gestaltung prozessorientierter Produktionssysteme unter Flexibilitätsgesichtspunkten. In: wt-online 96 (2006) 5 S. 302 ff.
- AURICH, J. C.; GOMEZ, K.; FELIPE, A.; DREWS, O.; WAGENKNECHT, C. (2006): Flexibilitätsorientiertes Produktionssystem für den Mittelstand: Ein Konzept zur unternehmensspezifischen Gestaltung und Einführung. In: ZWF 101 (2006) 12 S. 709 ff.
- BARTH, H. (2005): Produktionssysteme im Fokus. In: wt-online 95 (2005) 4 S. 269 ff.
- BASZENSKI, N.; PIERSON, K. (2003): Methodensammlung zur Unternehmens-Prozess-Optimierung. Köln 2003.
- BECKER, M.; KORGE, A.; SCHOLTZ, O. (2003): Ganzheitliche Produktionssysteme – Erhebung zur Verbreitung und zum Forschungsbedarf: Ergebnisse einer Kurzstudie zu Unternehmen in Deutschland. Stuttgart 2003.
- BECKER, T. (2008): Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren. 2., neu bearbeitete u. erweiterte Auflage, Berlin 2008.
- BÖGE, A. (Hrsg.) (2007): Vieweg Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik. 18., überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden 2007.
- BRECHER, C.; WECK, M. (2005): Werkzeugmaschinen 1 - Maschinenarten und Anwendungsbereiche. New York 2005.

- DEUSE, J.; STAUSBERG, J. R.; WISCHNIEWSKI, S. (2007): Leitsätze zur Gestaltung einer verschwendungsarmen Produktion: Adaption von Ganzheitlichen Produktionssystemen für den Mittelstand. In: ZWF 102 (2007) 5 S. 291 ff.
- DICKMANN, P. (Hrsg.) (2009): Schlanker Materialfluss mit Lean-Production, Kanban und Innovationen. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage, Berlin, Heidelberg 2009.
- DOMBROWSKI, U. et al (2006): Strukturelle Analyse ganzheitlicher Produktionssysteme. In: ZWF 101 (2006) 3 S. 114 ff.
- DOMBROWSKI, U.; HENNERSDORF, S.; SCHMIDT, S. (2006): Grundlagen Ganzheitlicher Produktionssysteme: Aus der Herkunft für die Zukunft lernen. In: ZWF 101 (2006) 4 S. 172 ff.
- DOMBROWSKI, U.; LEICHNITZ, H.; HANKE, T. (2008): GPS-Einführung bei laufender Produktion: Über Kaizen-Workshops zum Ganzheitlichen Produktionssystem. In: Industrial Engineering (2008) 1 S. 8 ff.
- DOMBROWSKI, U.; PALLUCK, M.; SCHMIDT, S. (2006): Typologisierung Ganzheitlicher Produktionssysteme. In: ZWF 101 (2006) 10 S. 553 ff.
- DOMBROWSKI, U.; QUACK, S. (2007): Kontinuierliche und systematische Tuning- und Anpassungsmaßnahmen während des Fabrikbetriebs. In: ZWF 102 (2007) 12 S. 839 ff.
- DYCKHOFF, H., Produktionstheorie: Grundzüge industrieller Produktionswirtschaft, Berlin, Heidelberg 2006.
- ENGINEERING DEVELOPMENT BOARD (2006): CNC Machine Tool Assembly, URL: <http://www.engineeringpakistan.com/EngPak/CNC%20Machine%20Tool%20Assembly.ppt>, zuletzt besucht am: 08.05.2012.
- ERLACH, K. (2006): Wertstromdesign. New York 2007.
- ESTER, M. (2000): Knowledge discovery in databases: Techniken und Anwendungen. Berlin 2000.
- EVERSHEIM, W. (1987): Strategien zur Rationalisierung der Montage: Einzel- und Kleinserienproduktion komplexer Produkte. Düsseldorf 1987.
- EVERSHEIM, W. (1989): Fertigung und Montage. 2., neubearbeitete und erweiterte Auflage, Düsseldorf 1989.
- EX-CELL-O (2005): Ex-Cell-O Fließmontage, URL: <http://www.zerspanungstechnik.de/News/2005/6/12/ex-cell-o-fließmontage>, zuletzt besucht am: 25.06.2011.
- FANDEL, G. (2005): Produktions- und Kostentheorie. 6. Auflage, Berlin 2005.
- FLEISCHER, J.; LANZA, G.; PETER, K. (2008): Wie schlank muss die Kleinserienproduktion sein?: Quantifizierte Wirkzusammenhänge von Lean Methoden und der Leistungsfähigkeit von Produktionssystemen. In: wt-online 98 (2008) 9 S. 754 ff.

- FREI F.; HUGENTOBLER M.; ALIOTH, A.; DUELL, W.; RUCH, L. (1996): Die kompetente Organisation: Qualifizierende Arbeitsgestaltung - die europäische Alternative. 2., überarbeitete Auflage, Zürich 1996.
- FRÖMING, J. (2009): Ein Konzept zur Simulation wissensintensiver Aktivitäten in Geschäftsprozessen. Berlin 2009.
- GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON (2009): Die ganze Welt der Wirtschaft: Betriebswirtschaft, Volkswirtschaft, Wirtschaftsrecht und Steuern. 17., komplett überarbeitete Auflage, Wiesbaden 2009.
- GARDNER PUBLICATIONS INC. (2001): Metalworking Insiders' Report: Machine Tool Scoreboard. URL: <http://www.metalworkinginsider.info/scoreboard.htm>, zuletzt besucht am: 25.06.2011.
- GEISSLER, A. (2007): Kontinuierlicher Fluss in der Kleinserienfertigung: Best Practice Deckel Maho. Aachener Management Tage [7. - 9. November 2007] ; Tagungsband, Aachen 2007.
- GEIST, M. (1981): Die Führung des Betriebes. Stuttgart 1981.
- GÜNTER, A. (1995): Wissensbasiertes Konfigurieren: Ergebnisse aus dem Projekt Prokon. Sankt Augustin 1995.
- GÜNTHER, H.-O.; TEMPELMEIER, H. (2009): Produktion und Logistik. Berlin 2009.
- HÄMMERLE, M.; /RALLY, P. (2010): Wertschöpfung steigern: Ergebnisse der Datenerhebung über die Verbreitung und Ausgestaltung von Methoden zur Prozessoptimierung in der Produktion mit besonderem Fokus auf die Wertstrommethode. Stuttgart 2010.
- HARTUNG, J.; ELPELT, B.; KLÖSENER, K.-H. (2005): Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. München, Wien, Oldenbourg 2005.
- HEISERICH, O.-E. (2002): Logistik: Eine praxisorientierte Einführung. 3., überarbeitete Auflage, Wiesbaden 2002.
- HESSE, W.; MERBETH, G.; FRÖLICH, R.; ENDRES, A. (1992): Software-Entwicklung: Vorgehensmodelle, Projektführung, Produktverwaltung, München 1992.
- HINRICHSSEN, S. (2002): Ganzheitliche Produktionssysteme: Begriffe, Funktionen, Stand der Umsetzung und Erfahrungen. In: FB/IE – Zeitschrift für Unternehmensentwicklung und Industrial Engineering 51 (2002) 6 S. 251 ff.
- HIRSCH, W. Z. (1952): Manufacturing Progress Functions. In: Review of Economics and Statistics 2 (1952) 34 S. 143 ff.
- HOESCHEN, A. (2007): Varianten, Preisdruck und Termine: Wie kann auch der Mittelstand den steigenden Anforderungen an Variantenvielfalt und Lieferzeiten gerecht werden? Köln 2007.

- IFM (2010): Schlüsselzahlen des Mittelstands. Bonn 2010.
- INSTITUT DER DEUTSCHEN WIRTSCHAFT (2008): Produktivität und Lohnstückkosten der Industrie im internationalen Vergleich. Köln 2008.
- JODLBAUER, H. (2007): Produktionsoptimierung: Wertschaffende sowie kundenorientierte Planung und Steuerung. Wien 2007.
- JORDAN, G (2010):., Erfolgsfaktoren von produzierenden Unternehmen in Deutschland, Karlsruhe 09.-10.03.2010 (Konferenzbeitrag für „10. Karlsruher Arbeitsgespräche“).
- KEMPPAINEN, K.; VEPSA, A.; TINNILA, M. (2008): Mapping the structural properties of production process and product mix: In: International Journal Production Economics (2008) 713–728 111 (2008) S. 713 ff.
- KIENER, S.; MAIER-SCHEUBECK, N. (2002): Produktions-Management: Grundlagen der Produktionsplanung und –steuerung. München 2002.
- KIENER, S. (2009): Produktions-Management: Grundlagen der Produktionsplanung und –steuerung. 9., verbesserte und erweiterte Auflage, München 2009.
- KLETTI, J.; SCHUMACHER, J. (2011): Die perfekte Produktion: Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT). Berlin 2011.
- KLUG, F. (2010): Logistikmanagement in der Automobilindustrie: Grundlagen der Logistik im Automobilbau. In: Logistikmanagement in der Automobilindustrie (2010).
- KLUGE, S. et al (2009): Managementsysteme vom Typ Toyota: In Klein- und mittelständischen Unternehmen des Maschinenbaus und der Elektroindustrie. In: wt-online 99 (2009) 3 S. 141 ff.
- KÖHLER, R. (1977): Empirische und handlungstheoretische Forschungskonzeptionen in der Betriebswirtschaftslehre: Bericht über die Tagung in Aachen. März 1976, 1. Aufl., Stuttgart 1977.
- KORTMANN, C.; UYGUN, Y. (2007): Ablauforganisatorische Gestaltung der Implementierung von Ganzheitlichen Produktionssystemen. In: ZWF 102 (2007) 10 S. 635 ff.
- KRATZSCH, S. (2000): Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen. Essen 2000.
- KREUZ, W. (1995): Mit Benchmarking zur Weltspitze aufsteigen: Strategien neu gestalten, Geschäftsprozesse optimieren, Unternehmenswandel forcieren. Landsberg/Lech 1995.
- KRYSTEK, U. (2003): Benchmarking – Auf der Suche nach Best Practices. In: Werkstatt und Betrieb 23 (2003) S. S. 969-975 ff.
- KUDLICH, T. (2000): Optimierung von Materialflusssystemen mit Hilfe der Ablaufsimulation. Dissertation München 2000.

- KÜHN, W. (2006): Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner. München 2006.
- LANZA, G.; PETER, K.; UDE, J. (2008): Ganzheitliche Produktionssysteme: Wann, Warum, Wie? Kurzstudie mit acht ausgewählten Unternehmen. In: Industrie Management 24 (2008) 5 S. 49 ff.
- LAY, G.; ZANKER, C. (2008): Planungsinstrumente zur Verwirklichung Ganzheitlicher Produktionssysteme in kleinen und mittleren Unternehmen. In: wt-online 98 (2008) 4 S. 242 ff.
- LAY, G.; NEUHAUS, R. (2005): Ganzheitliche Produktionssysteme (GPS) – Fortführung von Lean Production? In: angewandte Arbeitswissenschaft 185 (2005) S. 32 ff.
- LIEBAU, H.-D. (2002): Die Lernkurven-Methode. Stuttgart 2002.
- LOTTER, B.; WIENDAHL, H.-P. (Hrsg.) (2006): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg 2006.
- MCKINSEY&COMPANY (HRSG.) (2009): Made in Germany – Zukunftsperspektiven für die Produktion in Deutschland. München 2009.
- MEUDT, T. (2011): Modellierung, Simulation und Bewertung verschiedener Organisationsformen der Montage zu typischen Produktionsbedingungen. Studienarbeit betreut von Guido Rumpel, Darmstadt 2011.
- MEYER, C. (2007): Betriebswirtschaftliche Kennzahlen und Kennzahlen-Systeme. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage, Sternenfels 2007.
- MITTELHUBER, B.; KALLMEYER, O. (2002): Wertstromdesign – Ein Werkzeug des Toyota-Production-Systems. In: wt-online 92 (2002) 3 S. 79 ff.
- MTM (2001): Das Ganzheitliche Produktionssystem: Expertenwissen für neue Konzepte. Hamburg 2001.
- NEBL, T. (2004): Produktionswirtschaft. 5., unwesentlich veränderte Auflage, München, Wien 2004.
- NEEB, H.-P. (1999): Einsatzmöglichkeiten von ausgewählten Data Mining Verfahren im Bereich Financial Services. Diplomarbeit, München 1999.
- OELTJENBRUNS, H. (2000): Organisation der Produktion nach dem Vorbild Toyotas: Analyse, Vorteile und detaillierte Voraussetzungen sowie die Vorgehensweise zur erfolgreichen Einführung am Beispiel eines globalen Automobilkonzerns. Aachen 2000.
- PETERSEN, T. (2005): Organisationsformen der Montage: Theoretische Grundlagen, Organisationsprinzipien und Gestaltungsansatz. Aachen 2005.
- RABE, M. (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg 2008.

- REINHART, G.; ZÄH, M. F.; HABICHT, C.; NEISE, P. (2003): Einführung schlanker Produktionssysteme: Methoden und Vorgehensweisen. In: wt-online 93 (2003) 9 S. 571 ff.
- ROENPAGE, O.; LUNAU, S. (2007): Six Sigma+Lean Toolset: Verbesserungsprojekte erfolgreich durchführen. 2., überarbeitete Auflage, Berlin, New York 2007.
- ROTHER, M.; SHOOK, J.; WIEGAND, B. (2006): Sehen lernen: Mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen. Aachen 2006.
- RUEHLING, M. (2008): Das Konzept des Benchmarking. Darstellung und kritische Würdigung. München 2008.
- SACHS, L. (2004): Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden. 11., überarbeitete und aktualisierte Auflage, Berlin 2004.
- SALTELLI, A. (2004): Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models. Hoboken 2004.
- SCHUH, G.; GOTTSCHALK, S.; GULDEN, A.; KOCH, S. (2007): Effiziente Gestaltung der Montage im Maschinen- und Anlagenbau: Lean Production als Gestaltungsansatz. In: wt-online 97 (2007) 9 S. 633 ff.
- Seeger, K. (2009): Entwicklung einer Systematik zur Beschreibung und Bewertung ausgewählter Methoden der Produktionsoptimierung. Studienarbeit, betreut durch Guido Rumpel, Darmstadt 2009.
- SIMON, S. (2007): Benchmarking im Werkzeugmaschinenbau: Ein Beitrag zur wettbewerbsfähigen Produktentwicklung. Saarbrücken 2007.
- SKODOWSKI, R. (2008): X-Means: Ein Algorithmus zur Clusterbildung unter selbstständiger Abschätzung der optimalen Clusteranzahl. München 2008.
- SPATH, D. (Hrsg.) (2003): Ganzheitlich produzieren: Innovative Organisation und Führung. Stuttgart 2003.
- STEVEN, M. (2007): Handbuch Produktion: Theorie - Management - Logistik – Controlling. Stuttgart 2007.
- STÖLZLE, W.; HENSLER, K. F.; KARRER, M (2004): Erfolgsfaktor Bestandsmanagement: Konzept – Anwendung – Perspektiven. Zürich 2004.
- STRUKTUR MANAGEMENT PARTNER (2010): Werkzeugmaschinenbau in China. Köln 2010.
- THOMAS, K. (2010): Optimierung von Materialflusssystemen mit Hilfe von Ablaufsimulationen. Dissertation, München 2010.
- TRUMPF (2003): Mit Synchro zur Fabrik des Jahres. Ditzingen 24.02.2003 (Konferenzbeitrag für Intech 2003).

- TRUMPF GRÜSCH (2010): Von Trumf lernen heißt siegen lernen. URL: <http://weltderfertigung.de/archiv/jahrgang-2010/ausgabe-februar-2010/trumpf-werkgruesch.php>, zuletzt besucht am 26.05.2011.
- ULLMANN, G. (2010): Expertensysteme zur Bereitstellung von Produktionssystemwissen für den Werkzeug- und Formenbau. In: Behrens, B.-A.; Nyhuis, P.; Overmeyer, L. (Hrsg.): Berichte aus dem IPH, Band 05/2010, PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, Garbsen 2010.
- ULRICH, P. (1990): Rechnerintegrierter automatisierter Betrieb. München 1990.
- VDW (2010): Die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie im Jahr 2010. Frankfurt am Main 2010.
- WEBER, J.; SCHÄFFER, U. (2000): Balanced Scorecard & Controlling: Implementierung - Nutzen für Manager und Controller - Erfahrungen in deutschen Unternehmen. 3., überarbeitete Auflage, Wiesbaden 2000.
- WILDEMANN, H. (1989): Die modulare Fabrik. 2.Aufl. GFMT, München 1989.
- WILDEMANN, H.; BAUMGÄRTNER, G. (2006): Suche nach dem eigenen Weg: Individuelle Einführungskonzepte für schlanke Produktionssysteme. In: ZWF 101 (2006) 10 S. 546 ff.
- WILLNECKER, U. (2000): Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen. Dissertation, München 2000.
- WOMACK, J.; JONES, D.; ROOS, D. (1991): The machine that changed the world: How Japan's secret weapon in the global auto wars will revolutionize western industry. 1st Harper Perennial, New York 1991.
- ZÄH, M. F.; AULL, F. (2006): Lean Production-Methoden und Interdependenzen: Untersuchung der Interdependenzen von Lean Production-Methoden auf Basis von T. Ohno, S. Shingo und H. Takeda. In: wt-online 96 (2006) 9 S. 683 ff.
- ZAHN, E. (1993): Die strategische Renaissance des Unternehmens. In: ZAHN, E. (Hrsg.): Fit machen für den Wettbewerb. S. 1 ff.
- ZÜLCH, G. (1994): Vereinfachen und verkleinern: Die neuen Strategien in der Produktion. Stuttgart 1994.

Normen

- DIN 69651 (1985): Werkzeugmaschinen für die Metallbearbeitung, Berlin 1985.
- VDI 3633 (2010): Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen, Düsseldorf 2010.
- VDI 2815, 2860 (1978): Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung; Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Düsseldorf 1978.

Anhang

A) Grundlegende Methoden und Werkzeuge der Schlanke Produktion¹⁶⁷

Methoden I

Bezeichnung	Kurzbeschreibung
5S	Schaffung von Ordnung und Sauberkeit am Arbeitsplatz sowie Verstetigung der Einhaltung
Wertstromanalyse	Analyse und Darstellung von Informations- und Materialflüssen
Wertstromdesign	Konzeption von Zielzuständen von Informations- und Materialflüssen
Heijunka, Produktionsglättung	Abstimmung der Produktionsmenge und der produzierten Varianten zur Stabilisierung des Produktionsprozesses
Kanban	Verbrauchsorientierte Materialbereitstellung und Produktionsauslösung mit Meldebeständen
Milkrun	Regelmäßige, kurzzyklische Versorgung von mehreren Bedarfsorten im Produktionsprozess mit Materialien
Perlenkette	Festlegung der Reihenfolge von Produktvarianten in einem Produktionsprozess
Poka Yoke	Vermeidung von Qualitätsproblemen im Produktionsprozess durch einfache Vorrichtungen, z.B. Schablonen
SMED	Single Minute Exchange of Dies, Vorgehen zur Analyse und Optimierung von Rüstprozessen
Supermarkt	Lagerort für Materialien mit festgelegten, standardisierten Materialarten und -menge
Taktung	Durchführung des Produktionsprozesses im Rhythmus des Kundentakts
Gruppenarbeit, Shojinka	(Teilweise) selbstständige, eigenverantwortliche Planung und Steuerung von Kleingruppen in der Produktion
U-Layout	Anordnung von Arbeitsplätzen entlang einer U-Form, so dass Eingang und Ausgang der Linie ortsnah sind
SPC	Statistical Process Control, Konzept zur statistischen Qualitätskontrolle von Produktionsprozessen
one-piece-flow	Durchführung von Produktionsprozessen in der Losgröße 1 zur Reduzierung von Durchlaufzeit und Beständen
Fließfertigung	Konzept des ununterbrochenen Flusses des Produkts durch den Produktionsprozess
Jidoka	Ausstattung von Maschinen mit einfachen Vorrichtungen zur Fehlervermeidung und -erkennung
Hoshin Kanri	Konzept zur Steuerung des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses

¹⁶⁷ Auswahl in Anlehnung an Seeger (2009)

Methoden II

Bezeichnung	Kurzbeschreibung
Just-in-Time (JIT)	Konzept zur qualitäts-, mengen- und zeitpunktgerechten Lieferung von Materialien
Just-in-Sequence (JIS)	Erweiterung des JIT-Konzepts um die Anlieferung von Materialien in der richtigen Reihenfolge
TPM	Total Productive Maintenance, Konzept zur Erhöhung der Effizienz von Produktionsanlagen
Low-Cost-Automation	Optimierung von Produktionsanlagen mit einfachen Vorrichtungen, z.B. Schalter, Auswurfmechaniken
Flexible Mitarbeiter-systeme	Konzept zum Betreiben eines Produktionsabschnitts mit unterschiedlicher Personalkapazität bzw. Ausbringung
Ein-Lager-Strategie	Konzept zur Vermeidung von mehreren Lagerstätten zwischen Lieferanten und Produktionsprozess

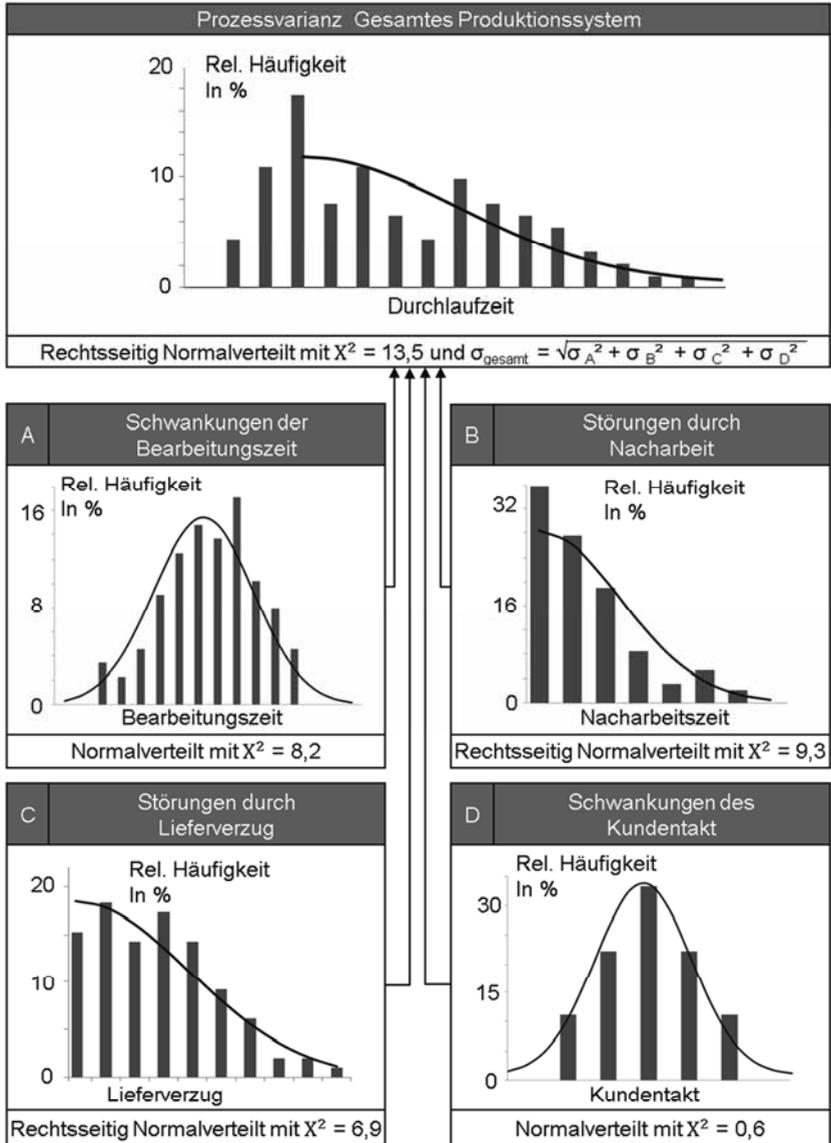
Werkzeuge I

Bezeichnung	Kurzbeschreibung
3 Mu – Checkliste	Identifikation globaler Verschwendungen, Überlastungen und Unausgeglichenheit der Produktion
5 M – Checkliste, Ishikawa-Diagramm	Analyse der Ursachen von Problemen nach Kategorien Mensch, Maschine, Material, Methoden und Mitwelt
5 mal Warum	Vorgehen zur Ursachenfindung von Problemen durch mehrmaliges Hinterfragen des Problems
ABC – Analyse	Analyse von Material bzw. Teilen nach Wert und Gebrauchshäufigkeit
P-Q-Analyse	Analyse der hergestellten Produkte hinsichtlich Produktionsmenge und -wert
Andon-Board	Informationstafel in der Produktion zur Visualisierung wichtiger Kennzahlen
Heijunka-Board	Ergänzung der Methode Heijunka, Tafel zur Visualisierung von Arbeitsaufträge und deren Bearbeitungsreihenfolge
Kanban-Karten	Ergänzung der Methode Kanban, Informationsträger zur Steuerung des Materialflusses
KPI-Board	Ergänzung des Prinzips KVP, Visualisierung von Key Performance Indicators eines Produktionsbereichs
Qualifikationsmatrix	Ergänzung der Methode Gruppenarbeit, Visualisierung der Einsatzmöglichkeiten von Arbeitskräften
Job Rotation Plan	Ergänzung der Methode Gruppenarbeit, Visualisierung der Arbeitsplatzbelegung von Arbeitskräften
Pick-by-light, Pick-by-voice	Ergänzung der Methode Poka Yoke, Unterstützung der Arbeitskraft bei Kommissionierprozessen durch Licht oder Ton

Werkzeuge II

Zustandsampel, Andon-Lampe	Visualisierung von Maschinen- oder Arbeitsplatzzuständen mit Lichtsignalen
Qualitätsregelkarte	Ergänzung der Methode SPC, Informationsträger für Qualitätsdaten einen Produktionsprozesses
Standardarbeitsblatt	Ergänzung des Prinzips Standardisierung, Dokumentation des Ablaufs eines Produktionsprozesses
Arbeitszyklusblatt	Ergänzung des Prinzips Standardisierung, Visualisierung des Ablaufs eines Produktionszyklus
Wertstromplan	Ergänzung der Methode Wertstromanalyse, Visualisierung eines Wertstroms
Schattenbrett	Ergänzung der Methode 5S, Visualisierungshilfe zur Feststellung der Vollständigkeit des Arbeitsmaterials
4-Augen-Prinzip	Prüfen der Produktions- und Produktqualität des Vorgängerarbeitsschritts
Reißleine	Ergänzung der Methode Fließlinie, Herbeiführung eines Linien-Stopps bei Produktionsproblemen
Audit	Ergänzung zu div. Methoden, Verfahren zur Bewertung der Einhaltung diverser Standards
PDCA-Zyklus	Ergänzung zu div. Methoden, Beschreibung der Abfolge von Verbesserungsmaßnahmen (Plan-Do-Check-Act)
KVP-Werkstatt	Ergänzung zum Prinzip KVP, Ort der Realisierung von technischen Verbesserungsmaßnahmen
Lerninseln	Ergänzung der Methode Gruppenarbeit, Ort der Qualifikation von Arbeitskräfte außerhalb des Produktionsprozesses
Ein-Punkt-Schulungen	Ergänzung des Prinzips 0-Fehler, Anweisung zur Vermeidung von Qualitätsproblemen
Schablonen	Ergänzung der Methode Poka Yoke, Prüfmittel zur Vermeidung von Qualitätsproblemen
Set-Bildung	Ergänzung der Methode Fließlinie, Kommissionierte Bereitstellung variantenreicher Materialien
Gruppentafel	Ergänzung der Methode Gruppenarbeit, Visualisierung von gruppenrelevanten Informationen
OEE	Overall Equipment Efficiency, Ergänzung der Methode TPM, Metrik zur Messung der Gesamtanlageneffektivität

B) Fallbeispiel: Analyse der Störungsmuster der Prozessvarianz



- Keine Angaben der absoluten Häufigkeiten und Klassen aufgrund von Geheimhaltung
- Nullhypothesen für Verteilungen wurden angenommen wenn $X^2 < 14,68$

C) Umsetzung des Simulationsmodells in Plant Simulation am Beispiel Standplatzmontage, Kundentakt 4h pro Maschine

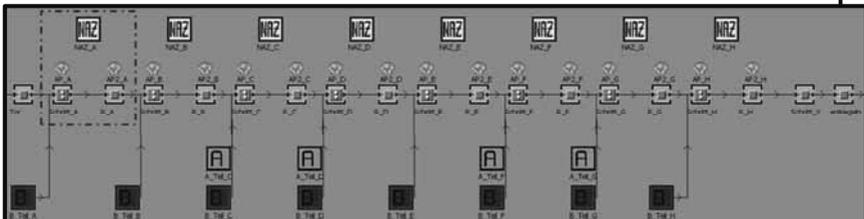
1 - Ebene Simulationscockpit

- Parametrisierung der Variablen für Prozessvarianz
- Parametrisierung der Gestaltungsparameter des Produktionssystems
- Parametrisierung des Experimentverwalters
- Steuerung des Ereignisverwalters
- Simulation des Auftragseingangs und Auftragsdisposition
- Simulation der Disposition der Arbeitskräfte



2 – Ebene Grundbaustein „Montageprozess“

- Simulation (und Visualisierung) des Montageprozesses
- Simulation von Prozessstörungen
- Simulation grundlegender Steuerungsprinzipien, z.B. Materialfluss
- Lesen und Schreiben leistungsrelevanter Kennzahlen auf dem Montageobjekt



3 – Ebene Methoden und Anwendungsbausteine

- Steuerung diverser Ereignisse, wie z.B. Nacharbeit, Lieferverzug
- Parametrisierung der Montageprozesse mit ereigniskonformen Daten
- Berechnung der von Bearbeitungs- und Taktzeiten

D) Parameter der Flächengleichungen für die Verschwendungsmuster unterschiedlicher Arten simulierter Produktionssysteme¹⁶⁸

Flächengleichungen $z = f(x, y)$

mit

z = Verschwendung

x = Prozessvarianz

y = Prozessfrequenz

Schlanke Fließmontage

$$z = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + f(\ln y)^1 + g(\ln y)^2 + h(\ln y)^3$$

Bestimmtheit: 98%

Virtuelle Fließmontage

$$z = \frac{a + bx + cx^2 + dx^3 + e \ln y}{1 + fx + gx^2 + hx^3 + i \ln y}$$

Bestimmtheit: 99%

Schlanke Standplatzmontage

$$z = a + b\sqrt{x} + \frac{c}{e^x} + \frac{d}{\sqrt{y}} + \frac{e}{y} + \frac{f}{\sqrt{y^3}} + \frac{g}{e^y}$$

Bestimmtheit: 98%

Parameter	Schlanke Fließmontage	Virtuelle Fließmontage	Schlanke Standplatzmontage
a	0,341	0,785	0,433
b	0,895	0,594	0,184
c	-0,539	-0,250	0,092
d	0,166	0,039	-0,033
e	-0,021	-0,163	0,241
f	0,096	0,735	-0,081
g	-0,064	-0,387	-0,125
h	0,001	0,063	-
i	-	-0,011	-

¹⁶⁸ vgl. Meudt (2011)

1. Persönliche Daten

Geburtsdatum	12. Mai 1983
Geburtsort	Waren (Müritz)
Nationalität	deutsch



2. Beruflicher Werdegang

Seit 2012	Assistent des CEO Siemens AG, Sector Infrastructure and Cities, Division Mobility and Logistics, Business Unit Rail Automation
2009 bis 2012	Mitglied der Institutsleitung / Oberingenieur Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Prof. Dr.-Ing. E. Abele, TU Darmstadt
2007 bis 2009	Wissenschaftlicher Mitarbeiter Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Prof. Dr.-Ing. E. Abele, TU Darmstadt

3. Ausbildung

2002 bis 2007	Studium des Wirtschaftsingenieurwesens / Fachrichtung Maschinenbau an der Universität Rostock
1993 bis 2002	Allgemeine Hochschulreife Johann - Heinrich - Voss – Gymnasium, Penzlin
1989 bis 1993	Heinrich - Schliemann – Grundschule, Ankershagen

4. Auszeichnungen

2010	Aufnahme als Stipendiat „e-fellows“
2007	Ehrung als Top 3-Jahresabsolvent der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock
2007	Auszeichnung in Anerkennung hervorragender Studienleistungen „ BDO-Preis “
2005	Aufnahme als Stipendiat der „ Studienstiftung des Deutschen Volkes “