

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **17658 N**

Lernkurven in manuellen Person-zur-Ware-Kommissioniersystemen (LeiKom)

(Bevilligungszeitraum: 01.09.2013 - 30.09.2015)

der AiF-Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik e.V.

Stuttgart, 15.01.2016

Ort, Datum

Matthew Stinson, M.Sc., MBE

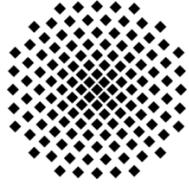
Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Universität Stuttgart



Institut für Fördertechnik und Logistik

Lernkurven in manuellen Person-zur-Ware- Kommissioniersystemen (LeiKom)

Abschlussbericht

Matthew Russell Stinson

Franziska Hanna Müller

David Korte

Karl-Heinz Wehking

Die im Rahmen des Forschungsprojekts gewonnenen Erkenntnisse beziehen sich gleichermaßen auf männliche und weibliche Personen. Allein aus Gründen der besseren Lesbarkeit wurde auf die zweifache Schreibweise verzichtet.

Kurzfassung

Dynamische Kapazitätsanforderungen und Prozessabläufe im Betrieb erfordern flexibel einsetzbare Arbeitskräfte. Somit rückt die Notwendigkeit von Erkenntnissen über die Leistungsentwicklung lernender Mitarbeiter in den Vordergrund. Dabei verfügen die Mitarbeiter über unterschiedliche Vorkenntnisse und Fähigkeiten. Sie werden unter verschiedenen Bedingungen eingesetzt und erhalten eine sehr kurze bis zu einer sehr ausführlichen Einarbeitung. In der Intralogistik und insbesondere in der Kommissionierung besteht ein beträchtlicher Bedarf an der Möglichkeit, lernende Mitarbeiter unter Berücksichtigung individueller Lernprozesse systematisch und wissenschaftlich fundiert einsetzen und bewerten zu können.

Im Rahmen des Forschungsprojekts LeiKom wurden Lernprozesse in der manuellen Person zur Ware (PzW)-Kommissionierung untersucht. Insbesondere wurde die Leistungsentwicklung anhand der individuellen Kommissionierzeitkomponenten beschrieben. Hierzu wurden Lernkurven in flexiblen Arbeitssystemen anhand einer vielseitigen, individuellen Leistungsbewertungsmethode quantifiziert. Es wurden außerdem wesentliche Einflussfaktoren auf die Effektivität des Lernens in der PzW-Kommissionierung identifiziert und mathematisch beschrieben.

Anhand von Prozess- und Datenanalysen realer Kommissioniersysteme der am Projekt beteiligten anwendenden Unternehmen wurden für die Leistungsentwicklung individueller Kommissionierer relevante Parameter identifiziert und quantifiziert. Die im Projekt LeiKom entwickelte Methodik wurde abschließend in Form eines EDV-Programms demonstrativ umgesetzt, um deren praktische Anwendung zu erleichtern. Das Programm kann ohne Programmierkenntnisse und kostenpflichtige Spezialsoftware im operativen Tagesgeschäft von Produktions- und Handelsunternehmen eingesetzt werden. Hierzu genügt ein kostenloser Download der Projektmaterialien von der IFT-Webseite. Anhand des hierin enthaltenen Projektleitfadens kann die Projektmethodik auch von externen Softwareherstellern nachvollzogen werden und in bestehende WMS-Module integriert werden. So kann ein breites Spektrum an WMS mit Lernkurvenfunktionalität ausgestattet werden. Durch die im Abschnitt 1.1 vorgestellten Faktoren zur steigenden Relevanz der Lernkurvenforschung verringern sich künftig die hiermit verbundenen Umsetzungskosten relativ zu den erzielten Vorteilen.

Die im vorliegenden Projektbericht beschriebenen Arbeiten wurden zwischen 01.09.2013 und 30.09.2015 in Kooperation mit einem projektbegleitenden Ausschuss durchgeführt. Aufbauend auf den hier dargestellten Projektergebnissen können in Zukunft verwandte Themen bearbeitet werden, z. B. die gezielte Optimierung der Lernumgebung in der Kommissionierung oder die Übertragung der Modellierungsmethoden auf andere Funktionsbereiche der Intralogistik.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
2. Status quo in der Kommissionierung.....	3
2.1 Terminologie, Grundlagen und Funktionen.....	3
2.2 Teilsysteme eines Kommissioniersystems nach der VDI 3590-1	5
2.2.1 Informationssystem.....	5
2.2.2 Organisationssystem	7
2.2.3 Materialflusssystem	8
2.3 Tätigkeiten im Materialflusssystem.....	11
3. Leistung in der Person-zur-Ware-Kommissionierung	14
3.1 Allgemeine Einführung	14
3.2 Kommissionierleistung und Einflussgrößen	15
3.2.1 Abgrenzung zwischen Logistikleistung und Kommissionierleistung	15
3.2.2 Einflussgrößen auf die Kommissionierleistung.....	17
3.3 Kennzahlen zur Quantifizierung der Leistung	18
3.3.1 Differenzierung in Kennzahlen, Kennzahlenarten und Kennzahlensystemen.....	18
3.3.2 Funktionen von Kennzahlen	20
3.3.3 Anforderungen an Kennzahlen	22
3.3.4 Kennzahlen für die Kommissionierung.....	23
3.4 Methoden zur Leistungsbeurteilung in der Person-zur-Ware Kommissionierung	24
3.4.1 Multivariate Regressionsanalyse	24
3.4.2 Systeme vorbestimmter Zeiten	25
3.4.3 Data Envelopment Analysis	26
4. Lerntheorie	28
4.1 Lernprozess allgemein und im industriellen Kontext	28
4.2 Lernkurvenmodelle.....	30
4.2.2 Log-linear Lernkurven.....	32
4.2.2.1 Wright	32
4.2.2.2 Crawford	36
4.2.2.3 Yelle.....	36
4.2.2.4 Stanford-B.....	37
4.2.2.5 De Jong.....	38
4.2.2.6 Baloff oder Plateau-Modell	41

4.2.2.7	S-Modell.....	42
4.2.2.8	Cochran	43
4.2.2.9	Ullrich.....	44
4.2.3	Lernkurven auf Basis von Exponentialfunktionen.....	44
4.2.3.1	Woeber	44
4.2.3.2	Levy	46
4.2.3.3	Knecht.....	47
4.2.4	Hyperbolische Lernkurvenmodelle.....	47
4.2.5	Multivariate Lernkurvenmodelle	49
5.	Vorgehensweise	51
5.1	AP 1.1: Kennzahldefinition und Dokumentation der betrachteten Kommissioniersysteme.....	51
5.2	AP 2.1: Bestimmung des Standard-Kommissionierleistungsniveaus	51
5.3	AP 2.2: Bestimmung der Leistungsentwicklung lernender Mitarbeiter.....	52
5.3.1	Leistungsbestimmung bei lernenden Mitarbeitern	52
5.3.2	Leistungsbestimmung bei eingearbeiteten Mitarbeitern	55
5.4	AP 2.3: Quantifizierung von Einflussfaktoren auf die Lernkurve.....	58
5.4.1	Ableitung aus den Lernkurvenmodellen	58
5.4.1.1	Allgemeine Parameter.....	58
5.4.1.2	Quantifizierung der Vorerfahrung	59
5.4.2	Ableitung aus empirischer Untersuchung.....	60
5.5	AP 3.1: Herleitung eines Modells zur Beschreibung von Lernkurven in der PzW- Kommissionierung.....	62
5.5.1	Lernverhalten bei Mitarbeitern von Projektpartner I.....	64
5.5.1.1	Charakterisierung des Kommissioniersystems	64
5.5.1.2	Vorgehen	66
5.5.1.3	Lernkurven	66
5.5.1.4	Interpretationsfähigkeit und Interpretation	67
5.5.2	Lernverhalten bei Mitarbeitern von Projektpartner II.....	68
5.5.2.1	Charakterisierung des Kommissioniersystems	68
5.5.2.2	Vorgehen	68
5.5.2.3	Lernkurven	69
5.5.2.4	Interpretationsfähigkeit und Interpretation	70
5.5.3	Lernverhalten bei Mitarbeitern von Projektpartner III.....	71
5.5.3.1	Charakterisierung des Kommissioniersystems	71
5.5.3.2	Vorgehen	72

5.5.3.3	Lernkurven	72
5.5.3.4	Interpretationsfähigkeit und Interpretation	75
5.6	AP 3.2: Erstellung eines Demonstrators zur Validierung und praktischen Anwendung der Methodik	78
6.	Kritische Gesamtbeurteilung und Ergebnistransfer in die Wirtschaft	91
7.	Auflistung projektbezogener Veröffentlichungen und Präsentationen.....	92
	Literaturverzeichnis	95

Abbildung 1: Kommissionierprozesskette	3
Abbildung 2: Vorgänge im Materialflusssystem	12
Abbildung 3: Transformationsprozess	14
Abbildung 4: Einflussfaktoren auf die Kommissionierleistung	18
Abbildung 5: Funktionen von Kennzahlen.....	21
Abbildung 6: Anforderungen an Kennzahlen	23
Abbildung 7: Vorgehensweise MTM-Planungsanalyse	26
Abbildung 8: Einflussgrößen auf die Lernzeit.....	29
Abbildung 9: Kurvenverlauf der Lernkurve von Wright.....	33
Abbildung 10: Kurvenverlauf der Lernkurve von Wright (log)	33
Abbildung 11: Aufbau des von Grosse und Glock betrachteten Kommissioniersystems ...	35
Abbildung 12: Lernkurve nach Yelle	37
Abbildung 13: Lernkurvenverlauf der Lernkurve nach Stanford-B.....	38
Abbildung 14: Lernkurvenverlauf der Lernkurve nach Stanford-B.....	38
Abbildung 15: Lernkurve nach De Jong.....	39
Abbildung 16: Lernkurve nach De Jong (logarithmische Darstellung)	40
Abbildung 17: Lernkurve nach Baloff (logarithmische Darstellung)	42
Abbildung 18: S-Modell Lernkurve.....	43
Abbildung 19: Lernkurvenmodell nach Woeber	46
Abbildung 20: 2-Parameter Hyperbelmodell	48
Abbildung 21: 3-Parameter Hyperbelmodell	49
Abbildung 22: Arbeitspakete des Projekts LeiKom	51
Abbildung 23: Lernkurve der Zeitarbeiter mit durchschnittlicher Kommissionierleistung des Stammpersonals als Referenz.....	55
Abbildung 24: Kommissionierte Masse je Schicht.....	57
Abbildung 25: Lernkurvenmodelle im Überblick.....	58
Abbildung 26: Ableitung eines Wright-Lernkurvenmodells, Basis: Leistungskennzahl	62
Abbildung 27: Ableitung eines De Jong-Lernkurvenmodells, Basis: Leistungskennzahl	63
Abbildung 28: Projektpartner I, Auftrags-Lernkurve, Bezugsgröße Aufträge	66
Abbildung 29: Projektpartner I, Positions-Lernkurve, Bezugsgröße Aufträge.....	67
Abbildung 30: Projektpartner I, Entnahme-Lernkurve mit S-Modell-Annäherung, Bezugsgröße Aufträge	67
Abbildung 31: Projektpartner II, Auftrags-Lernkurve, Bezugsgröße Tage	69
Abbildung 32: Projektpartner II, Positions-Lernkurve, Bezugsgröße Tage	70
Abbildung 33: Projektpartner II, Entnahme-Lernkurve mit Modell-Annäherung, Bezugsgröße Tage.....	70
Abbildung 34: Projektpartner III, Auftrags-Lernkurve, Bezugsgröße Tage	72
Abbildung 35: Projektpartner III, Positions-Lernkurve mit S-Modell-Annäherung, Bezugsgröße Tage.....	73
Abbildung 36: Projektpartner III, Positions-Lernkurve mit Stanford-B-Annäherung, Bezugsgröße Tage.....	73
Abbildung 37: Projektpartner III, Entnahme-Lernkurve mit S-Modell-Annäherung, Bezugsgröße Tage.....	74
Abbildung 38: Projektpartner III, Entnahme-Lernkurve mit Stanford-B-Annäherung, Bezugsgröße Tage.....	74
Abbildung 39: Histogramm der Datengrundlage Positionen, Normalverteilung (rechtsschief).	76

Abbildung 40: Histogramm der Datengrundlage Entnahmen, Normalverteilung (rechtsschief)76

Tabelle 1: Morphologischer Kasten zur Klassifizierung des Informationssystems	7
Tabelle 2: Morphologischer Kasten zur Klassifizierung des Organisationssystems	8
Tabelle 3: Bereitstellungsdimensionen	9
Tabelle 4: Morphologischer Kasten zur Klassifikation des Materialflusssystems.....	11
Tabelle 5: Kennzahlenarten.....	20
Tabelle 6: Leistungskennzahlen in der Kommissionierung nach VDI 4490	23
Tabelle 7: Numerische Werte einer 80 %-Lernkurve	34
Tabelle 8: Parameter der zusammengesetzten Lernkurve.....	37
Tabelle 9: Numerische Werte des Beispiels	45
Tabelle 10: Einflussgrößen auf die Leistung	54
Tabelle 11: Leistungswerte auf Basis individueller Werte	56
Tabelle 12: t-Test masse- und volumenbezogener Kommissionierleistungsvergleich des Stammpersonals mit und ohne Job-Rotation-Beteiligung	56
Tabelle 13: Aussagekraft exponentieller Modellierung in Abhängigkeit des Beschäftigungsverhältnisses	61
Tabelle 14: Bestimmtheitsmaß der abgeleiteten Lernkurvenformeln, Basis: Leistungskennzahl.....	63
Tabelle 15: Bestimmtheitsmaß der S-Modell-Annäherung.....	67
Tabelle 16: Bestimmtheitsmaß der Modell-Annäherung	71
Tabelle 17: Bestimmtheitsmaß der Modell-Annäherung, Positions-Lernkurve	73
Tabelle 18: Bestimmtheitsmaß der Modell-Annäherung, Entnahme-Lernkurve	75
Tabelle 19: F-Test zur Überprüfung der Varianz bezüglich Positionen und Entnahmen der Aufträge	77
Tabelle 20: F-Test zur Überprüfung der Varianz bezüglich der Lernraten der Positions- bzw. Entnahme-Lernkurve	77
Tabelle 21: Einfaktorielle-ANOVA der Lernraten von Positions- bzw. Entnahme-lernkurve ..	78

Abkürzungsverzeichnis

AKL	Automatisches Kleinteilelager
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Customer
bspw.	beispielsweise
DEA	Data Envelopment Analysis
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
KEP	Kurier-, Express- und Paketlieferdienst
KLT	Kleinladungsträger
MTM	Methods Time Measurement
O.Ä.	oder Ähnliches
PzW	Person-zur-Ware
RFID	Radio Frequency Identification
TMU	Time Measurement Unit
VBA	Visual Basic for Applications
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WzP	Ware zur Person
z. B.	zum Beispiel

1. Einleitung

1.1 Motivation

Manuelle Tätigkeiten dominieren die meisten Kommissioniersysteme aufgrund von der Fähigkeit des Menschen, Probleme kreativ zu lösen sowie ihrer Flexibilität und der mit ihnen verbundenen geringfügigen Investitionskosten. Heterogene Arbeitsinhalte stellen besonders hohe Flexibilitätsanforderungen an Kommissioniersysteme. Zu diesen Anforderungen zählen die Handhabung von Artikeln mit unterschiedlichen Massen und Dimensionen bzw. Volumina sowie der Ausgleich volatiler Kapazitätsschwankungen. Es ist deshalb oft schwierig, technisch nicht möglich und/oder unwirtschaftlich, Kommissionierprozesse zu automatisieren. Aus diesen Gründen ist der aktuelle Automatisierungsgrad in Kommissioniersystemen gering. Die manuelle Person-zur-Ware (PzW)-Kommissionierung stellt aktuell die bedeutsamste Form der Kommissionierung dar, bei welcher die Kommissionierer in Rundgängen zur Ware gehen, die vom Kommissionierauftrag spezifizierten Artikel manuell entnehmen, und diese Teilmengen anschließend abgeben, i. d. R. an einer Kommissionierbasis.

Ausgehend vom geringen Automatisierungsgrad in der Kommissionierung ist die Leistung in den meisten Kommissioniersystemen stark abhängig von den Fähigkeiten bzw. vom individuellen Verhalten der Mitarbeiter. Aktuelle Entwicklungen in der Intralogistik deuten auf eine steigende Relevanz des Lernens für den Unternehmenserfolg. Die Optimierung von Lernprozessen in der Kommissionierung wird u. a. aufgrund der zunehmenden Implementierung folgender Beschäftigungsformen an Bedeutung gewinnen:

- **externe Zeitarbeiter**, die z. B. aufgrund von saisonalen Auslastungsschwankungen beschäftigt werden,
- **neue Mitarbeiter**, deren Einarbeitung wegen hoher Mitarbeiterfluktuationsraten immer häufiger stattfinden muss,
- **Springer**, die aus anderen Arbeitsbereichen (z. B. Wareneingang) temporär in der Kommissionierung eingesetzt werden, um kurzzeitige Kapazitätsschwankungen auszugleichen (z. B. Krankheitsersatz) und
- **Job-Rotation-Mitarbeiter**, deren Einsatzbereiche regelmäßig geändert wird, um einseitige physische sowie geistige Belastung vor dem Hintergrund einer älter werdenden Belegschaft zu reduzieren.

Dabei steigt nicht nur die Häufigkeit der Einarbeitung in der Kommissionierung, sondern auch die Komplexität der Aufgaben. Die Kommissionierung wird nämlich immer stärker von neuartigen Kommissioniertechniken geprägt. Bspw. der Einsatz der weit verbreiteten Pick-by-Voice-Technologie erfordert die Bedienung eines Mini-PCs durch jeden Kommissionierer.

Dabei führen kürzere Produktlebenszyklen zu immer dynamischer werdenden Artikelsortimenten bzw. Lagerordnungen. Die Erfüllung einer wachsenden Vielzahl an individuellen Kundenwünschen sowie die Durchführung von Nebentätigkeiten tragen zusätzlich zur hohen geistigen sowie physischen Beanspruchung der operativen Mitarbeiter in der manuellen Kommissionierung. Hieraus resultieren einerseits Kommissionierprozesse, die nur vom erfahrenen Personell beherrscht werden. Andererseits fordert die hohe Dynamik in der Kommissionierung auch von eingelernten Mitarbeitern ständiges Lernen.

1.2 Zielsetzung

Lernprozesse spielen eine zentrale Rolle in der PzW-Kommissionierung aufgrund der zunehmenden Relevanz der im Abschnitt 2.1 erläuterten Beschäftigungsformen in der Intralogistik. Diese führen zu häufigeren Einlern- und Auffrischungsphasen, in denen ein lernender Mitarbeiter die Standard-Leistung eines Vollzeit-Kommissionierers nicht erreicht. Die Lernkurvenforschung beruht bisher allerdings auf Beobachtungen in hochstandardisierten Arbeitssystemen mit relativ homogenen Arbeitsinhalten. Diese Situation steht in starkem Gegensatz zu dynamischen Arbeitssystemen wie der Kommissionierung, in denen Arbeitsinhalte, z. B. Entnahmen, Positionen und Aufträge sehr heterogen sind. Zudem tragen die operativen Mitarbeiter ein hohes Maß an Entscheidungsverantwortung bezüglich des Prozessablaufs.

Vor Projektbeginn fehlte in erster Linie die Definition von Standard-Lernkurvenverläufen für die PzW-Kommissionierung und somit war keine relative Beurteilung der Leistungsentwicklung lernender Kommissionierer möglich. Die im Projektverlauf behandelte Thematik wird als anwendernah eingestuft, da die Projektergebnisse auf eine Optimierung der operativen Personaleinsatzplanung in der Kommissionierung mit lernenden Mitarbeitern stark abzielt.

Das übergeordnete Forschungsziel des Projekts LeiKom bestand in der Entwicklung einer Methodik, anhand welcher Lernkurven in der PzW-Kommissionierung quantifiziert werden können. Diese Methodik war so zu gestalten, dass sie zur Beschreibung des Leistungsverhalten lernender Kommissionierer unter verschiedenen Bedingungen herangezogen werden kann und als EDV-Programm zu hinterlegen, um deren praktischen Anwendung zu erleichtern.

2. Status quo in der Kommissionierung

2.1 Terminologie, Grundlagen und Funktionen

Mittels Kommissionierung wird, in Anlehnung an die Logistik, das Ziel verfolgt, die richtige Artikelgruppe mit den richtigen Artikeln in den richtigen Mengen und der Qualität zu möglichst geringen Kosten an den entsprechenden Kunden respektive nachgelagerten Prozess zu liefern.¹ Demzufolge stellt die Kommissionierung einen Kernprozess der Distributionslogistik sowie der Materialversorgung dar, welche auch in der Produktionslogistik relevant ist. Prinzipiell sind Kommissioniersysteme in der Produktion denjenigen Produktionsprozessen unmittelbar vorgelagert, welche Material in volatilen Mengen und Kombinationen verbrauchen. In der Distributionslogistik befindet sich dagegen das Kommissioniersystem direkt materialflussaufwärts vom Warenausgang, wobei es zur Zusammenstellung von Kundenaufträgen des Versands dient.² Die Abbildung 1 veranschaulicht beispielhaft sowohl die Untergliederung einer Kommissionierprozesskette als auch ihre Einordnung in eine allgemeine Prozesskette. Anzumerken ist, dass die Integration zusätzlicher Lager- bzw. Kommissionierprozesse, bei einer nicht just-in-time Materialbereitstellung für die Produktion, zwischen Wareneingang und Produktion möglich ist.

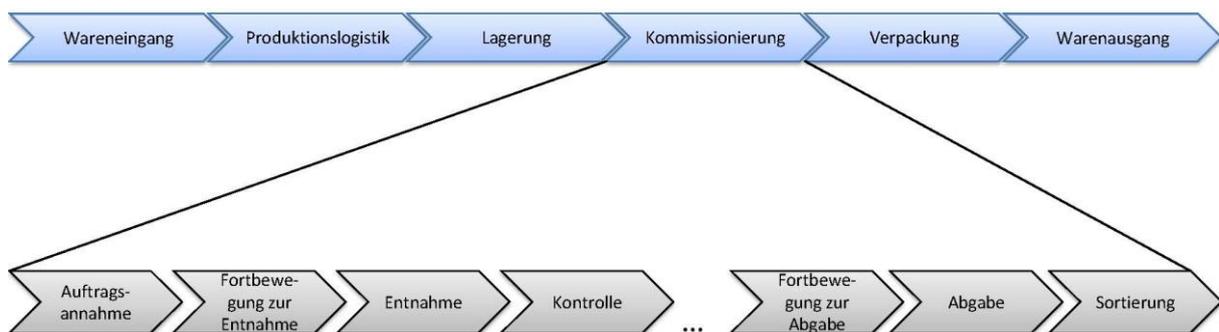


Abbildung 1: Kommissionierprozesskette³

Der Aufbau eines Kommissioniersystems umfasst nach Schulte die Elemente:

- Kommissionierlager,
- Transportmittel,
- Menschen und
- Kommissionieraufträge.⁴

Dabei übernimmt das *Kommissionierlager* die Artikelbevorratung inklusive ihrer Nachfüllung⁵ (Präsenzfunktion).

Die *Transportmittel* lassen sich in Stetig- oder Unstetigförderer unterteilen, welche zur Auffüllung entnommener Artikel, zur Unterstützung manueller Tätigkeiten, zum Transport von Bereitstellereinheiten zu Kommissionierern in der WzP-Kommissionierung oder dem Lagerort, wie auch zur Abförderung vollendeter Aufträge dienen. Insbesondere die eingesetzte Technolo-

¹ Vgl. Wannewetsch (2010), S. 30.

² Vgl. Günther & Tempelmeier (2003), S. 288.

³ Vgl. Schulte (2013), S. 268.

⁴ Vgl. Schulte (2013), S. 269.

⁵ Die Nachfüllung kann auch aus einem Reservelager erfolgen.

gie ist für die Leistung des Arbeitssystems maßgeblich verantwortlich. Relevant ist bspw. ob die Kommissionierung mit oder ohne Beleg erfolgt, da papierloses Kommissionieren Zeiteinspar- sowie Qualitätsverbesserungspotenziale realisieren.⁶ Des Weiteren stehen auf Seiten von teil- bzw. vollautomatisierten Systemen die Vorteile tendenziell höherer Durchsätze bei gleichzeitig geringerer Kommissionierfehlerrate⁷, denn die Hauptursache menschlicher Fehler liegt in der Informationsverarbeitung begründet.⁸ Jedoch sind bei der Planung die Kriterien Leistungsfähigkeit, Flexibilität, Investitions- und Betriebskosten gegeneinander abzuwägen, sodass automatisierte Kommissioniersysteme lediglich bei konstant hohen Auftragsmengen und Auftragshomogenität ihre signifikanten Investitionskosten rechtfertigen.⁹ Demzufolge sind auf absehbare Zeit manuelle Tätigkeiten in der Kommissionierung von großer Bedeutung und aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht mittels Maschinen substituierbar.¹⁰

Der Einsatz des Elements *Mensch* erstreckt sich auf bis zu drei Ebenen in Kommissioniersystemen. Von der Disposition (Ebene 1) mit der Personaleinsatzplanung, Gestaltung von Prozessschnittstellen und Definition von Auftragssequenzregeln; über Controlling- und Überwachungstätigkeiten (Ebene 2), welche Initialisierung der Kommissionierung, Statuskontrollen sowie Behebung von Fehlern beinhalten, bis hin zur physischen Bearbeitung von Kommissionieraufträgen (Ebene 3), die Bestandsüberwachung, Nachfüllung, Erfüllung von Kommissionieraufträgen respektive Verpacken und Transport zur nächsten Station umfasst.

Abschließend definieren *Kommissionieraufträge* welche und wie viele Artikel entnommen werden. Sie können aber auch Zusatzinformationen wie bspw. die Einstufung als Eilauftrag oder kundenindividuelle Verpackungsinstruktionen beinhalten. Dabei kann, in Abhängigkeit der Prozessorganisation des Kommissioniersystems, die Bearbeitung eines Kommissionierauftrages entsprechend einer Kundenbestellung (auftragsbezogen), einem Teil einer Kundenbestellung (bspw. artikelorientiert) oder einer Gruppe von mehreren Kundenbestellungen (z. B. zonenparallel) erfolgen.¹¹

Zudem beinhalten Kommissionieraufträge die Entnahmeeinformationen und bilden somit die Basisanforderung für das Zusammenstellen von Teilmengen aus einem Sortiment, welches das Ziel der Kommissionierung repräsentiert. Zur Erfüllung dieses Ziels setzt sich der Kommissioniervorgang aus folgenden Grundfunktionen zusammen, deren Reihenfolge nicht notwendigerweise determiniert ist und die teilweise auch entfallen können:

- Vorgabe der Transportinformation (für Güter und/oder Kommissionierer),
- Transport der Güter zum Bereitstellungsort,
- Bereitstellung der Güter,
- Bewegung des Kommissioniere[r]s zum Bereitstellungsort,
- Vorgabe der Entnahmeeinformation,
- Entnahme der Entnahmeeinheit(en) durch den Kommissionierers,
- Abgabe der Entnahmeeinheit(en),
- Quittierung des Entnahmevorgangs bzw. der Entnahmevorgänge,

⁶ Vgl. Heiserich et al. (2011), S. 72-74; Koether (2007), S. 99-100.

⁷ Vgl. Martin (2011), S. 404-406.

⁸ Vgl. Lolling (2003), S. 24 f.

⁹ Vgl. Schulte (2013), S. 270.

¹⁰ Vgl. Arnold & Furmans (2010), S. 213.

¹¹ Vgl. Schulte (2013), S. 269-273 f.

- Transport der Sammeleinheit(en) zur Abgabe der Sammeleinheit(en),
- Vorgabe der Transportinformation für die angebrochene(n) Bestelleinheit(en) und
- Transport der angebrochenen Bestelleinheit(en).¹²

Des Weiteren können diese Grundfunktionen mittels zusätzlich wertschöpfender Tätigkeiten wie Einsatz kundenspezifischer Verpackung, Auskunft über den Kundenbestellungsstatus und Qualitätskontrollen ergänzt werden. Überdies besteht die Möglichkeit, dass das Kommissioniersystem weiteren Anforderungen unterliegt, wodurch die Tätigkeiten in einer bestimmten Art und Weise auszuführen sind. Als Beispiele jener Anforderungen können die Erreichung eines definierten Durchsatzniveaus, Realisierung kurzer Reaktionszeiten¹³, bzw. die Unterschreitung einer maximalen Kommissionierfehlerrate angeführt werden.¹⁴

Die Kommissionierung kann zum einen horizontal in das innerbetriebliche Materialflusssystem eingeordnet werden. Bspw. verbindet in der Produktionslogistik die Kommissionierung das Lager und die Produktion, in der Distributionslogistik ist die Kommissionierung zwischen dem Lager und dem Warenausgang eingegliedert. Zum anderen kann die Kommissionierung auch vertikal in das Unternehmen eingeordnet werden. Hierbei sind der physische Prozess in der Materialflussebene, der Informationsfluss in der Logistikebene und die Organisation und Strategiegestaltung auf der Managementebene angesiedelt.¹⁵ Diese vertikale Untergliederung bildet letztendlich die Grundlage der drei Teilsysteme eines Kommissioniersystems.

2.2 Teilsysteme eines Kommissioniersystems nach der VDI 3590-1

2.2.1 Informationssystem

Die VDI-Richtlinie 3590 identifiziert folgende drei Teilsysteme der Kommissionierung: das Informations-, das Materialfluss- und das Organisationssystem. Insbesondere die Leistung (Funktionalität und Effizienz) eines Kommissioniersystems ist von einer „[...] fehlerfreien, vollständigen, rechtzeitigen und bedarfsgerechten Erfassung, Verarbeitung und Bereitstellung der Informationen [...]“¹⁶, sprich des Informationsflusses, abhängig. Dabei beinhaltet das *Informationssystem* nicht nur die notwendigen Elemente *Auftrag*¹⁷, *Kommissionierliste* bzw. *-datei*¹⁸ sowie *Position*¹⁹, sondern lässt sich zudem in die vier Grundfunktionen Auftragserfassung, -vorbereitung, -weitergabe und Bestätigung klassifizieren.²⁰

¹² Vgl. VDI 3590 (1994), S. 2.

¹³ Reaktionszeitanforderungen betragen in der Pharmabranche zwischen 20 und 45 Minuten; Vgl. Jünemann & Schmidt (2000), S. 211.

¹⁴ Vgl. Heiserich et al. (2011), S. 70.

¹⁵ Vgl. ten Hompel et al. (2011), S. 12 f.

¹⁶ Vgl. ten Hompel et al. (2011), S. 28.

¹⁷ Von einem Arbeitssystem oder Kunden flussaufwärts bezüglich des Kommissionierprozesses generiert, enthält dieser die benötigten Artikel inkl. Bestellmenge.

¹⁸ Ein physisches Dokument oder eine Datei, anhand dessen der Kommissionierer Teilaufträge, Aufträge oder Auftragsgruppen abarbeitet. Entweder wird ein Auftrag direkt verwendet oder um zusätzliche auftragspezifische Informationen erweitert wie z. B. die Lagerorte der Artikel, Klassifizierung als eilig etc.

¹⁹ Spezifiziert die Information, die zur Entnahme eines Artikels in der Kommissionierliste benötigt wird, z. B. Lagerort, entsprechende Entnahmemengen etc.

²⁰ Vgl. VDI 3590 (1994), S. 2 ff.

Hierbei steht die *Auftragserfassung* für den Eingang der Aufträge, wodurch die kundenindividuellen Artikel (respektive die des nachgelagerten Arbeitssystems) sowie Entnahmemengen festgelegt werden. Die Auslösung, wie auch die Übermittlung kann manuell, semiautomatisch oder vollautomatisch erfolgen, z. B. per Telefon, Brief, Telefax, manuelle Eingabe in einem Web-Portal bzw. automatische Bestellung bei unterschreiten eines Mindestbestandniveaus.²¹

Die *Auftragsvorbereitung* beurteilt bspw. ob Teilaufträge zur parallelen Bearbeitung gebildet werden. Bei Einzelauftragsvarianten erfolgt dagegen eine direkte Transformation der Aufträge in Kommissionierlisten, wobei diese, bei Definition von Auftragsgruppen, mehrere Aufträge umfassen. Zudem kann die Vorbereitung zur Kommissionierlistenerstellung manuell (per Erstellung physischer Kommissionierlisten), semiautomatisch (durch Eingabe in ein EDV-System) oder vollautomatisch (mittels kontinuierlicher Überwachung der Auslastung in der Kommissionierung) erfolgen.²²

Inwieweit die *Auftragsweitergabe* mit oder ohne physische Kommissionierliste erfolgt, ist abhängig des Einsatzgrades von mobilen PCs. So werden Kommissionierern über bspw. Handheld-Terminals o. Ä. einzelne Positionen angezeigt, wodurch eine Reduzierung der Kommissionierfehler respektive Einhaltung der optimalen Wegstrecke sichergestellt werden kann.²³

Dabei erfolgt die *Bestätigung* weitestgehend semi-automatisch je Position mittels Drücken einer Taste am mobilen Terminal, wodurch dem Kommissionierer die nächste Position angezeigt wird. Nichtsdestotrotz kann auch je Entnahme bzw. Kommissionierauftrag bestätigt werden. Seltener ist die manuelle Bestätigung durch bspw. den Aufschrieb eines Zeitstempels, wie auch eine vollautomatische Bestätigung, wobei in einzelnen Kommissioniersystemen Radio Frequency Identification (RFID) zur Verifizierung separater Entnahmen angewendet wird.²⁴ Vereinzelt findet auch die Kommissionierung mittels Pick-by-Vision im Rahmen einer datenbrillenerzeugten Augmented Reality. Hierbei werden dem Kommissionierer obligate Informationen (Lagerort, -platz, Pickmenge, etc.) in Echtzeit über das Display einer Datenbrille (z. B. Google Glass) nicht nur eingeblendet, sondern auch vorgelesen. Demzufolge ermöglicht dies freihändiges und papierloses kommissionieren, bei simultaner Echtzeit-Verbuchung der Warenbewegung in Lagerverwaltungssystemen mittels abscannen des Artikelbarcodes über eine integrierte Kamera.²⁵

²¹ Vgl. VDI 3590 (1994), S. 5.

²² Vgl. VDI 3590 (1994), S. 5.

²³ Vgl. VDI 3590 (1994), S. 5.

²⁴ Vgl. ten Hompel et al. (2011), S. 29-32; VDI 3590 (1994), S. 4.

²⁵ Vgl. VDI 3590 (1994), S. 5.; Schwerdtfeger et al. (2011), S. 213 f. und S. 218 ff.; Hofmann (2014), URL siehe Literaturverzeichnis; Erb (2014), URL siehe Literaturverzeichnis; xCon Partners GmbH (2014), URL siehe Literaturverzeichnis.

Zur Klassifizierung bietet die VDI 3590 einen morphologischen Kasten, der die vier Grundfunktionen beinhaltet (Vgl. Tabelle 1).

Tätigkeit	Varianten			
<i>Vorbereitung der Kommissionierung</i>				
Auftragserfassung	manuell	manuell/automatisch	automatisch	
Auftragsvorbereitung	Teilauftrag	Einzelauftrag	Auftragsgruppen	
	keine	manuell	manuell/automatisch	automatisch
Auftragsweitergabe	ohne Beleg		mit Beleg	
	eine Position		mehrere Positionen	
<i>Durchführung der Kommissionierung</i>				
Bestätigung	pro Entnahme	pro Position	pro Kommissionierliste	
	manuell	manuell/automatisch	automatisch	

Tabelle 1: Morphologischer Kasten zur Klassifizierung des Informationssystems²⁶

2.2.2 Organisationssystem

Das Organisationssystem wiederum lässt sich noch weiter in Aufbau-, Ablauf sowie Betriebsorganisation unterteilen.

Die *Aufbauorganisation (Infrastruktur)*²⁷ ist mit der Lagerortbestimmungslogistik verbunden, welche insbesondere von den Eigenschaften der Artikel bestimmt wird. Artikel mit ähnlichen Eigenschaften werden gruppenweise in Kommissionierzonen zusammengefasst, wobei folgende Charakteristika entscheidungsrelevant sind:

- physikalische Eigenschaften der Artikel, wie Abmessungen, Volumen, Gewicht etc.,
- mengenmäßiger Umschlag, z. B. Zugriffshäufigkeit je Artikel,
- sonstige besondere Eigenschaften und Merkmale, bspw. Lagertemperatur, Zugriffssicherheit, Gefahrgut, o. Ä., aber auch
- Identifikationsmerkmale, wie Aufbau nach Artikelnummern.

Demgegenüber definiert die *Ablauforganisation* den Prozess, nach welchem Kommissionieraufträge eine oder mehrere Kommissionierzonen durchlaufen. Sie ist bedingt durch die Struktur der Aufträge und den Elementen Kommissionierart bzw. Zonenorganisation. Dabei bezeichnet die *Kommissionierart* die Art und Weise der Umwandlung von Aufträgen in Kommissionierlisten. Ist diese auftragsorientiert, so wird ein Auftrag, durch lagerspezifische Daten ergänzt, unmittelbar in eine Kommissionierliste transformiert; ist diese dagegen artikelorientiert, werden mehrere Aufträge mit dem Ziel der Bewegungsoptimierung kumuliert.²⁸

²⁶ Vgl. VDI 3590 (1994), S. 5.

²⁷ Auch strukturelle Organisation genannt.

²⁸ Vgl. VDI 3590 (1994), S. 3 f.; Martin (2011), S. 392 f.

Letztgenannte Kommissionierart bedarf eines zweistufigen Kommissioniersystems, welche in der zweiten Stufe die entnommenen Artikel den jeweiligen Kommissionieraufträgen zuordnet. Anzumerken ist, dass dieser Mehraufwand den Rationalisierungsgewinn aus der ersten Stufe sogar überkompensieren kann, weshalb dies gegeneinander abgewogen werden sollte.²⁹

Ist das Lager in verschiedene Zonen differenziert, spezifiziert die *Zonenorganisation* inwiefern einheitliche oder gemischte Kommissionierprozesse in den verschiedenen Zonen stattfinden. Bei einer einheitlichen Zonenorganisation werden alle Aufträge nach der gleichen Kommissionierart abgewickelt, während eine gemischte Organisation Typen, Größen etc. klassifiziert und gegebenenfalls unterschiedliche Kommissionierarten umfasst.³⁰

Die *Betriebsorganisation* als letztes Teilsystem betrachtet die zeitliche Reihenfolge, mit welcher „[...] ein oder mehrere Kommissionieraufträge in ein Kommissioniersystem eingesteuert und verfolgt werden.“³¹ Dabei hat sie die Optimierung des Gesamtsystems anhand der Größen wie:

- Personaleinsatz,
- Auftragsgröße,
- Kunde,
- Versandart,
- Durchlaufzeit,
- Terminierung oder
- Beschäftigungsgrad bei Serien zum Ziel.³²

Tabelle 2 fasst die herausgearbeiteten Klassifizierungsmerkmale nochmals zusammen.

Teilsystem	Kriterium	Realisierungsmöglichkeiten	
Aufbauorganisation	Zonenaufteilung	eine Zone	mehrere Zonen
Ablauforganisation	Sammlung	sequenziell	simultan
	Entnahme	artikelorientiert	auftragsorientiert
	Abgabe	artikelorientiert	auftragsorientiert
Betriebsorganisation	Auftragssteuerung	ohne Optimierung	mit Optimierung

Tabelle 2: Morphologischer Kasten zur Klassifizierung des Organisationssystems³³

2.2.3 Materialflusssystem

Abschließend bilden die sechs Teilsysteme Bereitstell-, Transport-, Entnahme-, Abgabe-, Sammel- und Rücktransportsystem gemeinsam das *Materialflusssystem*, welches im Nachfolgenden anhand jener Teilsysteme konkretisiert wird.

²⁹ Vgl. Gudehus (2008), S. 678 f.

³⁰ Vgl. VDI 3590 (1994), S. 4; Gleißner & Möller (2011), S. 28.

³¹ Vgl. VDI 3590 (1994), S. 4.

³² Vgl. VDI 3590 (1994), S. 4.

³³ Vgl. VDI 3590 (1994), S. 6.

Zu kommissionierende Artikel werden mittels *Bereitstellungssystem* den Kommissionierern zur Entnahme präsentiert und disponibel gemacht. Prinzipiell ist eine Bereitstellung in der Person zur Ware PzW-Kommissionierung (Siehe Kapitel 2.3) nicht nur statischer Natur, denn die Artikel werden auf Lagerplätzen in Regalen präsentiert, sondern wird zudem durch Regaltechnik realisiert. Die folgende Tabelle 3 veranschaulicht dabei die verschiedenen Bereitstellungsmöglichkeiten in Abhängigkeit der Dimension Dynamik und Zentralität.

		Dynamik	
		statisch	dynamisch
Zentralität	dezentral	Fachbodenregalanlage <ul style="list-style-type: none"> – Bereitstellung in einem Fachbodenregal – Kommissionierbewegung: entlang der Regalfront und Entnahme einzelner Einheiten entsprechend der Bedarfsinformationen – lediglich Bereitstellereinheiten für die Bedarf vorliegt werden bewegt. Prinzip "Person-zur-Ware"	Regalfront an AKL <ul style="list-style-type: none"> – Bereitstellung in einem automatischen Kleinteilelager (AKL) – Kommissionierbewegung: entlang der Regalfront und Entnahme einzelner Einheiten entsprechend der Bedarfsinformationen – Bereitstellung: dynamisch in der untersten Regalhöhe
	zentral	Kommissioniernest <ul style="list-style-type: none"> – Regalanordnung (meist U-Form) – Kommissionierbewegung: keine Wegstrecke, da in Mitte von U – Sehr hohe Kommissionierleistung (1000St./h) – Einsatz: bei begrenzter Anzahl kleinvolumiger Artikel 	Hochregallagervorzone <ul style="list-style-type: none"> – Bereitstellung in einem automatischen Hochregallager – Auslagerung zu zentraler Übergabe (meist Stetigförderer) – Kommissionierbewegung: Wegstrecke entfällt – Aus-/Einlagerung automatisch Prinzip „Ware-zur-Person“

Tabelle 3: Bereitstellungsdimensionen³⁴

Den Transport der Artikel zur eben angesprochenen Bereitstellung, respektive zum Abgabort nach erfolgter Entnahme, gewährleistet das *Transportsystem*. Zum Einsatz kommen dabei Stetig- und Unstetigförderer, wie Hubwagen (auch elektrisch) oder Förderbänder und Rollenförderer (Siehe Kapitel 2.3).

Des Weiteren definiert das *Entnahmesystem* die Methode, nach welcher die Artikel durch die Kommissionierer von ihren jeweiligen Lagerorten extrahiert werden. In der PzW-Kommissionierung kann dabei zwischen statisch³⁵ und dynamisch³⁶ unterschieden werden. Äquivalent zum Entnahmesystem ist auch das *Abgabesystem* in statisch bzw. dynamisch klassifizierbar, jedoch sind hierbei die vollständig kommissionierten Aufträge an den nachgelagerten Prozess zu übergeben. Das *Sammelsystem* hat die Kollektion der Artikel nach der Entnahme und vor der Abgabe zur Aufgabe, wobei dies dezentral, bei mitgeführten Samme-

³⁴ Vgl. ten Hompel et al (2011), S. 23.

³⁵ Bspw. Pick-to-Box: der Kommissionierer positioniert die Artikel auf einem mitgeführten Behälter.

³⁶ Bspw. Pick-to-Box: der Kommissionierer positioniert die Artikel auf ein parallel zur Regalfront angeordnetes und angetriebenes Förderband ab.

leinrichtungen, respektive zentral, bei einem permanenten Abgabepunkt, erfolgen kann. Ein *Rücktransportsystem*, welches nicht einem Kommissionierauftrag zuordenbare Teile an den entsprechenden Lagerort zurückbefördert, ist nicht in jedem Kommissioniersystem vorhanden, wie z. B. in der PzW-Pick-und-Pack-Kommissionierung (Artikel werden Kundenauftragspezifisch direkt in Versandkartons abgelegt und diese anschließend versendet).³⁷

Äquivalent zu den Teilsystemen, welche das Materialflusssystem konstituieren, definiert die Richtlinie 3590 des VDI diverse Einheiten, in welche die Artikel im Verlauf des Kommissionierprozesses transformiert werden: So ist die *Lagereinheit* die Einheit des zeitlichen Transfers der bevorrateten Artikel während des Kommissionierprozesses. Indessen werden mithilfe von *Transporteinheiten* Bereitstellensysteme in der Kommissionierung versorgt bzw. entsorgt. Als *Beschickungseinheiten* werden diejenigen Einheiten bezeichnet, mit denen die entnommenen Artikel des Bereitstellortes nachgefüllt werden. Während die Menge eines Artikels am Bereitstellort, die für das Entnahmesystem angeboten werden, als *Bereitstelleinheit* bezeichnet werden. Die mittels Entnahmezugriff entnommene Menge eines zu kommissionierenden Artikels bildet die *Entnahmeeinheit*. Danach werden die Entnahmeeinheiten *Sammeleinheiten* zugeordnet, die bspw. mit getrennten Kundenaufträgen übereinstimmen und sich aus gleichen respektive verschiedenen Artikeln zusammensetzen. Abschließend bilden eine oder mehrere Sammeleinheiten die *Versandereinheit* (z. B. Paletten oder Schachteln), als welche die kommissionierten Artikel das Kommissioniersystem verlassen.³⁸

Neben der Einheitenklassifikation sind weitere, im Zusammenhang mit der Kommissionierung wichtige, Charakteristiken zur ganzheitlichen Erfassung der Terminologie zu berücksichtigen. So steht der *Transport der Güter zur Bereitstellung* für den Beförderungsprozess der Artikel zu ihren dedizierten Bereitstellorten (i. d. R. Regalplätze). Die ein- bis dreidimensionale *Bewegung der Kommissionierer zur Bereitstellung* ist für die PzW-Kommissionierung essenziell. Wird dabei der Kommissionierprozess in lediglich einer Gasse vollzogen, so entspricht dies einer eindimensionalen Bewegung. Erweitert um mindestens eine weitere Gasse, muss ein Gassenwechsellvorgang vorgenommen werden, der für eine Bewegung in zweiter Dimension steht. Eine additional vertikale Bewegung des Kommissionierers komplettiert die dritte Dimension. Hierbei erfolgt auch der Einsatz von unterstützenden Hilfsmitteln, wie bspw. eines Niederhubwagens mit Langgabel und Fahrerstand für die zweidimensionale oder eines Vertikal-Kommissionierers zur dreidimensionalen Bewegung.³⁹ Wie viele Entnahmeeinheiten je *Entnahmezugriff* entnommen werden, bedingen die Faktoren Artikelgröße bzw. -massen sowie die Konstitution und Übung des Kommissionierers, wie auch die genutzte Technologie, z. B. handfreie Pick-by-Voice- oder Pick-by-Vision-Kommissionierung. Äquivalent zur Bewegung des Kommissionierers zur Bereitstellung kann der *Transport der Artikel zur Abgabe*, die die Beförderung der entnommenen Teile zur Abgabe umfasst, in ein bis drei Dimensionen durchgeführt werden. Dabei erfolgt die *Abgabe* respektive Übergabe der erfüllten Aufträge an den nachgelagerten Prozess (wie die Verpackung) statisch auf einem stationären Wagen oder dynamisch auf einem Förderband. Zudem kann zwischen einer zentralen (an einem Ort) und einer dezentralen (an verschiedenen Orten oder nach Touren sortiert) Abgabe unterschieden werden. Des Weiteren ist eine Klassifizierung in eine geordnete Abgabe (Abgabe in einer bestimmten Sequenz und/oder einem bestimmten Ort) und einer will-

³⁷ Vgl. ten Hompel et al. (2011), S. 19-28; VDI 3590 (1994), S. 5 f.

³⁸ Vgl. VDI 3590 (1994), S. 3.

³⁹ Vgl. Martin (2011), S. 392.

kürlichen ungeordneten Abgabe möglich. Der vorwiegend in der Ware zur Person Kommissionierung (WzP-Kommissionierung)⁴⁰ vorzufindende *Rücktransport angebrochener Ladeeinheiten* beinhaltet die Rückführung nicht benötigter Teile an ihre jeweiligen Lagerorte.⁴¹

Diese Charakteristika werden von Tabelle 4 nochmals aufgegriffen und zusammenfassend dargestellt.

Vorgang	Realisierungsmöglichkeiten				Materialflusseinheit
Transport der Güter zur Bereitstellung	findet nicht statt	findet statt			Beschickungseinheit
		eindimensional	zweidimensional	dreidimensional	
		manuell	mechanisch	automatisch	
Bereitstellung	strategisch		dynamisch		Bereitstelleinheit
	zentral		dezentral		
	geordnet		ungeordnet		
Bewegung der Kommissionierer zur Bereitstellung	eindimensional	zweidimensional	dreidimensional		Sammeleinheit
Entnahme der Artikel durch Kommissionierer	ein Teil pro Zugriff		mehrere Teile pro Zugriff		Entnahmeeinheit
Transport der Güter zur Abgabe	eindimensional	zweidimensional	dreidimensional		Sammeleinheit
Abgabe	statisch		dynamisch		Sammeleinheit/ Versandeinheit
	zentral		dezentral		
	geordnet		ungeordnet		
Rücktransport der angebrochenen Lagereinheiten	findet nicht statt	findet statt			Beschickungseinheit
		eindimensional	zweidimensional	dreidimensional	
		manuell	mechanisch	automatisch	

Tabelle 4: Morphologischer Kasten zur Klassifikation des Materialflusssystems⁴²

2.3 Tätigkeiten im Materialflusssystem

Das Materialflusssystem determiniert die Art und Weise, wie sich die zu kommissionierenden Güter von der Bereitstellung bis zur Abgabe durch das Kommissioniersystem bewegen.⁴³ Abbildung 2 greift die verschiedenen Vorgänge im Materialflusssystem aus Tabelle 4 auf und hebt die durch einen Kommissionierer durchgeführten Vorgänge hervor.

⁴⁰ Siehe Kapitel 2.3.

⁴¹ Vgl. Martin (2011), S. 391 f.; ten Hompel (2011), S. 19-28.

⁴² Vgl. VDI 3590 (1994), S. 6.

⁴³ Vgl. VDI 3590 (1994), S. 1-6.



Abbildung 2: Vorgänge im Materialflusssystem⁴⁴

Die blau hinterlegten Vorgänge beschreiben die Arbeitsaufgabe des Kommissionierers, während die zwei grau hinterlegten Vorgänge nicht vom Kommissionierer durchgeführt werden.⁴⁵

Dabei kann der Leistungsumfang des Kommissionierens in Grundleistungen, Vorleistungen und Zusatzleistungen unterschieden werden. Zu den Grundleistungen gehören die Entnahme der Artikel, die Zusammenstellung der Auftragsmengen sowie die Befüllung der Versandeinheit. Die Vorleistungen stellen durch die Bereitstellung von Beständen und Nachschub einen effizienten Kommissionierablauf sicher. Abschließend bildet unter anderem das Etikettieren oder Verpacken Zusatzleistungen des Materialflusses. Der Prozess des Kommissionierens im engeren Sinne besteht nur aus den Grundleistungen.⁴⁶

In der Kommissionierung können zwei bereits erwähnte Grundprinzipien unterschieden werden: PzW und WzP. Bei der ersten Methode bewegt sich der Kommissionierer zu der Bereitstellungseinheit und entnimmt den Artikel. Entsprechend der Kommissionierliste werden die verschiedenen Bereitstellungseinheiten angesteuert und die Artikel in einem Sammelbehälter abgelegt. Dieser wird nach Abarbeitung aller Artikel an einer Basis abgegeben. Bei der WzP Kommissionierung bewegen sich hingegen die Entnahmeeinheiten zum Kommissionierer. Nachdem dieser den gewünschten Artikel in erforderlicher Stückzahl entnommen hat, bewegt sich die Entnahmeeinheit wieder in das Lager zurück. Jedoch sind auch Kombinationen beider Varianten möglich. Hierbei sind sowohl Kommissionierer als auch Entnahmeeinheit in Bewegung.⁴⁷

Vorteile des PzW-Systems sind ein geringer technischer Aufwand, kurze Auftragsdurchlaufzeiten sowie die mögliche Einbeziehung von Eilaufträgen. Des Weiteren ist das System sehr flexibel bezüglich Veränderungen des Sortiments und des Durchsatzes. Auch können alle Artikel weitestgehend unabhängig von Größe, Masse und Volumen kommissioniert werden. Nachteile sind vor allem ein hoher Grundflächenbedarf, bei einem großen Sortiment weite Wegstrecken sowie eine erschwerte Entsorgung leerer Ladehilfsmittel und Nachschubver-

⁴⁴ Eigene Darstellung, basierend auf VDI 3590 (1994), S. 5-6.

⁴⁵ Vgl. Siepenkort (2013), S. 20.

⁴⁶ Vgl. Gudehus (2010), S. 661.

⁴⁷ Vgl. ten Hompel et al. (2011), S. 41.

sorgung.⁴⁸ Die Vorteile des WzP-Systems liegen darin, dass keine oder kaum Wegstrecken zurückgelegt werden müssen. Außerdem erlaubt die statische Position eine Anpassung des Arbeitsplatzes an den Kommissionierer. Die benötigte Grundfläche ist durch das Wegfallen der Kommissioniergassen kleiner als bei der PzW-Kommissionierung. Jedoch sind hohe Anfangsinvestitionen für das automatisierte System notwendig. Des Weiteren sind hohe Kosten pro Bereitstellvorgang, sowie lange Auftragsdurchlaufzeiten möglich. Der guten Flexibilität bei Sortimentsänderungen steht eine schlechte Anpassungsmöglichkeit bei sich ändernden Leistungsanforderungen gegenüber.⁴⁹

Innerhalb der Unterteilung PzW kann zusätzlich nach dem Automatisierungsgrad des Systemtyps in manuelle, teilautomatisierte und vollautomatisierte Systeme unterschieden werden. Da in der vollautomatisierten Methode nur Kommissionierroboter eingesetzt werden, wird sie im Rahmen des vorliegenden Berichts nicht weiter betrachtet. Die Systemtypen der manuellen Kommissionierung können in konventionelles Kommissionieren, Kommissioniernest und Kommissioniertunnel eingeteilt werden. Während sich der Kommissionierer bei der konventionellen Methode durch die Gänge bewegt und die gewünschten Artikel entnimmt, werden in einem Kommissioniernest, auch Kommissionierzelle genannt, alle Artikel des Sortiments in der Nähe des Kommissionierers platziert. Mit diesem System können zwar nur eine begrenzte Sortimentgröße und relative kleine Artikel bearbeitet werden, die Kommissionierzeit wird aufgrund der kaum vorhandenen Wegstrecken dafür deutlich verkürzt. Bei einem Kommissioniertunnel laufen die Entnahme und die Auffüllung der Artikel getrennt voneinander ab. Per se entsprechen diese Arten der Kommissionierung aber der konventionellen Methode.⁵⁰

Die teilautomatisierte Kommissionierung in der PzW-Kommissionierung kann nach ten Hompel, Sadowsky und Beck in vier Systeme unterschieden werden, wobei das manuelle Kommissionieren mit fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) dem konventionellen Kommissionieren ähnelt. Jedoch werden die Sammelbehälter mit einem softwaregesteuerten FTF transportiert, welches nach Beendigung des Auftrages den Sammelbehälter zur Basis zurückfährt.⁵¹ Das Kommissionieren im Hochregal unterscheidet sich von den bisher genannten Systemen durch das Hinzukommen einer vertikalen Bewegungsmöglichkeit. Stapler oder Regalbediengeräte steuern die verschiedenen Ebenen des Hochregals an und kommissionieren die Ware daraus. Drittes System ist die manuelle Kommissionierung mit Bahnhöfen - auch Stationskommissionierung genannt. Analog zur konventionellen Methode werden die Artikel von der entsprechenden Bereitstellereinheit manuell in die Sammelbehälter gelegt. Die Abgabe der Behälter erfolgt jedoch dezentral an sogenannten Kommissionierbahnhöfen. Dort werden die Behälter an einen Stetigförderer weitergegeben, welcher sie zum nächsten Bahnhof, beziehungsweise zur Basis befördert. Durch die kombinierte Nutzung von Durchlauf- und Fachbodenregalen kann dieses System noch erweitert werden, wobei die häufig zu kommissionierenden Artikel entlang des Stetigförderers auf Durchlaufregalen positioniert

⁴⁸ Vgl. Gudehus (2010), S. 669-670.

⁴⁹ Vgl. Gudehus (2010), S. 674.

⁵⁰ Vgl. ten Hompel et al. (2011), S. 66-69.

⁵¹ Vgl. ten Hompel et al. (2011), S. 66-69.

sind. Die übrigen Artikel befinden sich auf Fachbodenregalen, die, senkrecht zum Stetigförderer, gassenförmig angeordnet sind.⁵²

3. Leistung in der Person-zur-Ware-Kommissionierung

3.1 Allgemeine Einführung

Während die Leistung von Maschinen relativ einfach zu ermitteln bzw. bei Kauf bereits angegeben und bekannt ist, ist dies bei Personen in der PzW-Kommissionierung weniger trivial. Für eine adäquate Leistungsdefinition respektive Leistungsbeurteilung in der Kommissionierung bietet sich eine Annäherung mit einer holistischen makroskopischen Betrachtungsebene des gesamten Unternehmens als Ausgangspunkt an. Ein Unternehmen als soziale technische Einheit erzeugt dabei mittels Transformationsprozesse aus Inputgrößen einen Output (Produkt), dessen Wertezuwachs als Wertschöpfung bezeichnet wird, welche somit gleichbedeutend mit einer Funktion über die Zeit ist (siehe Abbildung 3).⁵³

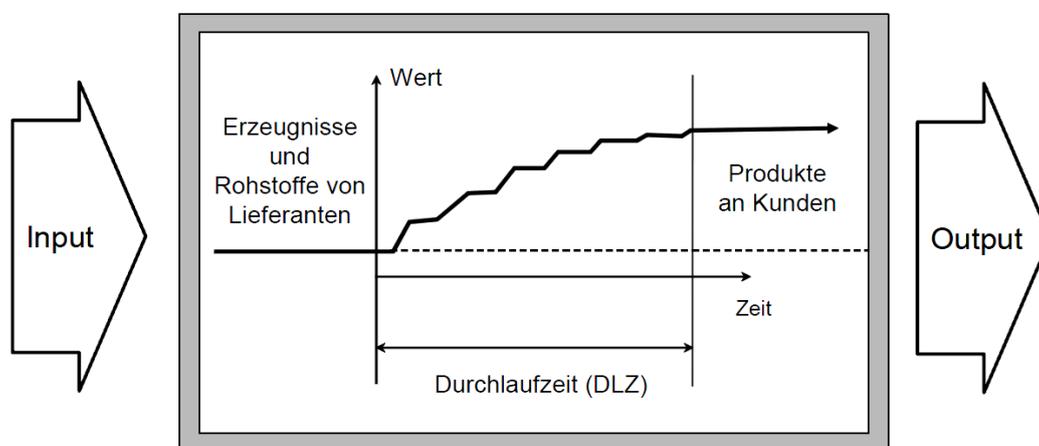


Abbildung 3: Transformationsprozess⁵⁴

Jenes Verständnis von Wertschöpfung ist folglich kongruent zum Leistungsverständnis in der Betriebswirtschaft, welche Leistungen „[...] [als] mit Preisen bewerteten, betriebsbedingten Zuwachs an Sachgütern und Dienstleistungen während einer Abrechnungsperiode [...]“⁵⁵ definiert. Zudem lässt sich der Begriff „Effizienz“ als Begriffsanalogie verwenden, da dieser das Verhältnis von realisiertem Systemoutput und beanspruchten Ressourcen eines Transformationsprozesses umfasst; wird hingegen das Verhältnis von realisiertem Systemoutput und Standardoutput analysiert, beschreibt dies die Effektivität der Leistungserbringung.⁵⁶ Zwar spezifizieren sowohl die Definition nach Domschke und Scholl als auch die Definition nach DIN EN 14943 den Begriff Leistung, jedoch vernachlässigen sie, mittels Fokus auf beanspruchte Ressourcen bzw. realisierter Systemoutput, den Aspekt des Transformationsprozesses.

⁵² Vgl. ten Hompel et al. (2011), S. 70-74.

⁵³ Vgl. Westkämper (2006), S. 33 f.

⁵⁴ Vgl. Westkämper (2006), S. 34.

⁵⁵ Vgl. Domschke und Scholl (2008), S. 307.

⁵⁶ Vgl. DIN EN 14943 (2006), S. 41.

Demzufolge ist eine weitere prozessorientierte Leistungsdefinition zu betrachten, die in Form der physikalischen Definition von Leistung bereitgestellt wird. Hierbei wird die Leistung als erbrachte mechanische Arbeit ΔW über einen bestimmten Zeitraum der Dauer Δt festgelegt, ergo Arbeit je Zeiteinheit.⁵⁷ Dabei wird die Arbeit auf eine durch Kraft F resultierende Bewegung eines Körpers über die gerichtete Wegstrecke s bezogen.⁵⁸

Auf die Kommissionierung übertragen, setzt sich daher die Leistung aus der zurückgelegten Wegstrecke sowie der hierbei bewegten Masse einer Periode zusammen. Jedoch wird in der Praxis die Masse eines Gutes nicht uneingeschränkt erfasst, weshalb eine weitergefasste Definition von Leistung gefunden werden muss, inklusive Berücksichtigung des Zeitanteils, sodass der Transformationsprozess einbezogen wird. Daher wird die Leistung analog des Durchsatzes von Unstetigförderern in automatisierten Kommissioniersystemen festgelegt, welcher mittels Beschleunigungen, Geschwindigkeiten sowie weiterer Kenngrößen der X-, Y- und Z-Achsen berechnet werden kann.⁵⁹ Für die Kommissionierleistung sind demnach analog dazu Arbeits- durch Zeitkomponente zu dividieren, wobei die Kommissionierzeiten in PzW-Kommissioniersystemen den Spielzeiten automatisierter Systeme entsprechen.

3.2 Kommissionierleistung und Einflussgrößen

3.2.1 Abgrenzung zwischen Logistikleistung und Kommissionierleistung

Die Logistikleistung kann neben den Logistikkosten aus dem Effizienzziel eines Unternehmens abgeleitet werden. Eine Methode zur Bewertung der Logistikleistung ist der Lieferservice. Er wird durch die Aspekte Lieferzeit, Lieferzuverlässigkeit, Lieferqualität und Lieferflexibilität bestimmt und ist somit mehrdimensional.⁶⁰ Eine hohe Logistikeffizienz setzt sich in der VDI 4400 aus geringen Logistikkosten und einer hohen Logistikleistung zusammen. Hierbei wird die Logistikleistung neben dem Lieferservice durch eine kurze Durchlaufzeit und eine hohe Produktivität bestimmt.⁶¹

Im Gegensatz zur mehrdimensionalen Logistikleistung, wird die Kommissionierleistung (KL) häufig eindimensional in Anhängigkeit von der Zeit definiert. Nach Gudehus entspricht die Kommissionierleistung der Anzahl an Positionen, die innerhalb einer Stunde bearbeitet werden können. Über die mittlere Kommissionierzeit pro Position kann die effektive Kommissionierleistung berechnet werden. Dabei repräsentieren die Formeln eins bis drei die unterschiedlichen Definitionen.

Kommissionierleistung:

$$KL = n_{pos}/h$$

Mittlere Kommissionierzeit:

⁵⁷ Vgl. Halliday und Resnick (1988), S. 155.

⁵⁸ Vgl. Hering (2013), S. 82.

⁵⁹ Siehe bspw. die FEM-Richtlinie 9.851 zur Leistungsberechnung von mit Regalbediengeräten ausgestatteten Hochregallagern.

⁶⁰ Vgl. Fleischmann (2008), S. 8-9.

⁶¹ Vgl. VDI 4400 (2002), S. 5.

$$\tau_{Pos} = \tau_{AKom} / n_{Pos}$$

Effektive Kommissionierzeit:

$$\mu_{KPos} = \eta_{ver} * \eta_{aus} * 3600 / \tau_{Pos}$$

Wobei τ_{AKom} die Auftragskommissionierzeit in Sekunden, n_{Pos} die Anzahl an Positionen, η_{ver} die Verfügbarkeit und η_{aus} die Auslastbarkeit des Kommissionierers sind. Die Kommissionierzeit setzt sich neben der Wegzeit und der Greifzeit aus zwei weiteren Komponenten zusammen. Darüber hinaus entspricht die Rüstzeit der Zeit, die für das Verarbeiten der Informationen, dem Positionieren, das Handhaben der Artikel und das Warten benötigt wird. Die Basiszeit entsteht nur in Systemen mit einer Basis und setzt sich aus der benötigten Zeit für die auftragsbezogene Vorbereitung beziehungsweise Nachbereitung zusammen. Hierzu gehören bspw. die Abgabe der kommissionierten Ware oder die Annahme neuer Picklisten. Die Verfügbarkeit des Kommissionierers entspricht der produktiven Zeit geteilt durch die Anwesenheit solange Kommissionieraufträge zu bearbeiten sind. Demgegenüber ist die Auslastbarkeit von den unplanmäßigen Wartezeiten abhängig und entspricht der Kommissionierzeit dividiert durch die Summe aus Kommissionier- und Wartezeit.⁶²

Auch ten Hompel, et al (2011) berechnen die Kommissionierleistung als Kommissionierpositionen pro Stunde. Im Unterschied zu Gudehus (2010) teilen sie die Kommissionierzeit jedoch in eine Bearbeitungszeit bestehend aus der Basiszeit, Greifzeit, Totzeit, Sortierzeit sowie eine Zusammenführzeit ein. Letztere besteht aus der gassengebundenen bzw. gassenungebundenen Wegzeit.⁶³

Neben der Kommissionierleistung bestimmen auch die Pickleistung und die Sammelleistung eines Kommissionierers seine Arbeitsleistung. Dabei entspricht die Pickleistung der entnommenen und abgelegten Artikelanzahl pro Stunde. Hier hingegen lässt sich die Sammelleistung als Versandeinheiten pro Stunde berechnen.⁶⁴

Die Kommissionierqualität unter Berücksichtigung von Kommissionierfehlern ist ein weiteres Kriterium zur Bewertung von Kommissionierern. Sie ist aber kein Bestandteil der Kommissionierleistung und wird deshalb im vorliegenden Bericht nicht berücksichtigt. Jedoch kann durch die Vermeidung und Behebung von Fehlern ein Einfluss auf die Kommissionierzeit und somit auf die Kommissionierleistung entstehen.⁶⁵ Eine indirekte Berücksichtigung der Kommissionierqualität ist somit möglich. Auch auf die Einbeziehung von Kosten als mögliches Bewertungskriterium wird verzichtet. Entweder müssten die Gesamtkosten auf den einzelnen Kommissionierer heruntergebrochen werden, was zu ungenauen und evtl. nicht nachvollziehbaren Ergebnissen führen würde oder die Kosten müssten über die einbezogenen Einflussgrößen berechnet werden. Da eine derartige Transformation der Leistungsparameter in Kosten keinen Einfluss auf die Bewertung als solche ausübt und zudem weitere Informationen erhoben werden müssten, wird von einer Betrachtung der Kosten abgesehen.

⁶² Vgl. Gudehus (2010), S. 735-745.

⁶³ Vgl. Sadowsky (2007), S. 77-112; ten Hompel et al. (2011), S. 128-129.

⁶⁴ Vgl. Gudehus (2010), S. 735.

⁶⁵ Vgl. ten Hompel et al. (2010), S. 31.

3.2.2 Einflussgrößen auf die Kommissionierleistung

Im Folgenden werden die in der Literatur genannten Einflussgrößen auf die Kommissionierleistung beschrieben, wobei je nach Autor auch andere Aspekte als die Positionen pro Stunde für die Kommissionierleistung betrachtet werden.

Die Leistungsfähigkeit eines Kommissioniersystems allgemein ist von verschiedenen Anforderungen abhängig. Zu nennen sind hier insbesondere Durchlaufzeit, Flexibilität, Qualität, Erweiterbarkeit, Durchsatz und Kosten.⁶⁶ Demgegenüber wird die Kommissionierleistung neben dem Kommissioniersystem und der Struktur der Aufträge stark von der Sortimentsbreite und der Kapazität der Versand- und Bereitstelleneinheiten bestimmt.⁶⁷ Auch das Layout beziehungsweise die Infrastruktur beeinflussen die Leistung. Zu nennen sind hier bspw. die Gangbreite und die Lagerfachtiefe. Die Betriebsstrategien im Sinne der Einlager- oder Wegstrategien werden durch einen Koordinator vorgegeben, beeinflussen aber wesentlich die Kommissionierleistung.⁶⁸ Des Weiteren setzt sich der Einfluss der Arbeitsbedingungen aus den beiden in Kapitel 3.2.1 genannten Faktoren Verfügbarkeit und Auslastbarkeit zusammen.⁶⁹

Stinson, Sommer und Wehking (2014) untersuchen den Einfluss der Anzahl der Positionen und Entnahmen, der kumulierten Auftragsmasse und Auftragsvolumen, der Wegstrecke sowie der Transportarbeit auf die Auftragsbearbeitungszeit. Letztere wird einerseits massenbezogen als Anzahl transportierter Kilogramm multipliziert mit der Anzahl zurückgelegter Meter und andererseits volumenbezogen als Anzahl der transportierten Kubikmeter multipliziert mit der Anzahl zurückgelegter Meter betrachtet. Bei allen sieben Einflussfaktoren können positive lineare Korrelationen mit der Auftragsbearbeitungszeit ermittelt werden, wobei die Anzahl der Positionen mit $r=0,8$, die Anzahl der Entnahmen mit $r=0,81$ und massenbezogene Transportarbeit mit $r=0,72$ die höchsten Korrelationen aufweisen. Außerdem wird eine multiple lineare Regressionsanalyse durchgeführt, um die Auftragsbearbeitungszeit zu prognostizieren. Berücksichtigt werden hierbei die Anzahl der Positionen und Entnahmen, sowie die massenbezogene Transportarbeit.⁷⁰

Siepenkort (2013) ermittelt, aufbauend auf der Literatur, sechs Einflussfaktoren. Die kommissionierte Mengen, die Bearbeitungszeit des Kommissionierauftrages, die zurückgelegte Wegstrecke, die bewegte Masse, das bewegte Volumen sowie die Kommissionierqualität. Jene Kennwerte werden über Kennzahlen in einen individuellen Effizienzwert überführt, welcher der Kommissionierleistung entspricht.⁷¹

⁶⁶ Vgl. Galka und Günthner (2008), S. 2.

⁶⁷ Vgl. Gudehus (2010), S. 735-745.

⁶⁸ Vgl. Sadowsky (2007), S. 47-48.

⁶⁹ Vgl. Gudehus (2010), S. 735-745.

⁷⁰ Vgl. Stinson et al. (2014), S. 54-73.

⁷¹ Vgl. Siepenkort (2013), S. 56 und 117.

Abbildung 4 fasst die in der Literatur gefundenen Einflussgrößen zusammen. Welche Aspekte jedoch in einer Untersuchung analysiert werden können, hängt maßgeblich von der Beschaffenheit der Primär- oder Sekundärdaten ab.



Abbildung 4: Einflussfaktoren auf die Kommissionierleistung⁷²

3.3 Kennzahlen zur Quantifizierung der Leistung

3.3.1 Differenzierung in Kennzahlen, Kennzahlenarten und Kennzahlensystemen

Weber und Schäffer (2014) definieren Kennzahlen als „[...] quantitative Daten, die als bewusste Verdichtung der Realität über zahlenmäßig erfassbare betriebswirtschaftliche Sachverhalte informieren sollen.“⁷³ Auch Reichmann (2011) definiert eine Kennzahl durch die drei Aspekte: Quantifizierbarkeit, Informationscharakter und spezifische Form der Information. Eine Kennzahl muss somit das zu Messende auf einem metrischen Skalenniveau wiedergeben können, die Urteilsbildung ermöglichen und zur Vereinfachung schwieriger Sachverhalte dienen.⁷⁴ Kennzahlen können deshalb auch als „[...] speziell herauszuhebende Informationen [...]“⁷⁵ angesehen werden.

Meist ist eine Kennzahl für sich nicht aussagekräftig genug und es werden mehrere Kennzahlen benötigt. Werden diese Kennzahlen in Beziehung zueinander gesetzt, bilden sie ein Kennzahlensystem. Die Kennzahlen können dabei durch logische, empirische oder hierarchische Beziehungen verknüpft werden. Eine logische Beziehung besteht bei einer begriffli-

⁷² Eigene Darstellung, basierend auf Sadowsky (2007), S. 47-48; Gudehus (2010), S. 735-745; Stinson et al. (2014), S. 54-73; Siepenkort (2013), S. 56 und 117.

⁷³ Vgl. Weber und Schäffer (2014), S. 173.

⁷⁴ Vgl. Reichmann (2011), S. 24.

⁷⁵ Vgl. Küpper u.a. (2013), S. 471.

chen oder mathematischen, tautologischen Umformung. Empirische Beziehungen lassen sich aus der Realität ableiten und benötigen eine Überprüfung anhand von Hypothesen. Auch aus der Realität ableiten lassen sich hierarchische Beziehungen. Allerdings stellen sie zusätzlich eine Rangordnung dar. Diese Rangordnung kann auf Basis von objektiven, bzw. sachlichen oder subjektiven Bewertungen erfolgen.⁷⁶

Durch die Vereinfachung der Sachverhalte, die durch eine Kennzahl erfolgt, entstehen mögliche Risiken bei der Nutzung von Kennzahlen. Bei der Konzentration auf eine Kennzahl werden andere, für den zu messenden Sachverhalt, wichtige Aspekte nicht berücksichtigt und dementsprechend fokussiert sich das Handeln der Kennzahlnutzer nur auf diese Kennzahl. Eine andere Gefahr besteht beim Vergleich von Kennzahlen, wenn eine Orientierung an Durchschnittswerten erfolgt und eine mögliche bessere Leistung daraufhin nicht angestrebt wird.⁷⁷

Je nach Strukturierung der Kennzahlen entstehen unterschiedliche Kennzahlarten. Zunächst ist eine Unterscheidung in absolute Zahlen und Verhältniszahlen möglich. Verhältniszahlen können Indexzahlen, Gliederungszahlen oder Beziehungszahlen darstellen. Ein weiteres Gliederungskriterium ist das Bezugsobjekt. Kennzahlen können sich auf das Unternehmen, beziehungsweise Unternehmensteilbereiche oder auf das Unternehmensumfeld beziehen. Bezogen auf den Nutzer von Kennzahlen kann eine Unterscheidung in unternehmensinterne und unternehmensexterne Zahlen erfolgen. Des Weiteren können finanzielle und nicht-finanzielle sowie Ist-Kennzahlen und Plan-Kennzahlen gebildet werden. Auch die Beeinflussbarkeit des Endergebnisses ist eine Strukturierungsmöglichkeit. So messen nachlaufende Kennzahlen die vergangene Leistung, während vorlaufende die zukünftige Leistung darstellen und Verbesserungsmöglichkeiten aufzeigen können.⁷⁸

Auch Weber und Schäffer (2014) teilen Kennzahlen in vier Kategorien ein. Relative und absolute Kennzahlen, monetäre und nicht-monetäre Kennzahlen, lokale und globale Kennzahlen und vorlaufende beziehungsweise nachlaufende Kennzahlen.⁷⁹

Reichmann (2011) kategorisiert Kennzahlen hingegen hinsichtlich der Informationsbasis, der statistischen Form, der Zielorientierung des Objektbereichs und hinsichtlich des Handlungsbezugs. Dabei stellt die Informationsbasis die Quelle der Informationen, wie bspw. die Kostenrechnung oder die Planungsrechnung, dar. Die statistische Form ist wie bereits beschrieben, die Unterteilung in absolute beziehungsweise relative Zahlen. Mit der Zielrichtung erfolgt eine Kategorisierung nach Zielgrößen wie bspw. Erfolgs- oder Liquiditätsziele. Während der Objektbereich dem oben bereits erwähnten Bezugsobjekt entspricht, bildet der Handlungsbezug einen neuen Aspekt ab. Im Gegensatz zu deskriptiven Kennzahlen, die rein beschreibend sind und noch weiter analysiert werden müssen, fordern normative Kennzahlen zu Handlungen auf, indem die Ziele bereits enthalten sind.⁸⁰

Tabelle 5 fasst die gefundenen Kennzahlarten und mögliche Ausprägungen zusammen.

⁷⁶ Vgl. Küpper u.a. (2013), S. 472-475.

⁷⁷ Vgl. Weber und Schäffer (2014), S. 208-209.

⁷⁸ Vgl. Sandt (2004), S. 12-13.

⁷⁹ Vgl. Weber und Schäffer (2014), S. 174.

⁸⁰ Vgl. Reichmann (2011), S. 25-26.

Kategorie	Ausprägung
Statistische Form	Absolute vs. relative Kennzahlen
Bezugsobjekt	Lokal / global
Nutzer	Unternehmensintern / unternehmensextern
Monetärer Bezug	Monetäre / nicht monetäre
Informationsbasis	Z.B. Kennzahlen basierend auf der Kostenrechnung
Beeinflussbarkeit	Vorlaufende / nachlaufende Kennzahlen
Zielrichtung	Z.B. Kennzahlen für die Erreichung von Liquiditätszielen
Handlungsbezug	Normativ / deskriptiv
Zeitbezug	Istkennzahlen / Plankennzahlen

Tabelle 5: Kennzahlenarten⁸¹

3.3.2 Funktionen von Kennzahlen

Eine Gliederungsmöglichkeit der Funktionen von Kennzahlen nach Dellmann und Pedell (1994) ist die Einteilung in die Informationsfunktion und in die Steuerungsfunktion. Die Informationsfunktion ermöglicht die Bereitstellung relevanter Daten für die Entscheidungsfindung, die Beurteilung gegebener Größen durch Gliederungen, beziehungsweise Vergleiche sowie eine Ursachenanalyse. Des Weiteren kann eine Kennzahl innerhalb der Informationsfunktion als Indikator für eine andere, nur schwer oder nicht direkt messbare Größe dienen. Eine Steuerungsfunktion nehmen Kennzahlen an, wenn sie als Zielvorgabe verwendet werden. Hierbei ist es notwendig, das gewünschte Ausmaß und einen Zeithorizont festzulegen. Diese Zielvorgaben können entweder entscheidungsproblemspezifisch oder stellenspezifisch sein. Dementsprechend führen sie zu einer Lösung eines bestimmten Entscheidungsproblems oder zu einer Koordination zwischen Organisationseinheiten durch Handlungsziele.⁸²

Nach Schulte (2001) erfüllen Kennzahlen die Funktionen der Quantifizierung von Zielen, sie dienen hierbei der Zielvorgabe und definieren den Raum und die Zeit sowie die Qualität und die Quantität des Ziels. Des Weiteren nennt Schulte die Kontrollfunktion, wobei eine Erfolgskontrolle durch einen Plan-ist-Vergleich durchgeführt wird. Kennzahlen können weiterhin als Vorgabe- und Analyseinstrument, sowie der Entscheidungshilfe dienen.⁸³

Weber und Schäffer (2014) nennen fünf nutzenstiftende Funktionen. Die Kontrollfunktion, die Soll-Ist-Vergleiche und Abweichungsanalysen ermöglicht, die Steuerungsfunktion, indem Kennzahlen den Steuerungsprozess vereinfachen und die Vorgabefunktion, wobei Kennzahlen als Lieferant von Zielwerten gelten. Des Weiteren werden die Operationalisierungsfunktion, welche zur Messbarkeit von Zielen führt, und die Anregungsfunktion, durch welche Kennzahlen ein Erkennen von Veränderungen ermöglichen, angeführt.⁸⁴

Friedel (2013) teilt die Funktionen in die Kategorien Informationsfunktion und Koordinationsfunktion ein. Wobei die Informationsfunktion wiederum unterteilt in eine Beurteilungs- und in

⁸¹ Eigene Darstellung, basierend auf Sandt (2004), S. 12-13; Weber und Schäffer (2014), S. 174; Reichmann (2011), S. 25-26.

⁸² Vgl. Dellmann und Pedell (1994), S. 109-114.

⁸³ Vgl. Schulte (2001), S. 462.

⁸⁴ Vgl. Weber und Schäffer (2014), S. 174-178.

eine Vergleichsfunktion differenziert wird. Die Koordinationsfunktion führt dazu, dass auf das gleiche Ziel hingearbeitet wird. Sie lässt sich unterteilen in eine Vorgabefunktion, eine Kontrollfunktion und eine Anreizfunktion.⁸⁵

Eine weitere mögliche Untergliederung der Funktionen von Kennzahlen findet sich bei Reichmann (2011). Er nennt zum einen eine externe Analysefunktion im Sinne von Bilanzanalyse und Betriebsvergleichen und zum anderen eine interne Analysefunktion, die Betriebsanalyse. Im ersten Fall soll eine Urteilsbildung und Entscheidungsfindung über andere Unternehmen, im zweiten Fall über das eigene Unternehmen erfolgen. Innerhalb dieser Unterteilung nennt Reichmann weiterhin die Funktion der Informationsbereitstellung von deskriptiven und normativen Informationen. Deskriptive Informationen führen zu der Funktion der Beschreibung, während normative Informationen eine Vorgabefunktion und damit verbunden eine Kontrollfunktion und einen Ursachenanalysefunktion ermöglichen.⁸⁶

Abbildung 5 stellt die Funktionen einer möglichen Unterteilungsvariante dar. Die Operationalisierungsfunktion wird hierbei als Grundfunktion angesehen, da erst durch die Messbarmachung und der damit einhergehenden Vereinfachung der Realität, die Funktionen der Information und Koordination ermöglicht werden.

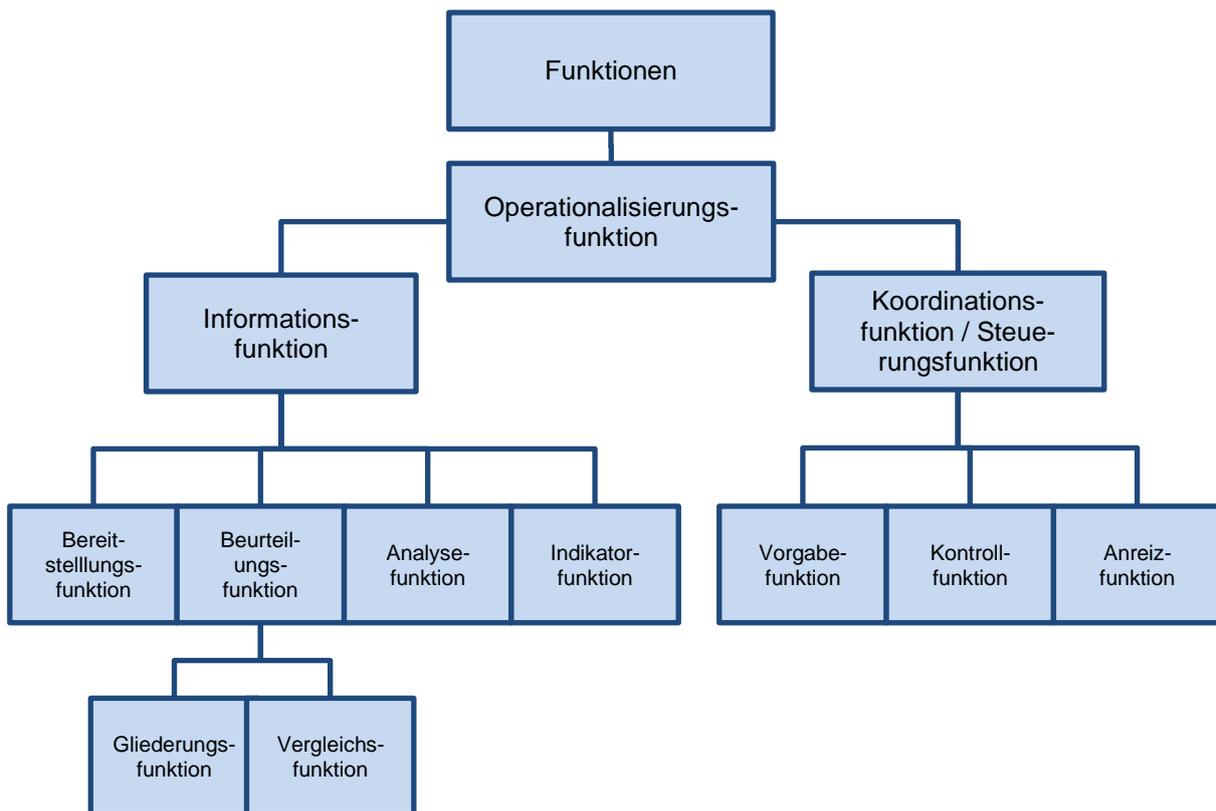


Abbildung 5: Funktionen von Kennzahlen⁸⁷

Der Fokus liegt insbesondere auf der Vergleichsfunktion, da diese für das weitere Vorgehen respektive die Auswertung von hoher Relevanz ist. Es kann zwischen den Formen Zeitver-

⁸⁵ Vgl. Friedl (2013), S. 257-258.

⁸⁶ Vgl. Reichmann (2011), S. 24-25.

⁸⁷ Eigene Darstellung, basierend auf Dellmann und Pedell (1994), S. 109-114; Schulte (2001), S. 462; Weber und Schäfer (2014), S. 174-178; Friedl (2013), S. 257-258; Reichmann (2011), S. 24-25.

gleich, Objektvergleich und Soll-/Ist- beziehungsweise Plan-/Ist- Vergleichen unterschieden werden. Bei einem Zeitvergleich werden verschiedene Zeitpunkte oder Zeitperioden desselben Untersuchungsobjektes miteinander verglichen. Während bei dem Objektvergleich die gleichen Kennzahlen von verschiedenen Objekten betrachtet werden. In der letzten Kategorie wird der tatsächliche Wert, der Ist-Wert, mit dem erwünschten Wert, dem Sollwert, beziehungsweise mit dem geplanten Wert verglichen.⁸⁸ Übertragen auf die Kommissionierung kann der Zeitvergleich dafür genutzt werden die Leistungssteigerung der Kommissionierer zu ermitteln; bzw. zur Beurteilung der Kommissionierleistung ein Soll-Ist-Vergleich durchzuführen.

3.3.3 Anforderungen an Kennzahlen

Bei der Erstellung und Anwendung von Kennzahlen müssen unterschiedliche Anforderungen berücksichtigt werden. Preißler (2008) hat einen Katalog mit 14 unterschiedlichen Anforderungen entwickelt.

Kennzahlen müssen aktuell sein und an sich ändernde Bedingungen angepasst werden, da die Nutzung von veralteten Kennzahlen zu falschen Entscheidungen führen kann.

Des Weiteren müssen Kennzahlen zielorientiert und zielgebunden sein. Das heißt, sie müssen eine Beziehung zwischen der Erfolgsgrößen und den Zielen abbilden, sowie einen anzustrebenden Zielwert besitzen. Daneben benötigt eine Kennzahl auch einen Soll-Wert. Dieser ist Voraussetzung für die Erfüllung der Indikatorfunktion und führt bei Unterschreitung zu einer Warnung an den Kennzahlnutzer.

Eine weitere Anforderung besteht in der Wirtschaftlichkeit. Dementsprechend dürfen die Kosten der Kennzahlen, die Informationsbeschaffungskosten, nicht höher als der Nutzen durch die Kennzahlen sein. Um diese Anforderung zu berücksichtigen, ist es notwendig die Anzahl der genutzten Messgrößen auf die wichtigsten zu beschränken.

Kennzahlen müssen außerdem exakt definiert und valide sein. Für die Anforderung der korrekten Interpretation sollten Kennzahlen nicht isoliert betrachtet und der Zeitraum der Erhebung berücksichtigt werden. Eine weitere Anforderung ist die korrekte Ermittlung. Fehler durch die Nutzung falscher Informationen oder einer falschen Verknüpfung können durch eine ständige Kontrolle der Kennzahlenentwicklung und des Ermittlungsverfahrens aufgedeckt werden. Außerdem sollten die Kennzahlen an den Benutzer angepasst und für diesen einfach zugänglich gemacht werden. Auch muss die Möglichkeit der Manipulation der Informationen verhindert und für jede Kennzahl mindestens ein Verantwortlicher festgelegt werden.

Schließlich sollten beim Arbeiten mit Kennzahlen auch qualitative Aspekte berücksichtigt werden.⁸⁹

⁸⁸ Vgl. Mensch (2008), S. 175-176.

⁸⁹ Vgl. Preißler (2008), S. 24-32.

Abbildung 6 stellt eine Übersicht der Anforderungen dar.



Abbildung 6: Anforderungen an Kennzahlen⁹⁰

3.3.4 Kennzahlen für die Kommissionierung

In der VDI 4490, werden operative Kennzahlen für die Kommissionierung beschrieben. Hierbei werden vier Kennzahlentypen unterschieden: Mengen- und Strukturdaten, die das Leistungsvolumen bzw. -struktur und die zur Erfüllung vorhandene Kapazität abbilden, Leistungskennzahlen, welche die Produktivität messen, Qualitätskennzahlen um Abweichungen bei der Zielorientierung zu messen, sowie betriebswirtschaftliche Kennzahlen, welche sich auf die entstehenden Kosten beziehen.⁹¹ Tabelle 6 stellt die aufgeführten Leistungskennzahlen entsprechend der Richtlinie dar.

Nr.	Kennzahl	Nr.	Kennzahl
1	Mitarbeiter Kommissionierung	11	Zeit pro Volumeneinheit
2	Arbeitsnettozeit Kommissionierung - brutto	12	Zeit pro Gewichtseinheit
3	Arbeitsnettozeit Kommissionierung – produktiv	13	Komm.-Aufträge pro Arbeitsnettozeit-Einheit
4	Arbeitsnettozeit Kommissionierung – Nebenzeiten	14	Position pro Arbeitsnettozeit-Einheit
5	Rüstzeit (Kommissionierung)	15	Greifeinheit pro Arbeitsnettozeit-Einheit
6	Greifzeit (Kommissionierung)	16	Volumen pro Arbeitsnettozeit-Einheit
7	Wegzeit (Kommissionierung)	17	Gewicht pro Arbeitsnettozeit-Einheit
8	Durchlaufzeit pro Komm.- Auftrag	18	Anteil Rüstzeit pro Komm.-Auftrag
9	Zeit pro Position	19	Anteil Greifzeit pro Komm.-Auftrag
10	Zeit pro Greifeinheit	20	Anteil Wegzeit pro Komm.-Auftrag
		21	Anteil Nebenzeiten

Tabelle 6: Leistungskennzahlen in der Kommissionierung nach VDI 4490⁹²

Die Nebenzeiten bestehen aus den Arbeitsstunden, die nicht direkt der Kommissionierung zuzuordnen sind. In der Brutto-Kommissionierzeit sind diese Nebenzeiten miteinberechnet, während sie kein Bestandteil der produktiven Arbeitsnettozeit sind.⁹³

⁹⁰ Eigene Darstellung, basierend auf Preißler (2008), S. 24-32.

⁹¹ Vgl. VDI 4490 (2007), S. 10.

⁹² Vgl. VDI 4490 (2007), S. 38-40.

Es sei darauf hingewiesen, dass die in Kapitel 3.2.1 genannten Definitionen der Kommissionierleistung, die sich aus den Kennzahlen der VDI 4490 ergeben, weitere Kennzahlen der Kommissionierung darstellen.

3.4 Methoden zur Leistungsbeurteilung in der Person-zur-Ware Kommissionierung

Zwar können die im vorangehenden Kapitel ermittelten Kennzahlen zur Leistungsermittlung herangezogen werden, doch hierzu bedarf es zusätzlich einer adäquaten Methode zur Implementierung der genannten Kennzahlen. Denn erst die Einbindung in eine entsprechende Methode ermöglicht die Quantifizierung der Leistung von sowohl eingearbeiteten als auch lernenden Mitarbeitern.

3.4.1 Multivariate Regressionsanalyse

Mittels Regressionsanalyse können Zusammenhänge zwischen einem unabhängigen Merkmal X und einem abhängigen Merkmal Y beschrieben werden. Dabei werden die linearen und nichtlinearen Regressionsanalysen unterschieden. Die lineare Regressionsanalyse nimmt grundsätzlich folgende Form an:

$$y_i = f(x_i) + e_i = a + bx_i + e_i$$

Mittels der *Methode der kleinsten Quadrate* und des t-Tests ist u. a. die Regressionsgerade ermittelbar. Im Rahmen einer *nichtlinearen Regressionsanalyse* hängt die Regressionsfunktion von mindestens einem unbekanntem Parameter nichtlinear ab.⁹⁴

Bei der *multiplen Regressionsanalyse* wird die einfache lineare Regressionsanalyse um einen oder mehrere weitere Regressoren. Die multiple Regressionsanalyse wurde bereits erfolgreich zur Bestimmung der Leistung in der Kommissionierung genutzt, wie aus dem Abschlussbericht des im Rahmen des von AiF geförderten Projekts *EfKom* des Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart (IFT) ersichtlich ist. Hierbei wird zunächst eine Korrelationsanalyse durchgeführt, wodurch die Relation respektive der Einfluss von Anzahl der Positionen und die Anzahl der Entnahmen auf die Kommissionierleistung untersucht werden.⁹⁵

Der Korrelationskoeffizient, welcher auf dem Intervall $[-1; +1]$ definiert ist, ist dabei als Maßgröße für die Stärke der linearen Abhängigkeit zu interpretieren. Nimmt die abhängige Variable linear mit der unabhängigen Variable zu, so beträgt der Korrelationswert $r = +1$, bzw. $r = -1$ sofern die abhängige Variable mit der unabhängigen Variable abnimmt. Besteht kein linearer Zusammenhang, dann nimmt der Korrelationskoeffizient den Wert 0 an. Der Rückschluss auf eine vollkommene Unabhängigkeit ist dabei jedoch nicht zulässig.⁹⁶

⁹³ Vgl. VDI 4490 (2007), S. 38.

⁹⁴ Vgl. Storm (2007), S. 264.

⁹⁵ Vgl. Stinson et al. (2014), S. 45 f. und S. 54.

⁹⁶ Vgl. Gebelein (1941), S. 365.

Anschließend fließen alle als relevant bewerteten Kennzahlen in die multivariate Regressionsanalyse ein.

3.4.2 Systeme vorbestimmter Zeiten

Neben Regressionsanalysen eignen sich auch Systeme vorbestimmter Zeiten für die Quantifizierung von Referenzzeiten eingearbeiteter Mitarbeiter. Prinzipiell werden einzelne Tätigkeiten bzw. Arbeitsschritte des gesamten Arbeitsumfangs analysiert, für welche Zeitbausteine (also vorbestimmte Zeiten) vorhanden sind und zur Darstellung des gesamten Arbeitsumfangs kumuliert werden.⁹⁷

Die Visualisierung des Lernens kann dabei mittels steigender Produktivitätskurve erfolgen, die den Lernfortschritt als Abnahme der Differenz aktueller Zeit zu Standardzeit (auf Basis vorbestimmter Zeiten) eines eingearbeiteten Mitarbeiters abbildet.⁹⁸ Exemplarisch wird hierfür die Methods Time Measurement (MTM)-Methode als eines der am weitesten verbreiteten Systeme vorgestellt. Der Elementarzyklus enthält nach MTM folgende Bewegungen:

1. Hinlangen,
2. Greifen,
3. Bringen,
4. Fügen,
5. Loslassen.⁹⁹

Die Soll-Zeitdauer der zu beschreibenden Arbeitstätigkeit wird mittels eines MTM-Zeitbausteinensystems in Form von TMU (Time Measurement Units) ausgedrückt. Dabei entspricht eine TMU 0,036 Sekunden.¹⁰⁰ Zwar wird MTM vorwiegend bei Montagetätigkeiten zur Vorgabezeitermittlung für die Arbeitsplanerstellung angewendet, doch auch innerhalb der Logistik wird MTM zunehmend eingesetzt.¹⁰¹

Da MTM standardisierte Zeiten für menschliche Bewegungsabläufe beinhaltet, können diese auch auf manuelle Kommissioniertätigkeiten übertragen werden. Bspw. werden in Softwarelösungen MTM-Zeiten bzw. MTM-Bausteine mit Layout- und Artikelinformationen verknüpft, wodurch nicht nur Soll-Pickzeiten für die Entnahme eines bestimmten Artikels ausgewiesen werden können, sondern zudem kürzere Wege, optimierte Personaleinsatzplanungen sowie eine verbesserte Lagerplatzzuordnung realisiert werden.¹⁰²

Eine exemplarische Vorgehensweise einer vollumfänglichen MTM-Planungsanalyse nach Bokranz und Landau visualisiert Abbildung 7.

⁹⁷ Vgl. Cakmakci und Karasu (2007), S. 338.

⁹⁸ Vgl. Bohlen und Barany (1976), S. 297.

⁹⁹ Vgl. Bokranz, R. and Landau, K., "Handbuch Industrial Engineering: Produktivitätsmanagement mit MTM", Schäffer-Poeschel (2011), S. 96.

¹⁰⁰ Vgl. Cakmakci und Karasu (2007), S. 338; Lotter (2012), S. 54.

¹⁰¹ Vgl. Loos (1996), S. 302.

¹⁰² Vgl. Steidl und Leßner (2003), S. 33 f.

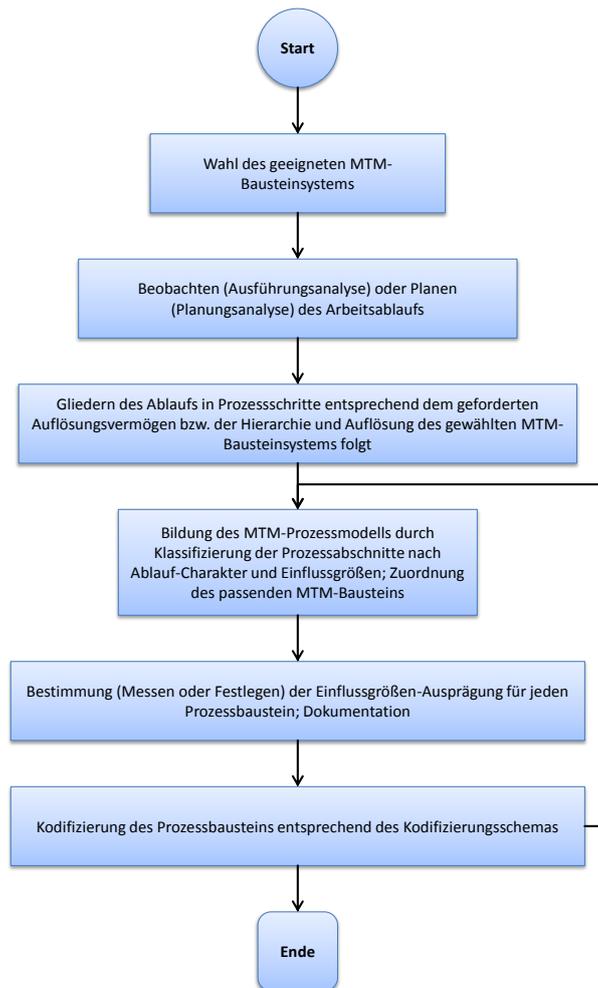


Abbildung 7: Vorgehensweise MTM-Planungsanalyse¹⁰³

Jedoch ist bei der Soll-Zeit-Ermittlung zu berücksichtigen, dass diese Zeiten lediglich dann geeignet sind, wenn der Mitarbeiter eingearbeitet ist, ein durchschnittliches Können bzw. Leistungspotenzial hat, physisch und psychisch gesund ist sowie unter Berücksichtigung der Qualität wie auch der gleichen Arbeitsbedingungen nach der gleichen Arbeitsmethode wie bei der MTM-Ermittlung arbeitet.¹⁰⁴ Problematisch ist aber bei der Übertragung auf die Kommissionierung, dass es sich hierbei um heterogene Aufträge respektive Tätigkeiten handelt, wodurch die Arbeitsmethodik frei gestaltbar ist. Hieraus folgende Leistungsunterschiede können lediglich mittels standardisierter Vorgaben der Arbeitsmethode vermieden werden.¹⁰⁵

3.4.3 Data Envelopment Analysis

Die Data Envelopment Analysis (DEA) ist neben der Wertanalyse, Kennzahlen im Allgemeinen, etc. eine in der Praxis bewährte Methode zur Bewertung der logistischen Leistungsfähigkeit von sowohl Prozessen, als auch organisatorisch zusammengefassten Systemen und

¹⁰³ Eigene Darstellung, basierend auf Bokranz und Landau (2006), S. 516 f. und S. 579-596.

¹⁰⁴ Vgl. de Greiff (2001), S. 65.

¹⁰⁵ Vgl. Sadowsky (2007), S. 189 f.

Teilsystemen in der Lager- und Distributionslogistik.¹⁰⁶ Daher ist zu überprüfen inwieweit die DEA als Mess- und Bewertungssystem für die individuelle Kommissionierleistung sowie zur Identifikation von Lernkurven bei Mitarbeitern geeignet ist und somit angewendet werden kann. Klumpp und Abidi ziehen hierfür folgende Kriterien zur Beurteilung von Mess- und Bewertungssystemen heran:

- Genauigkeit bei der Darstellung des zu betrachteten Objektes,
- Berücksichtigung aller Problemeinflüsse,
- Verhinderung von Fehlinterpretationen,
- Erhebungsaufwand,
- Methodenkomplexität,
- Formalisierbarkeit der Methode,
- Ermittlung der Effizienz.¹⁰⁷

Von Vorteil ist dabei, dass der Grundgedanke der DEA die Berechnung der Effizienz beinhaltet sowie mehrere Parameter in eine übergeordnete Kennzahl zusammengefasst werden.¹⁰⁸ Demzufolge wird auch der Punkt *Berücksichtigung aller Problemeinflüsse* erfüllt. Des Weiteren erfolgt sowohl eine Genaue Darstellung des Objektes als auch eine Verhinderung von Fehlinterpretationen bei einem Einsatz der DEA als Bewertungssystem für die individuelle Kommissionierleistung. Diesen Vorteilen steht jedoch nicht nur ein hoher Aufwand bei der Datenerhebung, sondern auch eine hohe Methodenkomplexität nachteilig gegenüber. Überdies ist die Formalisierbarkeit der Analysemethode bei einem Einsatz der DEA nur bedingt gegeben.¹⁰⁹

Für eine praxisnahe Anwendung in Unternehmen ist insbesondere auf eine sehr gute Handhabung zu achten, weshalb der Fokus auf die Punkte Genauigkeit der Darstellung des zu betrachtenden Objekts, geringer Erhebungsaufwand, eine geringe Methodenkomplexität und gute Formalisierbarkeit gelegt wird, wodurch eine Umsetzung bzw. Übertragung in der Praxis gewährleistet wird. Nach den oben aufgeführten Charakteristika der DEA stellt sie zwar die betrachteten Objekte genau dar, jedoch ist dies mit einem hohen Erhebungsaufwand, einer hohen Komplexität als auch einer bedingten Formalisierung verbunden. Folglich ist die DEA zwar für die Erfassung der Kommissionierleistung geeignet, dieser stehen aber insbesondere die Nachteile einer schwierigen Handhabung sowie ihre Anwendungsmöglichkeit in der Praxis entgegen.

¹⁰⁶ Vgl. Siepenkort (2013), S. 96.

¹⁰⁷ Vgl. Klumpp und Abidi (2011), S. 356.

¹⁰⁸ Vgl. Kleine und Sebastian (2009), S. 4.

¹⁰⁹ Vgl. Klumpp und Abidi (2011), S. 356.

4. Lerntheorie

4.1 Lernprozess allgemein und im industriellen Kontext

Lernen bezieht sich auf relative dauerhafte Veränderungen im Verhalten oder den Verhaltenspotenzialen eines Lebewesens in Bezug auf eine bestimmte Situation. Dabei beruht Lernen auf wiederholten Erfahrungen mit dieser Situation und kann nicht auf angeborene bzw. genetisch festgelegte Reaktionstendenzen, Reifung oder vorübergehende Zustände (z. B. Müdigkeit, Krankheit, Alterung oder Triebzustände) zurückgeführt werden.¹¹⁰

Wird eine bestimmte Vorgehensweise oder ein Verhalten durch Beobachten erlernt, wird dies häufig mit der Terminologie des *Beobachtungslernens* oder auch Lernen am Modell belegt. Diese Art des Lernens zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass der Lernende, ohne selbst Fehler machen zu müssen oder ohne eigenes Probieren, Handlungen erlernen kann.¹¹¹

Implizites Lernen wird von Berry und Dienes (1993) als Lernen definiert, bei dem Personen Dinge erledigen, ohne dies zu beabsichtigen und ohne dass das erlernte Wissen verbalisierbar ist. Folglich handelt es sich bei implizitem Lernen um einen intuitiven Lernprozess, dessen sich die Personen nicht bewusst sind und der beiläufig stattfindet.¹¹²

Des Weiteren wird Lernen ohne Belohnungen, wie sie beim Lernen durch Konditionierung üblich ist, wird als *latentes Lernen*¹¹³ bezeichnet. In Versuchen mit Ratten, die durch ein Labyrinth zu einer Futterbox gehen mussten, wurde festgestellt, dass die Ratten mit zunehmender Anzahl an Versuchen die Futterbox schneller erreicht haben.¹¹⁴ Aus diesen Versuchen entwickelte sich das Konzept der kognitiven Karten, wodurch Tiere und auch Menschen in der Lage sind, sich in vorher unbekanntem Umgebungen besser orientieren zu können. Die Versuche mit den Ratten zeigten auch, dass sie im Falle einer Belohnung, wenn sie hungrig in das Labyrinth gesetzt wurden, aufgrund des vorhandenen Wissens das Ziel der Futterbox schneller erreicht haben.

Auch im industriellen Umfeld finden Lernprozesse statt. Werden neue Mitarbeiter bspw. durch einen Coach eingearbeitet, so handelt es sich dabei um das Lernen am Modell. Kontinuierliches Lernen durch die steigende Routine lässt sich dem oben vorgestellten impliziten Lernen zurechnen.

Sinkt infolge des Lernens innerhalb eines laufenden Fertigungsprogramms der Fertigungsaufwand mit steigender Stückzahl und lässt sich dieses Phänomen als degressiver Verlauf grafisch darstellen, so stellt dies eine Lernkurve dar.¹¹⁵ Die Lernkurve ist somit das Resultat einer Formel, die die Leistung eines Mitarbeiters als Funktion der Anzahl der Übungswiederholungen darstellt.¹¹⁶

¹¹⁰ Vgl. Winkel et al. (2006), S. 6.

¹¹¹ Vgl. Kiesel und Koch (2012), S. 73.

¹¹² Vgl. Kiesel und Koch (2012), S. 84.

¹¹³ Latenz bezeichnet das Vorhandensein einer Sache, die (noch) nicht in Erscheinung getreten ist.

¹¹⁴ Vgl. Kiesel und Koch (2012), S. 63 f.

¹¹⁵ Vgl. Liebau (2002), S. 1.

¹¹⁶ Vgl. Funke (2006), S. 213.

Neben dem am häufigsten verwendeten Begriff *Lernkurve* tauchen in der Literatur noch weitere Begriffe auf. So finden sich Begriffe wie Einarbeitungskurve, Leistungskurve, Routinebildungskurve, Übungsgewinnkurve oder auch Zeitreduzierungskurve. In der englischsprachigen Literatur werden neben learning curve auch Begriffe wie cost reduction curve, efficiency curve oder auch time reduction curve verwendet.¹¹⁷ Wichtig ist jedoch die Unterscheidung von Lernkurve und *Erfahrungskurve*, da diese nicht miteinander verwechselt werden dürfen und die Abgrenzung somit essenziell für diese Ausarbeitung ist. Von einer Erfahrungskurve wird dann gesprochen, wenn die Erkenntnisse der Lernkurve auf ein gesamtes Unternehmen übertragen werden. Eingesetzt wird die Erfahrungskurve vor allem in der strategischen Unternehmensplanung. Dabei werden Einflussgrößen wie Betriebsgrößeneffekte, Rationalisierungseffekte oder die durch den technischen Fortschritt bedingten Auswirkungen berücksichtigt.¹¹⁸ Auf ein Produkt heruntergebrochen, betrachtet die Lernkurve die Fertigungskosten, die Erfahrungskurve hingegen alle mit dem Produkt in Verbindung stehenden Kosten wie die Entwicklungs-, Fertigungs-, Distributions-, Vertriebs-, Marketing-, Gemein-, oder auch die Kapitalkosten.¹¹⁹

Abbildung 8 visualisiert die verschiedenen Einflussgrößen auf die Lernzeit, welche sich nach de Greiff in drei Klassen unterteilen lassen.

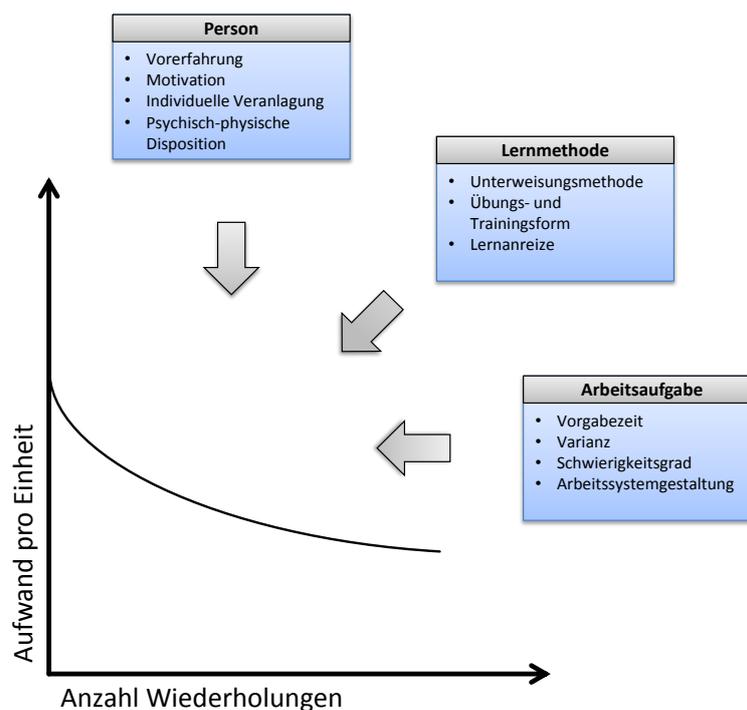


Abbildung 8: Einflussgrößen auf die Lernzeit¹²⁰

In der ersten Klasse sind die Einflussgrößen zusammengefasst, die von der die Tätigkeit ausübenden *Person* ausgehen. So können bspw. Vorerfahrung oder spezielle Kenntnisse sowie die Motivation und damit die Arbeitseinstellung einen großen Einfluss auf den Lernprozess haben. Auch individuelle Veranlagung wie bspw. die Leistungsfähigkeit, das Koordi-

¹¹⁷ Vgl. Liebau (2002), S. 180.

¹¹⁸ Vgl. Kistner (2005), S. 190.

¹¹⁹ Vgl. Homburg (2012), S. 73.

¹²⁰ In Anlehnung an de Greiff (2001), S. 118.

nationsvermögen und kognitive Fähigkeiten oder die psychisch-physische Disposition wie Krankheit, Tagesform, Stress oder Ermüdung haben einen Einfluss auf den Lernprozess und demzufolge die Lernzeit.¹²¹

Die zweite Klasse umfasst jene Einflussfaktoren, die von der Lernmethode ausgehen, wobei die Art der Unterweisungsmethode sich auf die Lernzeit auswirken kann. Eine Unterweisung erfolgt bspw. mit Hilfe von Anweisungen, die der Lernende in mündlicher oder schriftlicher Form erhält. Oder bei der Vier-Stufen-Methode erläutert der Lehrende dem Lernenden zunächst die Tätigkeit und führt sie dann beispielhaft aus. Im Anschluss daran muss der Lernende die Tätigkeit selbst durchführen und wird dabei vom Lehrenden betreut. Demgegenüber muss sich bei der Leittextmethode der Lernende die Tätigkeit selbst mit Hilfe von sogenannten Leitfragen erarbeiten und planen, die er vom Lehrenden gestellt bekommt. Nach Rücksprache mit dem Lehrenden führt der Lernende die Tätigkeit aus und überprüft selbstständig mit Hilfe einer Checkliste die erfolgreiche Durchführung. Im Anschluss daran erhält er vom Lehrenden eine Rückmeldung bezüglich seines Lernerfolges.¹²²

Neben der Unterweisungsmethode hat auch die Art der Arbeitspläne bzw. der Arbeitsunterweisungen einen Einfluss auf die Lernzeit. Laut einer Studie der RWTH Aachen, dem Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung und der ALROUND - Aktionsgemeinschaft luft- und raumfahrtorientierter Unternehmen in Deutschland e. V. verwenden über 70 % der befragten Unternehmen¹²³ schriftliche Arbeitsunterweisungen. Bei circa 45 % der Unternehmen werden Zeichnungen eingesetzt und 13 % der Unternehmen nutzen computeranimierte Arbeitsanweisungen.¹²⁴ Je verständlicher diese Arbeitsanweisungen gestaltet sind, desto eher helfen sie bei der Verkürzung der Lernzeit.

Die dritte Klasse beinhaltet die Einflüsse der *Arbeitsaufgabe*. Komplexe Tätigkeiten oder solche mit einer hohen Anzahl an Varianten führen zu einer längeren Lernzeit. Aber auch die Gestaltung des Arbeitssystems kann einen Einfluss auf die Lernzeit haben. Im Bereich der Kommissionierung können bspw. unterschiedliche Systeme wie Pick-by-Light oder Pick-by-Voice einen Einfluss auf die Lernzeit haben.

4.2 Lernkurvenmodelle

Die erste Beschreibung der Lernkurve geht auf Ebbinghaus zurück. In seinem dokumentierten Selbstversuch zeigt sich ein Zusammenhang zwischen der Anzahl an Lernwiederholungen einer Liste von Silben am ersten Tag und der benötigten Zeit zum Erlernen dieser Liste am zweiten Tag.¹²⁵

Die erste Arbeit, die Lerneffekte in der Industrie empirisch nachweist, stammt von Wright. In seiner Untersuchung über die Einflussfaktoren auf die Produktionskosten von Flugzeugen stellt er unter anderem fest, dass sich die Lohnkosten bei einer Verdopplung der Ausbrin-

¹²¹ Vgl. de Greiff (2001), S. 118.

¹²² Vgl. Schlick et al. (2014), S. 167.

¹²³ An der Umfrage nahmen N=1214 kleine und mittelständische überwiegend produzierende Unternehmen teil, vgl. Jeske et al. (2011), S. 21.

¹²⁴ Vgl. Jeske et al. (2011), S. 22.

¹²⁵ Vgl. Ebbinghaus (1885), o. S.

gungsmenge nur um 80 Prozent erhöhen. Wobei anzumerken ist, dass er den Einfluss nicht nur auf die Erfahrung der Arbeiter, sondern bspw. auch auf die mit großer Ausbringungsmenge verbundenen Standardisierung und dem damit möglichen Einsatz schlechter ausgebildeter Arbeiter zurückführt.¹²⁶

Ein Lerneffekt entsteht, da der Ausführende durch Wiederholung des Prozesses diesen schneller und mit weniger Fehler durchführen kann. Hierbei bildet eine Lernkurve den Zusammenhang zwischen der kumulierten Ausbringungsmenge und der benötigten Zeit ab. Nach der ersten empirischen Ausarbeitung durch Wright entstanden weitere, teilweise darauf aufbauende Lernkurvenmodelle.

Mittlerweile werden Lernkurven in vielen produzierenden Unternehmen berücksichtigt. Sie finden Berücksichtigung in der Angebotserstellung, der Vorkalkulation sowie der Kostenschätzung, bei der Planung von Produktionsprogrammen und Terminen wie dem Markteintritt, bei der Ermittlung von Vorgabezeiten für einzelne Arbeitsschritte sowie bei der Preisverhandlung mit Kunden und Zulieferern.¹²⁷ Auch bei der Gestaltung von Anreizsystemen im produzierenden Gewerbe werden Lernkurven eingesetzt.

Sogenannte persönliche Lernkurven entstehen durch das persönliche, individuelle Lernen, welches dort stattfindet, wo Mitarbeiter Aufgaben alleine durchführen und die Wirksamkeit dieser Tätigkeit durch Wiederholungen zunimmt.¹²⁸ Demzufolge können bspw. bei Überschreiten eines vereinbarten Lerngrades zusätzliche Leistungen an die Mitarbeiter ausbezahlt werden.¹²⁹

Zwecks einheitlichen Verständnisses werden wichtige, im Zusammenhang mit Lernkurven häufig angeführte Begrifflichkeiten nachstehend erläutert:

- Die *Lernrate* gibt an, auf welchen Prozentsatz vom Ursprungswert die Stückkosten bei einer Verdoppelung der kumulierten Produktionsmengen fallen.¹³⁰
- Der *Lerngrad* (Fortschrittsverhältnis) ist der Prozentsatz, um den der Ausgangswert verringert wird.¹³¹ Der *Lerngrad* entspricht somit 1-Lernrate.¹³²
- Bei der *Lernelastizität* handelt es sich um das Verhältnis zwischen dem relativen Anstieg der kumulierten Produktionsmenge und der daraus resultierenden relativen Veränderung der Kosten.¹³³

Aufgrund ihres Aufbaus werden Lernkurven in logarithmisch-lineare, exponentielle, hyperbolische und multivariate Modelle unterteilt. In den nachfolgenden Unterkapiteln, welche jene Logik aufgreifen, wird eine Auswahl an bereits in der Forschungsliteratur verwendeter Lernkurvenmodelle präsentiert, die jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

¹²⁶ Vgl. Wright (1936), S. 124-125.

¹²⁷ Vgl. Kistner (2005), S. 192.

¹²⁸ Vgl. Henfling (1978), S. 21.

¹²⁹ Vgl. Kistner (2005), S. 192.

¹³⁰ Vgl. Laarmann (2005), S. 24.

¹³¹ Vgl. Kistner (2005), S. 191.

¹³² Vgl. Laarmann (2005), S. 25.

¹³³ Vgl. Kistner (2005), S. 191.

4.2.2 Log-linear Lernkurven

Bei den klassischen Formen der Lernkurven handelt es sich um sogenannte log-linear Modelle, deren Formel in der Regel auf Potenzfunktionen basieren. Der Name stammt von deren linearen Verlauf in einem doppelt-logarithmischen Diagramm.

4.2.2.1 Wright

Bei der Montage von Flugzeugen stellte Wright im Jahre 1936 erstmals einen Zusammenhang zwischen der Zunahme der Stückzahl und der Abnahme der Stückkosten fest. Da es sich bei dem von ihm veröffentlichten Artikel mit dem Titel *Factors Affecting the Cost of Airplanes* um die erste Studie handelte, die sich dem Thema Lernkurven widmete, gilt er auch als „Vater der Lern- und Erfahrungskurven“. ¹³⁴ Wright beobachtete, dass bei Verdoppelung der Stückzahl der kumulative Durchschnittswert pro montierte Einheit um eine gleiche Rate sinkt. ¹³⁵ Mathematisch beschrieb er seine Beobachtungen mit folgender Formel: ¹³⁶

$$y = a * x^b$$

Mit:

y = Durchschnittlicher Fertigungsaufwand (pro Einheit) bei x kumuliert produzierten Einheiten,

a = Aufwand zur Produktion der ersten Einheit,

x = Anzahl der kumuliert produzierten Einheiten,

b = Lernindex.

Der Lernindex oder auch Degressionsfaktor ist der wichtigste Faktor der Formel. Er gibt die Lerngeschwindigkeit an und bestimmt die Krümmung der Lernkurve. Berechnen lässt sich der Lernindex aus der Lernrate, die im Beispiel 80% beträgt. ¹³⁷

$$b = \frac{\log\left(\frac{L}{100}\right)}{\log(2)} = \frac{\log\left(\frac{80}{100}\right)}{\log(2)} = -0,3219$$

Mit:

L = Lernrate in %.

Dargestellt wird die Lernkurve nach Wright in einem Diagramm, in dem auf der X-Achse die kumuliert produzierten Einheiten und auf der Y-Achse der durchschnittliche Aufwand eingetragen wird. Die Tabelle 7 enthält die numerischen Werte einer 20 %-Lernkurve mit einem Anfangswert von 100. In Abbildung 9 sind zwei Lernkurvenverläufe nach dem Modell von Wright mit den Lernraten L1 und L2 in Höhe von 60 % und 80 % dargestellt. Der Aufwand

¹³⁴ Vgl. Ullrich (1995), S. 13.

¹³⁵ Vgl. Wright (1936), S. 124.

¹³⁶ Vgl. Ullrich (1995), S. 15.

¹³⁷ Vgl. Ullrich (1995), S. 15.

zur Produktion der ersten Einheit betrug jeweils 100. In Abbildung 10 erfolgte eine doppelt-logarithmische Darstellung, wodurch die konstante Abnahme des durchschnittlichen Aufwandes deutlich wird.

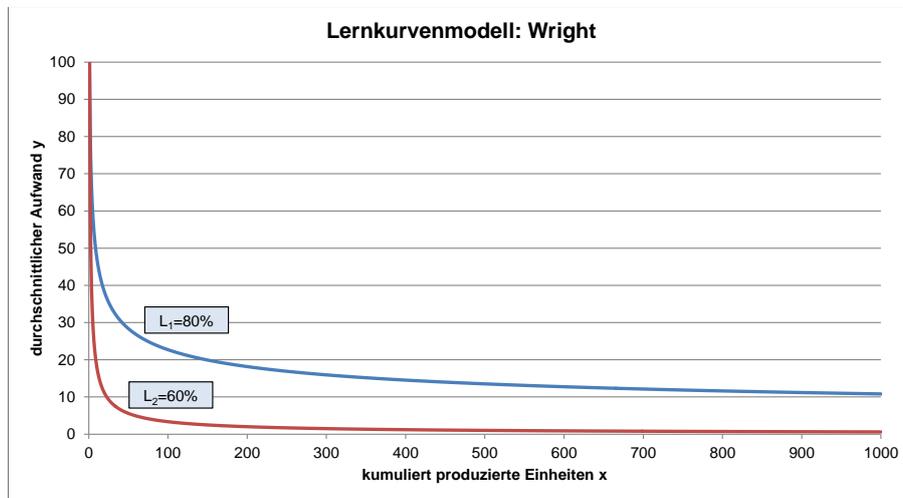


Abbildung 9: Kurvenverlauf der Lernkurve von Wright¹³⁸

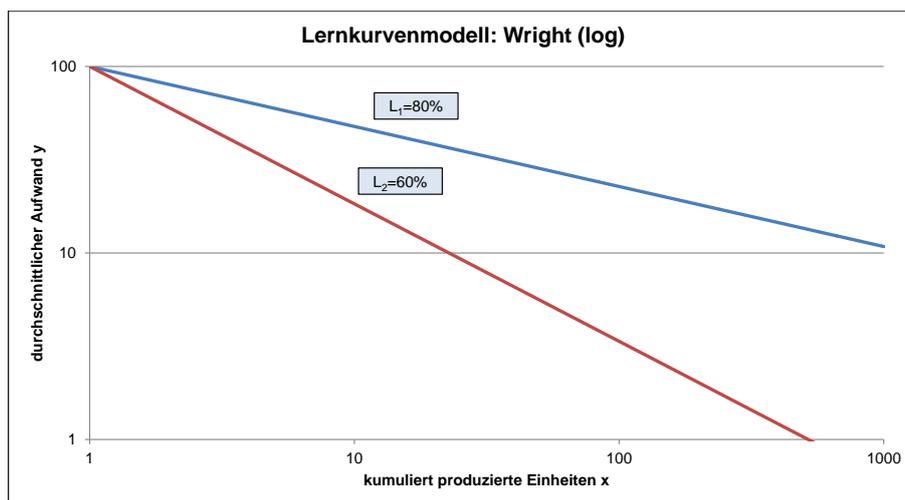


Abbildung 10: Kurvenverlauf der Lernkurve von Wright (log)¹³⁹

¹³⁸ Eigene Darstellung.

¹³⁹ Eigene Darstellung.

Anzahl der Flugzeuge	Durchschn. Aufwand für das Flugzeug in h	Durchschn. Einsparung pro Flugzeug in h bezogen auf das erste Flugzeug
1	100.00	-
2	80.00	20.00
4	64.00	36.00
8	51.20	48.80
16	40.96	59.04
32	32.77	67.23
64	26.21	73.79
128	20.97	79.03
256	16.78	83.22
512	13.42	86.58

Tabelle 7: Numerische Werte einer 80 %-Lernkurve¹⁴⁰

Der Lernprozess wird im Modell von Wright als unendlich angesehen, jedoch diese Annahme fragwürdig. Im Laufe der Serie flacht die Lernkurve mit zunehmender Stückzahl ab.¹⁴¹ Mittlerweile zählt dieses Modell aber zu den am weitesten verbreiteten, da es sich nicht nur sehr einfach anwenden lässt, sondern auch aufgrund der einfachen Konstruktion in der doppelt-logarithmischen Darstellung.¹⁴²

Den Einfluss von Lerneffekten auf die Leistung eines Kommissionierers untersuchten Grosse und Glock (2013) bereits ansatzweise mit Hilfe des Lernkurvenmodells von Wright. Betrachtungsgegenstand war der Kommissionierbereich eines mittelständischen Unternehmens, in dem überwiegend Kleinteile nach dem Prinzip PzW eindimensional kommissioniert werden.¹⁴³

Die Artikel befinden sich in den, wie in Abbildung 11 dargestellten u-förmig aufgestellten Regalen an festen Standorten. In der Mitte des U steht eine Rollenbahn, auf der sich die Transportboxen befinden, in welche die Kommissionierer die benötigten Artikel legen. Begonnen werden die Kommissionieraufträge an der Basis mit dem Erhalt der Pickliste, auf der die benötigten Artikel bereits in der zu den Standorten der Artikel passenden Reihenfolge aufgelistet sind. Die parallel zur Rollenbahn verlaufende Route der Kommissionierer ist bei jedem Auftrag identisch und endet wieder an der Basis mit dem Umsetzen der Transportboxen auf eine zweite Rollenbahn.

¹⁴⁰ Eigene Darstellung.

¹⁴¹ Vgl. Liebau (2002), S. 6.

¹⁴² Vgl. Nembhard und Osothsilp (2001), S. 268; de Greiff (2001), S. 33.

¹⁴³ Vgl. Grosse und Glock (2012), S. 266.

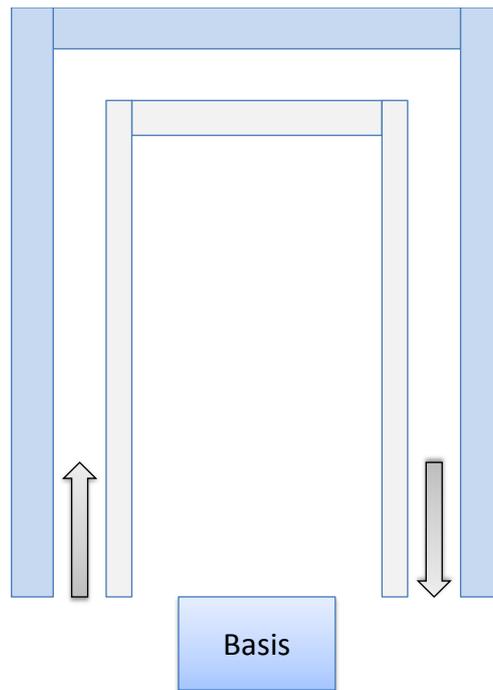


Abbildung 11: Aufbau des von Grosse und Glock betrachteten Kommissioniersystems¹⁴⁴

Im Rahmen der Studie wurden drei im Bereich der Kommissionierung unerfahrene Saisonarbeitskräfte über einen Zeitraum von zwei Wochen betrachtet.

Aufgrund der identischen Kommissionerrouten und der daraus resultierenden gleichbleibenden Wegzeit betrachteten Grosse und Glock die Basis-, die Greif- sowie die Totzeit der Kommissionieraufträge. Ihren Fokus richteten sie auf die Totzeit, da sie vermuteten, dass die darin enthaltenen Tätigkeiten wie Lesen, Suchen, Identifizieren und Etikettieren durch die gestiegene Routine schneller ausgeführt werden könnten.¹⁴⁵

Die Erfassung der Lerneffekte erfolgte bei Grosse und Glock anhand der Zeit, die pro Artikelposition benötigt wurde. Dabei wurden die Anzahl der Artikel bzw. die Zeit pro Entnahme eines Artikels in der Erfassung der Lerneffekte nicht berücksichtigt, da mehrere Artikel einer Position oft als Gebinde entnommen wurden und somit als eine Entnahme zu sehen sind. Abschließend wurde die Lernkurve in einem Diagramm, auf dessen Abszisse die Anzahl der Kommissionieraufträge und auf der Ordinate die durchschnittliche Kommissionierzeit pro Position abgetragen wurde, dargestellt.¹⁴⁶

Mit Hilfe einer Regressionsanalyse basierend auf der Methode der kleinsten Quadrate wurde eine Lernkurve bestimmt, welche sich den gemessenen Werten möglichst stark nähern sollte. Für die Adaption entschieden sich die Autoren für das Lernkurvenmodell von Wright, da sich dieses Modell für die Anpassung an empirisch erhobene Daten gut eignet.¹⁴⁷ Die Lernraten der drei Kommissionierer wurden mit 84,25 %, 94,89 % und 97,67 % Prozent angege-

¹⁴⁴ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Grosse und Glock (2013), S. 855.

¹⁴⁵ Vgl. Grosse und Glock (2012), S. 267.

¹⁴⁶ Vgl. Grosse und Glock (2012), S. 267.

¹⁴⁷ Vgl. Nembhard und Osothsilp (2001), S. 268.

ben.¹⁴⁸ Neben der Reduktion der benötigten Zeit pro Artikelposition stellten die Autoren außerdem eine Abnahme der Pickfehlerquote fest.

4.2.2.2 Crawford

Im Gegensatz zu den von Wright bestimmten Durchschnittswerten können mit Hilfe des von Crawford entwickelten Modells die Einzelwerte (Aufwand pro produzierte Einheit) bestimmt werden.¹⁴⁹

Die Formel entspricht der von Wright, jedoch mit dem Unterschied, dass sich das y auf eine Einheit und nicht auf den Durchschnittswert bezieht (Einheitsbetrachtung). Insbesondere in der betrieblichen Praxis ist die Lernkurve mit Einheitswerten einfacher handhabbar.¹⁵⁰ Entstanden ist dieses Modell am Stanford Research Institute, welches im Auftrag des US-Verteidigungsministeriums weitere Untersuchungen auf Basis der Erkenntnisse von Wright durchführen sollte.¹⁵¹

4.2.2.3 Yelle

Yelle entwickelte 1976 ein Lernkurvenmodell, das mehrere Tätigkeiten und unterschiedliche Lernprozesse in einer Lernkurve vereint. Äquivalent wie bei Systemen vorbestimmter Zeiten wollte Yelle für unterschiedliche Montagetätigkeiten eine Datenbank aufbauen, jedoch nicht mit Standardzeiten, sondern mit Lernkurven bzw. deren Parametern für diese Tätigkeiten.¹⁵²

Durch die Addition der einzelnen Lernkurven zu einer gesamten Produkt-Lernkurve lässt sich so die benötigte Zeit für die Fertigung des Produktes aufgrund des Lernfortschrittes bestimmen. Wie in der nachstehenden Formel dargestellt, werden die einzelnen Lernkurven addiert.¹⁵³

$$y = C_1 x_1^{b_1} + C_2 x_2^{b_2} + \dots + C_n x_n^{b_n}$$

Die in Abbildung 12 dargestellte zusammengesetzte Lernkurve besteht aus den drei Lernkurven mit den in Tabelle 8 enthaltenen Parametern. Sie lautet somit:

$$y = 50x^{-0,322} + 60x^{-0,152} + 40x^{-0,152}$$

¹⁴⁸ Vgl. Grosse und Glock (2012), S. 268.

¹⁴⁹ Vgl. Ullrich (1995), S. 19.

¹⁵⁰ Vgl. de Greiff (2001), S. 22.

¹⁵¹ Vgl. Laarmann (2005), S. 44.

¹⁵² Vgl. Yelle (1976), S. 149.

¹⁵³ Vgl. Yelle (1976), S. 153.

C_1	Lernrate	Einzel-Lernkurve
50	80 %	$y = 50x^{-0,322}$
60	90 %	$y = 60x^{-0,152}$
40	90 %	$y = 40x^{-0,152}$

Tabelle 8: Parameter der zusammengesetzten Lernkurve¹⁵⁴

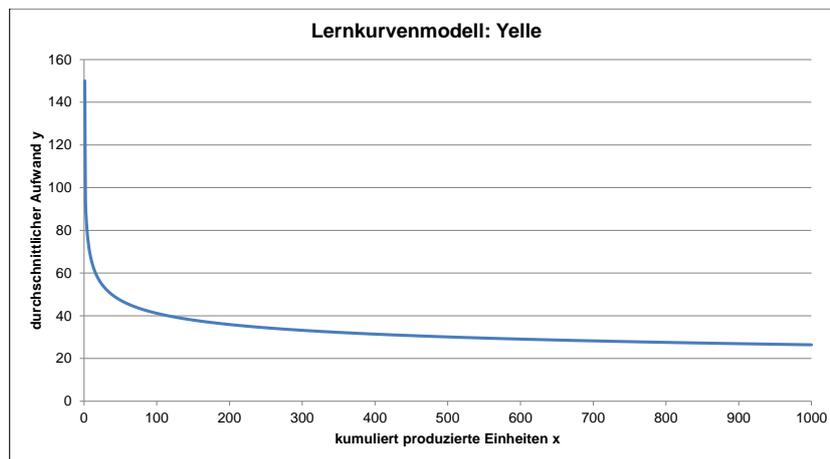


Abbildung 12: Lernkurve nach Yelle¹⁵⁵

4.2.2.4 Stanford-B

Ebenfalls im Rahmen der militärischen Aufrüstung vor Beginn des zweiten Weltkriegs wurde am Stanford-Institut die Vorerfahrung als Einflussfaktor auf die Montage von Flugzeugen quantifiziert. Da die Montage der Flugzeuge aufgrund der hohen geforderten Stückzahlen mehrfach von einem Stammwerk an Flugzeugwerke anderer Hersteller verlagert wurde, konnten unterschiedliche Lernkurven identifiziert werden.

Hersteller, die bereits ähnliche Flugzeuge montierten, hatten weniger Anlaufschwierigkeiten als Hersteller, die erstmalig ein solches Modell fertigten.

Daraufhin wurde die von Wright entwickelte Formel um einen Faktor ergänzt, der die vorhandene Erfahrung berücksichtigt.¹⁵⁶

$$y = a * (x + B)^{-b}$$

Mit:

B =Erfahrungswert (0=keine Erfahrung, 10=hohe Erfahrung).

Je größer die Erfahrung, desto höher sollte der Wert B gewählt werden. Bei einem Erfahrungswert von zehn benötigt das Unternehmen für die erste Einheit die Zeit, die ein unerfah-

¹⁵⁴ Eigene Darstellung.

¹⁵⁵ Eigene Darstellung.

¹⁵⁶ Vgl. Ullrich (1995), S. 19.

renes Unternehmen erst bei der elften Einheit erreichen würde. Abbildung 13 veranschaulicht den Vergleich der Lernkurven mit den Erfahrungswerten $B_1 = 0$, $B_2 = 5$ und $B_3 = 10$. Für die Darstellung wurden ein Anfangswert von 100 und eine Lernrate von 80 % gewählt.

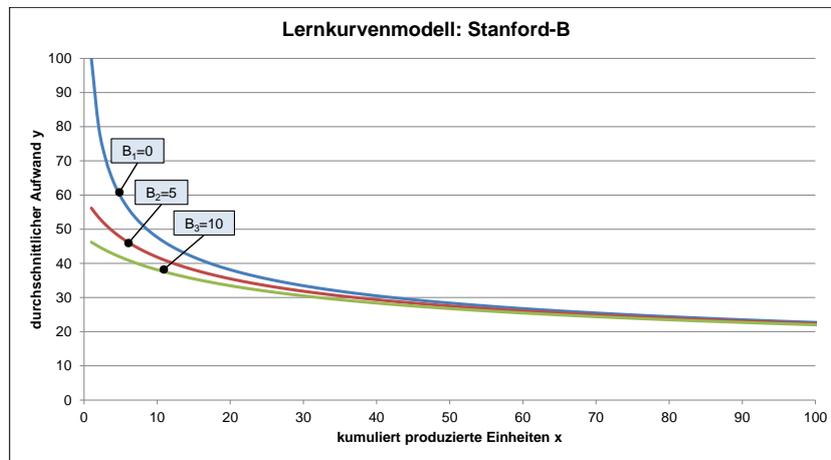


Abbildung 13: Lernkurvenverlauf der Lernkurve nach Stanford-B¹⁵⁷

Werden die Lernkurven doppelt-logarithmisch dargestellt (vgl. Abbildung 14), so ist erkennbar, dass der Verlauf der Lernkurve beim Erfahrungswert B_1 dem des Modells von Wright entspricht. Die Lernkurven mit den Erfahrungswerten B_2 und B_3 starten bei einem niedrigeren Wert, der auf die vorhandene Erfahrung zurückzuführen ist.

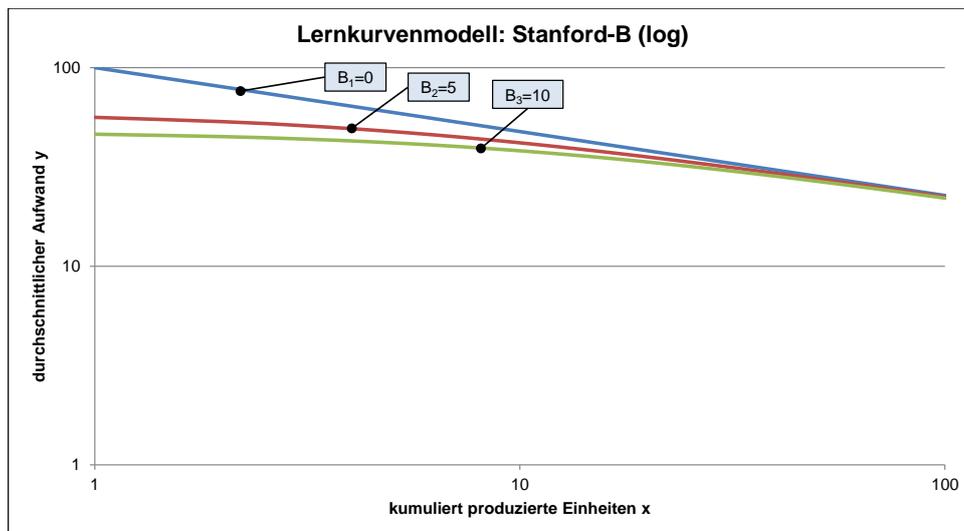


Abbildung 14: Lernkurvenverlauf der Lernkurve nach Stanford-B (logarithmische Darstellung)¹⁵⁸

4.2.2.5 De Jong

Auch der niederländische Arbeitswissenschaftler De Jong erkannte einen Zusammenhang zwischen der Verkürzung der Fertigungszeit und der steigenden Routine. De Jong ergänzte

¹⁵⁷ Eigene Darstellung.

¹⁵⁸ Eigene Darstellung.

die Formel von Wright um den Faktor M zur Berücksichtigung von Unreduzierbarkeit, die bspw. durch den Einsatz von Maschinen entsteht.

$$T_s = T_1 * \left(M + \frac{1 - M}{s^m} \right)$$

Mit:

T_s = benötigte Zeit für den Arbeitsgang mit der laufenden Nummer s

T_1 = die für den ersten Arbeitsgang benötigte Zeit

M = Inkompressibilitätsfaktor ($0 < M < 1$) // $M > 1$ bei unbeeinflussbaren Fertigungszeiten

m = Lernindex

s = laufende Nummer eines Arbeitsgangs in der Produktionsserie

Die Abbildung 15 enthält den Lernkurvenverlauf für einen Vorgang, der bei der Zeit $T_1 = 100$ startet, sowie eine Lernrate von 80% aufweist und der Inkompressibilitätsfaktor $M = 0,2$ beträgt.

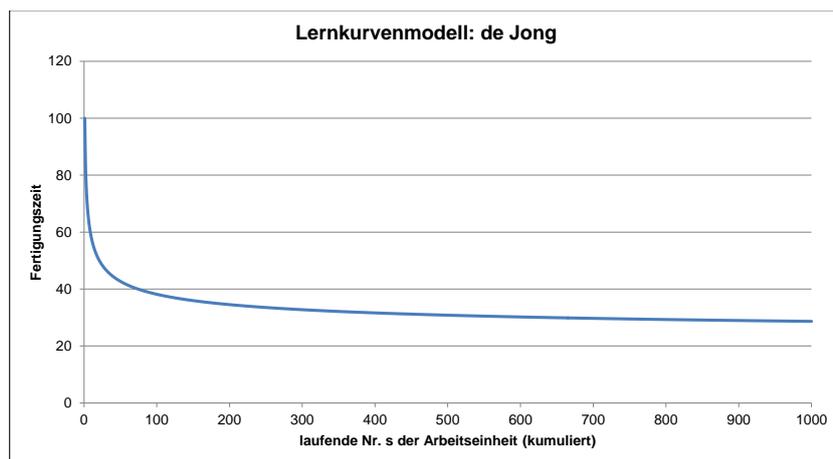


Abbildung 15: Lernkurve nach De Jong¹⁵⁹

¹⁵⁹ Eigene Darstellung.

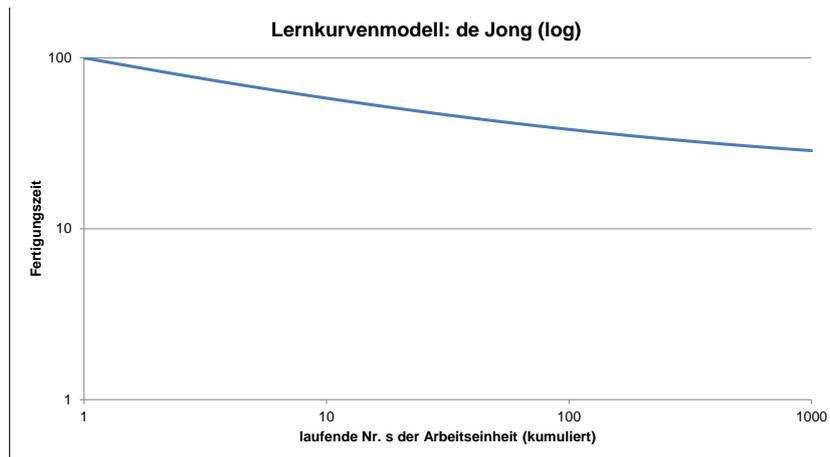


Abbildung 16: Lernkurve nach De Jong (logarithmische Darstellung)¹⁶⁰

In der doppelt-logarithmischen Darstellung in Abbildung 16 ist im Gegensatz zum Modell von Wright eine leichte konvexe Krümmung feststellbar, welche auf die Inkompressibilität zurückzuführen ist; M ist dabei auf dem Intervall von Null und Eins definiert. Bei einem Wert von Eins würde kein Lernfortschritt erfolgen.¹⁶¹ Die Wahl des Wertes M kann sich jedoch nach Liebau (2002) als relativ schwer gestalten.¹⁶²

Gründe für einen hohen Wert von M können darin liegen, dass die einander folgenden Teilarbeitsschritte miteinander übereinstimmen. Je stärker sich die Arbeitsschritte ähneln, wie bspw. beim Mauern oder Anstreichen, desto höher wird der Wert von M . Ein weiterer Grund sind Elemente in den Arbeitsschritten, die nicht reduzierbar sind. Als Beispiele nennt de Jong Maschinenzeiten oder Schmelzzeiten beim Schweißen. Außerdem führt de Jong die Veranlagung oder Erfahrung der Arbeiter als Gründe für hohe Werte von M an.¹⁶³ Somit deutet ein niedriger Wert daraufhin, dass sich die benötigte Zeit aufgrund der steigenden Routine deutlich senken lässt. Bei einem hohen Wert hingegen ist das Potenzial zur Senkung der Zeit gering.¹⁶⁴

Beispielhafte Werte sind nachstehend aufgelistet:

Revolverdrehen: $M = 0,4$

Drehen von Ringen: $M = 0,4$

Einwickeln: $M = 0,075$

Montage: $M = 0,25$.

De Jong war der erste Autor, der sich darüber hinaus mit individuellen Lernkurven der einzelnen Mitarbeiter befasste.¹⁶⁵ So untersuchte er, inwiefern die Erfahrung in Form von Dienstjahren sowie das Alter der Mitarbeiter einen Einfluss auf die Leistung haben.

¹⁶⁰ Eigene Darstellung.

¹⁶¹ Vgl. Ullrich (1995), S. 24.

¹⁶² Vgl. Liebau (2002), S. 19.

¹⁶³ Vgl. Ullrich (1995), S. 25.

¹⁶⁴ Vgl. Laarmann (2005), S. 232.

¹⁶⁵ Vgl. de Greiff (2001), S. 21.

4.2.2.6 Baloff oder Plateau-Modell

Baloff unterteilt den Lernprozess in eine Startphase (Start-up phase) und eine gleichbleibende Produktionsphase (Steady-state phase).¹⁶⁶ Laut Baloff hat das Modell von Wright mit einer konstant-logarithmischen Steigung lediglich in der ersten Phase seine Gültigkeit.¹⁶⁷ Die zweite Phase des Lernprozesses ist nach Baloff auf maschinelle oder sonstige Restriktionen zurückzuführen, so dass der Lernprozess endlich ist und die benötigte Zeit bzw. die verursachten Kosten in dieser Phase unabhängig der Anzahl der produzierten Einheiten gleichbleibend ist. Dabei soll die Wiedergabe des Lernverhaltens insbesondere bei hohen Stückzahlen verbessert werden. Während Baloff (1971) die Produktionsprozesse bei der Herstellung von Automobilen, Textilien und Musikinstrumenten analysiert und bei einer Outputrate von 10.000-100.000 Stück/Jahr eine stetige Phase identifiziert hat, scheint die Anwendbarkeit bei der Produktion in Raffinerien, Stahlwerken sowie in Glas und Papier produzierenden Unternehmen ebenfalls als vorzugswürdig. Folgende Formel stellt den mathematischen Ausdruck des Modells dar:

$$y = \begin{cases} a * s^{-m_2} & \text{für } s < a_p \\ a * a_p^{-m_2} & \text{für } s > a_p \end{cases}$$

Mit:

y = Kostenindex für Kostenaufwand pro Produktionseinheit,

a = Bearbeitungskosten für die erste Produktionseinheit,

s = kumulierte Anzahl der fertigen Produktionseinheiten,

m_2 = Verminderungsrate in den Bearbeitungskosten während der Startup-Phase,

a_p = kumulierte Produktionsmenge, ab der der Lerngrad null beträgt.

Die Abbildung 17 zeigt den beispielhaften Verlauf einer Lernkurve nach Baloff; der Startwert beträgt 100 und die Lernrate 80 %. Dabei findet der Übergang von der Einlauf- zur gleichbleibenden Produktionsphase einmal bei 10 bzw. das andere Mal bei 100 Einheiten statt.

¹⁶⁶ Vgl. Baloff (1971), S. 330.

¹⁶⁷ Vgl. de Greiff (2001), S. 24.

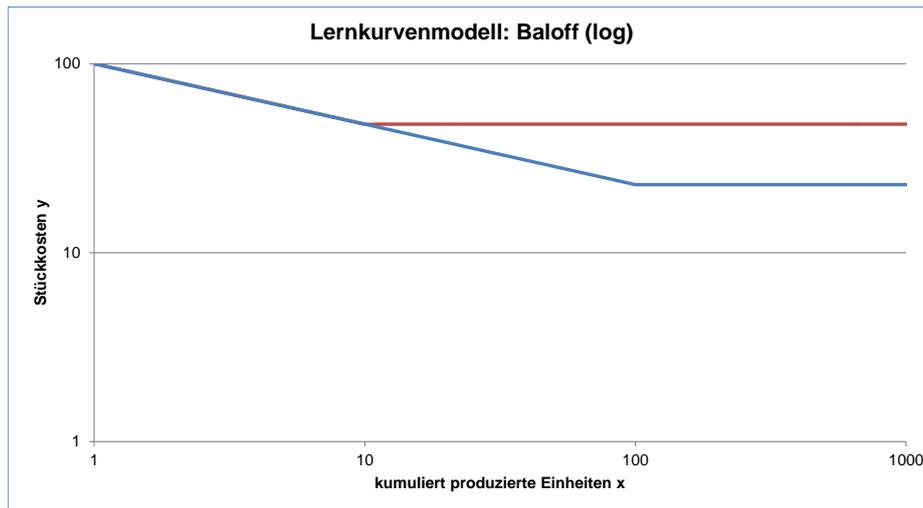


Abbildung 17: Lernkurve nach Baloff (logarithmische Darstellung)¹⁶⁸

4.2.2.7 S-Modell

Eine Lernkurve mit einem S-förmigen Verlauf wurde in Studien des Stanford-Research-Institute und der Boeing-Airplane-Company festgestellt. Im doppelt-logarithmischen Koordinatensystem dargestellt, besteht die Lernkurve aus einer Kombination der Stanford-B Formel, einem linearen sowie einem konvexen Anteil. Wie in Abbildung 18 zu erkennen ist, ist die Lernrate zu Beginn noch gering und entspricht dem konvexen Verlauf des Stanford-B-Modells. Im zweiten Abschnitt steigt die Lernrate. Der Verlauf ähnelt hier einem linearen Modell (Wright/Crawford). In der dritten Phase verringert sich die Lernrate und ähnelt dem konvexen Verlauf der Lernkurve von De Jong. Mathematisch ausgedrückt:¹⁶⁹

$$y = C_1 [M + (1 - M)(x + B)^b]$$

Die Parameter M und B stammen aus den Lernkurvenmodellen nach De Jong und Stanford-B und stehen für die Inkompressibilität bzw. die Vorerfahrung. In Abbildung 18 ist der leicht s-förmige Verlauf der Lernkurve durch die doppelt-logarithmische Darstellung erkennbar. Der Startwert dieser Lernkurve beträgt 100 bei einer Lernrate von 80 %, während M 0,4 und der Wert der Vorerfahrung 5 beträgt.

¹⁶⁸ Eigene Darstellung.

¹⁶⁹ Vgl. Anzanello und Fogliatto (2011), S. 575.

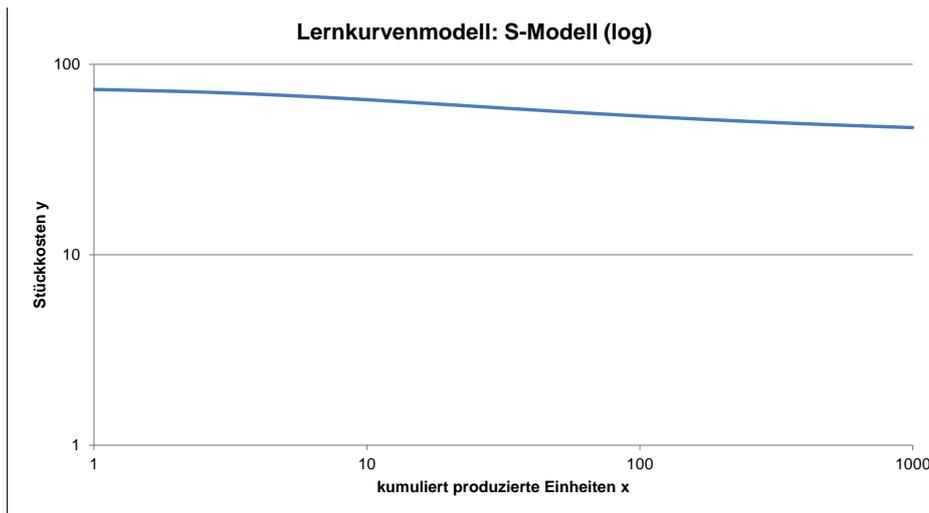


Abbildung 18: S-Modell Lernkurve¹⁷⁰

Liebau führt aus, dass der Verlauf des ersten Abschnitts auf unerfahrene Mitarbeiter zurückzuführen sein könnte, welche zu unterschiedlichen Zeitpunkten in den Fertigungsprozess eingestiegen sind.¹⁷¹

Weitere Gründe könnten Änderungen an der Konstruktion oder dem Material sein, wodurch Lerneffekte verzögert werden können.¹⁷² Im zweiten Abschnitt werden die Abläufe optimiert und es stellt sich eine konstante Lernrate ein. Im dritten Abschnitt reduziert sich die Lernrate, wodurch die Lernkurve abflacht. Nach Liebau ist häufig ein Wiederanstieg der Lernkurve zu beobachten, der darauf begründet, dass eingearbeitete Mitarbeiter vorzeitig versetzt werden, Betriebsmittel oder Maschinenkapazitäten reduziert werden oder auch die Motivation der Mitarbeiter zum Ende der Fertigung hin nachlässt.¹⁷³

4.2.2.8 Cochran

Das Lernkurvenmodell von Cochran basiert auf drei Bereichen. In der ersten Phase verhält es sich wie im Stanford-B Lernkurvenmodell. Danach geht es in einen linearen Verlauf über, wie er auch von Wright/Crawford beschrieben wird. Die letzte Phase ähnelt dem konvexen Verlauf der Lernkurve von de Jong. Um einen stetigen Übergang an den Punkten x_1 und x_2 zu gewährleisten, passte Cochran die Formel entsprechend an.

$$k(x)_{Cochran} = \begin{cases} k_1 * (X + b)^{\epsilon-1} & \text{für } 0 \leq X \leq x_1 \\ k_1 * X^{\epsilon-1} & \text{für } x_1 \leq X \leq x_2 \\ 10^{\log(k_e) + \frac{(\log(k_h) - \log(k_e))^2}{\log_2(LG) * (\log(x) - \log(x_h)) + \log(x_h) - \log(k_e)}} & \text{für } x_2 \leq X \leq \infty \end{cases}$$

¹⁷⁰ Eigene Darstellung.

¹⁷¹ Vgl. Liebau (2002), S. 16.

¹⁷² Vgl. Ullrich (1995), S. 28.

¹⁷³ Vgl. Liebau (2002), S. 18.

Jedoch besitzt die Lernkurve von Cochran, aufgrund der komplizierten Berechnung, lediglich eine geringe Bedeutung.¹⁷⁴

4.2.2.9 Ullrich

Ullrich entwickelte eine variable Lernkurvenfunktion auf der Basis von vier Prämissen. So soll die Tätigkeit aus einem reduzierbaren und einem unreduzierbaren Anteil bestehen, der Verlauf der Lernkurve soll sich asymptotisch dem unreduzierbaren Anteil annähern, der reduzierbare Anteil der Tätigkeit soll sich in Abhängigkeit einer Lernrate verringern und die Vorerfahrung des Mitarbeiters soll eine Rolle in der Anfangsroutine spielen.¹⁷⁵

$$t(x) = k + s * (x + B)^{-b}$$

Mit:

$t(x)$ = normierte Montagezeit für die xte Einheit,

k = Asymptote der Kurve,

s = Lernspanne (normierte Montagezeit für die erste Einheit - normierte Endzeit),

x = Anzahl der produzierten Einheiten,

b = Lernindex,

B = Faktor zur Berücksichtigung von Vorerfahrung.

4.2.3 Lernkurven auf Basis von Exponentialfunktionen

Exponentielle Modelle beinhalten in der Regel mehr Parameter als die klassischen log-linear Modelle und basieren qua nomen auf Exponentialfunktionen. Im Folgenden werden die bedeutenden exponentiellen Lernkurvenmodelle behandelt.

4.2.3.1 Woeber

Im Gegensatz zu den mittels Potenzfunktionen dargestellten Lernkurven, bspw. von Wright oder Crawford, entwickelte Woeber eine modifizierte negative Exponentialfunktion. Mit Hilfe dieser Formel lässt sich die erwartete Produktivität eines Auszubildenden respektive eines lernenden Mitarbeiters nach x Tagen berechnen.¹⁷⁶

¹⁷⁴ Vgl. Laarmann (2005), S. 239 f.

¹⁷⁵ Vgl. Ullrich (1995), S. 35.

¹⁷⁶ Vgl. Woeber (1983), S. 10.

Verglichen wird die Produktivität des Auszubildenden pro Schicht mit der eines voll ausgebildeten Arbeiters, wobei die Annahme gilt, dass die Produktivität des voll ausgebildeten Arbeiters nicht unterschritten werden kann.¹⁷⁷

$$y = a - a * e^{(-cx)}$$

Mit:

y = Arbeitsergebnis eines Auszubildenden pro Schicht

a = Arbeitsergebnis eines voll ausgebildeten Arbeiters pro Schicht

c = Ablaufvariable

x = Tage der Ausbildung

Die Abbildung 19 zeigt den Verlauf der Lernkurve nach Woeber. In diesem Beispiel produziert ein vollständig ausgebildeter Mitarbeiter 120 Einheiten eines Produktes an einem Arbeitstag (8 Stunden). Ein durchschnittlicher Mitarbeiter kann, nachdem er fünf Tage ausgebildet wurde, 90 Einheiten dieses Produktes pro Arbeitstag herstellen. Daraus ergibt sich die Funktion

$$90 = 120 - (120 * e^{-5c})$$

Die Lernkurvenfunktion lautet daraus abgeleitet:

$$y = 120 * (1 - 0,758^x)$$

Damit lässt sich die Anzahl der produzierten Einheiten pro Tag sowie die pro Einheit (siehe Tabelle 9) benötigte Zeit berechnen.

Tage Ausbildung	Produktion pro Tag [Stk.]	Zeit pro Einheit [min]
1	29,04	16,53
2	51,05	9,40
4	80,39	5,97
8	106,92	4,49
16	118,57	4,05
32	119,98	4,00

Tabelle 9: Numerische Werte des Beispiels¹⁷⁸

¹⁷⁷ Vgl. de Greiff (2001), S. 27.

¹⁷⁸ Eigene Darstellung.

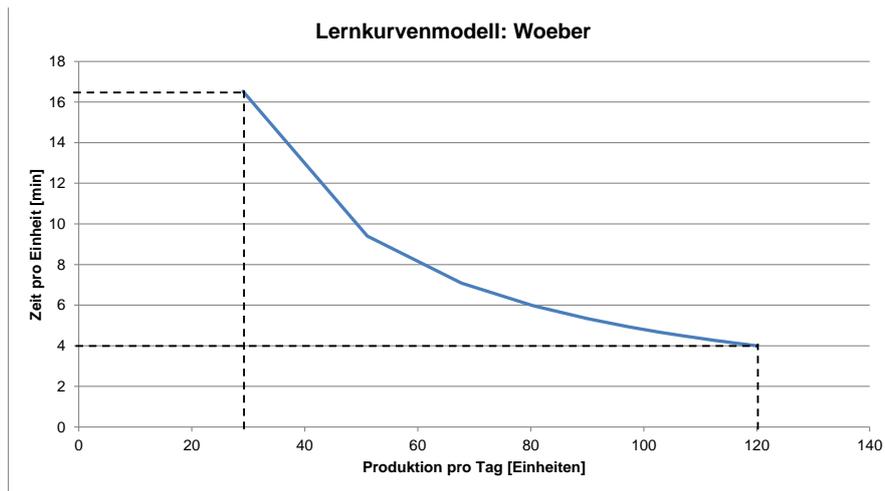


Abbildung 19: Lernkurvenmodell nach Woeber¹⁷⁹

4.2.3.2 Levy

Eine eigenständige Hypothese unabhängig von den bereits vorgestellten Modellen, die auf der Linearhypothese beruhen, stellte Levy auf. Die Hypothese besagt, dass mit zunehmenden kumulierten Produktionseinheiten bestimmte Faktoreinsatzmengen wie auch Kostengrößen abnehmen und gegen einen unteren Grenzwert streben, wobei die betragsmäßige Veränderung proportional zur Differenz des aktuellen Wertes einer Produktionseinheit und des Grenzwertes ist.¹⁸⁰

$$y = (a - c) * e^{-k*(x-1)} + c$$

Mit:

a = Wert der betrachteten Messgröße für die erste gefertigte Einheit

c = Grenzwert, dem sich die Lernkurve annähert

k = Proportionalitätsfaktor, der den Verlauf des Lernprozesses wiedergibt

$$y = c(1 - e^{-(kx+c_1)})$$

Die dargestellte Formel ist ein Derivat der originär von Levy entwickelten Formel. Beim Parameter c handelt es sich in diesem Fall um die Obergrenze, gegen die die Produktivität strebt. Der Parameter c_1 stellt die Ausgangsproduktivität dar, die empirisch zu ermitteln ist.¹⁸¹ Somit umgeht dieser Ansatz den oft kritisierten Umstand, dass die Lernkurve der linearen Modelle gegen Null konvergiert.¹⁸²

¹⁷⁹ Eigene Darstellung.

¹⁸⁰ Vgl. Levy (1965), B138.

¹⁸¹ Vgl. Henfling (1978), S. 74.

¹⁸² Vgl. Henfling (1978), S. 75.

4.2.3.3 Knecht

Knecht ergänzte die Formel der Linearhypothese um die Eulersche Zahl und eine Konstante c . Mithilfe der Erweiterung der Formel wird die unendliche Reduktion der benötigten Arbeitszeit bzw. der entstehenden Kosten bei hohen Ausbringungsmengen verhindert.¹⁸³

$$k(X) = a * X^{-b} * e^{cX}$$

Durch Ergänzung des Terms $(c + \frac{-b}{X})$ können die Kosten der letzten Einheit berechnet werden.¹⁸⁴

$$k(X) = a * X^{-b} * e^{cX} + (c + \frac{-b}{X})$$

4.2.4 Hyperbolische Lernkurvenmodelle

Im Gegensatz zu Log-linear Modellen besitzen Hyperbelmodelle definitionsgemäß keinen reduzierenden Exponentialwert. Die von Mazur und Hastie entwickelten 2- bzw. 3-Parameter-Hyperbelmodelle zählen dabei zu den relevantesten Vertretern von Hyperbelmodellen. Äquivalent zum Modell nach Levy stellt das 2-Parameter-Hyperbelmodell eine Verbesserung der Qualität oder einer anderen betrachteten Messgröße des Produktes in Relation zur Erfahrung und kann mittels der Formel:

$$Z = k \left[\frac{s}{(s + r)} \right]$$

Mit:

Z = kumulierte Produktionseinheitszahl,

s = Anzahl konformer Produktionseinheiten,

r = Anzahl nicht konformer Produktionseinheiten,

k = Produktionsniveaunkonstante,

ausgedrückt werden.¹⁸⁵

Die empirisch zu ermittelnde Produktionsniveaunkonstante k limitiert das Produktionsniveau als solches entsprechend ihres Wertes. Wie die nachstehende Abbildung 20 verdeutlicht, wird das maximale Produktionsniveau umso später erreicht, je größer die Anzahl nicht konformer Produktionseinheiten ist.

Bei Betrachtung von Lernprozessen werden die Parameter jedoch anders definiert: Z steht für die Anzahl produzierter Einheiten, die in s Einheiten der Produktionszeit gefertigt wurden; k steht für das maximale Leistungsniveau und r symbolisiert die Lernrate.¹⁸⁶

¹⁸³ Vgl. Jaber (2011), S. 10.

¹⁸⁴ Vgl. Knecht (1974), S. 490.

¹⁸⁵ Vgl. Mazur und Hastie (1978), o. S.

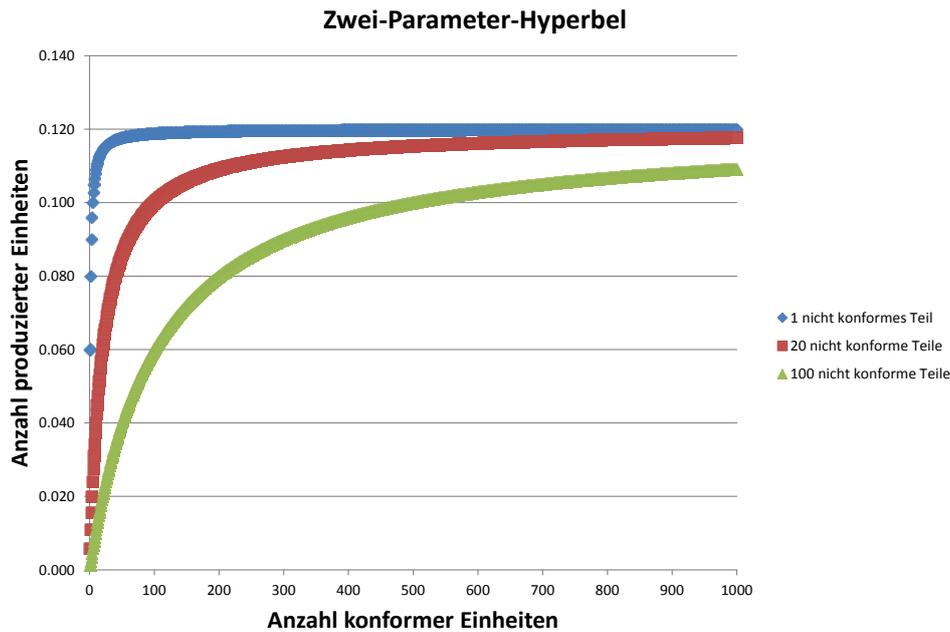


Abbildung 20: 2-Parameter Hyperbelmodell¹⁸⁷

Überdies kann die 2-Parameter-Hyperbel um einen dritten Parameter (Vorerfahrungswert p) ergänzt werden, wodurch die Prognose individueller Produktivität verbessert wird.

Somit lautet die Formel der 3-Parameter-Hyperbel:¹⁸⁸

$$Z = k \left[\frac{s + p}{(s + p + r)} \right]$$

Die Maßeinheit des Vorerfahrungswertes wird dabei in Zeiteinheiten bereits gewonnener Erfahrung gemessen, bspw. 16 Stunden. Je größer die Ausprägung von p ist, desto früher wird folglich das maximale Produktionsniveau erreicht (vgl. Abbildung 21).

Abschließend ist die verbesserte Definition der Vorerfahrung p und damit der 3-Parameter-Hyperbel durch Nembhard und Uzumeri anzuführen, die die Vorerfahrung mit der zur Erreichung des Produktionsniveaus $\frac{k}{2} = r$ in Relation setzen.¹⁸⁹ Diese Variante stelle nach Nembhard und Uzumeri ein robustes Modell dar, das den Lernverlauf besser als zehn weitere univariate Lernkurvenmodelle beschreibe.¹⁹⁰

¹⁸⁶ Vgl. Nembhard und Uzumeri (2000a), S. 375.

¹⁸⁷ Eigene Darstellung.

¹⁸⁸ Vgl. Mazur und Hastie (1978), o. S.

¹⁸⁹ Vgl. Nembhard und Uzumeri (1998), S. 518; Nembhard und Uzumeri (2000a), S. 375; Nembhard und Uzumeri (2000b), S. 318.

¹⁹⁰ Vgl. Nembhard und Uzumeri (2000a), S. 374; Anzanello und Fogliatto (2007), S. 2926-2937.

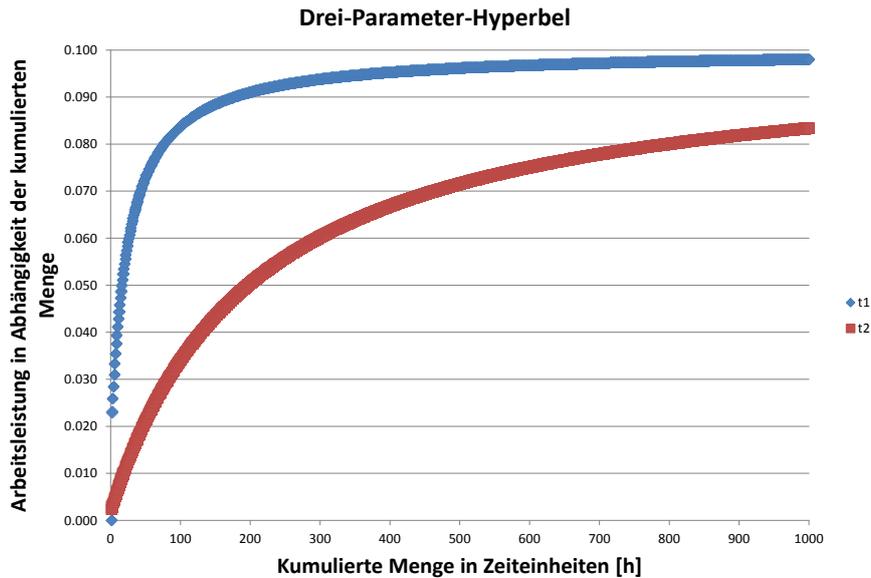


Abbildung 21: 3-Parameter Hyperbelmodell¹⁹¹

4.2.5 Multivariate Lernkurvenmodelle

Alle Lernkurvenmodelle respektive -theorien die bis dato präsentiert wurden unterstellen, dass Unternehmen bzw. demzufolge Kommissioniersysteme lediglich mittels höherer Produktionsraten die Lernkurven durchlaufen können.¹⁹² Dies ist auf ihren univariaten Charakter zurückzuführen, weshalb ein multivariates Modell zusätzlich Einflussgrößen auf den Lernprozess inkludiert. Als Repräsentant kann hierzu das Modell von Badiru herangezogen werden.¹⁹³

$$C_x = K \prod_{i=1}^n u_i g_i^{l_i}$$

Mit:

- C_x = kumulative Durchschnittskosten pro Produktionseinheit,
- K = Kosten der ersten Produktionseinheit,
- g = Vektor der spezifischen Werte der unabhängigen Variablen,
- g_i = spezifischer Wert des i-ten Faktors,
- n = Anzahl der Faktoren im Modell,
- u_i = Koeffizient des i-ten Faktors,

¹⁹¹ Eigene Darstellung.

¹⁹² Vgl. Lapré (2011), S. 23.

¹⁹³ Vgl. Badiru (1992), S. 180.

l_i = Lernexponent des i -ten Faktors.

Anzumerken ist, dass eine Vereinfachung der dargestellten Schreibweise durch die Zusammenführung der einzeln aufgeführten Konstanten u_i in eine Konstanten K vor dem Summenzeichen.

5. Vorgehensweise

Die durchzuführenden Arbeiten des Projekts LeiKom gliedern sich in drei Hauptarbeitspakete (HAP) auf. Diese wiederum setzen sich aus insgesamt sieben Arbeitspaketen (AP) zusammen, wie nachstehende Abbildung 22 verdeutlicht.

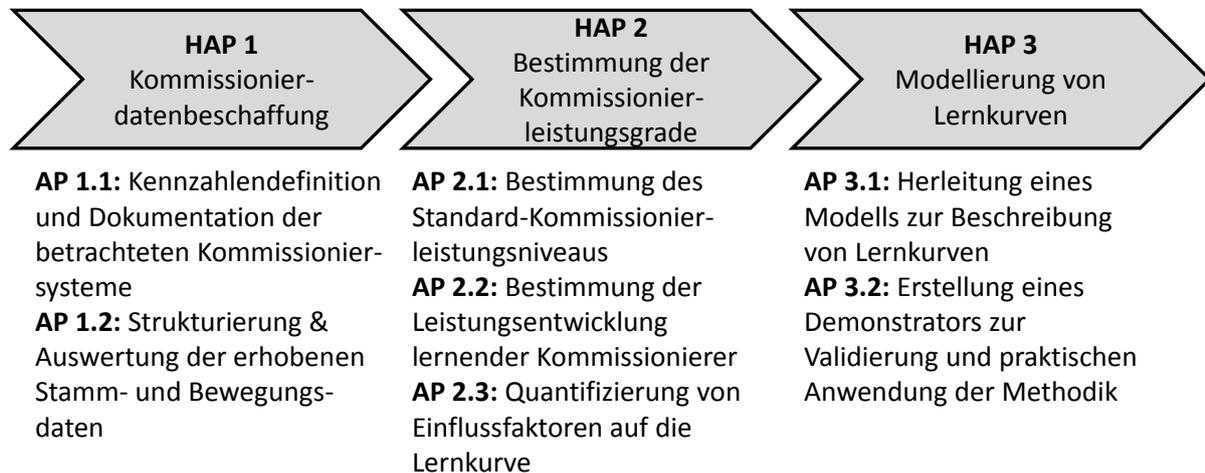


Abbildung 22: Arbeitspakete des Projekts LeiKom

5.1 AP 1.1: Kennzahldefinition und Dokumentation der betrachteten Kommissioniersysteme

Mittels Leitfäden, welche Befragung wie auch Beobachtungen inkludieren, sind zunächst die betrachteten Kommissioniersysteme der Industriepartner charakterisiert worden, um eine möglichst detailliert dokumentierte Bezugsbasis für den Erkenntnisgewinn aus der Auswertung zu haben (siehe Kapitel 5.5). Des Weiteren erwies sich der Aufbau einer eigenen normalisierten relationalen Datenbank je Projektpartner, durch Integration der Informationen aus der Datenerhebung, als vorzugswürdig. Kausal hierfür ist die unzureichende Vergleichbarkeit der betrachteten Kommissioniersysteme. Zwecks effizienter Auswertungsmöglichkeit wurden die Rohdaten äquivalent zu den Kommissioniersystembeschreibungen in Microsoft Access strukturiert. Somit lagen final Stamm- und Bewegungsdaten von drei Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses zur Verfügung, wobei die einzelnen Zellen respektive Relationen atomarisiert wurden, um Redundanzen zu Eliminieren. Anzumerken ist, dass im Projektverlauf, entsprechend der getroffenen Vereinbarungen, weitere Daten hinsichtlich der lernenden Zeitarbeiter übermittelt sowie unmittelbar in die Datenbanken integriert wurden.

5.2 AP 2.1: Bestimmung des Standard-Kommissionierleistungsniveaus

Basierend auf den in AP 1.1 strukturierten Stamm- und Bewegungsdaten wurden für das jeweilige Kommissioniersystem Standardleistungen ermittelt, die auf von eingearbeiteten Mitarbeitern kommissionierte Aufträge zurückgehen. Jedoch ist die Methodenermittlung mit Identifikation relevanter Einflussfaktoren der Quantifizierung der Standardleistung voranzustellen, um somit die Prognose von auftrags- und personenspezifischen Soll-Auftragszeiten

zu ermöglichen. Hierfür wurden, soweit vorhanden, die Auftragszeiten in das Verhältnis zu den geleisteten Kommissionierarbeiten gesetzt, wodurch unter anderem die *Anzahl der Positionen* und/oder *Entnahmen* und/oder die *zurückgelegte Wegstrecke* als wesentliche kommissioniersystemspezifische Einflussfaktoren auf die Bearbeitungszeiten identifiziert werden konnten. Hierauf aufbauend wurde für die Standardleistung das Verhältnis respektive der strukturelle Zusammenhang der unabhängigen Einflussfaktoren auf den abhängigen Zeitfaktor in Bezug auf einen eingearbeiteten Mitarbeiter untersucht. Somit konnten die Größen eines von einem lernenden Mitarbeiter kommissionierten Auftrags in dieses Konstrukt eingebracht werden, wodurch die benötigte Zeit bei Bearbeitung von einem eingearbeiteten Mitarbeiter identifiziert werden kann. Da sowohl die Methode zur Effizienzbewertung¹⁹⁴ als auch die Systeme vorbestimmter Zeiten¹⁹⁵ mit einem erheblichen Aufwand in der Datenerhebung und einer hohen Methodenkomplexität verbunden sind, wurde die Regressionsanalyse für die Identifikation herangezogen. Basierend auf dieser konnten nicht nur Koeffizienten, sondern insbesondere auch die Zuverlässigkeit der relevanten Einflussfaktoren quantifiziert werden. Folglich wurden auf Basis von bereits durch erfahrene Kommissionierer bearbeitete Aufträge eine Regressionsgerade für das jeweilige betrachtete Kommissioniersystem erstellt. Daher geben diese, bei Einfügen der unabhängigen Parameter eines Auftrags eines lernenden Mitarbeiters, die benötigte Zeit wenn dieser Auftrag von einem eingearbeiteten Mitarbeiter kommissioniert worden wäre als abhängige Variable aus. Diesbezüglich ist festzuhalten, dass bei einem Projektpartner, die Auftragszeiten nicht erfasst werden, weshalb in diesem Zusammenhang das Zeitelement der Kommissionierleistung anhand der Schichtdauer determiniert wurde.

In Abhängigkeit von Heterogenität der Aufträge bzw. Detaillierungsgrad der Daten wurden zur Bestimmung der Soll-Auftragszeiten der jeweiligen Kommissioniersysteme zwei bis drei Einflussfaktoren auf die Kommissionierleistung berücksichtigt.¹⁹⁶ Dabei wurde die Zuordnung der Kommissionierleistung zum zugehörigen Mitarbeiter eines jeden Kommissioniersystems jederzeit gewahrt, wodurch auch Varianzen der individuellen Kommissionierleistung untersucht werden konnten. Des Weiteren wurde die Aussagekraft der Prognose in den jeweiligen Kommissioniersystemen mithilfe statistischer Bewertungsmethoden quantifiziert, wobei eine ausreichende Präzision für alle Methoden konstatiert werden kann, welche durch die Verfügbarkeit von Auftragszeiten in den Rohdaten nochmals maßgeblich verbessert wird.

5.3 AP 2.2: Bestimmung der Leistungsentwicklung lernender Mitarbeiter

5.3.1 Leistungsbestimmung bei lernenden Mitarbeitern

Prinzipiell erfolgte die Bestimmung der Leistungsentwicklung lernender Mitarbeiter äquivalent zur Bestimmung des Standard-Kommissionierleistungsniveaus, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Daher sind auch bei den lernenden Mitarbeitern die benötigten Bearbeitungszeiten mit den jeweils kommissionierten Positionen und/oder Entnahmen in Relation gesetzt worden. Da bei einem Projektpartner lediglich die Schichtzeiten, nicht aber die tatsächlich

¹⁹⁴ Z. B. DEA-Analyse, siehe Kapitel 3.4.3.

¹⁹⁵ Z. B. MTM, siehe Kapitel 3.4.2, MTM ist nicht nur systemspezifisch, sondern muss auch nach jeder Veränderung des Pickprozesses erneut angepasst werden.

¹⁹⁶ Z. B. Entnahmen, kommissioniertes Volumen und Masse.

benötigten Bearbeitungszeiten zur Verfügung standen, wurde hier, zusätzlich zu dem standardmäßigen Vorgehen, eine Methode gewählt, die die Schichtzeit mit einem Kommissionierleistungsfaktor in Relation setzt (sowohl für lernende als auch eingearbeitete Mitarbeiter). Die nachfolgenden Erkenntnisse wurden bereits im Rahmen einer VDI-Schriftreihe veröffentlicht, weshalb ausdrücklich auf diese Veröffentlichung verwiesen wird.

Hierbei erfolgt die Darstellung der Lernkurve über den Zwischenschritt einer multivariater Regressionsanalyse, welche zur Bestimmung der individuellen Kommissionierleistung in Zeit pro Auftrag unter Berücksichtigung der Anzahl Entnahmen, der Auftragsmasse sowie des Auftragsvolumens herangezogen wird.

Mithilfe der Regressionsanalyse wurden die Koeffizienten der unabhängigen Variablen, hier die Anzahl Entnahmen (Greifeinheiten), die Auftragsmasse sowie das Auftragsvolumen, und damit der Einfluss auf die abhängige Variable, also die benötigte Bearbeitungszeit des Auftrags, auf Basis realer Aufträge bestimmt. Dabei wird die Produktivität durch die resultierenden Koeffizienten, welche die prognostizierte benötigte Zeitdauer je Kilogramm etc. darstellen, abgebildet.

Da bei einem anwendenden Projektpartner keine exakten Auftragsbearbeitungszeiten erfasst werden, wurden als abhängige Variable die Schichtzeit herangezogen, welche lediglich tagesbezogene Rückschlüsse zulässt, da es sich um eine Konstante (8-h-Schicht = 28800 Sekunden) handelt. Daher sind die ermittelten Koeffizienten nur als Indikatoren heranzuziehen, weshalb nachfolgend jeweils der prozentuale Effekt von Masse, Volumen und Anzahl Entnahmen Verwendung findet. Zudem sind zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit die Koeffizienten des Kommissioniersystems und nicht einzelner Mitarbeitergruppen heranzuziehen, wodurch sich die Leistung respektive der Leistungskennwert einer Schicht zu 7,7% aus der Anzahl Entnahmen, zu 69,3% aus der kommissionierten Masse in Kilogramm sowie zu 23% aus dem kommissionierten Volumen in dm^3 zusammensetzt, wie Tabelle 10 zeigt.¹⁹⁷

Da es sich um prozentuale Größen handelt, sind demzufolge auch die quantifizierten Leistungskennwerte einheitenlos. Jedoch sei darauf hingewiesen, dass durch Variation der Einheiten der Wert bzw. die Gewichtung der Koeffizienten maßgeblich beeinflusst wird, wobei das Produkt aus bspw. Koeffizient(kg) und Masse in kg bzw. Koeffizient(g) und Masse in g gleich bleibt. Überdies würde eine homogenere Massenstruktur der kommissionierten Einheiten (hier: von 0,23 bis 17900 Gramm; Mittelwert = 1292,154 Gramm und Standardabweichung = 1741,36147 Gramm bei $N = 17791$) zu einem reduzierten Einfluss der Masse führen.¹⁹⁸

¹⁹⁷ Vgl. Stinson et al. (2015), S. 185. Aufgrund konstanter Zeiten (abhängige Variable) ist ein Ausweis von standardisierten Koeffizienten nicht möglich, da die Varianz null beträgt.

¹⁹⁸ Vgl. Stinson et al. (2015), S. 186.

	Zeitarbeiter gesamt		Stammpersonal		Stammpers. Mit job rotation	Stammpersonal & Zeitarbeiter	
<i>Regressions-Statistik</i>							
Multipler Korrelationskoeffizient	0,715668373		0,672015386		0,702694992	0,691317409	
Bestimmtheitsmaß	0,51218122		0,451604679		0,493780252	0,47791976	
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	0,504836843		0,446282876		0,484836076	0,47485045	
Standardfehler	20226,934		17906,81228		14245,75278	18906,30329	
Beobachtungen	272		169		228	669	
	Variablen	Einfluss in %	Variablen	Einfluss in %	Einfluss in %	Variablen	Einfluss in %
Summe von Greifeinheiten	2,538611941	9,724485	0,957037213	2,763362	2,242261436	8,129201	2,220428759
Bruttogewicht in kg	9,993225804	38,28036	29,321618	84,66364	20,53211922	74,43812	19,97725309
Volumen in dm ³	13,57352267	51,99516	4,354416115	12,573	4,808422813	17,43268	6,61374443
Summe	26,10536041		34,63307133		27,58280347		28,81142628

Tabelle 10: Einflussgrößen auf die Leistung¹⁹⁹

Eine beispielhafte Berechnung einer Tagesleistung:²⁰⁰

- 1232 Greifeinheiten
- 428,5953 kg kommissionierte Masse
- 433,0783 dm³ kommissioniertes Volumen

$$\text{Leistungskennwert} = 0,07707 * 1232 + 0,69338 * 428,5953 + 0,22955 * 433,0783 = 491,54$$

Aufgrund einer beobachtbaren Zunahme des Leistungskennwertes über die kommissionierten Tage ist davon auszugehen, dass eine Lernkurve auch auf Basis eines Leistungskennwertes bestimmt werden kann. So kann bspw. über den Leistungskennwert der zugehörige Lernkurvenfaktor für den entsprechenden Tag berechnet werden, welcher als die benötigte durchschnittliche Zeit in Sekunden zur Bearbeitung eines Leistungskennwertes von Eins - Kommissionierung eines Guts mit Masse 1kg und Volumen 1dm³, entspricht etwa einer Flasche Mineralwasser - interpretiert werden kann.

Durch die vorherrschende konstante Schichtzeit bedeutet ein hoher Leistungskennwert eines Tages, dass im Mittel weniger Zeit pro Leistungskennwert benötigt wurden und demzufolge der Lernkurvenfaktor niedriger ist. Nach durchschnittlich fünf bis neun Tagen übertreffen die lernenden Mitarbeiter den mittleren Kommissionierleistungsgrad eines eingearbeiteten Mitarbeiters, wie aus Abbildung 23 ersichtlich ist.²⁰¹

¹⁹⁹ Entnommen aus Stinson et al. (2015), S. 186.

²⁰⁰ Entnommen aus Stinson et al. (2015), S. 186.

²⁰¹ Vgl. Stinson et al. (2015), S. 186.

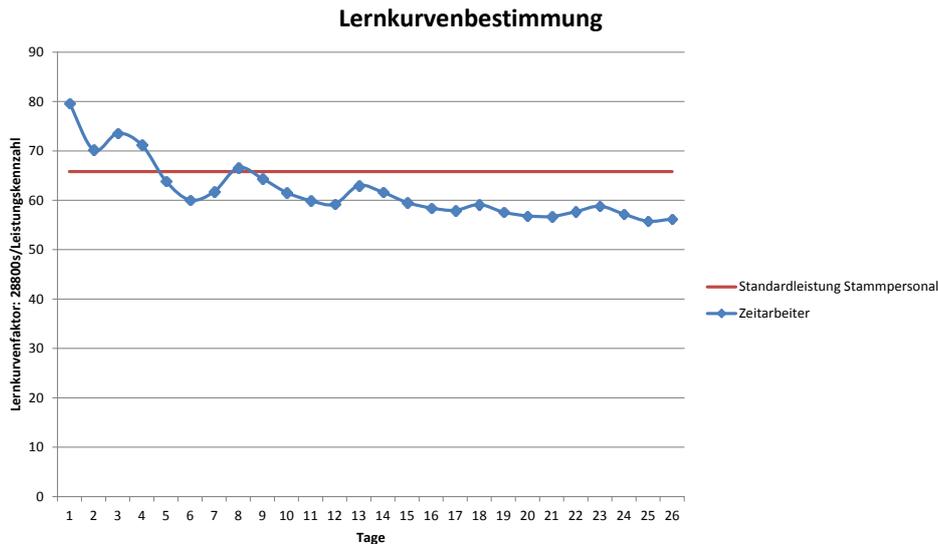


Abbildung 23: Lernkurve der Zeitarbeiter mit durchschnittlicher Kommissionerleistung des Stammpersonals als Referenz²⁰²

Dies zeigt, dass auch mehrere Einflussfaktoren zu einer Leistungskennzahl zusammengefasst werden können, auf die die Lernkurve aufbauen kann. Aus Gründen der Praktikabilität ist jedoch im weiteren Verlauf des Projekts die klassische Herangehensweise gewählt worden. Ergo wurde die Bearbeitungszeit (wie auch die Schichtzeit) in Verhältnis zu den Einflussgrößen *Anzahl der Positionen* und/oder *Entnahmen* gesetzt.

5.3.2 Leistungsbestimmung bei eingearbeiteten Mitarbeitern

Darüber hinaus konnte ein Lernfortschritt bei bereits als *eingearbeitet* klassifizierten Mitarbeitern beobachtet werden. Denn der Projektpartner betreibt ein Job-Rotation-Konzept am betrachteten Lagerstandort innerhalb dessen die beteiligten Mitarbeiter unter anderem halbtags in einem WzP-Kommissioniersystem und halbtags in einem PzW-Kommissioniersystem arbeiten. Dies hat zwei Funktionen: einerseits sollen die Mitarbeiter flexibilisiert werden, andererseits soll die tägliche Arbeit abwechslungsreich gestaltet sein, wodurch eine langfristig hohe Leistungsfähigkeit der Kommissionierer ermöglicht bzw. unterstützt werden soll.²⁰³

Ein Vergleich der jeweiligen Leistung von Stammpersonal mit versus ohne Beteiligung an der Job-Rotation auf Basis des im vorigen Kapitel erläuterten Leistungskennwertes ist in Tabelle 11 angeführt; dabei bezieht sich die Leistungsbewertung ausschließlich auf die Arbeit im WzP-Kommissioniersystem. Die Auswertung der Resultate aus der Tabelle 11 zeigen, dass das Stammpersonal mit Job-Rotation-Beteiligung im Schnitt leistungsfähiger ist als das Stammpersonal ohne Job-Rotation-Beteiligung, wodurch von einem weiteren Lernen eingearbeiteter Mitarbeiter ausgegangen werden kann.²⁰⁴

²⁰² Entnommen aus Stinson et al. (2015), S. 187.

²⁰³ Vgl. Stinson et al. (2015), S. 189.

²⁰⁴ Vgl. Stinson et al. (2015), S. 189.

Leistungskennzahl	Zeitarbeiter	Stammpersonal mit Job-Rotation	Stammpersonal ohne Job-Rotation
Mittelwert	452,6	540,6	341,3
Standardabweichung	412,6	447,7	305,7

Tabelle 11: Leistungswerte auf Basis individueller Werte²⁰⁵

Dieses Phänomen kann zudem hinsichtlich der Einflussgrößen (*kommissionierte Masse und Volumen*) auf die Leistung im Rahmen des Job-Rotation-Konzepts analysiert werden. Mittels t-Tests können signifikante Unterschiede zwischen Mittelwerten ausgewiesen werden. Basierend auf der Annahme, dass das Stammpersonal mit Job-Rotation aufgrund abwechslungsreicher Tätigkeiten von der kommissionierten Masse und vom kommissionierten Volumen weniger stark beansprucht wird, sind in Tabelle 12 die abgeleiteten Hypothesen wie auch die Ergebnisse des t-Tests dargestellt. Die allgemeine Formel des t-Tests lautet dabei:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s} * \sqrt{n}$$

Mit:

\bar{x} arithm. Mittel Stichprobe, hier: komm. Masse durch Stammpers. mit Job-Rot.

μ_0 Erwartungswert, hier: angepasste komm. Masse durch Stammpers. o. Job-Rot.

s Standardabweichung Stichprobe

n Stichprobengröße

Masse und Volumen	H_0 : Stammpersonal mit Job-Rotation kommt mit Masse (Volumen) gleich oder schlechter zurecht und kommissioniert im Schnitt eine gleiche oder geringere Masse pro Zeiteinheit (Volumen); $\bar{x} \leq \mu_0$	t-Test Masse $t = \frac{551,2 - 430,4}{511,4} * \sqrt{228}$ $= 3,5 > 3,1 = C$
	H_1 : Stammpersonal mit Job-Rotation kommt mit Masse (Volumen) besser zurecht und kommissioniert im Schnitt eine höhere Masse (Volumen); $\bar{x} > \mu_0$	Volumen $t = \frac{607,2 - 278,4}{665,5} * \sqrt{228}$ $= 7,4 > 3,1 = C$
Ablehnung der Nullhypothese, wenn $t > C$, $C=3,0903$ bei $p=0,01$		

Tabelle 12: t-Test masse- und volumenbezogener Kommissionierleistungsvergleich des Stammpersonals mit und ohne Job-Rotation-Beteiligung²⁰⁶

Abbildung 24 visualisiert einen massenbezogenen Leistungsvergleich, der auch den angepassten Mittelwert aus dem t-Test zeigt. Aufbauend auf der zugrundeliegenden Datenaus-

²⁰⁵ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Stinson et al. (2015), S. 189.

²⁰⁶ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Stinson et al. (2015), S. 190.

wertung (vgl. Tabelle 10²⁰⁷) ist anzunehmen, dass das Stammpersonal mit Beteiligung am Job-Rotation-Konzept hinsichtlich der Masse circa 43% produktiver kommissioniert. Daher wurde der Mittelwert des Stammpersonals ohne Beteiligung am Job-Rotation-Konzept für den t-Test um diese 43% erhöht (von 301,35 auf 430,4 kg je Schicht), um den möglichen positiven Einfluss des Job-Rotation-Konzepts zu isolieren. Wird der Produktivitätsvorteil durch Anheben der mittleren kommissionierten Masse des Stammpersonals ohne Teilnahme am Job-Rotation-Konzept herausgerechnet und hätte Job-Rotation keinen signifikant positiven Einfluss auf das Handling von Masse, so könnte die Nullhypothese nicht abgelehnt werden.

Nachstehende Berechnung verdeutlicht die Herleitung der höheren Produktivität:²⁰⁸

$$\text{Produktivitätsfaktor} = \frac{\text{Massenproduktivität mit Job - Rot.}}{\text{Massenproduktivität o. Job - Rot.}} = \frac{\frac{28800s}{20,53 \frac{s}{kg}}}{\frac{28800s}{29,32 \frac{s}{kg}}} = 1,4282.$$

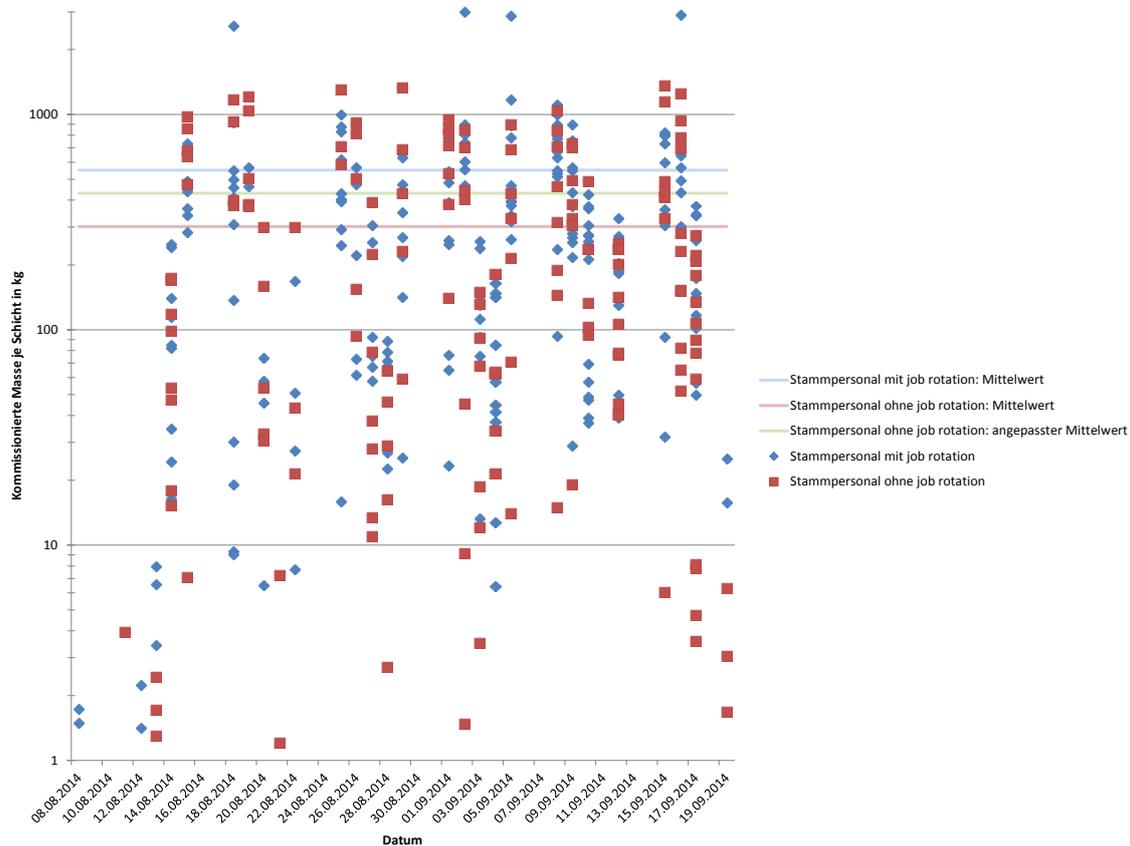


Abbildung 24: Kommissionierte Masse je Schicht²⁰⁹

²⁰⁷ Siehe Kapitel 5.3.1.

²⁰⁸ Vgl. Stinson et al. (2015), S. 190.

²⁰⁹ In Anlehnung an Stinson et al. (2015), S. 191.

5.4 AP 2.3: Quantifizierung von Einflussfaktoren auf die Lernkurve

Wie im vorigen Kapitel bereits dargelegt, erfolgt Lernen nicht nur bei unerfahrenen Mitarbeitern, sondern auch bei erfahrenen Mitarbeitern. Dieses erweiterte Lernen bedarf jedoch einer gesonderten Betrachtung in einer eigenständigen Untersuchung, weshalb im Rahmen des Projekts *LeiKom* der Fokus auf den Einflussfaktoren auf die Lernkurve von lernenden Mitarbeitern gelegt wird. Hierfür wurden zwei Herangehensweisen verwendet. Zum einen wurden die Parameter ermittelt, welche sich aufgrund der Wahl aus diversen Lernkurvenmodellen bzw. -konzepten ergeben. Zum anderen mittels empirischer Untersuchung mithilfe der von den Industriepartnern zur Verfügung gestellten Daten, die zu einem genaueren Verständnis der Einflussfaktoren, welche durch die praktische Anwendung initiiert werden, beiträgt.

5.4.1 Ableitung aus den Lernkurvenmodellen

5.4.1.1 Allgemeine Parameter

Im Rahmen der Literaturrecherche zu diesem Forschungsprojekt wurden insgesamt 14 verschiedene Modelle identifiziert, die letztendlich die Grundgesamtheit für das AP 3.1 bilden (vgl. Abbildung 25).²¹⁰ Hierbei wurde darauf geachtet, dass, soweit möglich, auf die originäre Quelle eines jeden Lernkurvenmodells zurückgegriffen wird. War es nicht möglich Zugang zu dieser zu bekommen, so wurde alternativ auf Quellen zurückgegriffen, die die ursprüngliche Quelle verwendet haben.

Log-linear Modelle	Exponentialmodelle	Hyperbolische Modelle	Multivariate Modelle
Wright	Woerber	2- oder 3-Parameter-Hyperbelmodelle	Multivariate Lernkurve
Crawford	Levy		
Yelle	Knecht		
Stanford-B			
De Jong			
Baloff oder Plateau-Modell			
S-Modell			
Cochran			
Ullrich			

Abbildung 25: Lernkurvenmodelle im Überblick²¹¹

Der Erkenntnisgewinn ist, dass die Einflussfaktoren auch mit einer dichotomen Entscheidungssituation gleichgesetzt werden können, da von dem Verwender zunächst gewählt werden muss, welche Charakteristika des Lernens in die Lernkurve miteinbezogen werden sol-

²¹⁰ Siehe Kapitel 4.2.

²¹¹ Eigene Darstellung.

len. So ist initial die Entscheidung hinsichtlich der Darstellung des Lernfortschritts zu treffen, da ausgehend von dieser Entscheidung alle weiteren Einflussgrößen abhängig sind.

Prinzipiell kann zwischen einer steigenden Produktivitätskurve²¹² sowie einer fallenden Kurve, die den Zeitbedarf je Einheit wiedergibt, differenziert werden. Zudem besteht bei diversen Lernkurven die Möglichkeit, eine Vergessenskurve zu implementieren, die eine Verschlechterung der Leistungsfähigkeit abbilden kann.

Des Weiteren ist zu wählen, ob die Lernkurve in der Lage sein soll Vorerfahrung zu berücksichtigen, denn dann ist in der Formel ein Term enthalten, der für eine Linksverschiebung der Lernkurve verantwortlich ist. Letzter „a priori“ Einflussfaktor auf die Lernkurve ist die Entscheidung hinsichtlich der Limitierung von Lernen. Bspw. ist nach der Lernkurve nach Wright unendliches Lernen möglich, weshalb die Lernkurve gegen null konvergiert. Demgegenüber beinhaltet die Formel des De Jong-Modells einen Inkompressibilitäts- oder Inkomprimierbarkeitsfaktor, welcher das vollständige Absinken verhindert. Abschließend ist die Lernrate als einziger, von der Wahl des Lernkurvenmodells unabhängiger Einflussparameter identifizierbar, da dieser in jeder Formel enthalten ist.

5.4.1.2 Quantifizierung der Vorerfahrung

Um die Vorerfahrung eines Mitarbeiters zu beschreiben, zwecks eindeutigen Erfassens des Startpunktes auf der individuellen Lernkurve, können verschiedene Items herangezogen werden, die zusammen die Vorerfahrung bilden. Dieses Kapitel basiert somit auf Kapitel 4.1, welches sich mit der Thematik des allgemeinen Lernens befasst. In Analogie zu Schachspielern, die sich frühere Spielzüge in das Gedächtnis rufen um sie auf die aktuelle Spielsituation anzuwenden, kann bereits einschlägige Arbeitserfahrung eines Kommissionierers als ein Treiber seiner Vorerfahrung gesehen werden.²¹³

Des Weiteren beeinflusst neben einer theoretischen Einarbeitung in die Kommissionierung, die bspw. durch eine Präsenzschiulung oder als Selbststudium erfolgen kann, auch das Beobachten der Tätigkeit im Rahmen eines Einarbeitungsprogrammes den „Betrag“ der Vorerfahrung.²¹⁴ Dies knüpft direkt an die einschlägige Arbeitserfahrung an, da auch hier bereits Gesehenes auf die aktuelle Aufgabenstellung übertragen werden kann. Im Gegensatz zur Arbeitserfahrung basiert die Erfahrung nicht auf physisch durchgeführte Tätigkeiten, weshalb von einer geringeren Halbwertszeit des beobachteten Wissens ausgegangen werden kann.²¹⁵

Demzufolge geht der größte Einfluss auf die Vorerfahrung vom Selbstständigen Kommissionieren bzw. durchführen einer Tätigkeit aus. Hierunter fällt nicht nur das eigenständige Kommissionieren, sondern auch das Kommissionieren im Team.²¹⁶

²¹² Bspw. Lernkurve nach Towill, vgl. Towill (1990).

²¹³ Vgl. Sternberg und Frensch (1992), S. 191.

²¹⁴ Vgl. Hacker und Skell (1993), S. 220.

²¹⁵ Vgl. Kullmann und Seidel (2005), S. 27 ff.

²¹⁶ Vgl. McDaniel et al. (1988), S. 327.

Überdies kann der Fokus des Zusammenarbeitens auf der Einarbeitung liegen, sodass von einem Coaching gesprochen werden kann. Dabei ist zu beachten, dass die Erfahrung aus dem Coaching sowohl von der Zeitdauer als auch von der Erfahrung des Coaches abhängig ist.²¹⁷

Die abschließende Auflistung skizziert nochmals relevante Parameter auf die Vorerfahrung eines Kommissionierers:

- Theoretische Einarbeitung,
- Einschlägige Arbeitserfahrung,
- Beobachtung des Kommissionierprozesses,
- Zusammenkommissionieren sowie
- Selbständiges Kommissionieren bzw. Coaching.

5.4.2 Ableitung aus empirischer Untersuchung

Neben der Ableitung von Einflussfaktoren aus den Definitionen der Lernkurvenmodelle bzw. -theorien wurde eine empirische Untersuchung hinsichtlich der Einflussfaktoren auf die Lernkurve durchgeführt, die für wichtige Erkenntnisse bezüglich der Anwendbarkeit bzw. notwendiger Transformationen von Lernkurvenmodellen in der Intralogistik essenziell ist. Hierfür wurden die in AP 1.1 strukturierten Daten hinsichtlich möglicher Lerneffekte ausgewertet und mit den aus Kapitel 5.4.1 gewonnenen Erkenntnissen abgeglichen.

Diesem Grund ist es auch geschuldet, dass die empirische Untersuchung letztendlich auf lediglich drei Lernkurvenmodellen beruht (De Jong-Modell, Stanford-B und S-Modell). Dabei sind zwei Anmerkungen zu treffen: einerseits sei auf den fließenden Übergang von AP 2.3 und AP 3.1 verwiesen, weshalb sich die Begründung zur Fokussierung auf diese drei Lernkurven im nachfolgenden AP wiederfindet²¹⁸; andererseits ist durch das S-Modell sowohl die Lernkurve nach De Jong wie auch Stanford-B darstellbar, da es sich bei der Formel um eine Verschmelzung dieser beiden handelt.²¹⁹

Zuvorderst erscheint dies redundant, doch hierdurch konnten die Auswirkungen bei (Nicht-)Berücksichtigung von nicht unendlichem Lernen respektive Vorerfahrung besser hervorgehoben werden. Basierend auf diesen drei Lernkurven wurden zunächst Unterschiede aufgrund der Bezugsgröße der Zeit identifiziert, welche auch Einfluss auf die Aussage der Lernkurve hat. So kann bspw. die Positionsanzahl oder die Anzahl der Entnahme-/Greifeinheiten als Referenzgröße genutzt werden. Während somit die Entnahmen Aussagen hinsichtlich der motorischen Lernfähigkeit erlauben, können bei Verwendung der Positionsanzahl Lerneffekte der individuellen Organisation etc. berücksichtigt werden. Jedoch ist hierfür ein konstantes Verhältnis von Anzahl der Entnahmen je Position über die Zeit die notwendige Voraussetzung, da bei starker Volatilität eine Verzerrung resultiert. Es ist offensichtlich, dass ein Kommissionierer, trotz effizienterer Arbeitsweise durch den Lerneffekt, für eine Position

²¹⁷ Vgl. DuBois und McKee (1994), zitiert nach Quinones et al. (1995), S. 891.

²¹⁸ Siehe bspw. Kapitel 5.5.2.

²¹⁹ Vgl. Anzanello und Fogliatto (2011), S. 575.

mit 1000 Entnahmen mehr Zeit benötigen kann als bei Bearbeitung seines ersten Auftrags mit nur einer Entnahme je Position.

Darüber hinaus stellt insbesondere die Erkenntnis hinsichtlich der notwendigen Formelanpassung ein wichtiges Ergebnis dieses Projekts dar. Denn eine Betrachtung ganzer Arbeitstage ist eher atypisch für die Lernkurvenanwendung und ein Novum bezogen auf die Untersuchung des Lernens in der Kommissionierung. Bis dato repräsentiert (definitionsbedingt) die kumulierte Produktionseinheit die Erfahrung des Mitarbeiters in den Formeln der Modelle.

Eine signifikante Verbesserung der Ergebnisse begründet jedoch die tagesweise Auswertung. Demzufolge ist eine Transformation der Formeln bzw. Neudefinition der Variable bei Übertragung von der Produktion auf die Kommissionierung vorzunehmen, da mutmaßlich die Volatilität bzw. Heterogenität der Kommissionieraufträge, als Äquivalent zur Produktionseinheit, die Anwendung der originären Fassung der Lernkurvenmodelle verhindert. Nachstehende Tabelle 13 verdeutlicht nochmals den Verbesserungsgrad bei Quantifizierung der Erfahrung anhand gearbeiteter Tage.

Performance measurement	Experience measurement	r ²	
		Steady employees	Temporary employees
Cumulative average seconds/pick	Days worked	0.27	0.79
Cumulative average seconds/pick	Orders completed	0.35	0.44

Tabelle 13: Aussagekraft exponentieller Modellierung in Abhängigkeit des Beschäftigungsverhältnisses²²⁰

²²⁰ Vgl. Stinson (2014), S. 5.

5.5 AP 3.1: Herleitung eines Modells zur Beschreibung von Lernkurven in der PzW-Kommissionierung

Entsprechend der Erkenntnisse des vorangestellten AP 2.3 wurde in einem fließenden Übergang AP 3.1 gestartet. Hierfür wurde die Auswahl an Lernkurvenmodellen iterativ durch Zunahme weiterer Anforderungen verkleinert. In einem ersten Schritt wurden alle Varianten mit Produktivitätskurven ausgeschlossen, da der benötigte Zeitbedarf je Einheit direkt aus der Lernkurve ablesbar sein sollte (Lernkurve nach Levy, nach Knecht und die Zwei/Drei-Parameter-Hyperbel). Des Weiteren scheint eine Vereinfachung der Multidimensionalen Lernkurve möglich, da die Hinzunahme der Einzel-Konstanten u_i neben der Konstante K insofern redundant ist, als dass alle Einzel-Konstanten u_i in einer einzigen Konstanten, die dann vor dem Produkt steht (also in K), zusammengefasst werden können.²²¹ Aufgrund dieser Unsicherheit wurde von einer Verwendung dieses Lernkurvenmodells abgesehen. Darüber hinaus wurden die Kriterien Berücksichtigung der Vorerfahrung wie auch kein unendliches Lernen zu unterstellen als essenziell bewertet. Dies wird nochmals durch die im Rahmen des AP 2.2 untersuchten Lernkurvenfaktoren auf Basis von Leistungskennwerten deutlich. Zwar wird der Ausweis der Lernkurve auf Basis von Leistungskennwerten aus Gründen der Praktikabilität verworfen, doch bei einer ersten Untersuchung der Werte wies eine lediglich grobe, händisch entwickelte Annäherungsformel des De Jong-Modells ein gleich gutes Bestimmtheitsmaß wie eine mittels kleinster Quadrate-Methode entwickelte Wright-Lernkurve aus, wie anhand der Abbildungen 26 und 27 sowie der zugehörigen Tabelle 14 ersichtlich ist.

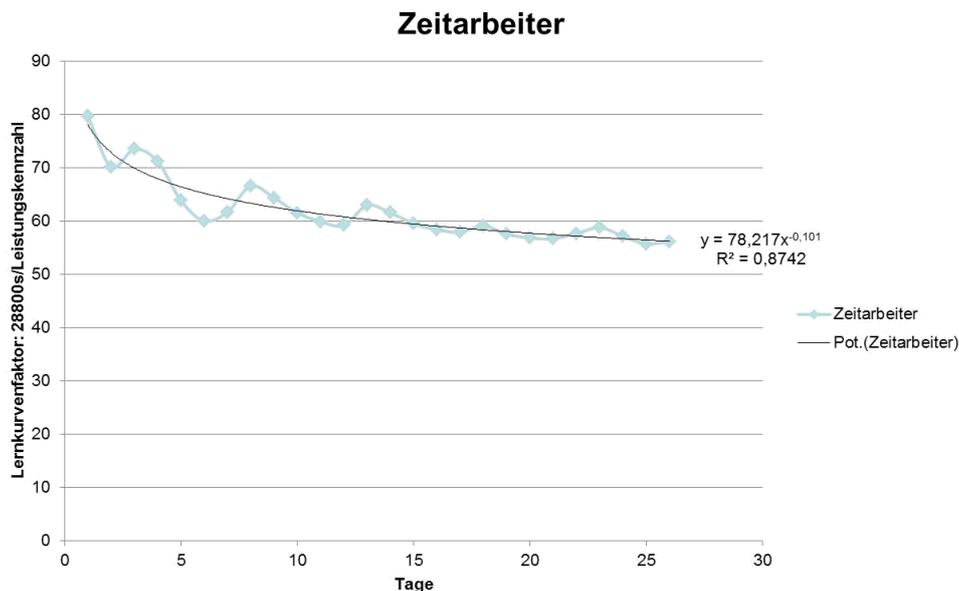


Abbildung 26: Ableitung eines Wright-Lernkurvenmodells, Basis: Leistungskennzahl²²²

²²¹ Siehe Kapitel 4.2.5, bzw. vgl. Anzanello und Fogliatto (2011), S. 577 f.

²²² Eigene Darstellung, in Anlehnung an Stinson et al. (2015), S. 187.

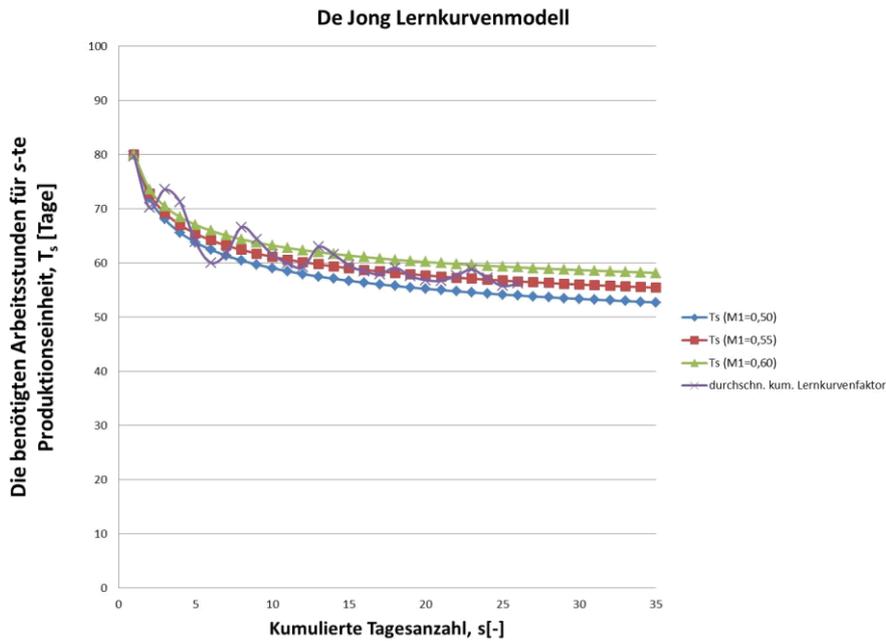


Abbildung 27: Ableitung eines De Jong-Lernkurvenmodells, Basis: Leistungskennzahl²²³

Log-linear-Modell (Wright)	DeJong-Modell
$y = 78,217x^{-0,101}$ <ul style="list-style-type: none"> • Lernrate: 93,24 • Unendliches Lernen fraglich <p style="text-align: center;">R² = 0,8742</p>	$T_s = 80 * (0,55 + \frac{1-0,55}{x^{0,3219}})$ <ul style="list-style-type: none"> • Lernrate: 80 • Inkomprimierbarkeitsfaktor: 0,55 • Lediglich grobe Näherungsfunktion <p style="text-align: center;">R² = 0,8758</p>

Tabelle 14: Bestimmtheitsmaß der abgeleiteten Lernkurvenformeln, Basis: Leistungskennzahl²²⁴

Daher entfielen die Lernkurvenmodelle nach Wright, Crawford, Yelle, Woeber und das Plateau-Modell, weil die beiden Charakteristika Vorerfahrung und kein unendliches Lernen nicht erfüllt wurden. Äquivalent hierzu genügen die folgenden Modelle den beiden Charakteristika lediglich teilweise: während die Inkompressibilität bzw. Inkomprimierbarkeit im De Jong-Modell implementiert ist, wodurch kein unendliches Lernen unterstellt wird, beinhaltet das Modell keinen Parameter zur Erfassung der Vorerfahrung eines Subjekts; vice versa verhält sich der Sachverhalt bei Verwendung des Lernkurvenmodells Stanford-B. Somit wäre ein Modell, das beide Kriterien vereint, vorzugswürdig. Folglich wurde das S-Modell als Basis für die Herleitung eines Modells zur Beschreibung von Lernkurven in der PzW-

²²³ Entnommen aus Stinson et al. (2015), S. 188.

²²⁴ Vgl. Stinson et al. (2015), S. 187 f.

Kommissionierung gewählt, da, obgleich der Berücksichtigung von Inkompressibilität sowie Vorerfahrung, die Komplexität des Modells gering ist.²²⁵ Denn die Modelle von Ullrich und Cochran erfüllen zwar wie das S-Modell die Anforderungen, doch ist bei Ullrich eine Lernspanne zu ermitteln bzw. bei Cochran ist die Lernkurvenformel in drei verschiedene Abschnitte unterteilt, weshalb die Handhabbarkeit dieser Modelle unter der Praktikabilität des S-Modells liegt (siehe Kapitel 4.2.2.8 und 4.2.2.9).

Wie bereits in Kapitel 5.4 ausgeführt, zeigt, bei einem Ausweis der Leistung in Zeiteinheiten je Entnahme, die Verwendung von Arbeitstagen anstelle der bearbeiteten Aufträge als Bezugsgröße eine signifikante Verbesserung des Bestimmtheitsmaß der Lernkurve. Demzufolge ist das S-Modell, dessen originäre Fassung Produktionseinheiten betrachtet²²⁶, hinsichtlich der Bezugsgröße anzupassen. Überdies ist eine präzise Charakterisierung des Kommissioniersystems erforderlich, da hierdurch die Aussagefähigkeit der Lernkurven abhängig ist. So wurden zusätzlich Lernkurven bezüglich Aufträge wie auch Positionen entwickelt und auf ihren jeweiligen wissenschaftlichen Erklärungsgehalt untersucht. Für die Verwertbarkeit der Erkenntnisse aus diesen zusätzlichen Lernkurven ist ein vergleichsweise konstantes Verhältnis von Entnahmen zu Positionen bzw. zu Aufträgen notwendig.²²⁷ Zudem muss die Beeinflussbarkeit durch den Kommissionierer gegeben sein, da je nach Ausgestaltung des Kommissioniersystems, bspw. durch Teilautomatisierung respektive maschinelle Unterstützung, gewisse Zeiten determiniert werden. Daher ist die Aussagefähigkeit jener zusätzlichen Lernkurven individuell zu klären. Sie sind zwar zudem für die Beurteilung des Einarbeitungszustands eines Mitarbeiters nicht entscheidend, jedoch aus wissenschaftlicher Sicht interessant, da hierdurch die Möglichkeit besteht genauere Aussagen hinsichtlich des Lernens zu treffen. Wie bereits im vorigen Kapitel angesprochen kann somit die Lernfähigkeit über motorische Effekte hinaus bezüglich des Lernens der individuellen Organisation etc. getroffen werden – unter der Einschränkung, dass obige Bedingungen erfüllt sind.

5.5.1 Lernverhalten bei Mitarbeitern von Projektpartner I

5.5.1.1 Charakterisierung des Kommissioniersystems

Untersucht wurde das Lernverhalten bei Kommissionierern in einem mittelständischen Unternehmen aus dem Bereich der Textilindustrie, welches Bekleidung herstellen lässt und diese an Händler und Endkunden vertreibt. Produziert werden die Artikel des Unternehmens in Südeuropa, Asien und Nordafrika. Die Lieferung erfolgt bei den Artikeln aus Asien per Container und aus Südeuropa wie auch Nordafrika per Lastkraftwagen. Da die Artikel unpalettiert in Kartons geliefert werden, müssen diese im Wareneingang aus den LKW und Containern manuell entnommen werden. Im Wareneingang werden die gelieferten Artikel nur hinsichtlich der gelieferten Menge anhand von einer Gewichtskontrolle überprüft. Eine Kontrolle der Qualität findet hier nicht statt. Voluminöse Artikel wie Winterbekleidung oder zeitkritische Artikel werden im Blocklager in der Freifläche eingelagert. Die restlichen Artikel werden überwiegend in Kleinladungsträger (KLT) umgepackt, um dann im automatischen Kleinteilelager (AKL) eingelagert zu werden. Dabei verfügt das AKL über acht Regalbediengeräte, von de-

²²⁵ Vgl. Anzanello und Fogliatto (2011), S. 575.

²²⁶ Äquivalent in der Kommissionierung: kommissionierte Aufträge.

²²⁷ Siehe Kapitel 5.4.

nen zwei in der Lage sind Kartons einzulagern. Die restlichen sechs RBG können lediglich standardisierte KLT handhaben, weshalb die gelieferten Artikel in diese umgeladen werden müssen. Insgesamt umfasst das AKL über 60.000 Lagerplätze, welche doppelt tief angeordnet sind. Bei der Einlagerung der Artikel in das AKL erfolgt keine Zonierung, da die eingelagerten Artikel bereits verkauft sind und es sich folglich bei allen Artikeln um Schnelldreher handelt. Im Untergeschoss des Distributionszentrums werden die Artikel als Bodenblocklager aufbewahrt. Zudem befindet sich die Bereitstellung und Kommissionierung einer separaten Eigenmarke in einem abgetrennten Bereich. Diese Artikel werden in einem Durchlaufregal im AKL bereitgestellt. Prinzipiell hat das Unternehmen zwei Saisons im Jahr, wobei pro Saison im B2B-Bereich circa 1,5 Mio. Artikel, mit einem Umsatzpeak von 80 % in den ersten beiden Monaten eines Jahres, umgesetzt werden. Zur Bewältigung dieser Aufgabe beschäftigt das Unternehmen in diesem Zeitraum zwischen 15 und 20 Leiharbeiter, die im Wareneingang sowie im Bereich der PzW-Kommissionierung eingesetzt werden. Um auf die Bearbeitung der Auftragspitzen vorbereitet zu sein, erfolgt eine Vorkommissionierung der Bestellungen bereits ab Dezember. Dies ist möglich, da die Kunden des Unternehmens ihre Bestellungen bereits sechs Monate im Voraus abgeben. Nach der Vorkommissionierung werden die bestellten Artikel wieder im AKL eingelagert. Die vorkommissionierten Aufträge werden zum benötigten Zeitpunkt aus dem AKL ausgelagert und um andere Artikel aus dem AKL oder dem Lager in der Freifläche ergänzt. An den WzP-Kommissionierstationen können fünf Aufträge parallel via Pick-to-Light kommissioniert werden. Dabei werden die zu kommissionierenden Artikel als Batch (40-50 Auslagerungen) aus dem AKL ausgelagert sowie an den WzP-Kommissionierstationen bereitgestellt. Kommissioniert werden die Artikel in Kartons, die in Abhängigkeit des Auftrags automatisch ausgewählt werden. Nach der WzP-Kommissionierung schließt sich bei Bedarf eine Kommissionierung im Freiflächenlager an. Andernfalls wird der Auftrag in den Wareneingang transportiert. Bei dem Freiflächenlager handelt es sich um ein Bodenzeilenlager, in denen sich Paletten mit Kartons befinden.

Die Kommissionierer bewegen sich mit Kommissionierwagen durch das Bodenzeilenlager, um zu den gewünschten Artikeln zu gelangen. Informationen über die zu kommissionierenden Artikel können die Mitarbeiter der Mobilten Datenerfassung (MDE) entnehmen, die sich an den Kommissionierwagen befinden.

Fertig kommissionierte Aufträge werden an zwei Übergabestationen am Rande des AKL abgegeben. Anschließend werden die gebildeten Versandeinheiten beim Transport in den Versandbereich in einer Schleife der Förderanlage gepuffert und müssen vom Mitarbeiter des Versandbereichs manuell abgerufen werden. Nach dem Abruf eines Auftrags werden die Kartons sowohl in Abhängigkeit der Anforderungen des KEPs²²⁸ oder des Kunden mit Labels versehen als auch auf den Versandbahnen sortiert.

Die Zuordnung zu den Versandbahnen geschieht entweder in Abhängigkeit des KEPs oder des Kunden. Besteht ein Auftrag aus mehreren Schachteln, wird der letzte Karton des Auftrags ausgeschleust und mit den Versandpapieren versehen. In einem separaten Bereich finden die Kommissionierung und der Versand der B2C-Aufträge (Endkunden) statt. An den Ware-zum-Mann Kommissionierstationen des AKL erfolgt die erste Stufe der Kommissionierung. Hier werden die Artikel für 33 Aufträge in fahrbare Wannen kommissioniert, welche im Anschluss daran in den B2C-Kommissionierbereich geschoben werden. Dort werden die

²²⁸ KEP = Kurier-, Express- und Paketlieferdienst.

Artikel der 33 Aufträge via Pick-to-Light in ein Regal mit 33 Fächern kommissioniert. Abschließend erfolgt die Entnahme und Verpackung der Artikel an der Rückseite des Regals.

5.5.1.2 Vorgehen

Die in AP 1.1 erfassten und strukturierten Daten bilden die Datengrundlage der nachfolgenden Tätigkeiten zur Ermittlung von Lernkurvenmodelle in der PzW-Kommissionierung. Jedoch mussten zusätzlich notwendige Anpassungen vorgenommen werden, da die Auftragsdaten von Projektpartner I heterogen sind (äußerst volatile Auftragszeiten über mehrere Tage, weil nicht eilende Aufträge parallel zu weiteren dringlichen Aufträgen kommissioniert wurden oder Aufträge von verschiedenen Personen kommissioniert wurden und somit nicht eindeutig zu zuordnen sind). Daher wurde die Datenbasis auf Aufträge eingeschränkt, welche im Intervall (0 Sek.; 3000 Sek.) liegen. Anzumerken ist, dass die Aufträge um eine fortlaufende Nummer ergänzt wurden, sodass die Erfahrung des bearbeiteten Auftrags dennoch berücksichtigt werden konnte. Ergo basiert die Evaluierung auf $N = 5$ Zeitarbeiter, die während des Zeitraumes (17.12.2014 – 15.02.2015) kommissioniert haben. Neben den durchschnittlichen Zeiten je Entnahme wurden überdies Zeiten je Auftrag sowie Position erfasst. Da die Datengrundlage für eine Lernkurvenauswertung mit Bezugsgröße Tage nicht ausreichend ist, wurde nochmals eine zu Tabelle 13 äquivalente Lernkurve mit Aufträgen (Produktionseinheiten) als Bezugsgröße gewählt. Dadurch ist eine nochmalige Validierung hinsichtlich der Bezugsgröße Tage respektive Aufträge möglich.

5.5.1.3 Lernkurven

Auch wenn lediglich die Lernkurve bezogen auf die Entnahmen interpretierbar ist, so sind aus Gründen der Vollständigkeit alle ermittelten Lernkurven dargestellt.

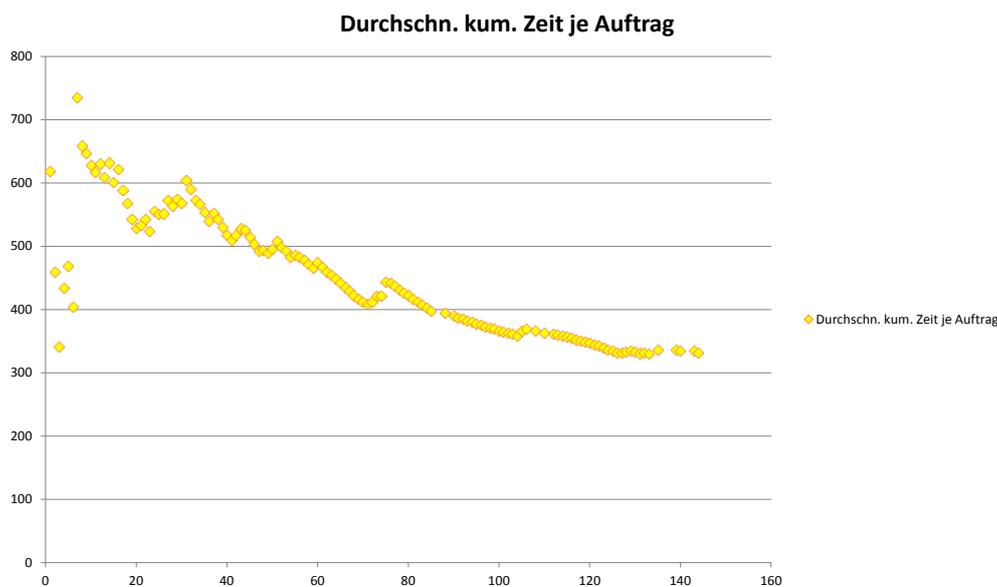


Abbildung 28: Projektpartner I, Auftrags-Lernkurve, Bezugsgröße Aufträge

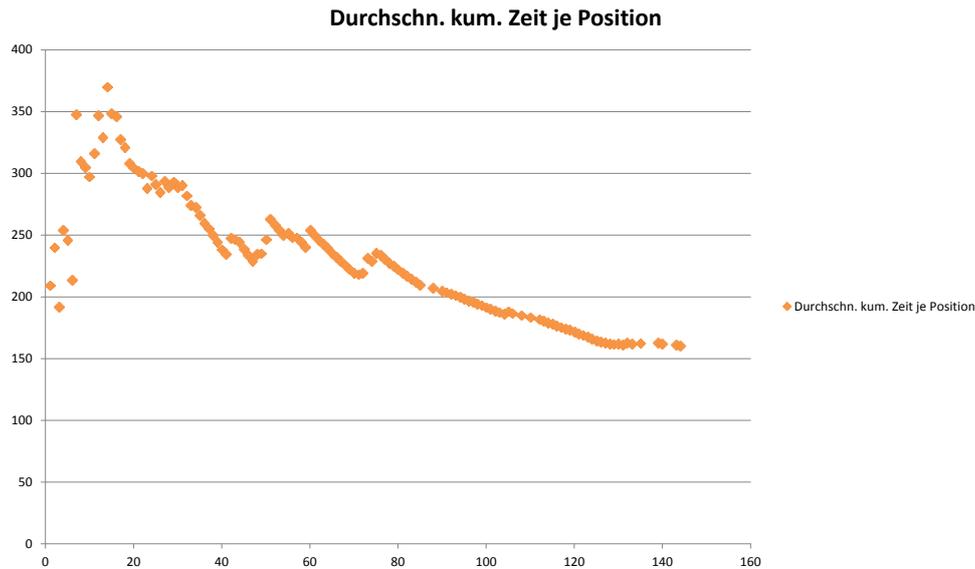


Abbildung 29: Projektpartner I, Positions-Lernkurve, Bezugsgröße Aufträge

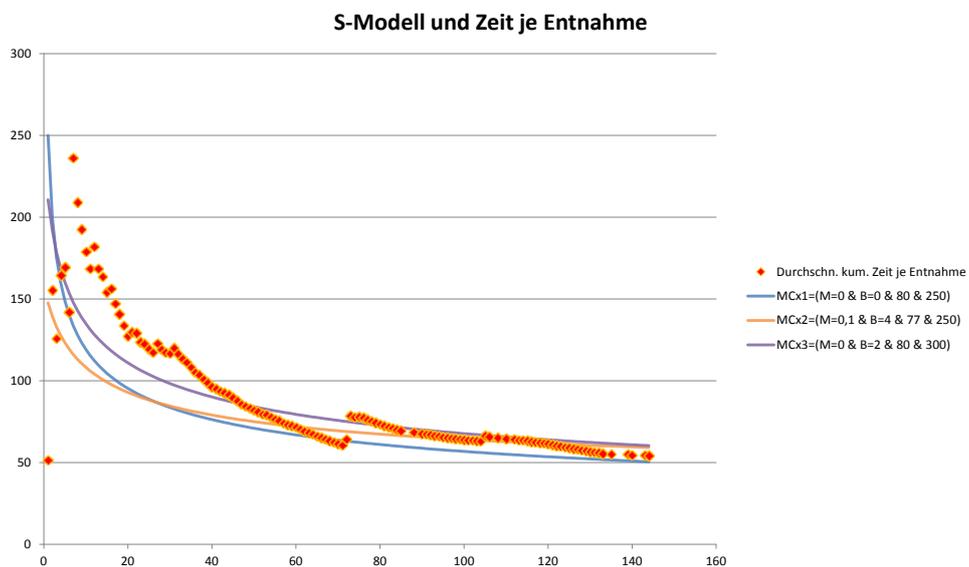


Abbildung 30: Projektpartner I, Entnahme-Lernkurve mit S-Modell-Annäherung, Bezugsgröße Aufträge

S-Modell	MCx3=(M=0 & B=2 & 80 & 300)	0,4909111
S-Modell	MCx1=(M=0 & B=0 & 80 & 250)	0,6816257
S-Modell	MCx2=(M=0,1 & B=4 & 77 & 250)	0,6387776

Tabelle 15: Bestimmtheitsmaß der S-Modell-Annäherung

5.5.1.4 Interpretationsfähigkeit und Interpretation

Wie bereits dargelegt, sind aufgrund der Heterogenität der Aufträge Interpretationen der Auftrags- & Positions-Lernkurven unzulässig, weshalb der Fokus auf der Entnahme-Lernkurve liegt. Da die Auswertung auf einer geringen Datenbasis beruht, wurde die Bezugsgröße Aufträge, entgegen der eigenen Empfehlung, gewählt. Zwar ist das Bestimmtheitsmaß deutlich

höher als bei der Auswertung von Tabelle 13, doch diese Werte sind immer noch signifikant niedriger als bei den folgenden Auswertungen der anderen Projektpartner mit Tagen als Bezugsgröße. Dies bestätigt somit die vorangegangenen Untersuchungsergebnisse, dass eine Lernkurve mit Tagen anstatt Aufträgen als Bezugsgröße für die Kommissionierung deutlich bessere Ergebnisse liefert. Dies kann mittels der heterogenen Aufträge erklärt werden, welche nicht mit homogenen Produktionsgütern gleichzusetzen sind. Des Weiteren weisen die ersten Aufträge ein niedriges Ausgangsniveau auf, die zu Verzerrungen führen. Dies kann auf die begleitete Einarbeitung der lernenden Mitarbeiter durch einen eingearbeiteten Arbeiter zurückgeführt werden, wodurch dessen Erfahrung in die ersten eigenständig bearbeiteten Aufträge des lernenden Mitarbeiters implementiert werden.

Den Annäherungsformeln kann entnommen werden, dass in diesem Kommissioniersystem eine Berücksichtigung von geringer Vorerfahrung und die Unterstellung eines niedrigen Inkompessibilitätsfaktors in einer besseren Anpassung des S-Modells resultiert. Jedoch liegen keine Daten über die reale Vorerfahrung der Zeitarbeiter vor, sodass diesbezüglich keine abschließende Aussage getroffen werden kann. Des Weiteren ist zu überprüfen, inwieweit auch bei den Projektpartnern dieser niedrige Inkompessibilitätsfaktor festgestellt werden kann, sodass dies als ein Charakteristikum für die Kommissionierung gewertet werden kann.

5.5.2 Lernverhalten bei Mitarbeitern von Projektpartner II

5.5.2.1 Charakterisierung des Kommissioniersystems

Das untersuchte Kommissioniersystem wird von einem großen Vertreiber von Kosmetikprodukten betrieben. Da die hier gehandhabten Artikel nur sehr kurzfristig gelagert und Umverpackungstätigkeiten durchgeführt werden, wird das betrachtete Distributionszentrum als Crossdocking-Zentrum bezeichnet. Der Projektpartner II verfügt über mehrere ähnliche Crossdocking-Zentren und stellte der Forschungsstelle die Kommissionierdaten von einem Standort zur Verfügung. Die Anlieferungen erfolgen ausschließlich per LKW und sind empfängerorientiert sortiert. Dabei entsprechen die Empfänger verschiedenen Filialen desselben Projektpartners innerhalb Deutschlands. Eingetroffene Ware wird in einem Bodenzeilenlager auf Paletten zwischengespeichert. Die Kommissionierung erfolgt nach dem manuellen Transport der Ware zu einem stationären Arbeitsplatz. Dort werden Qualitätskontrollaktivitäten sowie eine Umverpackung in Kleinladungsträger durchgeführt. Dabei wird der Arbeitsfortschritt positionsweise mittels eines kabelgebundenen Barcode-Scanners am Arbeitsplatz durch den Kommissionierer bestätigt. Entsprechende Zeitstempel werden auftragsweise erzeugt. Nach der Fertigstellung eines Kommissionierauftrags wird die Ware zum Warenausgangspuffer gebracht. Sie verbleibt in der Nähe des Warenausgangs bis zur Abholung durch den entsprechenden Frachtführer. Die betrachteten lernenden Kommissionierer sind saisonale Aushilfen, die einer i. d. R. zweitägigen Einführung durch einen erfahrenen Mitarbeiter unterzogen werden.

5.5.2.2 Vorgehen

In die Auswertung fließen lediglich Aufträge mit Bearbeitungszeiten, Positionen wie auch Entnahmen größer als Null ein. Um die Erfahrung eines bearbeiteten Auftrags, dessen Bear-

beitungszeit bei null liegt (bspw. durch Kommissionieren eines Auftrags mit nur einer Entnahme - Start- und Endzeitpunkt gleich - o. Ä.), dennoch zu berücksichtigen, wurden die Aufträge fortlaufend nummeriert. Die Auswertung basiert daher auf 20121 berücksichtigten Aufträgen, die von 43 Zeitarbeitern während des Zeitraums 19.08.2013 bis 25.02.2015 kommissioniert wurden. Dabei werden für die Ermittlung der Lernkurven die durchschnittlichen Zeiten (in Sek.) je Auftrag, je Position und je Entnahme über einen gesamten Arbeitstag herangezogen. Per Definition leiten sich die Lernkurven aus den jeweiligen kumulierten Zeiten ab.

5.5.2.3 Lernkurven

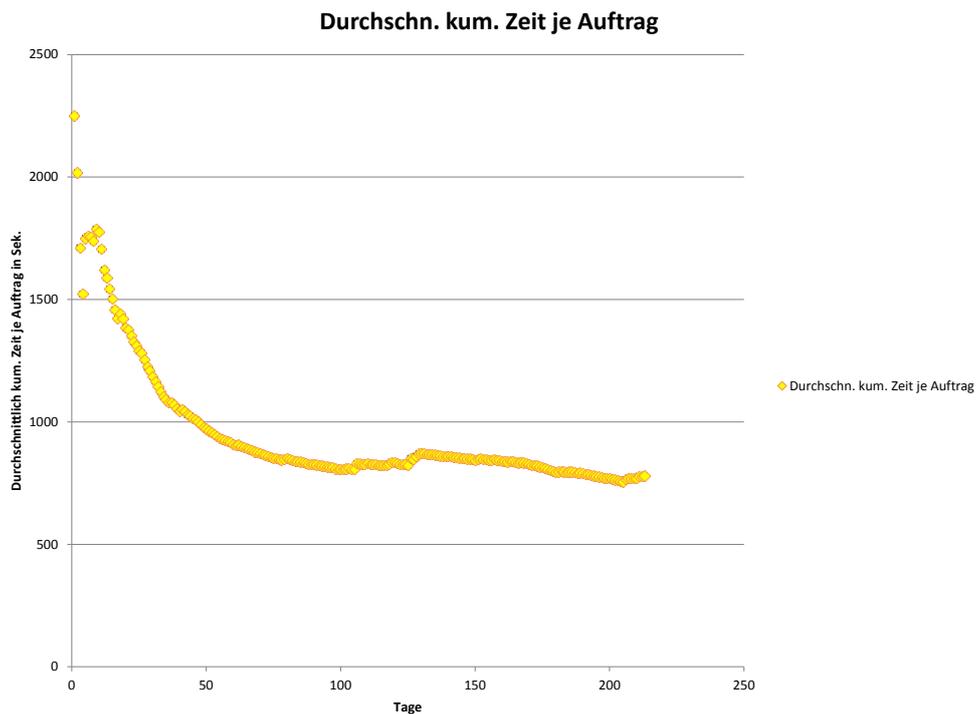


Abbildung 31: Projektpartner II, Auftrags-Lernkurve, Bezugsgröße Tage



Abbildung 32: Projektpartner II, Positions-Lernkurve, Bezugsgröße Tage

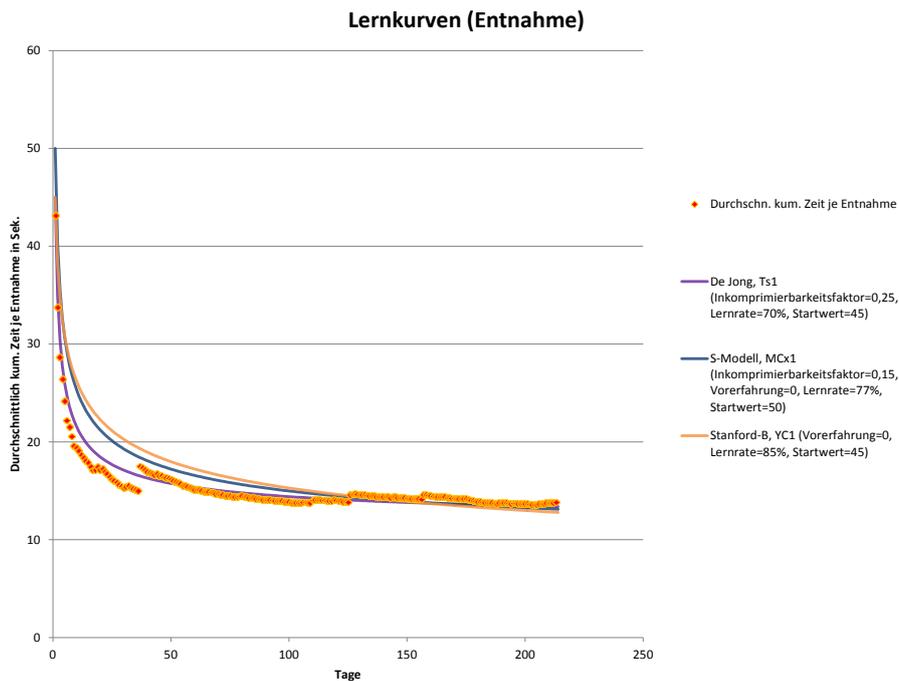


Abbildung 33: Projektpartner II, Entnahme-Lernkurve mit Modell-Annäherung, Bezugsgröße Tage

5.5.2.4 Interpretationsfähigkeit und Interpretation

Bei dem Kommissioniersystem des Projektpartners II werden die Bereitstellereinheiten zu den stationären Kommissionierplätzen transportiert, ehe die geforderte Menge entnommen wird.

Daher sind die Zeiten für Positionen bzw. Aufträge überwiegend determiniert, weshalb im Folgenden der Fokus auf Entnahmen oder Entnahmezeiten liegt.

Aus den Abbildungen 34 und 35 ist ersichtlich, dass die Lernkurven von Aufträgen sowie Positionen insgesamt ein relativ hohes Zeitniveau haben. Jedoch ist die Einflussmöglichkeit des Kommissionierers limitiert. Zum einen durch den Transport der Bereitstelleneinheiten zu den Kommissionierstationen, zum anderen durch die Auftragsstruktur; je mehr Entnahmen je Position, desto mehr Zeit je Position wird benötigt. Demgegenüber befindet sich die Lernkurve der Entnahmen bereits auf einem vergleichsweise niedrigen Ausgangsniveau. Abbildung 36 zeigt diese im Vergleich mit den am besten passenden Standardlernkurven (De Jong Modell, S-Modell sowie Stanford-B). Überdies kann auf Basis des De Jong bzw. S-Modells (Bestimmtheitsmaß größer 0,9) eine Lernrate zwischen 70% und 77% abgeleitet werden, die für ein überdurchschnittlich schnelles Lernen der Zeitarbeiter steht (siehe Tabelle 16).

De Jong	Ts1 (M=0,25 & 70% & 45)	0,95945103
S-Modell	MCx1=(M=0,15 & B=0 & 77% & 50)	0,9142511
Stanford-B	YC1 (B=0 & 85% & 45)	0,84208667

Tabelle 16: Bestimmtheitsmaß der Modell-Annäherung

Zudem kann, äquivalent zu den bisherigen Forschungsergebnissen, mittels der Bezugsgröße Tage ein deutlich höheres Bestimmtheitsmaß der Lernkurven erreicht werden. Ergo ist auf Basis der Lernkurvenmodelle mit dem höchsten Bestimmtheitsmaß anzunehmen, dass die Zeitarbeiter (nahezu) keine Vorerfahrung gehabt haben. Des Weiteren verbessert die Verwendung eines vergleichsweise niedrigen Inkompressibilitätsfaktors das Gütekriterium, so dass dies als ein Charakteristikum in der Kommissionierung gesehen werden kann. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass ein Vergleich verschiedener Kommissioniersysteme nicht zulässig ist, weshalb über den Faktor der Inkompressibilität hinaus keine weiteren Vergleiche gezogen werden.

5.5.3 Lernverhalten bei Mitarbeitern von Projektpartner III

5.5.3.1 Charakterisierung des Kommissioniersystems

Projektpartner III verfügt am betrachteten Standort über drei verschiedene Kommissioniersysteme. Der Fokus der Untersuchungen wurde auf ein shuttlebasiertes Kommissioniersystem gerichtet. Dabei arbeitet der Kommissionierer an einem stationären, ergonomisch optimierten Arbeitsplatz. Aufgrund der eingesetzten Shuttletechnik werden die vom Kommissionierer zurückzulegenden Wegstrecken eliminiert und somit kann eine außerordentlich hohe Kommissionierleistung pro Kommissionierer erreicht werden. Projektpartner III betreibt ein innovatives Job-Rotation-Konzept innerhalb der Kommissionierung. Dabei wird qualifizierten Mitarbeitern die Möglichkeit geboten, täglich eine halbe Schicht in einem WzP-Kommissioniersystem und eine halbe Schicht in einem PzW-Kommissioniersystem zu arbeiten. Hierdurch sollen die Mitarbeiter flexibilisiert und deren Arbeitsinhalte abwechslungsreich gestaltet werden. Am betrachteten Standort werden ebenfalls saisonale Aushilfen eingesetzt; diese Gruppe umfasst u. a. Studenten, Schüler und Mitarbeiter der gewerblichen Arbeitnehmerüberlassung. Neue Mitarbeiter erhalten eine grundlegende theoretische Einführung in die

intraglogistischen Prozesse des Unternehmens und nehmen im Anschluss ihre Arbeit auf. Erfahrene Mitarbeiter und automatische Fehlererkennungssysteme sorgen dafür, dass eine ausreichende Kommissionierqualität bereits ab dem Arbeitsbeginn eingehalten wird.

5.5.3.2 Vorgehen

Auch bei Auswertung der Daten von Projektpartner III fließen lediglich Aufträge mit Bearbeitungszeiten, Positionen wie auch Entnahmen größer als null ein. Desgleichen wird die Erfahrung eines bearbeiteten Auftrags, dessen Bearbeitungszeit bei null liegt, mittels fortlaufender Nummerierung berücksichtigt. Die Auswertung basiert daher auf 67069 ausgewerteten Aufträgen, die von 25 Zeitarbeitern während des Zeitraums 08.08.2014 bis 19.08.2014 kommissioniert wurden. Dabei werden für die Ermittlung der Lernkurven die durchschnittlichen Zeiten (in Sek.) je Auftrag, je Position und je Entnahme über einen gesamten Arbeitstag herangezogen. Per Definition leiten sich die Lernkurven aus den jeweiligen kumulierten Zeiten ab. Jedoch werden bei der Datenerfassung der Unternehmung lediglich Zeiträume erfasst, weshalb für die Auswertung keine exakten Zeiten vorliegen. Aufgrund der obligatorischen Bezugsgröße Tage, wurde daher die Schichtzeit eines Tages je Mitarbeiter (8 Stunden = 28.800 Sekunden) als Referenzzeit verwendet. Somit ist aber bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen, dass die Effizienz (Sekunden je Auftrag, etc.) auch Totzeiten und Pausen enthält, was zu höheren Werten führt und einen Vergleich mit anderen Kommissioniersystemen obsolet macht.

5.5.3.3 Lernkurven

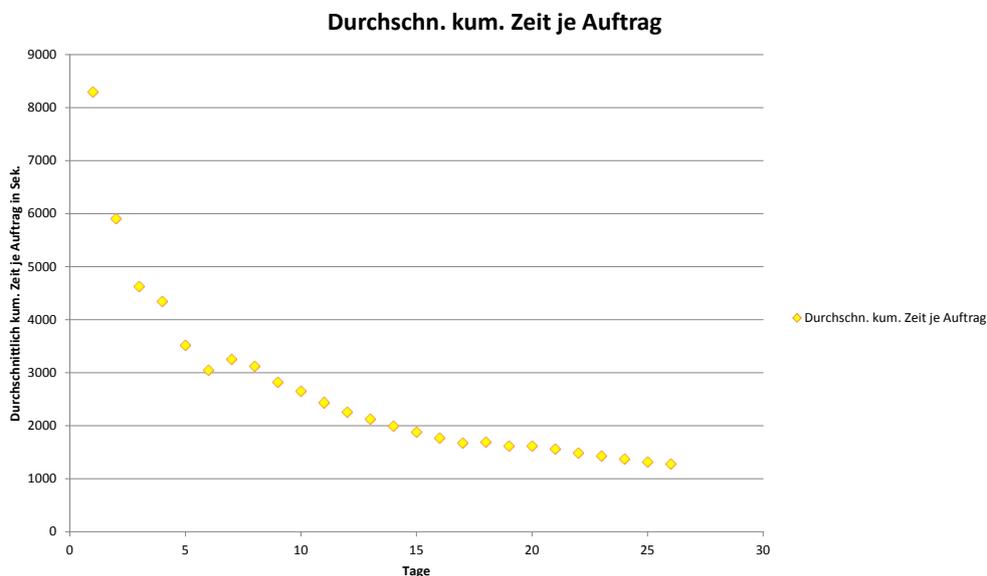


Abbildung 34: Projektpartner III, Auftrags-Lernkurve, Bezugsgröße Tage

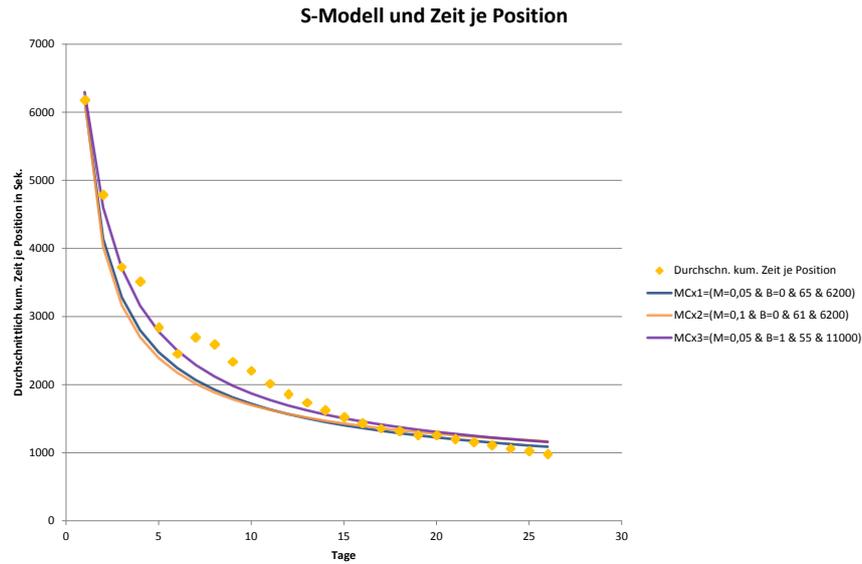


Abbildung 35: Projektpartner III, Positions-Lernkurve mit S-Modell-Annäherung, Bezugsgröße Tage



Abbildung 36: Projektpartner III, Positions-Lernkurve mit Stanford-B-Annäherung, Bezugsgröße Tage

S-Modell	MCx1=(M=0,05 & B=0 & 65 & 6200)	0,96113606
S-Modell	MCx2=(M=0,1 & B=0 & 61 & 6200)	0,94439494
S-Modell	MCx3=(M=0,05 & B=1 & 55 & 11000)	0,97754273
Stanford-B	YC1 (B=0 & 70% & 6200)	0,97651226
Stanford-B	YC2 (B=2 & 59% & 14000)	0,98797471
Stanford-B	YC3 (B=1 & 62% & 10500)	0,98758331

Tabelle 17: Bestimmtheitsmaß der Modell-Annäherung, Positions-Lernkurve

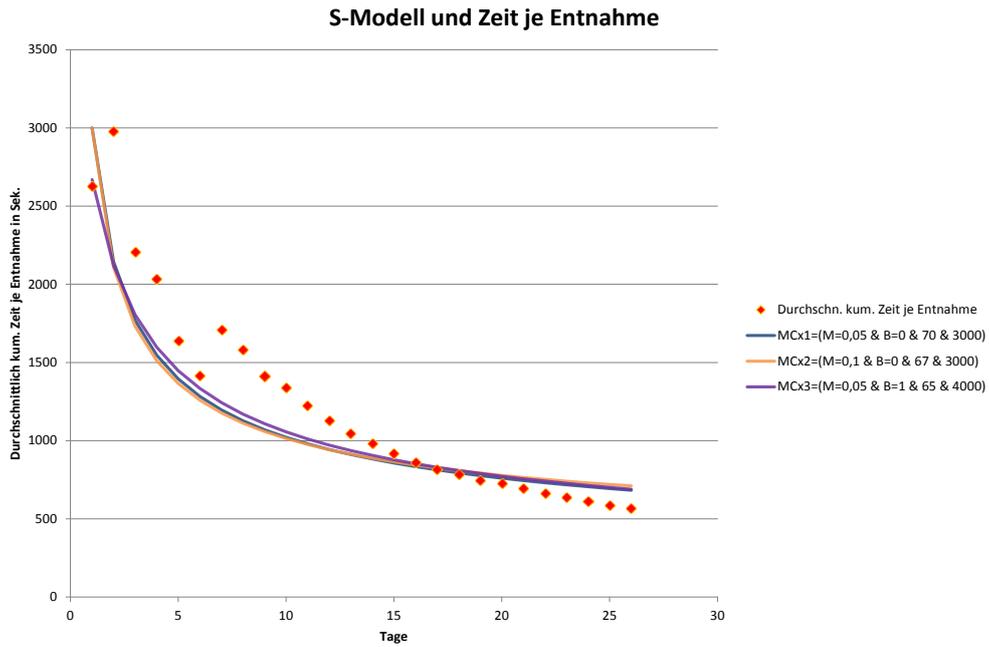


Abbildung 37: Projektpartner III, Entnahme-Lernkurve mit S-Modell-Annäherung, Bezugsgröße Tage

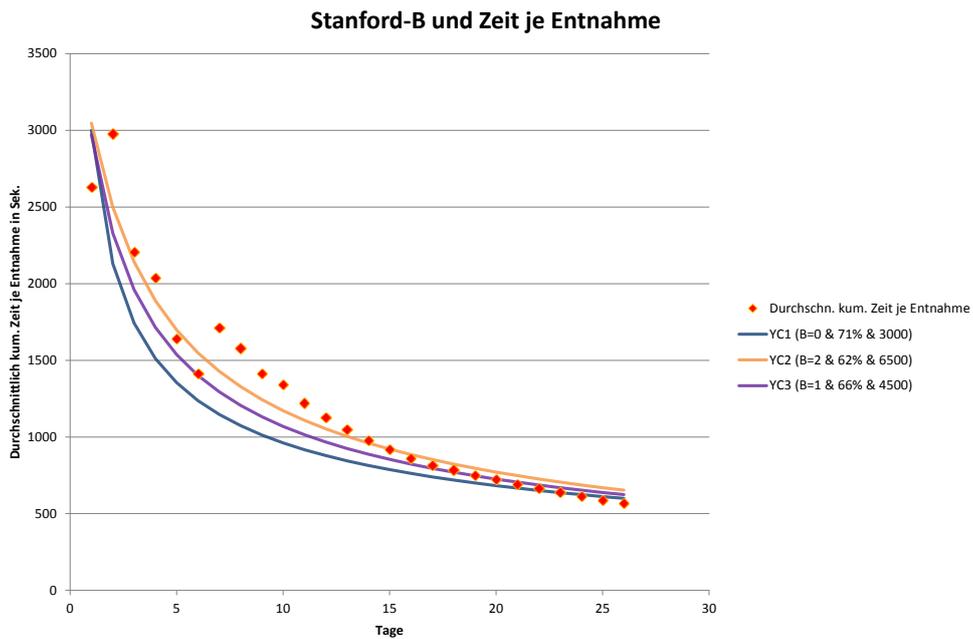


Abbildung 38: Projektpartner III, Entnahme-Lernkurve mit Stanford-B-Annäherung, Bezugsgröße Tage

S-Modell	MCx1=(M=0,05 & B=0 & 70 & 3000)	0,84985205
S-Modell	MCx2=(M=0,1 & B=0 & 67 & 3000)	0,82959468
S-Modell	MCx3=(M=0,05 & B=1 & 65 & 4000)	0,90942758
Stanford-B	YC1 (B=0 & 71% & 3000)	0,85611903
Stanford-B	YC2 (B=2 & 62% & 6500)	0,93490417
Stanford-B	YC3 (B=1 & 66% & 4500)	0,91293869

Tabelle 18: Bestimmtheitsmaß der Modell-Annäherung, Entnahme-Lernkurve

5.5.3.4 Interpretationsfähigkeit und Interpretation

Entgegen der Evaluierung des Lernens der anderen Projektpartner wird in diesem Fall die Interpretation der Positions-Lernkurve als Repräsentant für prozedurales Lernen²²⁹ als zulässig erachtet, obwohl auch hier die Einflussmöglichkeit durch den Kommissionierer nur bedingt gegeben ist. Dies begründet sich auf einer vergleichsweise homogenen Auftragsstruktur sowie auf einem ähnlichen Verteilungsverlauf, der für eine statistische Auswertung notwendig ist. Jedoch sind in Relation zu den Daten der anderen Projektpartner Verzerrungen

Hypothesen der Einfaktoriellen-ANOVA:

H₀: Die Lernraten von prozeduralem und sensomotorischem Lernen sind identisch.

H₁: Die Lernrate von prozeduralem Lernen ist nicht identisch (ist niedriger als) mit der des sensomotorischen Lernens.

basierend auf der Verwendung von Schichtzeiten inkludiert, weshalb die Werte insgesamt auf einem höheren Niveau liegen und die Lernrate deutlich niedriger ist, was ein äußerst schnelles Lernen implizieren würde. Diesen Schluss lässt aber die Datengrundlage nicht zu, wodurch die anderen Parameter im Fokus stehen respektive lediglich die Lernraten von Entnahmen und Positionen untersucht sowie *intern* verglichen werden können. Des Weiteren weisen die Annäherungskurven von Entnahmen und Positionen ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß auf, weshalb sie das Lernverhalten sehr gut widerspiegeln.

Sowohl die Positions- als auch die Entnahme-Lernkurve zeigen, dass die Vorerfahrung der Zeitarbeiter im unteren Bereich liegen muss oder eben keine Vorerfahrung vorhanden gewesen ist. Darüber hinaus implizieren die hohen Wert des Bestimmtheitsmaßes für die Anpassungen der Lernkurve nach Stanford-B respektive die des S-Modells, dass von einem niedrigen Inkompressibilitätsfaktor für das Lernverhalten ausgegangen werden kann. Dies ist be-

²²⁹ Im Folgenden wird zwischen sensomotorischem und prozeduralem Lernen unterschieden. Die Arbeitsdefinition versteht dabei...

...unter **sensomotorischem Lernen**: das Phänomen, das zu schnelleren Bewegungen und höherer Koordination führt, wodurch effektiveres Arbeiten ermöglicht wird.

... unter **prozeduralem Lernen**: das Phänomen, das zu besseren Entscheidungen und Entwicklung neuer Methoden führt, wodurch effizienteres Arbeiten ermöglicht wird.

reits für die vorangegangenen Projektpartner zu konstatieren, weshalb dies als Charakteristikum für das Lernen in der Kommissionierung gewertet werden kann. Des Weiteren ist auch hier die Bezugsgröße Tage vorzugswürdig, wie anhand des Bestimmtheitsmaßes festgestellt werden kann.²³⁰ Zwar weisen die Lernkurven niedrige Lernraten auf, die schnelles Lernen repräsentieren, doch dieser Schluss ist unzulässig, da im Gegensatz zu den bis dato untersuchten Datengrundlagen sowohl Totzeiten als auch Pausen in der Datenbasis enthalten sind. Somit bleibt lediglich zu klären, ob das prozedurale Lernen (Lernrate der Annäherung an die Positions-Lernkurve) signifikant schneller erfolgt, als das des sensomotorischen Lernens (Lernrate der Annäherung an die Entnahme-Lernkurve). Demzufolge wurden die zu verifizierenden Hypothesen aufgestellt:

Hierfür wurde zunächst die notwendige Bedingung untersucht, dass es sich um eine normalverteilte Datengrundlage handelt, damit mittels Einfaktorieller-Analysis-Of-Variance (ANOVA) signifikante Mittelwertunterscheide hinsichtlich der Lernraten identifiziert werden können.²³¹

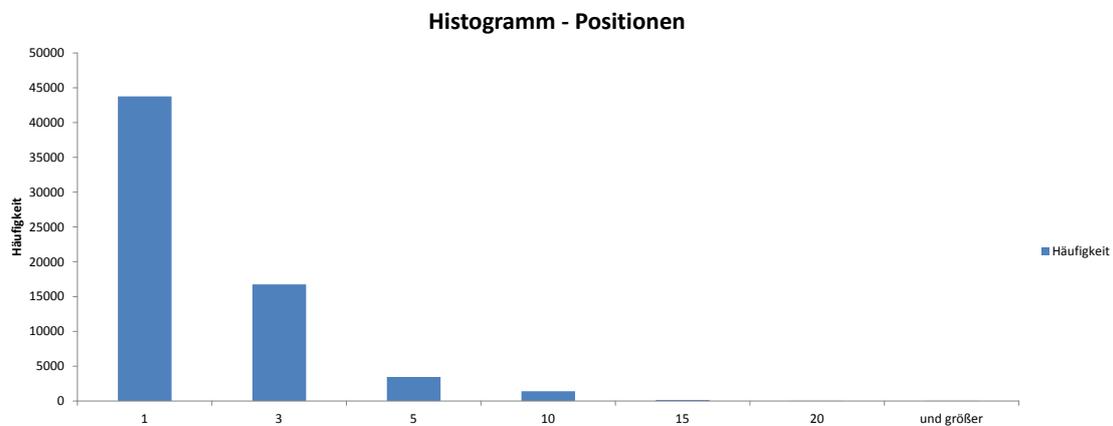


Abbildung 39: Histogramm der Datengrundlage Positionen, Normalverteilung (rechtsschief)²³²

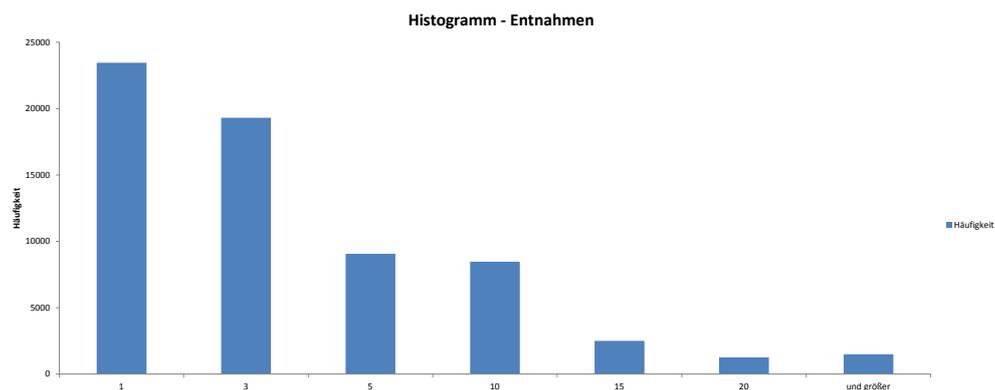


Abbildung 40: Histogramm der Datengrundlage Entnahmen, Normalverteilung (rechtsschief)²³³

²³⁰ Siehe Tabelle 17 und 18.

²³¹ Vgl. Rasmussen (1996), S. 14 f.

²³² Eigene Darstellung.

²³³ Eigene Darstellung.

Zwei-Stichproben F-Test		
	Variable 1	Variable 2
Mittelwert	1,668279061	4,34504227
Varianz	1,93669935	51,8062946
Beobachtungen	65534	65534
Freiheitsgrade (df)	65533	65533
Prüfgröße (F)	0,037383476	
P(F<=f) einseitig	0	
Kritischer F-Wert bei einseitigem Test	0,987231413	

Tabelle 19: F-Test zur Überprüfung der Varianz bezüglich Positionen und Entnahmen der Aufträge²³⁴

Wie aus den beiden Abbildungen 42 und 43 ersichtlich, ist die Datengrundlage von Positionen und Entnahmen nicht normalverteilt, weshalb prinzipiell keine Auswertung zulässig wäre. Dennoch können rechts- bzw. linksschiefe Verteilung mittels Einfaktorieller-ANOVA untersucht werden, sofern die Schiefe der Verteilung einheitlich ist. Da jeweils eine rechtsschiefe Verteilung vorliegt, ist somit die Grundvoraussetzung einer Einfaktoriellen-ANOVA gegeben²³⁵, wie auch der durchgeführte F-Test verdeutlicht: beide Daten haben gleiche Varianzen, da die Nullhypothese nicht abgelehnt werden kann (siehe Tabelle 19).

Zwei-Stichproben F-Test		
	Variable 1	Variable 2
Mittelwert	-0,398156572	-0,54164336
Varianz	0,039938786	0,037182854
Beobachtungen	25	25
Freiheitsgrade (df)	24	24
Prüfgröße (F)	1,074118354	
P(F<=f) einseitig	0,431205317	
Kritischer F-Wert bei einseitigem Test	1,983759568	

Tabelle 20: F-Test zur Überprüfung der Varianz bezüglich der Lernraten der Positions- bzw. Entnahme-Lernkurve

Jedoch besitzen die zugehörigen Daten für die Lernraten unterschiedliche Varianzen, da hier der verdoppelte F – Wert = 2,148 etwas über dem *kritischen F* – Wert = 1,984 liegt (siehe Tabelle 20). Demzufolge ist Ergebnis der Einfaktoriellen-ANOVA, das in Tabelle 21 ausge-

²³⁴ Der F-Test geht von einer Nullhypothese aus, dass beide Varianzen gleich sind. Liegt die Prüfgröße (F-Wert) oberhalb des Akzeptanzniveaus (*krit. F* – Wert = 0,987), so kann die Nullhypothese (gleiche Varianzen) verworfen werden. Da es sich eigentlich um einen zweiseitigen Test handelt, jedoch ein einseitiger Test durchgeführt wird, ist der F-Wert zu verdoppeln (=0,0748).

²³⁵ Vgl. Roberts und Russo (1999), S. 71.

wiesen ist, in kritisch zu hinterfragen, zumal sich das Ergebnis des Tests auf einer zu kleinen Stichprobe (N=25) begründet.²³⁶

ANOVA						
ZUSAMMENFASSUNG						
Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz		
Lernrate Entnahmen	25	7,090067113	0,283602685	0,239969987		
Lernrate Positionen	25	7,558555688	0,302342228	0,149066642		
ANOVA						
Streuungsursache	Quadratsummen (SS)	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)	P-Wert	kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	0,004389631	1	0,004389631	0,022566672	0,881218895	4,042652129
Innerhalb der Gruppen	9,336879098	48	0,194518315			
Gesamt	9,341268729	49				

Tabelle 21: Einfaktorielle-ANOVA der Lernraten von Positions- bzw. Entnahmelernkurve

Demnach kann die Nullhypothese (H_0 : Die Lernraten von prozeduralem und sensomotorischem Lernen sind identisch.) auf Basis dieser (zu) kleinen Stichprobe nicht abgelehnt werden, was bedeutet, dass das Lernen gleich schnell erfolgt, ohne jedoch einen Erkenntnisgewinn hinsichtlich des Einflusses des sensomotorischen Lernens auf das prozedurale Lernen zu liefern.

Quintessenz ist, dass zur Ermittlung signifikanter Ergebnisse respektive zum Treffen statistisch belastbarer Aussagen hinsichtlich prozedurales und sensomotorisches Lernen bereits die Datenbasis eine ausreichende statistische Güte aufweisen muss. Folglich wäre ein Lernlager vorzugswürdig (Laborexperiment), wodurch die Volatilität der Aufträge sowie ihre Struktur manipulierbar bzw. kontrollierbar wären.²³⁷ Somit könnte sowohl die Normalverteilung als auch die gleiche Varianz gewährleistet werden. Darüber hinaus würde dies eine Evaluierung auf Basis zweier verschiedener unabhängiger Stichproben ermöglichen, anstatt auf einer einzigen. Überdies könnten die Handlungen der Probanden beobachtet werden, die Rückschlüsse auf das Lernen ermöglichen könnten. Demzufolge besteht weiterer, im Rahmen des Projekts nicht zu klärender Forschungsbedarf hinsichtlich des Verhaltens von prozeduralem wie auch sensomotorischem Lernen zueinander. Zudem ist zu klären ob prozedurales schneller als sensomotorisches Lernen erfolgt, wie auch die Frage: inwieweit das sensomotorische Lernen die Lernrate des prozeduralen Lernens beeinflusst.

5.6 AP 3.2: Erstellung eines Demonstrators zur Validierung und praktischen Anwendung der Methodik

Allgemeines

Ziel des Demonstrators ist es, eine Möglichkeit aufzuzeigen, wie die LeiKom-Projektergebnisse in der Praxis eingesetzt werden können. Als Funktion steht hierbei insbe-

²³⁶ Anmerkung: Die Nullhypothese des F-Tests ($H_0 = \text{gleiche Varianzen}$) zur Lernrate wird vermutlich gerade wegen der zu kleinen Stichprobe abgelehnt.

²³⁷ Hierbei ist darauf zu achten, dass Multikollinearität vermieden wird.

sondere die Leistungsanalyse von lernenden Kommissionierern im Mittelpunkt. Darauf aufbauend ist die Verteilung anstehender Aufträge auf die Kommissionierer unter Berücksichtigung des individuellen Lernfortschritts eine weitere Anwendungsmöglichkeit.

Als Grundlage hierfür dienen die unternehmensindividuellen Rohdaten von bereits erledigten Aufträgen. Neben den Auftragsbearbeitungszeiten, den Positionen beziehungsweise den Entnahmen sowie dem Bearbeitungsdatum, ist außerdem der Status des Kommissionierers eine notwendige Angabe. Der Status gibt an, ob der Kommissionierer am Tag der Auftrags-erledigung eingearbeitet war oder nicht.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten das Lernen darzustellen. Im Verlauf des Projektes konnte jedoch gezeigt werden, dass die Lernkurve des S-Modells den Lernverlauf in der manuellen Kommissionierung am besten abbildet. Dieses Modell stellt deshalb die Basis für die Leistungsberechnungen der Kommissionierer dar.

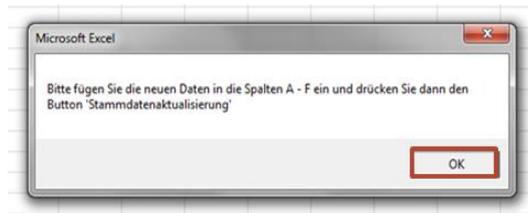
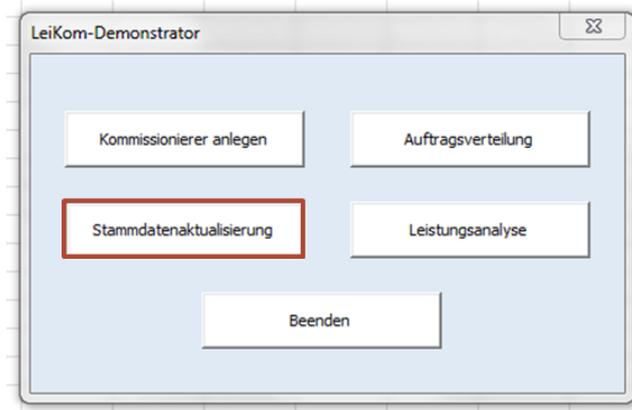
Im Allgemeinen unterliegen die Rohdaten deutlichen Schwankungen. Um diese abzumildern werden im Demonstrator alle Aufträge entfernt, deren Leistungen über $1,5 \cdot$ Interquartilsabstand beziehungsweise unter $1,5 \cdot$ Interquartilsabstand liegen. Die Werte innerhalb des Interquartilsabstands entsprechen 50% aller gemessenen Werte. Jedoch zeigt die Analyse der Rohdaten, dass bereits vor der Eingabe der Daten in den Demonstrator Ausreißer entfernt werden sollten. Aufgrund von Messfehlern, bspw. durch nicht abgemeldete Aufträge, werden ansonsten die Berechnungen des Demonstrators verfälscht. Empfehlenswert ist es, sich vor der ersten Nutzung die Zeiten pro Bezugseinheit in einem Histogramm anzeigen zu lassen und unrealistische Datensätze manuell zu entfernen.

Sofern keine eigenen Daten zur Verfügung stehen, können die Daten im Tabellenblatt ‚Testdaten‘ genutzt werden. Diese wurden für den Demonstrator generiert. Werden die Daten nicht benötigt, kann das Tabellenblatt gelöscht werden.

Der Demonstrator basiert auf MS Excel 2010 und wurde mit VBA erstellt. Eine Anwendung mit anderen Excel-Versionen wurde nicht getestet.

Aktualisierung der Rohdaten

Der Demonstrator nutzt die Ergebnisse aus der Analyse der historischen Daten für die weiteren Berechnungen. Bei der erstmaligen Nutzung des Programms ist die Aktualisierung der Rohdaten daher der erste Schritt. Hierzu im Hauptmenü auf den Button ‚Stammdatenaktualisierung‘ und anschließend ‚OK‘ drücken.



Die neuen Daten können im Tabellenblatt ‚Auftragsdaten (Rohdaten)‘ ab Zeile zwei eingegeben werden. Folgende Reihenfolge muss dabei eingehalten werden:

Spalte A: Auftragsnummern

Spalte B: Bezugseinheit (Mengen oder Positionen)

Spalte C: Bearbeitungsdatum

Spalte D: ID des Kommissionierers

Spalte E: Zeit pro Bezugseinheit

Spalte F: Status (eingelernt, nicht eingelernt)

Für die Berechnung den Button ‚Stammdatenaktualisierung‘ drücken.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Auftrag	Bezugseinheit	Erstellungsdatum	Kommissionierer	Zeit pro BE	Status					Stammdatenaktualisierung	
2	KA1000001	7	05.02.2014	Eingelernter K 1		0,2 eingelernt						
3	KA1000002	2	08.03.2014	Eingelernter K 1		0,208 eingelernt						
4	KA1000003	8	19.03.2014	Eingelernter K 1		0,213 eingelernt						
5	KA1000004	2	25.03.2014	Eingelernter K 1		0,22 eingelernt						
6	KA1000005	16	28.02.2014	Eingelernter K 1		0,2215 eingelernt						

Über die Tabellenblätter ‚lernend‘, ‚eingelernt‘ und ‚k‘ werden nun die Tagesleistungen berechnet und aggregiert.

Die genutzte Lernkurvenformel ermöglicht es, die Vorerfahrung der Kommissionierer zu berücksichtigen. Sind diese Informationen vorhanden, können sie in Spalte B eingetragen werden. Die Vorerfahrung kann Werte von 1 bis 10 annehmen. Liegen die Informationen nicht vor, kann die Spalte leer gelassen werden.

	A	B	C	D	E
1	Name/Tag	Vorerfahrung	1	2	3
2	k (Durchschnitt)		2,61800408	2,50926304	2,64657974
3	Weiter		2,50018048	0,97375	1,42653334
4			3,79180956	3,39420009	4,06767511
5	Neuer K 1		3,12472222	1,7088	1,41333333
6	Neuer K 2		3,97733333	1	1,46613333
7	Neuer K 3			0,65244444	5,5
8	Neuer K 4		0,46072727	3,956	4,59706667
9	Neuer K 5		2,292	6,77333333	2,4795
10	Neuer K 6		3,2352381	0,965	0,42344444
11					

Nach dem Drücken des ‚Weiter‘-Buttons erfolgt über eine Regressionsanalyse die Berechnung der Lernrate und der anderen Variablen der Lernkurvengleichung.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Originaldaten											
2	Name/Tag		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	k (Durchschnitt)		2,61800408	2,50926304	2,64657974	1,77245355	2,16095233	1,8734442	0,90971428	3,37475109	0,57249397	1,5304254
4	Durchsch. kum. Zeit/Menge		2,61800408	2,56363356	2,59128229	2,3865751	2,34145055	2,26344949	2,07005875	2,23314529	2,04862848	1,9968081
5	Transformierte Werte für die Regression											
6	X		0	0,30103	0,47712125	0,60205999	0,69897	0,77815125	0,84509804	0,90308999	0,95424251	
7	Y		0	-0,00991005	-0,00484229	-0,04384524	-0,0529352	-0,06911097	-0,1120244	-0,07556159	-0,11705164	-0,129454
8	Lernkurve Durchschnittsbetrachtung		2,61800408	2,16148104	1,93564936	1,7914364	1,68791926	1,60838364	1,54448144	1,49148869	1,44649264	1,4075806
9	Lernkurve Einheitenbetrachtung		1,88780095	1,56959906	1,41219174	1,31167363	1,23952097	1,18408371	1,13954314	1,10260658	1,0712438	1,0441216
10												
11												

Die Lernkurve basiert auf den kumulierten durchschnittlichen Werten. D. h. die Leistung an Tag vier (1,7914364 Zeiteinheiten pro Bezugseinheit) entspricht nicht der tatsächlichen Leistung am vierten Tag, sondern der Leistung, die der Kommissionierer durchschnittlich an den vier Tagen erbracht hat. Die Umrechnung dieser Durchschnittsbetrachtung auf die Einheitenbetrachtung erfolgt durch die Bildung der Gesamtleistung. Hierfür werden die Werte der Durchschnittsleistung mit der Tagesanzahl multipliziert. Die tatsächliche an diesem Tag zu erbringende Leistung entspricht dann der ersten Ableitung der Gesamtkosten. In diesem Fall für Tag vier 1,31167363.

Die genutzte Lernkurvengleichung lautet:

$$Y = k[M + (1 - M)(S + B)^m]$$

Mit Y als durchschnittliche Zeit pro Bezugseinheit über die betrachteten Tage. B entspricht der durchschnittlichen Vorerfahrung der Kommissionierer, die die Aufträge der Rohdaten bearbeitet haben. Die Lernrate wird berechnet durch die Addition des Regressionskoeffizienten b mit eins. Aus dieser Lernrate kann der Steigungskoeffizient m der Lernkurvengleichung berechnet werden.

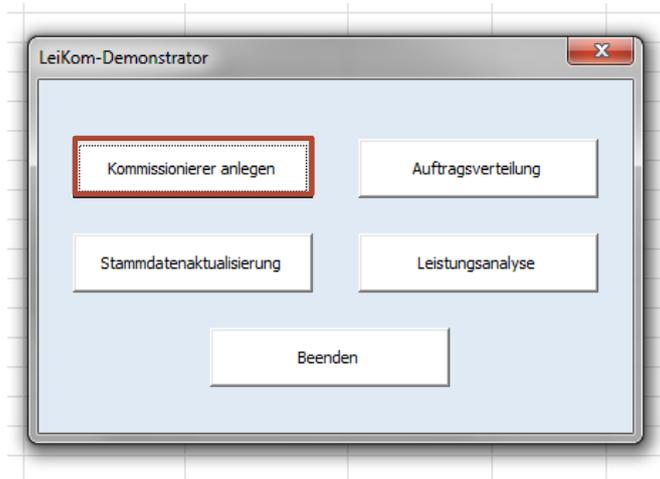
$$m = \log(\text{Lernrate}) / \log(2)$$

k entspricht der Leistung des ersten Tages, den der Kommissionierer alleine arbeitet. M ist der Inkomprimierbarkeitsfaktor. Er kann als Faktor angesehen werden, der zusammen mit k den Wert darstellt, unter den die Leistung nicht sinken kann. Im Demonstrator wird dieser niedrigste Wert durch die geringste Tagesleistung eines eingelernten Kommissionierers dargestellt.

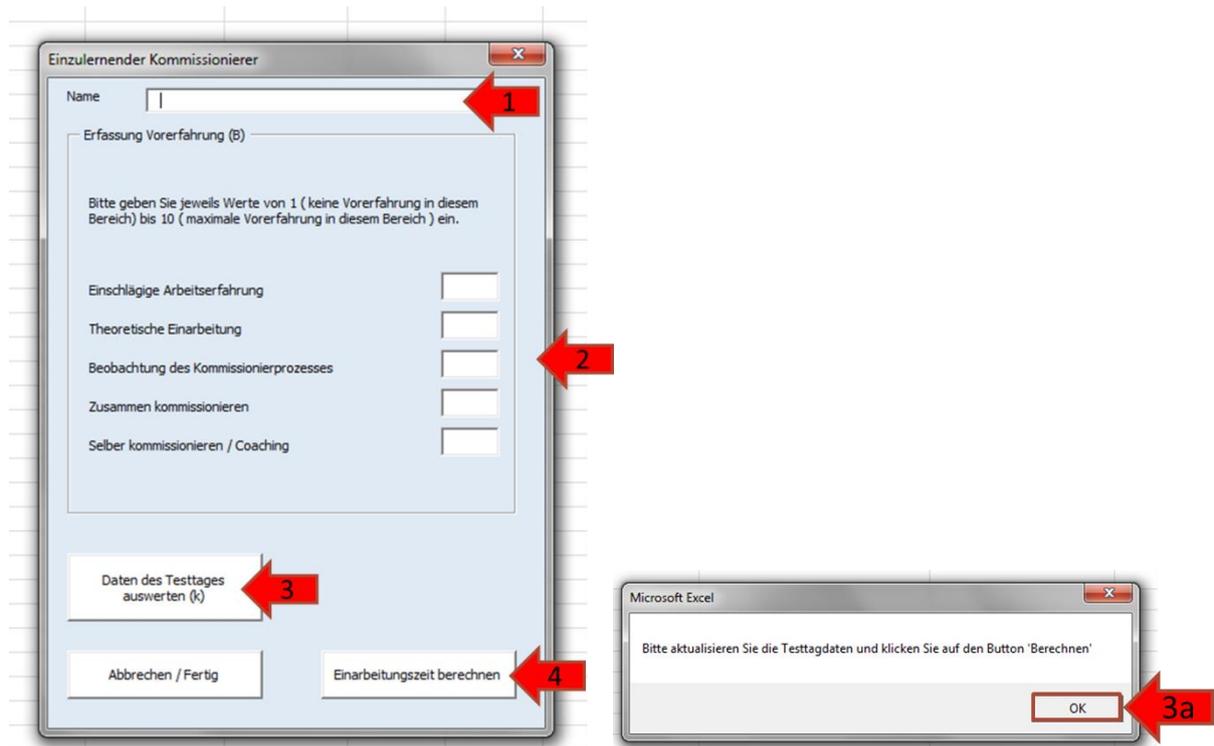
$$M = \text{beste } \emptyset \text{ Tagesleistung eines eingelernten Kommissionierers} / k$$

12		
13		
14	b	-0,189428326
15	Lernrate	0,810571674
16	m	-0,302988335
17	M	0,079449838
18	B	0
19	k	2,618004084
20		

Anlegen neuer Kommissionierer



Für die Auftragsverteilung und die Leistungsanalyse müssen alle einzulernenden Kommissionierer zunächst angelegt werden.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M
1	Auftrag	Bezugseinheit	Erstellungsdatum	Kommissionierer	Zeit pro BE	Status					Berechnen	niveau (k) : 2,89181905
2	KA1001439	2	41675	Testkomm1	7,288	nicht eingelernt						
3	KA1001440	3	41675	Testkomm1	5,86666667	nicht eingelernt						
4	KA1001441	8	41675	Testkomm1	2,723	nicht eingelernt						
5	KA1001442	2	41675	Testkomm1	1,812	nicht eingelernt						
6	KA1001443	3	41675	Testkomm1	0,632	nicht eingelernt						
7	KA1001444	3	41675	Testkomm1	0,42666667	nicht eingelernt						
8	KA1001445	10	41731	Testkomm1	1,4944	nicht eingelernt						
9												
10												
11												
12												
13												



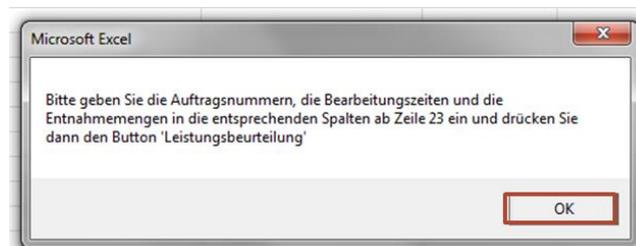
Hierzu ist die ID, bspw. der Name oder die Nummer des Kommissionierers, anzugeben (1). Eine doppelte Namensvergabe ist nicht möglich. Die Eingabe der Vorerfahrungswerte können wie bei der Stammdatenaktualisierung Werte von eins bis zehn annehmen, jedoch ist hier eine differenziertere Eingabe möglich (2). Um das Leistungsniveau des ersten Arbeitstages zu berechnen, muss der Testtag ausgewertet werden (3, 3a). Hierzu die Testtagdaten des Kommissionierers in das Tabellenblatt ‚Testtag‘ ab Zeile 2 eingeben (3b) und den Button ‚Berechnen‘ drücken (3c). Das Leistungsniveau erscheint dann auf der Maske des einzulernenden Kommissionierers. Zum Abschluss wird durch den Button ‚Einarbeitungszeit berechnen‘ die Tagesanzahl berechnet, die benötigt wird bis der einzulernende Kommissionierer die Leistung eines eingelernten Kommissionierers erreicht. Das Niveau der eingelernten Kommissionierer wird im folgenden Standardleistung genannt und entspricht der durchschnittlichen Tagesleistung der eingearbeiteten Kommissionierer.

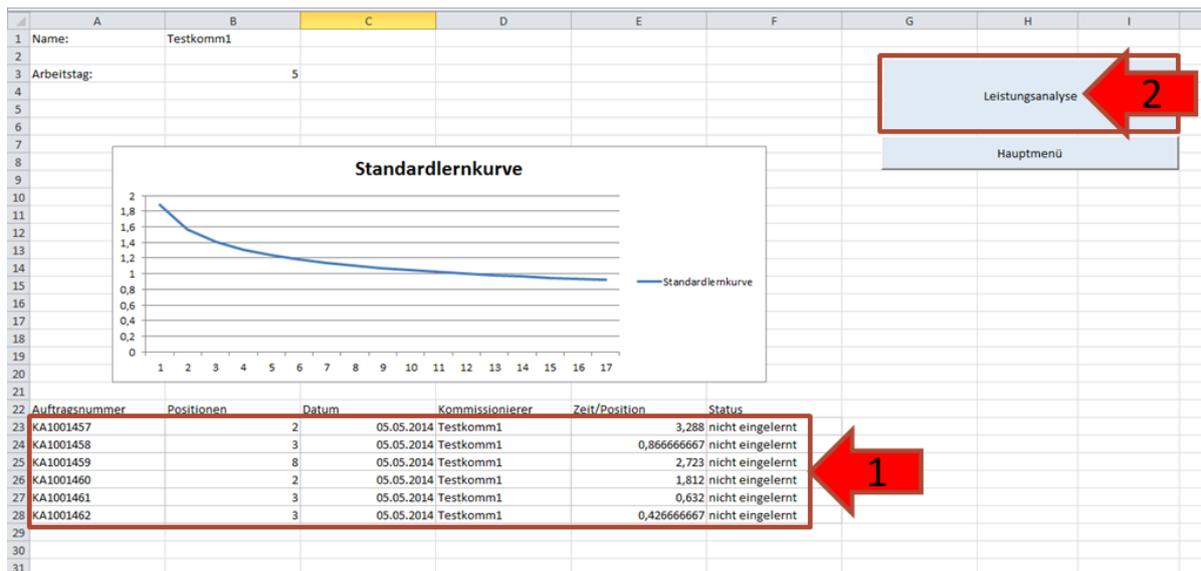
Die eingegebenen Informationen für die Leistungsanalyse und Auftragsverteilung werden automatisch gespeichert.

Leistungsanalyse



Die Leistungsanalyse kann nur für Kommissionierer durchgeführt werden, die bereits angelegt sind. Hierzu sind der Name des zu analysierenden Kommissionierers und der Arbeitstag anzugeben.

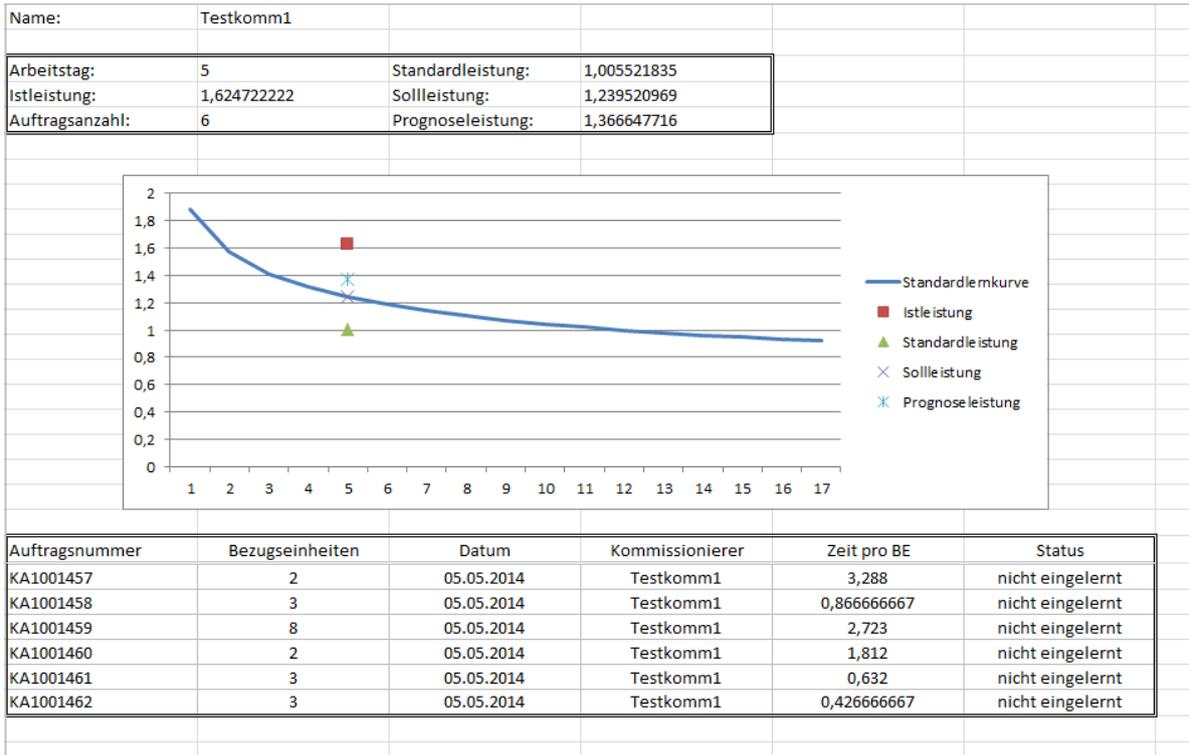




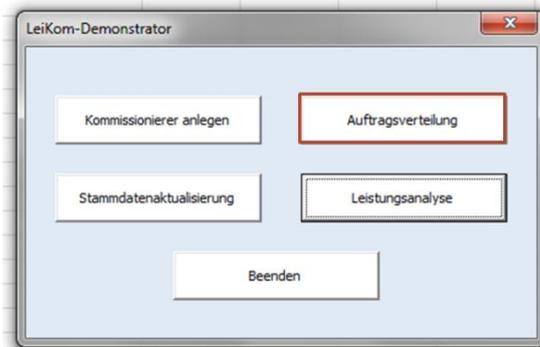
Die Daten des Testtages können ab Zeile 23 eingefügt werden (1). Durch Drücken des Buttons ‚Leistungsanalyse‘ (2) werden folgende Leistungen ausgegeben:

- Ist-Leistung: Die an diesem Tag erbrachte Leistung des zu analysierenden Kommissionierers.
- Standardleistung: Die durchschnittliche Leistung der eingearbeiteten Kommissionierer.
- Sollleistung: Die Leistung, die einzuarbeitende Kommissionierer durchschnittlich bei diesem Lernfortschritt erbringen.
- Prognoseleistung: Die Leistung, die aufgrund der Testtagdaten von dem einzulernenden Kommissionierer erwartet wird.

Der Begriff Leistung wird dabei definiert als Zeiteinheit pro Bezugseinheit (z. B. Minuten pro Position). Die Zeiteinheit (Sekunden, Minuten,...) und das Bezugsobjekt (Entnahme oder Position) entsprechen denen der Rohdaten.



Auftragsverteilung



Auftragsverteilung

Anzahl Kommissionierer: 3

davon einzulernende Arbeiter: 2

Abbrechen Berechnen

Für die Auftragsverteilung werden die Anzahl der zur Verfügung stehenden Kommissionierer (1) sowie die Anzahl der davon noch einzulernenden Kommissionierer benötigt (2). Für jeden noch nicht eingelernten Arbeiter öffnet sich eine Maske, in der der Name und der Arbeitstag eingegeben werden müssen (2a, 2b, 2c). Die bereits durch das Anlegen gespeicherten Daten werden automatisch abgerufen.

Einzulernende Kommissionierer

Einzuarbeitender Kommissionierer 1

Name: Testkomm1

Erfasste Vorerfahrung:

Einschlägige Arbeitserfahrung	1
Theoretische Einarbeitung	2
Beobachtung des Kommissionierprozesses	3
Zusammen kommissionieren	4
Selber kommissionieren / Coaching	5

Arbeitstag: 6

Abbrechen Daten übernehmen

Einzulernende Kommissionierer

Einzuarbeitender Kommissionierer 2

Name: Testkomm2

Erfasste Vorerfahrung:

Einschlägige Arbeitserfahrung	0
Theoretische Einarbeitung	0
Beobachtung des Kommissionierprozesses	0
Zusammen kommissionieren	0
Selber kommissionieren / Coaching	0

Arbeitstag: 7

Abbrechen Daten übernehmen

Microsoft Excel

Bitte geben Sie in der entsprechenden Spalte die Arbeitszeiten in Minuten an und klicken die auf den Button 'Fertigstellen'.

OK

In Spalte D auf Tabellenblatt ‚Auftragsverteilung‘ ist die Arbeitszeit des betrachteten Zeitraums in der gleichen Zeiteinheit einzugeben, in der die Leistung berechnet wurde. In Spalte C wird die erwartete Leistung ausgegeben. Für eingelernte Kommissionierer entspricht diese immer der Standardleistung.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Name	Arbeitstag	Erwartete Leistung	Arbeitszeit	Kommissionierzeit	Aufträge					Fertigstellen
2	Testkomm1	6	1,308616496	480							
3	Testkomm2	7	1,031546186	480							
4	Eingelernter Kommissionierer1		1,005521835	240							
5											
6											
7											

Die zu verteilenden Aufträge werden in das Tabellenblatt ‚Anstehende Aufträge‘ eingegeben, wobei die Auftragsnummern von Prioritätsaufträgen nochmals in Spalte A einzufügen sind.

	A	B	C	D
1	Prio-Auftragsnummern	Alle zu bearbeitenden Aufträge	Bezugseinheiten	
2	KA1001489	KA1001489		2
3	KA1001490	KA1001490		2
4	KA1001491	KA1001491		8
5	KA1001492	KA1001492		2
6	KA1001493	KA1001493		16
7	KA1001494	KA1001494		2
8		KA1001495		2
9		KA1001496		5
10		KA1001497		2
11		KA1001498		2

Nach der Fertigstellung ist in Spalte E die gesamte Kommissionierzeit des jeweiligen Kommissionierers für die eingeteilten Aufträge zu sehen. Die jeweiligen Aufträge werden in der gleichen Zeile ab Spalte F ausgegeben.

Aufträge, die ein Kommissionierer nicht alleine bearbeiten kann, werden als nicht zuteilbar ausgewiesen. Ebenso Aufträge, die in der gesamten Kommissionierzeit aller zur Verfügung stehenden Kommissionierer nicht mehr bearbeitet werden können.

Durch die Betätigung des ‚Ausgabe‘- Buttons werden die Aufträge kommissioniererspezifisch dargestellt. Wird das Tabellenblatt ‚AV (Druck)‘ ausgedruckt, erscheinen die Aufträge für einen Kommissionierer auf einem bzw. mehreren Blättern.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Arbeitstag	Erwartete Leistung	Arbeitszeit	Kommissionierer	Aufträge			Fertigstellen			Ausgabe		Hauptmenü			
2	9	1,179416189	240	237,0626539	KA1001549	KA1001554	KA1001568	KA1001588	KA1001493	KA1001546	KA1001624	KA1001574				
3		1,005521835	240	235,2921094	KA1001532	KA1001556	KA1001565	KA1001510	KA1001562	KA1001587	KA1001611	KA1001528				
4		1,005521835	120	119,6570984	KA1001520	KA1001605	KA1001550	KA1001778	KA1001598	KA1001620	KA1001575					
5					KA1001641	KA1001591	KA1001597	KA1001607	KA1001609	KA1001643	KA1001646	KA1001777	KA1001581	KA1001582	KA1001638	KA1001645
6																
7																
~																

Zusammenfassung des Demonstrators

Der Demonstrator enthält folgende Funktionen:

- Stammdatenaktualisierung
 - Durchzuführen, um die durchschnittliche Lernkurve der lernenden Kommissionierer und die durchschnittliche Leistung der eingelernten Kommissionierer zu berechnen.
 - Benötigte Informationen (historische Daten):
 - Auftragsnummer,
 - Anzahl der Bezugseinheiten,
 - Ausführungsdatum,
 - Ausführender Kommissionierer,
 - Zeit pro Bezugseinheit,
 - Status des Kommissionierers und
 - Vorerfahrung der Kommissionierer (optional).
- Kommissionierer anlegen
 - Auszuführen für jeden neuen Kommissionierer, um seine Einarbeitungszeit zu berechnen. Die Informationen werden für weitere Funktionen gespeichert.
 - Benötigte Informationen:
 - ID des Kommissionierers,
 - Vorerfahrung (optional) sowie
 - Auftragsbearbeitungsdaten des ersten Arbeitstages.
- Leistungsanalyse
 - Berechnet die Istleistung, Solleistung und Prognoseleistung des Kommissionierers und stellt diese grafisch dar.
 - Benötigte Informationen:
 - Name/ID des bereits angelegten Kommissionierers und
 - Arbeitstag.
- Auftragsverteilung
 - Verteilt anstehende Aufträge unter Berücksichtigung der zu erwartenden Tagesleistung auf die Kommissionierer.
 - Benötigte Informationen:
 - Anzahl der arbeitenden Kommissionierer sowie
 - Anzahl, ID und Arbeitstag der lernenden Kommissionierer.

6. Kritische Gesamtbeurteilung und Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die manuelle Kommissionierung stellt einen zentralen Prozess in der Distributions- und Produktionslogistik dar und weist eine fachübergreifende, langfristige Relevanz auf. Dabei sind die Arbeitsinhalte in der manuellen Kommissionierung sehr heterogen in Hinsicht auf durchzuführende Aufträge und anfallende Nebentätigkeiten. Steigende Heterogenität und Dynamik in intralogistischen Aufgabenbereichen werden mit Ansätzen wie Job-Rotation, Springer-Tätigkeiten und saisonaler Beschäftigung begegnet. Diese Methoden bieten die Möglichkeit, Lastspitzen auszugleichen, den Abwechslungsgrad der Arbeit zu steigern sowie die monotone Arbeitsbelastung – vor dem Hintergrund von im Schnitt älter werdenden Belegschaften – zu vermeiden. Sie erfordern jedoch den Umgang mit und die Optimierung von Lernprozessen.

Die im Projekt LeiKom adressierte Thematik ist für eine Vielzahl von Branchen relevant: So treten heterogene Kommissioniervorgänge z. B. bei Logistikdienstleistern, Handelsunternehmen, verarbeitenden Unternehmen des Maschinenbaus, oder in der Automobilindustrie auf. Die entwickelte Methode zur Darstellung von Lernkurven in heterogenen Arbeitssystemen verspricht zudem eine Kompatibilität mit Tätigkeiten außerhalb der Kommissionierung, bspw. in der Montage und Wartung. Durch die während der Projektlaufzeit realisierte Identifizierung und Beschreibung von Einflussfaktoren auf Lernprozesse in der Kommissionierung können Maßnahmen abgeleitet und ergriffen werden, um die entsprechenden Lernprozesse zu optimieren. Dies führt zu einer Steigerung der Flexibilität des Kommissioniersystems bezüglich der in der Kommissionierung einsetzbaren Mitarbeiter.

Zu den wesentlichen Projektergebnissen zählt die Erkenntnis, dass das in Kapitel 4.2.2.7 vorgestellte S-Modell nach einer entsprechenden Transformation in der Lage ist, die betrachteten Lernprozesse in der Kommissionierung zu beschreiben. Die aus dem Projekt LeiKom erzielten Erkenntnisse können anhand des in Kapitel 5.6 beschriebenen Demonstrators praktische Anwendung in der Industrie finden. Hier wird es dem Anwender ermöglicht, die Leistungsentwicklung lernender Mitarbeiter wissenschaftlich begründet und systematisch zu verfolgen. Der Demonstrator bietet u. a. folgende Funktionen

- eine lernkurvengerechte Personaleinsatzplanung,
- Kontrolle der Leistungsentwicklung lernender Kommissionierer zu jedem Zeitpunkt, anhand eines Soll-Ist-Vergleichs,
- Berücksichtigung von sich entwickelnden Leistungsgraden lernender Mitarbeiter bei der Leistungsbewertung und Ableitung von Maßnahmen zur Optimierung der Lernbedingungen im Kommissioniersystem anhand der analysierten Einflussfaktoren.

Die Projektergebnisse sind aufgrund folgender Gegebenheiten insbesondere für KMU von hoher Relevanz:

- Lerneffekte sind am stärksten in Prozessen mit einem hohen Anteil an manuellen Tätigkeiten. Der Automatisierungsgrad in KMU, auch in der Kommissionierung, ist erfahrungsgemäß geringer als in GU.
- KMU fehlt i. d. R. eine große Menge an Erfahrungswerten hinsichtlich Lernprozesse, da i. d. R. weniger Mitarbeiter an weniger Standorten eingearbeitet werden als bei GU.

- KMU verfügen grundsätzlich über weniger umfangreiche EDV-Systeme bzw. IT-Ressourcen als GU und haben deshalb nur bedingt die Möglichkeit, umfangreiche Datenerfassungen und -analysen durchzuführen, um die Lernkurvenformen selbst festzustellen.

Unternehmen können den Demonstrator als alleinstehendes Planungsinstrument einsetzen. Die vom Tool erzeugten Werte können z. B. im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse zwischen Leihkräften und zusätzlichen festen Mitarbeitern herangezogen werden. Der Demonstrator kann zusätzlich zur laufenden Leistungskontrolle lernender Kommissionierer verwendet werden durch stichprobenweise manuelle Zeiterfassung.

Weiterer Forschungsbedarf besteht zum einen hinsichtlich der gezielten Optimierung von Lernprozessen. Hierzu müssen künftig Konzepte entwickelt werden, in deren Rahmen die im Projekt LeiKom beschriebenen Einflussfaktoren auf das Lernverhalten individueller Mitarbeiter in der Kommissionierung systematisch beeinflusst werden. Dabei müssen u. a. Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Einflussfaktoren berücksichtigt werden, nach Möglichkeit im Rahmen von empirisch-experimentellen Untersuchungen. Zum anderen deuten die im Projekt LeiKom durchgeführten Datenanalysen auf langfristige Lerneffekte hin, die nicht ohne weiteres anhand von Kommissionierleistungsbeurteilungen identifiziert werden können. Diese Effekte sind erkennbar, wenn z. B. kurzfristig eine sehr hohe Kommissionierleistung erforderlich ist und diese nur von den erfahrenen Kommissionierern abgerufen werden kann. Zur qualitativen Beschreibung solcher langfristigen Lernprozesse sind weitere, detailliertere Prozessanalysen erforderlich.

7. Auflistung projektbezogener Veröffentlichungen und Präsentationen

Zur Gewährleistung des Ergebnistransfers der im Projekt entwickelten Methodik in die Wirtschaft diente in erster Linie die Kooperation mit dem PA, bestehend aus sieben Unternehmen. Somit konnte einerseits durch eine aktive Teilnahme der Projektpartner der Praxisbezug des Projekts sichergestellt werden. Andererseits förderte das PA die praktische Anwendung der Methodik durch den Einsatz des Demonstrators im Tagesgeschäft sowie die Weiterentwicklung des Demonstrators und den angestrebten Transfer in ein ERP-Modul mit Unterstützung entsprechender IT-Spezialisten.

Zur Verbreitung der Projektergebnisse wurden während der Durchführung sowie nach Projektabschluss praxisrelevante Artikel verfasst und in einschlägigen Fachzeitschriften, in wissenschaftlichen Sammelwerken sowie auf Internetplattformen veröffentlicht. Auch Vorträge wurden im Rahmen von verschiedenen Veranstaltungen gehalten. Hierdurch konnte wertvoller Input von externen Organisationen gewonnen und in der verbleibenden Projektlaufzeit berücksichtigt werden. Die erzielten und geplanten Maßnahmen zum Transfer in die Wirtschaft werden in der Tabelle 22 bzw. in der Tabelle 23 dargestellt.

Art der Transfermaßnahme	Organisation	Datum/Ort
Vortrag (Matthew Stinson): „Die manuelle Kommissionierleistung und Lernprozesse“	Abschlussfeier Master Online Logistikmanagement, Universität Stuttgart	14.02.2014, Stuttgart
Vortrag (Matthew Stinson): „Lernkurven: von der Massenproduktion zur Kommissionierung“	Bundesvereinigung Logistik/Mercedes-Benz	19.03.2014, Rastatt
Vortrag (Matthew Stinson): „Lernkurven in der Kommissionierung“	12. Internationale Fachmesse für Distribution, Material und Informationsfluss (LogiMAT)	26.03.2014, Stuttgart
Englischsprachige wissenschaftliche Veröffentlichung und Vortrag (Matthew Stinson): „Learning Curves of Temporary Workers in Manual Order Picking Activities“	10. WGTL-Fachkolloquium, T. U. München	08.10.2014 - 09.10.2014, Garching
Darstellung des bisherigen Projektverlaufs und wesentlicher Zwischenerkenntnisse (Matthew Stinson): Lernkurven in manuellen Person-zur-Ware-Kommissioniersystemen (LeiKom)	IFT-Jahresbericht 2013/2014	Januar 2015
Vortrag (Matthew Stinson): Auswirkungen der Zeitarbeit und Job Rotation auf die Kommissionierleistung	13. Internationale Fachmesse für Distribution, Material- und Informationsfluss (LogiMAT)	11.02.2015, Stuttgart
Praxisnahe Veröffentlichung (David Korte, Matthew Stinson, Karl-Heinz Wehking): Forschungsprojekt zur manuellen Mann-zur-Ware-Kommissionierung Geeignete Lernkurvenmodelle	Hebezeuge Fördermittel	06.2015, Berlin
Wissenschaftliche Veröffentlichung und Vortrag (Matthew Stinson und Thomas Scherner / Adolf Würth GmbH & Co. KG)	24. Deutscher Materialflusskongress, T. U. München	27.03.2015, Garching
Vortrag (Matthew Stinson): Effiziente Lernprozesse als Erfolgsfaktor in der Kommissionierung	Fachgruppentreffen „Kommissionierung“ des Intralogistiknetzwerks Baden-Württemberg	09.07.2015, Stuttgart
Praxisnahe Veröffentlichung (Franziska Hanna Müller, Matthew Stinson, Karl-Heinz Wehking):	Hebezeuge Fördermittel	02.2016, Berlin
Veröffentlichung eines Tools inkl. Bedienungsanleitung zur optimierten Personaleinsatzplanung auf der Institutswebseite	IFT	09.2015

Tabelle 22: Erzielte Maßnahmen zum Transfer in die Wirtschaft

Art der Transfermaßnahme	Organisation	Datum/Ort
Praxisnahe Veröffentlichung (Franziska Hanna Müller, Matthew Stinson, Karl-Heinz Wehking):	Hebezeuge Fördermittel	02.2016, Berlin
Heranziehen der Projekterkenntnisse zur Gestaltung eines Modelllagers für Probandenversuche und Industrieprojekte am IFT	IFT	10.2015-03.2016, Stuttgart
Entwicklung eines ERP-Moduls zur nahtlosen Integration der im Projekt entwickelten Methodik in die bestehende Software-Infrastruktur eines Unternehmens		2016

Tabelle 23: Geplante Maßnahmen zum Transfer in die Wirtschaft

Literaturverzeichnis

- Anzanello, M. J. & Fogliatto, F. S., 2007. Learning curve modelling of work assignment in mass customized assembly lines. *International Journal of Production Research*, Vol. 45; Issue 13, pp. 2919-2938.
- Anzanello, M. J. & Fogliatto, F. S., 2011. Learning curve models and applications: Literature review and research directions. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 41, Issue 5, pp. 573-583.
- Arnold, D. & Furmans, K., 2010. *Materialfluss in Logistiksystemen*. 6., erweiterte Hrsg. Berlin: Springer-Verlag.
- Badiru, A. B., 1992. Computational Survey of Univariate and Multivariate Learning Curves. *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 39, Issue 2, pp. 176-188.
- Baloff, N., 1971. Extension of the Learning Curve - Some Empirical Results. *Operational Research Quarterly*, Vol. 22, Issue 4, pp. 329-340.
- Bohlen, G. A. & Barany, J. W., 1976. A learning curve prediction model for operators performing industrial bench assembly operations. *International Journal of Production Research*, Vol. 14, Issue 2, pp. 295-303.
- Bokranz, R. & K., L., 2006. *Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.
- Bourier, G., 2014. *Beschreibende Statistik*. 12. Hrsg. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag.
- Bozer, Y. A. & White, J. A., 1996. A generalized design and performance analysis model for end-of-aisle order-picking systems. *IIE Transactions*, Vol. 28, Issue 4, pp. 271-280.
- Cakmakci, M. & Karasu, M. K., 2007. Set-up time reduction process and integrated predetermined time system MTM-UAS: A study of application in a large size company of automobile industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 33, Issue 3, pp. 334-344.
- Dellmann, K. & Pedell, K. L., 1994. *Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel-Verlag.
- DIN, 2006. *DIN EN 14943 - Transportdienstleistungen - Logistik - Glossar, Normenausschuss Gebrauchstauglichkeit und Dienstleistungen (NAGD) im DIN*. Berlin: Beuth Verlag.
- Berry, Dianne; Dienes, Zoltan P., 1993. *Implicit learning: theoretical and empirical issues*. Hove/Hillsdale: L. Erlbaum Associates.
- Domschke, W. & Scholl, A., 2008. *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre - Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht*. 4. Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- DuBois, D. & McKee, A. S., 1994. *Facets of Working Experience*. Nashville, TN, Ninth Annual Conference of the Society for Industrial and Organizational Psychology.

Ebbinghaus, h., 1885. *Über das Gedächtnis - Untersuchungen zur experimentellen Psychologie*. [Online]

Available at: <http://www.uni-leipzig.de/~psycho/wundt/opera/ebbing/memory/Gdaechtl.htm>
[Zugriff am 01 März 2015].

Erb, C., 2014. *SALT Solutions, Die neun Vorteile von Google Glass in der Logistik*. [Online]

Available at: <http://www.salt-solutions.de/blog/index.php/die-neun-vorteile-von-google-glass-der-logistik/>
[Zugriff am 30 Juli 2014].

Fleischmann, B., 2008. Grundlagen: Begriff der Logistik, logistische Systeme und Prozesse. In: D. Arnold, et al. Hrsg. *Handbuch der Logistik, 3. Hrsg.*. Berlin u.a.: Springer-Verlag, pp. 3-12.

Friedl, B., 2013. *Controlling*. 2. Hrsg. Konstanz und München: UVK Verlagsgesellschaft mbH.

Funke, J., 2006, Hrsg. *Handbuch der Allgemeinen Psychologie - Kognition. Band 5*. Göttingen u. a.: Hogrefe.

Galka, S. & Günthner, W. A., 2008. *Analytische Modellierung von Kommissioniersystemen zur systematischen Planungsunterstützung, Tagungsband zum 4. Fachkolloquium der WGTL, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der TU München*. [Online]

Available at: http://www.fml.mw.tum.de/fml/images/Publikationen/Galka_WGTL_2008_Kommissioniersysteme.pdf

[Zugriff am 22 März 2015].

Gebelein, H., 1941. Das statistische Problem der Korrelation als Variations- und Eigenwertproblem und sein Zusammenhang mit der Ausgleichsrechnung. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, Vol. 21, Issue 6*, pp. 364-379.

Gleißner, H. & Möller, K., 2011. *Case Studies in Logistics*. Wiesbaden: Springer-Verlag.

de Greiff, M., 2001. *Die Prognose von Lernkurven in der manuellen Montage unter besonderer Berücksichtigung der Lernkurven von Grundbewegungen. Band Nr. 592*. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Grosse, E. H. & Glock, C. H., 2013. An experimental investigation of learning effects in order picking systems. *Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 24, Issue 6*, pp. 850-872.

Gudehus, T., 2008. Kommissioniersysteme. In: D. Arnold, et al. Hrsg. *Handbuch Logistik*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 668-681.

Gudehus, T., 2010. *Logistik - Grundlagen, Strategien, Anwendungen*. 4. Hrsg. Heidelberg u.a.: Springer-Verlag.

Günther, H. & Tempelmeier, H., 2003. *Produktion und Logistik*. 5. Hrsg. Berlin: Springer-Verlag.

- Hacker, W. & Skell, W., 1993. *Lernen in der Arbeit*. Berlin: Bundesinstitut für Berufsbildung.
- Halliday, D. & Resnick, R., 1988. *Fundamentals of Physics Extended*. 3rd Hrsg. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons Inc..
- Heiserich, O.-E., Helbig, K. & Ullmann, W., 2011. *Logistik: Eine praxisorientierte Einführung*. Wiesbaden: Gabler-Verlag.
- Henfling, M., 1978. *Lernkurventheorie: E. Instrument zur Quantifizierung von produktivitätssteigernden Lerneffekten*. Gerbrunn bei Würzburg: Lehmann-Verlag.
- Hering, E., 2013. Physik. In: E. Hering, Hrsg. *Taschenbuch für Wirtschaftsingenieure*. München: Carl Hansen Verlag, pp. 77-111.
- Hofmann, T., 2014. *SALT Solutions, Pick-by-Vision zum Anfassen*. [Online] Available at: <http://www.salt-solutions.de/blog/index.php/pick-by-vision-zum-anfassen/> [Zugriff am 30 Juli 2014].
- Homburg, C., 2012. *Quantitative Betriebswirtschaftslehre: Entscheidungsunterstützung durch Modelle. Mit Beispielen, Übungsaufgaben und Lösungen*. 3. Hrsg. Wiesbaden: Gabler-Verlag.
- Homburg, C., 2014. *Grundlagen des Marketingmanagements: Einführung in Strategie, Instrumente, Umsetzung und Unternehmensführung*. 4. Hrsg. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag.
- Jaber, M. Y., 2011. *Learning curves: Theory, models, and applications. Band 21, Industrial innovation series*. Boca Raton: CRC Press.
- Jeske, T., Garrel, J. v. & Starke, J., 2011. Erfolgsfaktor Flexibilität: Ergebnisse eine rdeutschlandweiten Unternehmensbefragung. *Industrial Engineering, Vol. 64, Issue 1*, pp. 20-23.
- Jünemann, R. & Schmidt, T., 2000. *Materialflußsysteme: Systematische Grundlagen*. 2. Hrsg. Berlin: Springer-Verlag.
- Kiesel, A. & Koch, I., 2012. *Lernen: Grundlagen der Lernpsychologie*. Wiesbaden: Springer-Verlag.
- Kistner, K. P., 2005. *Quantitative Unternehmensführung: Denken in Austauschraten; Festschrift für Klaus-Peter Kistner zum 65. Geburtstag mit 21 Tabellen*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Kleine, A. & Sebastian, D., 2009. *Flexible Performance Messung mittels DEA*. Lehrgebiet Quantitative Methoden, Arbeitspapier Nr. 48 Hrsg. Stuttgart: Universität Hohenheim.
- Klumpp, M. & Abidi, H., 2011. Logistikeffizienz in der Handelspraxis - Einsatz der Data Envelopment Analysis (DEA) in der Baumarktlogistik. In: R. Bogaschewsky, et al. Hrsg. *Supply Management Research - Aktuelle Forschungsergebnisse*. Wiesbaden: Gabler-Verlag, pp. 351-364.

- Knecht, G. R., 1974. Costing, Technological Growth and Generalized Learning Curves. *Operational Research Quarterly*, Vol. 25, Issue 3, pp. 487-491.
- Koether, R., 2007. *Technische Logistik*. 3., aktualisierte und erweiterte Hrsg. München: Carl Hanser Verlag.
- Kullmann, H.-M. & Seidel, E., 2005. *Lernen und Gedächtnis im Erwachsenenalter*. Bielefeld: W. Bertelsmann Verlag.
- Küpper, H.-U. et al., 2013. *Küpper, Hans-Ulrich/Friedl, Gunther/Hofmann, Christian/HControlling - Konzeption, Aufgaben, Instrumente*. 6. Hrsg. Stuttgart: Schäffer Poeschel Verlag.
- Laarmann, A., 2005. *Lerneffekte in der Produktion*. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verlag.
- Lapr e, M., 2011. Inside the Organizational Learning Curve: Understanding the Organizational Learning Process. Hanover: Now Publishers.
- Levy, F. K., 1965. Adaptation in the Production Process. *Management Science*, Vol. 11, Issue 6, pp. B136-B154.
- Liebau, H.-D., 2002. *Die Lernkurven-Methode*. Stuttgart: Ergonomia-Verlag.
- Lolling, A., 2003. *Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit bei Kommissioniertatigkeiten. Dissertation*. Dortmund: Universität Dortmund.
- Loos, P., 1996. Workflow-Management in der dezentralen Produktion.. In: E. Scherer, P. Schonsleben & E. Ulich, Hrsg. *Werkstattmanagement - Organisation und Informatik*. Zürich: VDF Hochschulverlag, pp. 291-309.
- Lotter, B., 2012. Die Primär-Sekundär-Analyse. In: B. Lotter & H. Wiendahl, Hrsg. *Montage in der industriellen Produktion*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 49-78.
- Martin, H., 2011. *Transport- und Lagerlogistik: Planungen, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*. 8. Hrsg. Wiesbaden: Vieweg und Teubner Verlag.
- Mazur, J. E. & Hastie, R., 1978. Learning as accumulation: A reexamination of the learning curve. *Psychological Bulletin*, Vol. 85, Issue 6, pp. 1256-1274.
- McDaniel, M. A., Hunter, J. E. & Schmidt, F. L., 1988. Job Experience Correlates of Job Performance. *Journal of Applied Psychology*, Vol. 73, Issue 2, pp. 327-330.
- Mensch, G., 2008. *Finanz-Controlling - Finanzplanung und Kontrolle, Controlling zur finanziellen Unternehmensführung*. 2. Hrsg. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Nembhard, D. A. & Osothsilp, N., 2001. An empirical comparison of forgetting models. *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 48, Issue 3, pp. 283-291.
- Nembhard, D. A. & Uzumeri, V., M., 1998. A population of learners: A new way to measure organizational learning. *Journal of Operations Management*, Vol. 16, Issue 5, p. 515-528.

- Nembhard, D. A. & Uzumeri, M. V., 2000a. An Individual-Based Description of Learning within an Organization. *IEEE TRANSACTIONS ON ENGINEERING MANAGEMENT*, Vol. 47, Issue 3, pp. 370-378.
- Nembhard, D. A. & Uzumeri, M. V., 2000b. Experiential learning and forgetting for manual and cognitive tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 25, Issue 4, pp. 315-326.
- Preißler, P. R., 2008. *Betriebswirtschaftliche Kennzahlen - Formeln, Aussagekraft, Sollwerte, Ermittlungsintervalle*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Quinones, M. A., Ford, K. J. & Teachout, M. S., 1995. The relationship between work experience and job performance: a conceptual and meta-analytic review. *Personnel Psychology*, Vol. 48, Issue 4, pp. 887-910.
- Rasmussen, C. E., 1996. *Evaluation of Gaussian Processes and other Methods for Non-Linear Regression*, Toronto: Carl Edward Rasmussen, University of Toronto.
- Reichmann, T., 2011. *Controlling mit Kennzahlen - Die systemgestützte Controlling-Konzeption mit Analyse- und Reportinginstrumenten*. 8. Hrsg. München: Vahlen-Verlag.
- Roberts, M. J. & Russo, R., 1999. *A Student's Guide to Analysis of Variance*. London und New York: Routledge.
- Sadowsky, V., 2007. *Beitrag zur analytischen Leistungsermittlung von Kommissioniersystemen*. Diss. Dortmund: Universität Dortmund.
- Sandt, J., 2004. *Management mit Kennzahlen und Kennzahlensystemen - Bestandsaufnahme, Determinanten und Erfolgsauswirkungen*. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verlag.
- Schlick, C. M., Moser, K. & Schenk, M., 2014. *Flexible Produktionskapazität innovativ managen: Handlungsempfehlungen für die flexible Gestaltung von Produktionssystemen in kleinen und mittleren Unternehmen*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schulte, C., 2013. *Logistik: Wege zur Optimierung der Supply Chain*. 6. Hrsg. München: Vahlen-Verlag.
- Schulte, G., 2001. *Material- und Logistikmanagement*. 2. Hrsg. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Schwerdtfeger, B., Reif, R., Günther, W. A. & Klinker, G., 2011. Pick-by-vision: there is something to pick at the end of the augmented tunnel. *Virtual Reality*, Vol. 15, Issue 2-3, pp. 213-223.
- Siepenkort, A., 2013. *Methode zur Messung und Bewertung der individuellen Kommissionierleistung in "Person-zur-Ware"-Systemen*. Stuttgart: Universität Stuttgart.
- Steidl, S. & Leßner, C., 2003. Pickprozess - Zeit im Griff. *Logistik heute*, Vol. 25, Issue 10, pp. 32-34.

Sternberg, R. J. & Frensch, P. A., 1992. On Being an Expert: A Cost-Benefit Analysis. In: R. Hoffmann, Hrsg. *The Psychology of Expertise - Cognitive Research and Empirical AI*. New York: Springer, pp. 191-203.

Stinson, M., 2014. Learning Curves of Temporary Workers in Manual Order Picking Activities. *Logistics Journal: Proceedings, o. J., o. I.*

Stinson, M., Scherner, T. & Wehking, K.-H., 2015. Lernprozesse in der Kommissionierung im Rahmen eines Job-Rotation-Konzepts. In: VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, Hrsg. 24. *Deutscher Materialfluss-Kongress, VDI-Berichte 2234*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, pp. 179-194.

Stinson, M., Sommer, T. & Wehking, K.-H., 2014. *Bewertung und Optimierung der Effizienz manueller Tätigkeiten in der Kommissionierung (EfKom), Abschlussbericht 17236N, BVL*. [Online]

Available at: http://www.bvl.de/files/441/481/522/Abschlussbericht_17236N_FS1.pdf [Zugriff am 22 März 2015].

Storm, R., 2007. *Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle*. 12. Hrsg. München: Carl Hanser Verlag.

ten Hompel, M., Sadowsky, V. & Beck, M., 2011. *Kommissionierung. Materialflusssysteme 2-Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik*. Heidelberg - Dordrecht - London - New York: Springer-Verlag.

ten Hompel, M. et al., 2010. *Strategien für die flexible auftragsweise Kommissionierung mit integrierter Prüfung, Schlussbericht für den Zeitraum 1.10.2008-31.12.2009, TU Dortmund, BVL*. [Online]

Available at: https://www.bvl.de/files/441/481/522/578/Flexkom_Abschlussbericht.pdf [Zugriff am 22 März 2015].

Towill, D. R., 1990. Forecasting learning curves. *International Journal of Forecasting, Vol. 6, Issue 1*, pp. 25-38.

Trenkle, A., Seibold, Z., Stoll, T. & Furmans, K., 2013. *Logistics Journal: Proceedings*. [Online]

Available at: https://www.logistics-journal.de/proceedings/2013/3768/trenkle_2013wgtl.pdf [Zugriff am 22 März 2015].

Ullrich, G., 1995. *Wirtschaftliches Anlernen in der Serienmontage: Ein Beitrag zur Lernkurventheorie*. Aachen: Shaker-Verlag.

Vahrenkamp, R. & Kotzab, H., 2012. *Logistik - Management und Strategien*. 7. Hrsg. München: Vahrenkamp-Verlag.

VDI, 1994. *Kommissioniersysteme - Grundlagen. VDI-Richtlinie 3590-1*. Düsseldorf: Beuth-Verlag.

VDI, 2002. *Logistikkennzahlen für die Distribution. VDI-Richtlinie 4400-3*. Düsseldorf: Beuth-Verlag.

- VDI, 2007. *Operative Logistikkennzahlen von Wareneingang bis Versand. VDI-Richtlinie 4490*. Düsseldorf: Beuth-Verlag.
- Wannenwetsch, H., 2010. *Integrierte Materialwirtschaft und Logistik: Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion*. 4., aktualisierte Hrsg. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Weber, J. & Schäffer, U., 2014. *Einführung in das Controlling*. 14. Hrsg. Stuttgart: Schäffer-Poeschel-Verlag.
- Wermuth, M., 2014. Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik. In: R. P., C. Birk & M. Wermuth, Hrsg. *Das Ingenieurwissen: Mathematik und Statistik*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 147-179.
- Westkämper, E., 2006. *Einführung in die Organisation der Produktion*. 1. Hrsg. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag.
- Winkel, S., Petermann, F. & Petermann, U., 2006. *Lernpsychologie. Band 2817*. Paderborn: Schöningh.
- Woeber, W., 1983. Die Anwendung von Lernkurven in der Fertigungsindustrie. *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, Vol. 128, o. I.*, pp. 9-12.
- Wright, T. P., 1936. Factors Affecting the Cost of Airplanes. *Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 3, Issue 4*, pp. 122-128.
- xCon Partners GmbH, 2013. *xPick - eXact Pick, xPick – Ein Kernsystem mit vielen Gesichtern*. [Online]
Available at: <http://www.xpick.de/xpick/index.php/de/product-de/technology-de>
[Zugriff am 30 Juli 2014].
- Yelle, L. E., 1976. Estimating learning curves for potential products. *Industrial Marketing Management, Vol. 5, Issue 2-3*, pp. 147-154.
- Yu, M. & Koster, R. B. M. d., 2009. The impact of order batching and picking area zoning on order picking system performance. *European Journal of Operational Research, Vol. 198, Issue 2*, pp. 480-490.