

Kapitel 1

Einleitung

Auch wenn die vierte industrielle Revolution bereits ausgerufen wurde und führende Fachleute davon ausgehen, dass zukünftig Cyber-physische Systeme (CPS) die Produktion und Logistik in den Unternehmen lenken werden [BtHV14, S.15], ist der Mensch nach wie vor ein wichtiger Bestandteil industrieller Prozesse. Menschenleere Fabriken und Distributionszentren sind aktueller Einschätzung nach weder technologisch noch ökonomisch eine realistische Perspektive [Hir14, S. 93], [Hom16]. Dies gilt im besonderen Maße in der Kommissionierung, die eine zentrale Tätigkeit in der innerbetrieblichen Logistik darstellt [Gud05, S. 685]. Begründen lässt sich die Relevanz des Menschen für den Kommissionierprozess vor allem mit seinen kognitiven und motorischen Fähigkeiten [AF07, S. 213] sowie mit seiner Anpassungs- und Lernfähigkeit [BC11]. Vor allem seine Gabe zur Anpassung erlaubt es ihm, schnell auf neue Gegebenheiten (z. B. neue Artikelgeometrien oder eine veränderte Auftragsstruktur) zu reagieren und mit diesen umzugehen. Zudem ist ein Mensch nicht an einen bestimmten Systemteil oder Prozess gebunden, sondern kann flexibel auch in vor- oder nachgelagerten Prozessen eingesetzt werden. Ein entscheidender Wettbewerbsfaktor in einer Zeit, die logistiktreibenden Unternehmen durch eine steigende Artikelvielfalt und sinkende Bestellmengen ein hohes Maß an Flexibilität abverlangt [Zel15, S. 1]. Haupttreiber dieser gestiegenen Anforderungen ist u. a. der Online-Handel, der mittlerweile seine Kunden mit Lieferungen am selben Tag verwöhnt. Im Kontext dieser Entwicklung wird sich der Mensch auch in CPS-basierten Kommissioniersystemen mittelfristig nicht wirtschaftlich durch Maschinen ersetzen lassen [FtH15]. Die Kommissionierung wird also auch zukünftig einen personalintensiven Prozess darstellen und in Hochlohnländern wie Deutschland, Dänemark oder der Schweiz mit signifikanten Kosten verbunden sein. Entsprechend bleibt sie Gegenstand von Rationalisierungsbestrebungen und Optimierungsvorhaben seitens ihrer Betreiber [tHSB11, S. 3].

1.1 Ausgangslage und Handlungsbedarf

Bei der Optimierung von Kommissioniersystemen und auch bei deren Neuplanung spielt die Kenntnis der Dauer von manuellen Tätigkeiten eine wichtige Rolle. Genaue Zeitwerte erleichtern nicht nur die Modellierung der logistischen Tätigkeiten, sondern auch die Dimensionierung des Arbeitskräftebedarfs und der Puffergrößen [KSS+10, S. 5]. Allerdings gestaltet sich insbesondere bei den Kommissionierzeiteanteilen, welche für die Leistungsbestimmung wichtige Einflussparameter darstellen, eine exakte Quantifizierung schwierig. So sind in konventionellen Kommissioniersystemen beispielsweise die pro Entnahme zurückgelegten Wegstrecken und damit die exakten Wegzeiten häufig unbekannt. Sowohl analytische Verfahren als auch Verfahren zur Vorgabezeitbestimmung wie REFA oder *Methods-Time Measurement* (MTM) erlauben nur Aussagen zur mittleren Dauer von Arbeitsvorgängen [KSS+10, S. 5], [Zel15, S. 3] bzw. von Sollzeiten. Dies zeigt sich auch in den Annahmen und an den Restriktionen, die mit den verfügbaren Verfahren verbunden sind. *Systeme vorbestimmter Zeiten* (SvZ) und insbesondere MTM beziehen sich bspw. nur auf vom Menschen beeinflussbare Zeitanteile [REF97], [BL12]. Wartezeiten, die durch technische Komponenten wie z. B. Automatische Kleinteilelager (AKL), Datenterminals oder Liftsysteme anfallen, werden nicht berücksichtigt. Folglich ist eine exakte Zeitermittlung in existierenden Kommissioniersystemen, insbesondere wenn diese nach dem Ware-zur-Person-Prinzip, also mit einer automatischen Bereitstellung, arbeiten, auf Basis von SvZ-Ansätzen schwierig. Zudem reichen vorgegebene Wertebereiche in den MTM-Tabellen stellenweise nicht aus, um alle Bedingungen abzubilden, die bei der Kommissionierung auftreten können. So ist zwar der Kraftaufwand, der bei einem Greifvorgang anfällt, im MTM-Verfahren berücksichtigt, die maximal wählbare Kraft wird aber in der manuellen Kommissionierung häufig überschritten [SSW14, S. 64].

Auch die analytischen Verfahren weisen Grenzen auf. Beispielsweise in der Wegzeitermittlung in Person-zur-Ware-Systemen ist es mithilfe des Berechnungsverfahrens nach Sadowsky möglich, die mittlere Wegzeit für Touren mit einem Auftrag zu berechnen (vgl. [Sad07]). Allerdings wird für ein exaktes Ergebnis eine Auftragsstruktur mit einer konstanten Positionsanzahl vorausgesetzt [Zel15, S. 3]. Zudem bleibt das sogenannte Multi-Order-Picking unberücksichtigt, welches in der Praxis häufig zum Einsatz kommt. Einige dieser Lücken werden in der Arbeit von Zellerhoff geschlossen, wobei auch hier vereinfachende Annahmen getroffen werden.

Die Bestimmung der Bearbeitungszeit mit den verfügbaren Verfahren liefert deshalb in der praktischen Anwendung nur Näherungslösungen mit einer inhärenten Unschärfe. Eine Steigerung der Genauigkeit ist zwar möglich (z. B. durch Zeitaufnahmen nach REFA oder Videoanalysen), aber mit einem hohen manuellen Aufwand zur Sammlung und Aktualisierung der Daten verbunden. Dieser Umstand erschwert nicht nur die Analyse der Leistungsfähigkeit eines bestehenden Kommissioniersystems, sondern auch die Auswahl von geeigneten Systemtypen während der Planungsphase. Auch die realitätsnahe Abbildung der menschlichen Arbeitskraft bei der Erstellung von Simulationsmodellen ist davon betroffen [GS11].

Wie im Stand der Forschung und Technik im zweiten Teil dieser Arbeit genauer ausgeführt, widmen sich verwandte Arbeiten auf diesem Gebiet entweder der Analyse und Optimierung von Leistungsaspekten des manuellen Kommissionierprozesses oder der Nutzung von mobilen Sensoren zur Steuerung von industriellen Prozessen. Arbeiten, die beide Aspekte zur Analyse bestehender Systeme miteinander vereinen, sind dem Autor nicht bekannt. Auch der Transfer von Lösungen aus dem Bereich der Fertigung und Montage erscheint für die Kommissionierung durch die fehlende Ortsgebundenheit des Prozesses nicht sinnvoll. Folglich existiert eine methodische Lücke, welche angesichts des Stellenwerts der Kommissionierung für die industrielle Wertschöpfung geschlossen werden sollte.

1.2 Ziele

Ziel der vorliegenden Dissertationsschrift ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Analyse des manuellen Kommissionierprozesses, mit dem u. a. die Kommissionierzeitanteile automatisch erfasst werden können. Dieses Verfahren nutzt eine sensorgestützte Aktivitätserkennung, wie sie bspw. im Sport oder in der Medizintechnik bereits Anwendung findet. Dazu wird der Kommissionierer mit mobiler Sensorik ausgestattet, die während der Kommissionierung verschiedene physikalische Größen wie die Beschleunigung, die Drehgeschwindigkeit oder Änderungen im umliegenden Magnetfeld aufzeichnet. Diese Daten werden anschließend im Rahmen eines hierarchischen Verfahrens ausgewertet, welches sich insgesamt auf drei Ebenen aufteilt. Zunächst werden für die Kommissionierung relevante Bewegungs- und Kontextinformationen von einer Messausrüstung aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Daten werden auf der zweiten Verfahrensebene mit Verfahren der statistischen Mustererkennung verarbeitet, um die ausgeführten Aktivitäten und Prozessschritte zu identifizieren. Die Dauer und die zeitliche Abfolge der Bewegungen und Aktivitäten liefern die Grundlage für die automatische Analyse des Kommissionierprozesses, welche die dritte Ebene des Verfahrens darstellt. Um dieses Ziel zu erreichen, sind geeignete Messausrüstungen, Sensordaten, Merkmale und Verfahren der statistischen Mustererkennung für diese Aufgabe zu erforschen. Dabei ist das übergeordnete Ziel, eine möglichst hohe Genauigkeit der eingesetzten Methoden zu erreichen. Darüber hinaus muss eine geeignete Kontextbestimmung gefunden werden, die es erlaubt, auch die Umgebungsbedingungen, in welchen die Bewegungen stattfinden, für die Mustererkennung heranzuziehen.

Die eingesetzten Methoden der Mustererkennung sind dem Fachgebiet des maschinellen Lernens zuzuordnen. Im Sinne des maschinellen Lernens wird in dieser Arbeit ein überwachter Ansatz verfolgt. Mit anderen Worten, die zu unterscheidenden Bewegungen und Aktivitäten müssen zum Zeitpunkt des Anlernens feststehen und in Form von manuell aufbereiteten Trainingsdaten vorliegen. Die Möglichkeiten einer (halb-)automatischen Adaption der Verfahren an unterschiedliche Szenarien und Systeme sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Stattdessen sollen das Anler-

nen und die Modellierung soweit systematisiert werden, dass eine Übertragung des Verfahrens auf neue Kommissioniersysteme mit vertretbarem Aufwand möglich ist.

1.3 Nutzen und Adressaten

Das zu entwickelnde Verfahren hat gleichermaßen einen praktischen wie auch einen wissenschaftlichen Nutzen auf dem Gebiet der Kommissionierung. Beide Facetten werden in diesem Abschnitt genauer beleuchtet. Anschließend werden potenzielle Anwender des Verfahrens benannt.

Von praktischer Seite ist zu erwarten, dass durch den Einsatz von Sensorik und einem automatisierten Analyseverfahren der Aufwand für die Durchführung von Zeitstudien und Prozessaufnahmen in der Kommissionierung deutlich reduziert werden kann. Nach dem Anlegen der Sensorik kann eine Messung autark und ohne Beaufsichtigung durch Messpersonal ablaufen. So können zum einen mehrere Kommissionierer gleichzeitig gemessen werden und zum anderen Realprozesswerte, wie die Wegzeit pro Position oder die Anzahl von Entnahmen pro Position, über einen längeren Zeitraum erhoben werden. Diese Daten bieten eine bessere Ausgangsbasis für Veränderungsplanungen und erlauben auch die Bestimmung von Kennzahlen, die den Betreibern von Kommissioniersystemen bisher nicht zur Verfügung stehen. Dazu gehört u. a. die in [Sie13] und [SSW14] vorgeschlagene massen- und volumenbezogene Transportarbeit sowie die Nettoarbeitszeit nach VDI4490. Zudem kann mithilfe der Zeitanteile auch das *Time-driven Activity-based Costing*¹ unterstützt werden, so dass bspw. die Preisermittlung für Logistikdienstleistungen verbessert werden kann. Dies ist insbesondere für Mehrwertdienste interessant, die für die Anbieter einen Kostentreiber darstellen [tHH11, S. 186]. Der reduzierte Messaufwand erlaubt es auch, Prozessaufnahmen häufiger als bisher oder sogar kontinuierlich durchzuführen und somit Daten für Trendanalysen zu sammeln. Sofern Zeiten und Kennzahlen aus vergleichbaren Kommissioniersystemen vorliegen, sind auch systemübergreifende Vergleiche und Benchmarks denkbar. Weiterhin können durch Vergleichsmessungen auch die Auswirkung von Änderungen innerhalb eines Systems besser nachvollzogen werden. So können bspw. die Wegzeitreduzierung durch eine optimierte Lagerzonung mithilfe des hier vorgestellten Verfahrens oder die eingesparten Kosten durch einen schnelleren Scanvorgang quantifiziert werden. Unter Zuhilfenahme von Kontextinformationen ist es mit dem hier vorgestellten Ansatz auch möglich, die Dauer und die Intensität der Nutzung von Flurförderzeugen wie z. B. Gabelstaplern zu ermitteln. Mit diesen Informationen könnte bspw. der Verschleiß der Förderzeuge überwacht und die Instandhaltung unterstützt werden, wie es u. a. in [NK06] beschrieben wird.

¹ *Time-driven Activity-based Costing* nach Kaplan ist eine angepasste Variante der Kostenrechnungsmethode *Activity-based Costing*, in der die Kosten einer Aktivität durch die Kosten der Ressourcen pro Zeiteinheit und den Zeitverbrauch aller Ressourcen für die Aktivität abgeschätzt werden. Die Genauigkeit des Ergebnisses hängt von der Genauigkeit seiner Parameter ab [KA04, S. 4].

Auch von wissenschaftlicher Seite kann diese Arbeit und das entwickelte Verfahren einen Beitrag zu verschiedenen Fragestellungen leisten. Zum einen können verbreitete Abschätzungen, Faustformeln und Erfahrungswissen im Bereich der Kommissionierung durch empirische Untersuchungen überprüft werden. Besonders hervorzuheben sind hier die Formeln von Gudehus zur Abschätzung von Greif- [Gud05, S. 765] und Verteilzeiten [Gud12, S. 792] oder das typische Verhältnis zwischen Weg-, Greif-, Basis- und Totzeiten, wie es von Martin beschrieben wird [Mar09, S. 396]. Zum anderen gliedert sich diese Arbeit in das Themengebiet der automatisierten Planung ein, welches u. a. am Standort Dortmund sehr aktiv bearbeitet wird. In diesem Zusammenhang sind bspw. Arbeiten zur agentenbasierten Konzeptplanung von Kommissioniersystemen [Ell15] oder zur automatischen Layoutsynthese entstanden [Mos18], die sich zum Ziel gesetzt haben, den aufwändigen Planungsprozess zu automatisieren. Auch wenn die automatisierte Planung derzeit noch ein Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten ist, so bilden automatisierte Analysewerkzeuge wie die vorliegende Arbeit eine wichtige Grundlage. Beispielsweise kann bei einer fortlaufenden Analyse der Kommissionierzeitanteile ein Anstieg einer relevanten Kennzahl über einen festgelegten Schwellwert automatisch gemeldet werden. Dies kann als Anstoß für eine sich anschließende Optimierungsplanung dienen, in deren Zuge die Frage geklärt wird, ob eine Optimierung des Lagers sinnvoll ist. Doch auch im operativen Bereich kann eine Aktivitätserkennung Nutzen entfalten. Beispielsweise kann eine automatische Erfassung der Bewegungs- und Arbeitsabläufe in Arbeitsassistenzsysteme integriert werden, um dem Kommissionierer zu jedem Prozessschritt die passenden Informationen bereitzustellen [Woel14, S. 62].

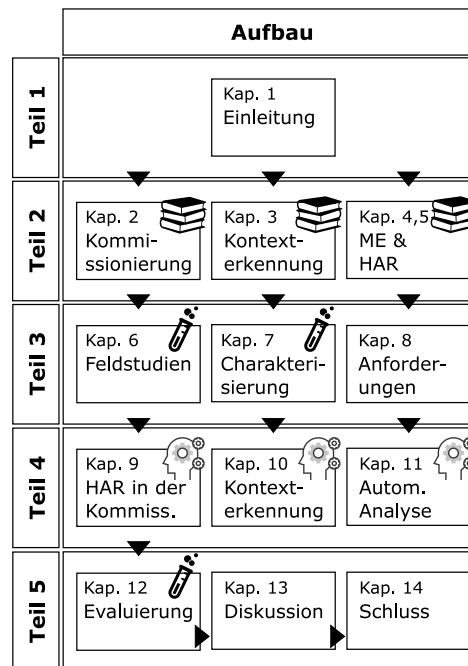
Der mit dieser Arbeit angesprochene Adressatenkreis umfasst sowohl Wissenschaftler als auch Mitarbeiter erwerbswirtschaftlicher Unternehmen. Während auf wissenschaftlicher Seite das größte Interesse bei Forschern im Bereich der innerbetrieblichen Logistik liegen dürfte, wird auf wirtschaftlicher Seite ein breiteres Spektrum bedient. Dazu gehören zunächst Betreiber von Kommissioniersystemen. Diese reichen von produzierenden Betrieben über Logistikdienstleister bis hin zu Handelsunternehmen. Des Weiteren werden Logistikplaner angesprochen, die in Ingenieurbüros, Beratungsunternehmen oder auch innerbetrieblichen Planungsabteilungen arbeiten. Insbesondere für diese Gruppe bietet das hier entwickelte Verfahren ein neuartiges Analysewerkzeug, das vermag, die Durchführung von Prozessaufnahmen maßgeblich zu verbessern, da u. a. mehr Daten in kürzerer Zeit aufgenommen werden können. Zuletzt kann dieses Verfahren auch Herstellern von Kommissioniersystemen dabei helfen, ihre Systeme und insbesondere ihre Arbeitsplätze aufzunehmen und auf Basis der Analyseergebnisse zu optimieren.

Auch wenn ein vielfältiger Nutzen für verschiedene Anwender gegeben ist, so konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf Unternehmen, Freiberufler und Forscher, die Projekte im Bereich der Veränderungsplanung und Optimierung von Kommissioniersystemen durchführen. Der Haupttreiber für diese Entscheidung liegt in der inhärenten Datenschutzproblematik begründet, die mit der Erfassung von personenbezogenen Leistungsdaten im betrieblichen Umfeld verbunden ist.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit besteht aus insgesamt fünf Teilen (vgl. Abb. 1.1). Nach der Definition von Zielen und Vorüberlegungen im ersten Teil wird im zweiten Teil der Stand der Forschung und Technik aufgearbeitet. Neben der Kommissionierung werden auch Fachgebiete der Mustererkennung und im besonderen der Erkennung von menschlicher Aktivität vorgestellt. Zudem wird auch das Gebiet des kontextsensitiven Rechnens betrachtet. Anschließend erfolgt im dritten Teil eine umfangreiche Analyse des Kommissionierprozesses. Diese fußt sowohl auf den Ergebnissen von Literaturarbeit als auch von Feldforschung bei kooperierenden Unternehmen. Die Hauptergebnisse dieses Teils sind eine Taxonomie von Kommissionieraktivitäten sowie eine ausführliche Charakterisierung des Kommissionierprozesses vor dem Hintergrund der Aktivitätserkennung. Diese werden zu Anforderungen an die Verfahrensentwicklung subsumiert. Im vierten Teil dieser Arbeit wird die Verfahrensentwicklung beschrieben. Dabei werden die Kontextbestimmung und die Aktivitätserkennung einzeln betrachtet. Anschließend werden die entwickelten Verfahren im fünften Teil evaluiert und validiert. Außerdem wird nach Ansatzpunkten für Optimierungen gesucht. Im Rahmen der Evaluierung werden die Daten aus den Feldstudien genutzt. Die erzielten Ergebnisse werden im Anschluss anhand von Bewertungsmaßzahlen beurteilt und kritisch diskutiert. Die Schlussbetrachtungen schließen diese Arbeit und enthalten neben einer Zusammenfassung und einem Fazit auch Ansatzpunkte für Folgearbeiten.

Abb. 1.1 Aufbau der vorliegenden Arbeit, wobei die Kapitel mit einem hohen Literatur-, Empirie- oder Eigenanteil besonders hervorgehoben sind.



1.5 Publikationen

Teile der hier dargelegten Forschungsergebnisse wurden durch den Autor im Vorfeld veröffentlicht. Diese sechs Publikationen werden im Folgenden aufgelistet und an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit referenziert. Sie werden in der Reihenfolge aufgelistet, in der die jeweiligen Ergebnisse entstanden sind. Diese weicht ab von der Reihenfolge ihrer Veröffentlichung:

- Grzeszick, R.; Fink, G. A.; Feldhorst, S.; Mosblech, C.; ten Hompel, M.: *Camera-assisted Pick-by-feel*. In: Wehking, K.-H. (Hrsg.): 12. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL): Universität Stuttgart. Univ.-Verl. Stuttgart, 2016.
- Feldhorst, S.; ten Hompel, M.: *Bewegungsklassifikation mithilfe mobiler Sensoren zur Analyse des Kommissionierprozesses*. In: Noche, B. (Hrsg.): 11. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL): Universität Duisburg Essen. Univ.-Verl. Duisburg, 2015.
- Feldhorst, S.; Masoudinejad, M.; ten Hompel, M.; Fink, G. A.: *Motion Classification for Analyzing the Order Picking Process Using Mobile Sensors*, Intl. Conf. On Pattern Recognition Applications and Methods (ICPRAM), 2016.
- Feldhorst, S.; Aniol, S.; ten Hompel, M.: *Human Activity Recognition in der Kommissionierung : Charakterisierung des Kommissionierprozesses als Ausgangsbasis für die Methodenentwicklung*. In: Wehking, K.-H. (Hrsg.): 12. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL): Universität Stuttgart. Univ.-Verl. Stuttgart, 2016.
- Feldhorst, S.; Grzeszick, R.; Kaczmarek, S.: *Zero Effort - Real Data: Automatische Prozessanalysen durch Aktivitätserkennung*. In: Günthner, Willibald A. (Hrsg.): Tagungsband zum 26. Materialflusskongress: Vernetzte Intralogistik. München: VDE-Verl., 2017.
- Grzeszick, R.; Lenk, J.M.; Moya, F.; Feldhorst, S.; ten Hompel, M. and Fink, G.: *Deep Neural Network-based Human Activity Recognition for the Order Picking Process*. 4th International Workshop on Sensor-based Activity Recognition and Interaction (iWOAR), Rostock, 2017.

Alle Publikationen wurden gemäß der Promotionsordnung als Vorveröffentlichung des Autors bei der Fakultät Maschinenbau der TU Dortmund angezeigt und sind durch diese anerkannt worden. Außerdem sind einige der Ideen und Vorarbeiten für diese Arbeit im Zuge der Ausschreibung und Betreuung der Projektgruppe „*Camera-assisted Pick-by-Feel*“ der Fakultät Informatik entstanden [SMS+15]. Auch andere zumeist vom Autor betreute studentische Arbeiten lieferten wertvolle Eingaben und Anregungen. Alle studentischen Arbeiten, die vom Autor zu diesem Thema betreut wurden, werden im Anhang A aufgeführt.