

# Human Activity Recognition in der Kommissionierung – Charakterisierung des Kommissionierprozesses als Ausgangsbasis für die Methodenentwicklung

Human Activity Recognition in Order Picking Systems –  
Field studies and implications for the development of HAR solutions

**Sascha Feldhorst**  
**Sandra Aniol**  
**Michael ten Hompel**

*Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen  
Fakultät Maschinenbau  
Technische Universität Dortmund*

**I**m Gegensatz zu vielen anderen Anwendungsbereichen (z. B. Sport oder Freizeit) ist die automatische Aktivitätserkennung in der Kommissionierung ein neues Thema und weitgehend unerforscht. Deshalb wird in diesem Beitrag als Grundlage für die Methodenentwicklung über die Ergebnisse von umfangreichen Feldstudien berichtet, die in Kooperation mit kommissionierenden Unternehmen durchgeführt wurden. Zur Datenerhebung wurden Befragungen, Beobachtungen und Prozessaufnahmen eingesetzt. Während der Prozessaufnahmen wurden Bewegungsdaten von Kommissionierern mithilfe von Inertialsensoren erfasst. Zusätzlich wurden in einem Unternehmen auch Zusatzinformationen in Form von Funksignalen gespeichert, welche Rückschlüsse auf den Kontext einer Messung zulassen. Zum Zweck der Auswertung wurden die einzelnen Prozessstudien mit einer Videokamera aufgezeichnet und später ausgewertet.

*[Schlüsselwörter: Aktivitätserkennung, HAR, Kommissionierung, Feldstudien, Datensätze]*

**W**hile human activity recognition (HAR) has been successfully deployed to different application scenarios in terms of every day or sport activities, it is rather new in the field of industrial order picking which is an important process in the field of logistics. Consequently, there are currently no dedicated datasets nor activity taxonomies available to build HAR solutions upon. To overcome this and to allow for the development of specialized HAR-approaches for order picking scenarios, the following contribution presents results of comprehensive field studies carried out in real world systems. During this studies measurements of inertial sensors as well as context information were gathered and the process was recorded on video for a later analysis.

*[Keywords: Activity Recognition, Human Activity Recognition, Order Picking, Field studies, HAR datasets]*

## 1 EINLEITUNG

Im Gegensatz zu vielen anderen Anwendungen im Freizeit-, Alltags- oder Sportbereich ist die Erkennung menschlicher Aktivität (engl. *Human Activity Recognition*, HAR) in der Kommissionierung ein neues Thema, das abgesehen von ersten Vorstudien, die kürzlich an der TU Dortmund durchgeführt worden sind, weitgehend unerforscht ist (vgl. [FtH15], [FMt<sup>+</sup>16], [GFM<sup>+</sup>16]). Als Folge sind weder Aktivitätsdatensätze zum Anlernen und Erproben von HAR-Verfahren noch eine strukturierte Sammlung oder Taxonomie von Aktivitäten für die Kommissionierung verfügbar. Beides bildet eine wichtige Grundvoraussetzung für die Entwicklung und Erprobung von HAR-Lösungen [BBS14]. Vorhandene Arbeiten, die bisher im industriellen Bereich durchgeführt wurden (vgl. [WLT<sup>+</sup>06], [SRO<sup>+</sup>08], [HSL09], [KHS<sup>+</sup>13]), konzentrieren sich auf Wartungs- und Fertigungsprozesse, welche sich durch ihren Ortsbezug und die verwendeten Werkzeuge auf den ersten Blick deutlich von der Kommissionierung unterscheiden. Um die Übertragbarkeit dieser Lösungen zu überprüfen und adäquate HAR-Ansätze für die Kommissionierung zu entwickeln, bedarf es zunächst einer genauen Charakterisierung des Kommissionierprozesses aus Sicht der Aktivitätserkennung. Eine solche ist jedoch bisher nicht in der Literatur beschrieben. Deshalb verfolgt der vorliegende Beitrag das Ziel, diese Lücken zu schließen und fehlende Daten und Erkenntnisse mithilfe von Verfahren der empirischen Forschung aus realen Kommissioniersystemen zu gewinnen.

Der Beitrag gliedert sich in fünf Teile: Nach der Motivation des Themas werden zentrale Vorüberlegungen des Studienentwurfs beschrieben, wie die zugrundeliegenden Forschungsfragen, die Verfahren der Datenerhebung und die Kooperationsformen mit den Unternehmen. Dazu zählt auch die Messausrüstung, welche für die Prozessaufnahmen genutzt wird. Im dritten Teil wird die Durchführung der Studien vorgestellt, bevor der vierte Teil die Resultate

der Auswertung thematisiert. Abschließend wird der Beitrag zusammengefasst, ein Fazit gezogen und Ansatzpunkte für zukünftige Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet aufgezeigt.

## 2 STUDIENENTWURF

Insgesamt werden für die Studien 16 Unternehmen ausgewählt und angesprochen, wobei darauf geachtet wird, ein breites Spektrum von Unternehmen aus unterschiedlichen Branchen abzudecken. Zusätzlich wird auch die Position des Unternehmens innerhalb der Wertschöpfungskette berücksichtigt, sodass gleichermaßen Hersteller, Logistikdienstleister und Handelsunternehmen akquiriert werden.

Die Resultate, die im Rahmen der hier konzipierten Studien erzielt werden sollen, können wie folgt zusammengefasst werden:

- Datensätze mit Bewegungs- und Kontextdaten aus realen Kommissionierprozessen als Grundlage für HAR-Lösungen
- Charakterisierung des Kommissionierprozesses für die Methodenentwicklung
- Erkenntnisse über den manuellen Auswertungsprozess, um Vergleichswerte zur erzielbaren Zeitersparnis und Erkennungsgenauigkeit durch automatische Verfahren zu sammeln
- Erkenntnisse über die Beschaffenheit der Bewegungs- und Kontextdaten als Grundlage für automatische Erkennung

Darüber hinaus sollen Kommissionieraktivitäten und auch die praktischen Besonderheiten des Kommissionierprozesses identifiziert werden. Dies hilft beispielsweise dabei, eine Sammlung von Aktivitätsklassen (Taxonomie) zu definieren, die für die Aufbereitung der Trainingsdaten genutzt werden kann. Als Leitlinie für den Studienentwurf werden zunächst die gewünschten Resultate in einzelne Forschungsfragen überführt. Diese Konkretisierung erleichtert im weiteren Verlauf auch die Bewertung der erzielten Ergebnisse.

### 2.1 FORSCHUNGSFRAGEN

Um den gewünschten Erkenntnisgewinn zu konkretisieren, werden die folgenden Forschungsfragen aufgestellt:

- **FF1:** Welche Aktivitäten sind in der Kommissionierung anzutreffen?
- **FF2:** In welche Gruppen lassen sich diese Aktivitäten einteilen?
- **FF3:** Wie stellen sich die Aktivitäten und Kontextdaten in den Messwerten dar und welche Muster bieten sich für eine Erkennung an?

- **FF4:** Aus wie vielen Aktivitäten setzt sich ein Kommissionierprozess zusammen?
- **FF5:** Wo liegen Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Prinzipien Person-zur-Ware (PzW) und Ware-zur-Person (WzP)?
- **FF6:** Welchen Anteil haben die Aktivitäten an den PzW- bzw. WzP-Gesamtprozessen?
- **FF7:** Wie läuft eine manuelle Auswertung von Prozessaufnahmen ab? Wie lange dauert diese Auswertung und wie fehleranfällig ist sie?

### 2.2 VERFAHREN DER DATENERHEBUNG

Das wichtigste Verfahren der Datenerhebung sind Prozessaufnahmen vor Ort. Ergänzend werden Befragungen und Prozessbeobachtungen durchgeführt, um auch Daten zu Technik, Prozess und Layout der betrachteten Kommissioniersysteme zu erheben. Da nicht nur Erkenntnisse über die Kommissionierung, sondern auch über die manuelle Auswertung von Aktivitätsdaten gewonnen werden sollen, werden neben den Feldstudien auch sogenannte Annotationsstudien durchgeführt. Diese sollen zeigen, wie aufwändig und fehleranfällig eine manuelle Aktivitätsanalyse des Kommissionierprozesses ist. Mithilfe dieser Informationen können später entwickelte Erkennungsmethoden bezüglich ihrer Zeitersparnis und ihrer Genauigkeit besser eingeordnet werden.

#### 2.2.1 BEFRAGUNGEN

Hier wird auf eine mündliche Befragung in Form von persönlichen Interviews zurückgegriffen. Dazu werden sogenannte Leitfadengespräche (nach [Sti99, S.188]) mit den verantwortlichen Mitarbeitern geführt. Als Stichwortkatalog wird ein Vorgesprächsbogen mit den folgenden Informationsgruppen verwendet:

- Allgemeine Unternehmensinformationen
- Förder-, Lager- und Handhabungstechnik
- Layout der betrachteten Kommissioniersysteme
- WMS, IT und Leittechnik

Zu den allgemeinen Informationen gehören Angaben zur Branche, Kunden oder Umsatz des Unternehmens. Über die betrachteten Standorte werden insbesondere die Mitarbeiteranzahl, die Gesamtfläche und die Funktionsbereiche erhoben. Außerdem werden Informationen über das Layout der Kommissioniersysteme sowie über die eingesetzte Technik gesammelt.

#### 2.2.2 BEOBACHTUNGEN

Im Zuge der Prozessbeobachtungen werden Mitarbeiter der Unternehmen während der Arbeit innerhalb der betrieblichen Kommissioniersysteme anhand vorher festgelegter Kriterien beobachtet. Die Beobachtung ist den

Kommissionierern bewusst und erfolgt nur nach deren freiwilliger Einwilligung. Hier wird ein besonderes Augenmerk auf die Faktoren gelegt, welche die Aktivitäten des Kommissionierers beeinflussen. Dabei geht es insbesondere darum, mit welcher Technik bzw. mit welchen Hilfsmitteln interagiert wird und wie sich diese auf die Aktivitäten auswirken. Zusätzlich werden verschiedene praktische Besonderheiten erfasst, die nicht in der Literatur dokumentiert sind. Um sicherzustellen, dass die Beobachtungen hier systematisch erfolgen, wird das Kategoriensystem im Vorfeld ausformuliert und in Form eines Protokollbogens mit den Beobachtungen genommen. Während der Beobachtungen wird dieses Protokoll ausgefüllt, das die folgenden Kategorien enthält:

- Auftragsablagen, Entnahmen und Positionen
- Eingesetzte technische Hilfsmittel
- Layout des Versuchsbereichs
- Prozessablauf
- Störungen

### 2.2.3 PROZESSAUFNAHMEN

Bei den Prozessaufnahmen handelt es sich um den Kern der Feldstudien. Sie dienen in erster Linie der Erhebung von Bewegungs- und Kontextdaten (vgl. Abb. 1). Dazu werden neben den Bewegungen des Kommissionierers optional auch Daten erhoben, welche Rückschlüsse auf die Umgebung und die Situation (Kontext) während der Messung zulassen. Diese Messungen werden zu HAR-Datensätzen aufbereitet, die zum Anlernen und Erproben von Mustererkennungsmodellen genutzt werden können. Im Rahmen einer Prozessaufnahme werden Bewegungsdaten mithilfe mobiler Inertialsensorik erfasst. Als Quelle für Kontextinformationen kommen verschiedene Alternativen in Frage, bspw. die Signalstärke von Funksignalen (z. B. von *Beacons*) oder Tonmittschnitte von Mikrofonen. Zunächst muss jedoch eine entsprechende Messausrüstung zusammengestellt werden. Der Aufbau dieser Ausrüstung wird in Abschn. 2.4 beschrieben.

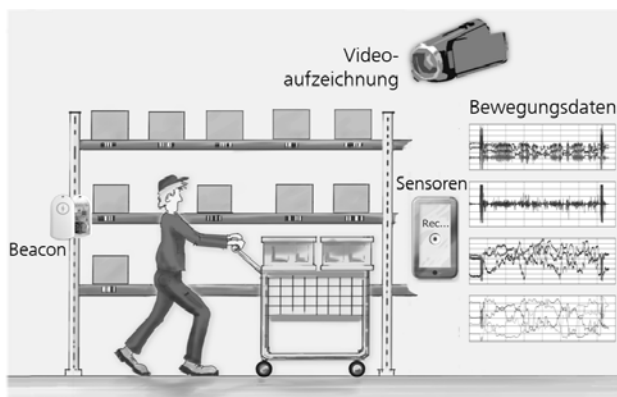


Abbildung 1. Beispielhafte Prozessaufnahme

Um gesonderte Datensätze zu generieren, werden die Prozessaufnahmen in einzelne Messungen unterteilt. Dabei wird der Kommissionierprozess für einen vorher festgelegten Zeitraum aufgenommen. Zum Zweck der späteren Auswertung wird jede Messung mithilfe einer Kamera aufgezeichnet (vgl. Abb. 1). Die Aufnahmen helfen, die Daten im Nachgang auszuwerten. Zusätzlich können sie für eine detaillierte Prozessbeobachtung genutzt werden.

### 2.2.4 AUSWERTUNG DER PROZESSAUFNAHMEN

Um die einzelnen Prozessaufnahmen zu HAR-Datensätzen aufzubereiten, wird zunächst jedes Video einzeln betrachtet und annotiert. Der Begriff Annotation stammt aus dem Bereich des überwachten, maschinellen Lernens. Damit ist gemeint, dass aufgenommene Daten so mit Zusatzinformationen versehen werden, dass sie anschließend als Trainingsdaten für das Anlernen von Modellen genutzt werden können. Da bei der Erkennung von menschlicher Aktivität i. d. R. Zeitreihendaten zum Einsatz kommen, geht es bei der Annotation im HAR-Bereich darum, Zeitreihen in Intervalle zu zerlegen und diesen Intervallen eine Aktivität zuzuordnen. Dieser Vorgang wird für jedes Video manuell mithilfe einer speziellen Videosoftware durchgeführt, die es erlaubt, durch das Video in Einzel- und Bewegbildern zu navigieren. So können die Ausführung einer Aktivität in Bewegbildern und die Übergänge zwischen den Aktivitäten in Einzelbildschritten betrachtet werden. Da prinzipiell jedes Einzelbild einem bestimmten Zeitpunkt zugeordnet werden kann, können auf diese Weise Zeitintervalle gebildet werden, die den Zeitraum beschreiben, in dem nur eine bestimmte Aktivität ausgeführt wird.

Im Vorfeld werden Videos festgelegt, zu denen mehrere Annotationen angefertigt werden. Dabei handelt es sich um Kreuz- oder Wiederholtests. Bei einem Kreuztest wird ein Video von verschiedenen Personen annotiert und bei einem Wiederholtest annotiert dieselbe Person ein Video doppelt. Ziel dieser Tests ist es, die Varianz der Annotationen zu ermitteln und herauszufinden, wie stark subjektive Wahrnehmungen die Bestimmung der Aktivitäten beeinflussen und welche Wiederholgenauigkeit erzielt wird. Dadurch kann die menschliche Fehlerrate abgeschätzt werden und nach der Methodenentwicklung genutzt werden, um die Auswertungsgenauigkeit von automatischen und manuellen Prozessstudien zu vergleichen.

Neben den Trainingsdatensätzen und Erkenntnissen über den Annotationsvorgang liefern die Annotationen auch ein umfangreiches Datenmaterial über den Kommissionierprozess. Diese Daten können zur Beantwortung verschiedener Forschungsfragen herangezogen werden.

## 2.3 KOOPERATIONSFORMEN

Da insbesondere im Arbeitsumfeld nicht alles was technisch möglich auch juristisch erlaubt bzw. politisch gewollt ist, sind arbeits- und datenschutzrechtliche Aspekte

zu berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund sind Vorbehalte gegenüber den Feldstudien bei den angesprochenen Unternehmen zu erwarten, denen durch verschiedene Kooperationsformen begegnet wird:

- **Typ 1:** Rein informell
- **Typ 2:** Informell u. Besichtigungen vor Ort
- **Typ 3:** Feldstudie samt Prozessaufnahmen

Die einfachste Form der Kooperation (Typ 1) ist die reine Bereitstellung von Informationen zu den Kommissioniersystemen eines Unternehmens. Dazu gehören der Prozessablauf, Organisation, Daten zur Technik, Schaubilder, Layouts sowie Informationen zum Artikel- und Auftragspektrum. Sofern ein Unternehmen dazu bereit ist, werden zusätzlich Besichtigungen durchgeführt (Typ 2), um die Kommissionierprozesse vor Ort zu beobachten. Die ergiebigste Form der Kooperation (Typ 3) liegt vor, wenn das Unternehmen zusätzlich der Durchführung von Prozessaufnahmen zustimmt und sich darüber hinaus auch Mitarbeiter finden, die freiwillig daran teilnehmen.

## 2.4 MESSAUSRÜSTUNG

Aufgrund ihrer Verbreitung und vor allem wegen ihrer Verfügbarkeit in zahlreichen *Wearables* und *Smartphones* wird in dieser Arbeit auf IMU zurückgegriffen. Die verwendete Messausrüstung ist in Abbildung 2 dargestellt.

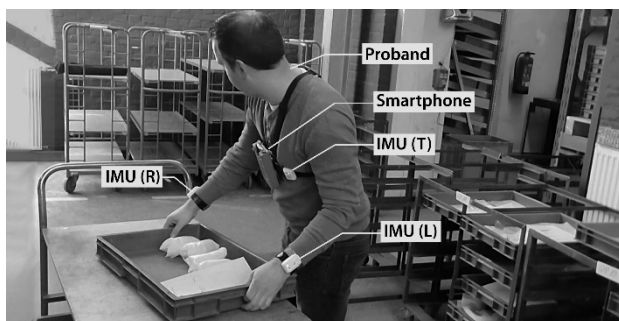


Abbildung 2. Übersicht der am Körper getragenen Sensoren

Da neben den Bewegungsdaten auch Daten über die aktuelle Situation des Kommissionierers gesammelt werden, muss die Messausrüstung auch in der Lage sein, Kontextdaten zu erheben. In diesem Beitrag werden als Kontextdaten zunächst Funksignale von *Bluetooth-Beacons* betrachtet. Die Messwerte werden mit einem *Smartphone* erhoben, welches der Kommissionierer am Körper trägt. Dieses zeichnet die Empfangsstärke der Funksignale (*Received Signal Strength Indicator*, RSSI) und die Identifikationsnummer der *Beacons* für eine spätere Auswertung auf. Aufgrund der integrierten Sensorik sind *Smartphones* zur Ermittlung von Kontextdaten sehr gut geeignet [LML<sup>+</sup>10]. Dadurch können zukünftig auch andere Kontextdaten berücksichtigt werden (z. B. Tonmitschnitte), ohne die Messausrüstung erweitern zu müssen.

Die in Abb. 2 dargestellte Messausrüstung besteht also aus drei IMUs und einem *Smartphone*, das am Torso befestigt wird. Diese Messausrüstung wurde bereits erfolgreich in [FMT<sup>+</sup>16] eingesetzt. Komplettiert wird die Ausrüstung durch *Beacons*, die optional in der Arbeitsumgebung des Kommissionierers angebracht werden. Sofern *Beacons* (vgl. Abb. 3) in der Umgebung vorhanden sind, kann der Datenbestand um RSSI-Werte erweitert werden.

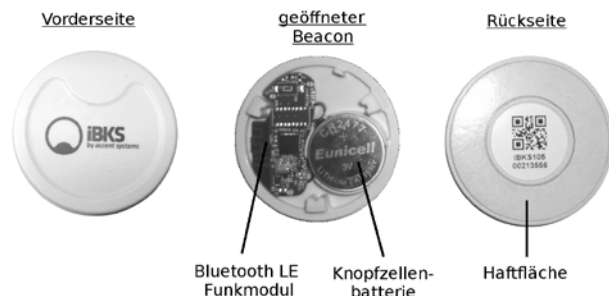


Abbildung 3. Aufbau der verwendeten Beacons (Hentschel)

## 3 STUDIEN

In diesem Abschnitt werden die Feld- und Annotationsstudien beschrieben. Dabei wird dargelegt, wie bei den Studien vorgegangen wird und wie viele Daten insgesamt erhoben werden. Anschließend werden in Abschnitt 4 die Erkenntnisse aus den Studien vorgestellt.

### 3.1 FELDSTUDIEN

Die 16 angefragten Unternehmen setzen sich aus sechs Herstellern, vier Dienstleistern und sechs Handelsunternehmen zusammen (vgl. Abb. 4). Dabei sind in dieser Stichprobe fünf kleine und mittlere Unternehmen (KMU) und elf Großunternehmen enthalten. Die Rückmeldung auf die Kooperationsanfrage kann als positiv bewertet werden. Auf vier Absagen kamen zwölf Kooperationszusagen vom Typ 2 und Typ 3. Dies entspricht einer Quote von 75 Prozent.

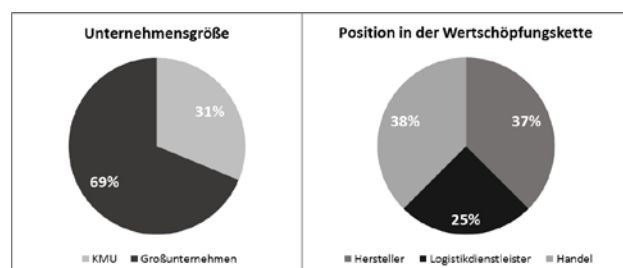


Abbildung 4. Einordnung der kooperierenden Unternehmen

#### 3.1.1 TYP-1- UND TYP-2-KOOPERATIONEN

Von den zwölf positiven Rückmeldungen haben sich drei Unternehmen (A, B und C) für eine Typ-2-Kooperation entschieden, d. h. es werden zum einem Informationen

über die betriebenen Kommissioniersysteme bereitgestellt und zum anderen besteht die Möglichkeit, die Systeme vor Ort zu besichtigen. Im Sinne der Datenerhebung wird bei Typ-2-Kooperationen auf Befragungen des leitenden Personals und auf Prozessbeobachtungen zurückgegriffen.

### 3.1.2 AUFNAHMEN (TYP-3-KOOPERATIONEN)

Acht Unternehmen sind zu Feldstudien inkl. Prozessaufnahmen bereit. Bei einem dieser Unternehmen wird jedoch von einer Prozessaufnahme aus Gründen der Arbeitssicherheit abgesehen. Für dieses Unternehmen wird stattdessen eine Besichtigung samt Prozessbeobachtung durchgeführt (Typ 2, Unternehmen D). Folglich werden in sieben Unternehmen Prozessaufnahmen angefertigt. Diese Unternehmen betreiben insgesamt 24 verschiedene Kommissionierbereiche, wobei hier jeder Bereich als eigenständiges System aufgefasst wird. Davon wird in drei Systemen nach dem Ware-zur-Person-Prinzip und in 20 Systemen nach dem Prinzip Person-zur-Ware (PzW) gearbeitet. Bei einem System handelt es sich um eine Mischung aus beiden Prinzipien, da ein Teil der Güter aus einem Lift (WzP) und die restliche Ware aus einem Regallager entnommen werden. Eines der PzW-Systeme wird ausgewählt, um Kontextinformationen mithilfe von *Beacons* aufzunehmen.

An den Prozessaufnahmen beteiligen sich insgesamt 34 Probanden auf freiwilliger Basis. Dabei handelt es sich um 22 Männer und 12 Frauen, die größtenteils hauptberuflich in der Kommissionierung arbeiten. Ein Großteil der Probanden ist zwischen 25 und 45 Jahren alt (vgl. Abb. 5) und verfügt über mehr als zwei Jahre Berufserfahrung im Bereich der Kommissionierung (ca. 70 Prozent). Pro Proband und System werden mindestens drei Aufnahmen erzeugt. Zudem wird darauf geachtet, dass für jedes einzelne Kommissioniersystem Datensätze von mindestens drei verschiedenen Probanden vorliegen. Insgesamt entstehen so 172 Bewegungsdatensätze (> 20 Stunden) und 24 Kontextdatensätze. Dabei werden alle Kontextdatensätze in demselben System aufgenommen, wobei zwei verschiedene Anbringungsweisen und zwei verschiedene Laufgeschwindigkeiten des Kommissionierers berücksichtigt werden. Pro Szenario werden so sechs verschiedene Kontextdatensätze erzeugt.

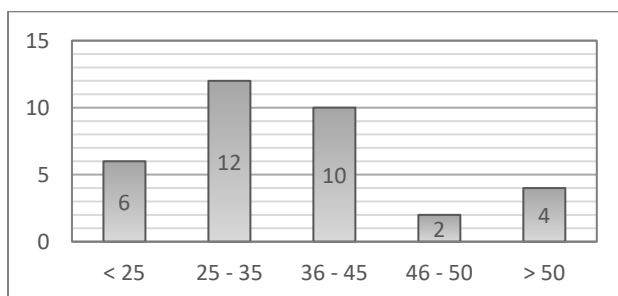


Abbildung 5. Altersverteilung der Kommissionierer

### 3.2 ANNOTATIONSSTUDIEN

Wie bereits in Abschn. 2.2.4 erwähnt, werden im Zuge der Annotationsstudien die Daten aus den Feldstudien manuell ausgewertet. Insgesamt nehmen an den Annotationsstudien 30 Personen teil, welche die Videos, aufgeteilt in vier Gruppen, nacheinander annotieren. Es handelt sich dabei um 23 Studierende und 7 Wissenschaftler. Alle verfügen über Vorwissen im Bereich der innerbetrieblichen Logistik. Um den Auswertungsaufwand pro Person zu begrenzen, wird nicht das gesamte Datenmaterial auf die Teilnehmer verteilt. Stattdessen werden 155 Videos mit einer Gesamtlänge von 17,5 Stunden aus dem Datenbestand ausgewählt. Pro Teilnehmer muss so zwischen 15 und 60 Minuten Videomaterial bearbeitet werden, wobei der zeitliche Aufwand für jede einzelne Auswertung dokumentiert wird. Für die Annotation steht den Gruppen eine Taxonomie von Aktivitätsklassen zur Verfügung, die im Laufe der Annotationsstudien nach Bedarf erweitert wird. Diese lässt sich in sieben Oberklassen aufteilen, die selbst wiederum aus mehreren Unterklassen bestehen:

- LOCOMOTION (Fortbewegung)
- RETRIEVAL (Entnahme)
- UTILITY USAGE (Hilfsmittelnutzung)
- VAS (Mehrwertdienste)
- MISC (Weitere)
- INFO (Informationsaufnahme)
- HAR (HAR-Hilfsklassen)

Die HAR-Oberklasse enthält Hilfsklassen, wie z. B. die Klasse UNKNOWN oder IGNORE. Die UNKNOWN-Klasse wird bspw. genutzt, falls im aufgezeichneten Kommissionierprozess eine Tätigkeit beobachtet wird, die keiner Klasse aus der Taxonomie zugeordnet werden kann. Mithilfe der IGNORE-Klasse dagegen können Teile der Aufnahme von der Betrachtung ausgeschlossen werden.

Von jedem Teilnehmer wird im Zuge der Annotationsstudien neben den regulären Datensätzen jeweils ein Kreuz- und ein Wiederholtest durchgeführt. Der Wiederholtest sieht vor, dass ein Datensatz wiederholt annotiert wird, wobei ein zeitlicher Abstand von einer Woche zwischen den Annotationen einzuhalten ist. Zusätzlich erhält im Zuge der Kreuztests jeder Teilnehmer einen Datensatz, den auch ein anderer Teilnehmer bearbeitet. Durch diese Mehrfachannotation entstehen insgesamt 195 Annotationen von 155 Videos, sodass für ausgewählte Datensätze mehrere Annotationen verfügbar sind, die im Folgenden miteinander verglichen werden, um die Genauigkeit einer manuellen Prozessanalyse abzuschätzen.

### 4 AUSWERTUNG

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Studien vorgestellt: Dabei werden zunächst die Ergebnisse der Prozessbeobachtungen und Messungen betrachtet. An-

schließlich wird der Kommissionierprozess charakterisiert. Als Grundlage dafür dienen u. a. die Aktivitätstabellen, die im Zuge der Annotationsstudien entstanden sind. Zuletzt wird der Annotationsprozess bzgl. Aufwand und Genauigkeit analysiert, bevor die wichtigsten Erkenntnisse für die Entwicklung von HAR-Lösungen in der Kommissionierung zusammengefasst werden.

#### 4.1 PROZESSBEOBACHTUNGEN

Bei den Feldstudien wurden vier Unternehmen ausschließlich durch Befragungen und Beobachtungen berücksichtigt. Von den Unternehmen sind drei im Bereich des Handels tätig und eines im Bereich der Produktion. Bei den Kommissioniersystemen handelt es sich bis auf eine Ausnahme um Systeme, die nach dem PzW-Prinzip arbeiten (vgl. Tab. 5.1). Weiterhin betreiben die Unternehmen A, C und D an den besichtigten Standorten mindestens zwei verschiedene manuelle Kommissionierbereiche. Die Fortbewegung der Kommissionierer zur Bereitstellung erfolgt in den betrachteten PzW-Systemen sowohl zu Fuß als auch mithilfe von Flurförderzeugen mit Fahrerstand (hier: Gabelstapler und Regalbediengeräte). In einem System wird eine Elektrohängebahn (EHB) eingesetzt. Diese fungiert als Auftragsablage und als Leittechnik, denn neben einem Terminal verfügt die EHB auch über eine Beleuchtung zum Hervorheben des nächsten Entnahmefachs. Im Gegensatz zum Gabelstapler und zum Regalbediengerät hat eine EHB keinen Fahrerstand, sodass der Kommissionierer sich zu Fuß fortbewegen muss.

Tabelle 1. Übersicht der besichtigten Kommissioniersysteme

System	Fortbewegung	Entnahme	Leittechnik	Güter
A-KS01	Zu Fuß	Manuell	MT	KT
A-KS02	RBG	Mechanisiert	MT	GT
A-KS03	WzP	Manuell	ST	KT
B-KS01	Zu Fuß	Manuell	PbL, MT	Kartonware
C-KS01	Zu Fuß	Manuell	KL	KT
C-KS02	Gabelstapler	Mechanisiert	KL	GT
D-KS01	Zu Fuß	Manuell	KL	CC
D-KS02	Fahrzeug	Manuell	KL	Behälter

RBG=Regalbediengerät, MT=Mobilterminal, PbL=Pick-by-Light, ST=Stationäres Terminal, KL=Papierliste, GT=Großteile, KT=Kleinteile, CC=CC-Container

Die Eindrücke aus diesen vier Unternehmen führten zu der Hypothese, dass sich folgende Faktoren auf die auszuführenden Aktivitäten der Kommissionierer auswirken: Fördermittel, Leittechnik, Ladehilfsmittel, weitere Hilfsmittel (z. B. Messer oder Tüten), die Realisierung der Entnahme, die Realisierung der Fortbewegung und Art und Beschaffenheit der kommissionierten Güter. Das ist damit zu begründen, dass sich diese Einflussfaktoren direkt auf den Kommissionierprozess auswirken, aus dem die zu unterscheidenden Aktivitäten abgeleitet werden. Beispielsweise wirkt sich die Leittechnik eines Systems darauf aus, ob der Kommissionierer schreiben (Pickliste) oder tippen (mobiles o. stationäres Terminal) muss, um zu quittieren. Diese Hypothese bestätigte sich auch bei den Feldstudien inkl. Messung (Typ-3) für die ebenfalls Prozessbeobachtungen durchgeführt wurden.

#### 4.2 MESSUNGEN

Während der Messungen sind sowohl PzW- als auch WzP-Kommissioniersysteme betrachtet worden, wobei der Anteil von PzW-Systemen überwog. Insgesamt verteilen sich die 172 Datensätze auf 131 Datensätze aus 19 verschiedenen PzW-Systemen und auf 24 Datensätze aus 3 WzP-Systemen. Weitere 17 Datensätze wurden in dem System erstellt, bei dem an der Basis ein Liftsystem betrieben wird. Für die weitere Auswertung wird dieses System ebenfalls zu den PzW-Systemen gezählt. Die Kontextdaten wurden ebenfalls in einem PzW-System erhoben, sodass für die Auswertung der Messungen Datensätze aus insgesamt 24 Kommissioniersystemen vorlagen. Dabei haben sich die Systeme bzgl. Technik und Organisation teilweise deutlich voneinander unterschieden. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht verschiedener technischer Hilfsmittel.

Tabelle 2. Häufigkeitsübersicht technischer Hilfsmittel

	Technik	# Sys	Technik	# Sys	
Lagermittel	Automatisches Kleinteilelager	2	Bahnhof	6	
	Bodenblocklager	3	Handgabelhubwagen	2	
	Durchlaufregallager	2	Kommissionierwagen	13	
	Fachbodenregallager	8	Kommissionierfahrzeug	5	
	Liftsystem	2	Stetigfördertechnik	2	
	Palettenregallager	14	Kommissionierliste	16	
Ladehilfsmittel	Behälter	17	Leittechnik	Kanban-Karte	1
	Karton	6		Mobiles Terminal	10
	Palette	5		Pick-by-Light	2
	Tablar	2		Stationäres Terminal	2

Tabelle 2 kann u. a. entnommen werden, dass in den betrachteten Systemen eine Lagerung in Paletten- oder Fachbodenregalen favorisiert wurde. Die meisten Systeme setzten Behälter als Ladehilfsmittel ein und der Kommissionierwagen war das häufigste Fördermittel zur Beförderung der Entnahmen. Zur Kommissionierführung wurde vornehmlich auf Papierlisten oder mobile Terminals gesetzt. Teilweise wurde auch eine Kombination aus beidem eingesetzt z. B., wenn die Kommissionierliste aus Etiketten bestand, die auf den Entnahmeeinheiten angebracht

werden mussten und die Quittierung digital realisiert wurde. Grundsätzlich trat es häufiger auf, dass verschiedene Varianten einer Technik innerhalb eines Systems genutzt wurden, u. a. bei den Ladehilfsmitteln und der Lagertechnik. Daher unterstreicht diese Häufigkeitsverteilung die Diversität der technischen Ausgestaltung von Kommissioniersystemen. Diese Vielfalt muss bei der Methodenentwicklung berücksichtigt werden.

Auch in organisatorischer Hinsicht unterschieden sich die Kommissioniersysteme voneinander. Um diese Unterschiede systematisch zu erfassen, wurden von den Studienteilnehmern Prozessschaubilder angefertigt. Zur Modellierung wurden Flussdiagramme oder BPMN (*Business Process Model Notation*) verwendet. Anschließend erfolgte ein Vergleich mit den idealisierten Prozessen, wie sie in der Literatur beschrieben werden. Bei diesem Vergleich wurde versucht den einzelnen realen Prozessschritten ein Prozessschritt aus dem idealisierten Prozess zuzuordnen. Die dabei gemachten Beobachtungen wurden dokumentiert, gruppiert und in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3. Übersicht der Unterschiede auf Prozessebene

Beobachtung	Prozess (Ideal)	Prozess (Real)	Beispiel(e)
Prozesse enthalten unterschiedlich viele Zyklen (Kreise) in der visuellen Darstellung	Zyklus pro Position und pro Auftrag (PzW) und pro Bereitstellungsstelleinheit (WzP)	1. Positionsweiser Zyklus kann entfallen 2. Zusätzlicher Zyklus durch Kontrolltätigkeiten	1. Entnahme ganzer Paletten 2. Korrektur von Fehlern
Es fallen verschiedene Zusatzaktivitäten an, d.h. Ergänzung des idealisierten Prozesses	Keine Berücksichtigung von Zusatzaktivitäten	Es fallen viele verschiedene Zusatzaktivitäten an, insb. Mehrwertdienste.	Etikettieren, Packmuster bilden, Verpacken, Entsorgen
Der Prozess unterscheidet sich in seiner Struktur und in den einzelnen Schritten	Alle Kernaufgaben sind jeweils in einem Schritt aufgeführt	1. Aufteilung o. Wegfallen von Prozessschritten 2. Dopplungen 3. Zusatzprozesse	1. Anstatt Quittieren, <i>Scan Item</i> u. <i>Scan Box</i> 2. Lesen 3. Nachschub

Im Wesentlichen fasst die Tabelle drei Beobachtungen zusammen, die sich an verschiedenen Beispielen verdeutlichen lassen. Zunächst fiel bereits an den Abfolgen der Prozessschritte auf, dass diese unterschiedlich viele Zyklen aufwiesen. Während der idealisierte Prozess Zyklen enthält, um positions-, auftrags- oder bereitstellungsweise Wiederholungen von Prozessschritten abzubilden,

fallen in realen Prozessen diese Zyklen teilweise weg oder es kommen neue hinzu. Beispielsweise kann eine prozessseitig vorgesehene Kontrolle (z. B. eine Mengeneingabe ins mobile Terminal) dazu führen, dass der Entnahmeprozess für eine Position wiederholt werden muss. Weiterhin wurden viele Zusatzaktivitäten beobachtet, die nicht Teil des idealisierten Kommissionierprozesses sind. In den meisten Fällen handelte es sich dabei um Mehrwertdienste, wie eine artikelweise Verpackung oder Etikettierung. Es fielen aber auch prozessimmanente Zusatzaktivitäten an, wie das Bilden von Packmustern oder von Anbrüchen vor der Entnahme. Zuletzt wurden Unterschiede bei den ausgeführten Prozessschritten beobachtet. Diese kamen zustande, weil einzelne Teile aus dem idealisierten Prozess auf mehrere Schritte im realen Prozess aufgeteilt wurden oder andererseits komplett entfielen. Vereinzelt wurde in realen Systemen der Kommissionierprozess unterbrochen, um einen Zusatzprozess (z. B. Nachschub oder Entsorgen von Verpackungsmaterial) zu realisieren.

Nach der Auswertung von Technik und Organisation, wurden die Messdaten näher betrachtet. Dabei ging es vor allem darum, charakteristische Muster und Merkmale in den Daten zu identifizieren (FF3). Diese Merkmale dienen der Unterscheidung verschiedener Aktivitäts- und Kontextklassen und bilden die Basis für eine Mustererkennung. Hierbei wurden zunächst Bewegungsdaten studiert. Dazu wurden mithilfe der Annotationsergebnisse typische Vertreter einer Aktivität aus den Messungen für eine isolierte Betrachtung extrahiert. Diese Daten wurden dann sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich graphisch dargestellt und analysiert (vgl. Abb. 6). Zur Überführung der Daten in den Frequenzbereich wurden die isolierten Daten mithilfe einer diskreten Fouriertransformation verarbeitet. Dabei kam eine Implementierung des FFT-Algorithmus (*Fast Fourier Transform*) zum Einsatz.

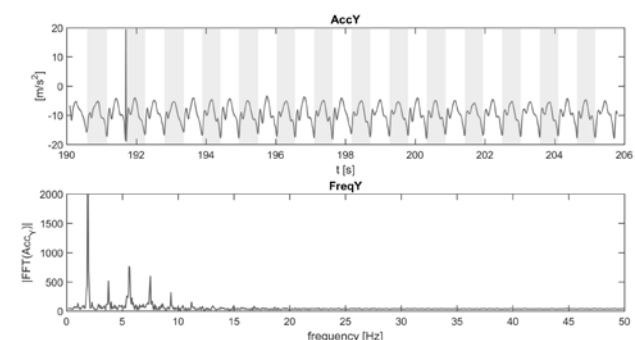


Abbildung 6. Beschleunigungen am Torso (Aktivität: WALK)

Der obere Ausschnitt in Abb. 6 zeigt Beschleunigungswerte am Torso in Y-Richtung (hoch/runter) während ein Kommissionierer eine Lagergasse entlang läuft. Die Daten zeigen im Zeitbereich ein regelmäßiges Muster. Im Verlauf der Beschleunigungen, sind die 29 Schritte deutlich zu erkennen, die der Kommissionierer während dieser Zeit zurückgelegt. Auch das Frequenzspektrum des Signals (zu sehen im unteren Ausschnitt) weist Muster auf.



So zeigen sich Extremwerte im Betrag der Fourierkoeffizienten bei 1,96, 3,78, 5,67, 7,49 und 9,38 Hz, wobei der Abstand zwischen diesen Frequenzen ungefähr der Schrittfrequenz von 1,87 Hz entspricht. Zum Vergleich wurden auch andere Arten der Fortbewegung wie Treppensteigen oder Fahren betrachtet (vgl. Abb. 7 und 8).

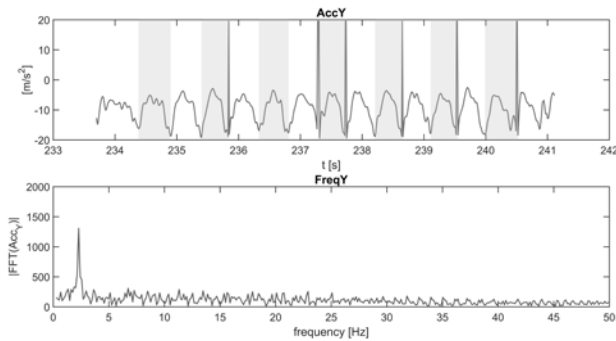


Abbildung 7. Beschleunigungen am Torso (Aktivität: STEP)

In Abb. 7 ist der zeitliche Verlauf der Beschleunigungswerte dargestellt, während der Kommissionierer eine Treppe herunterläuft. Wie man sieht, ergibt sich auch hier ein sehr charakteristisches Muster, das sich in Amplitude und Frequenz von dem Laufen auf der Ebene unterscheidet.

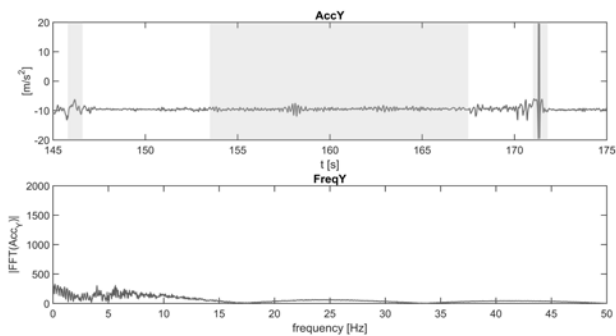


Abbildung 8. Beschleunigungen am Torso (Aktivität: DRIVE)

In Abb. 8 ist der zeitliche Verlauf der Beschleunigungswerte aufgetragen während der Kommissionierer in einem Flurförderzeug fährt (mittlere Markierung). Es ist zu sehen, dass die Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge zu markanteren Mustern führen als eine Fahrt mit gleichbleibender Geschwindigkeit. Sowohl der Einstiegs- als auch der Ausstiegsvorgang (vordere und hintere Markierung) sind deutlich zu erkennen. Im Frequenzspektrum zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Unterschied zwischen einer laufenden und einer fahrenden Fortbewegung, die zur Unterscheidung herangezogen werden kann. Auch Entnahmevorgänge führten zu Mustern in den Beschleunigungswerten am Handgelenk (vgl. Abb. 9).

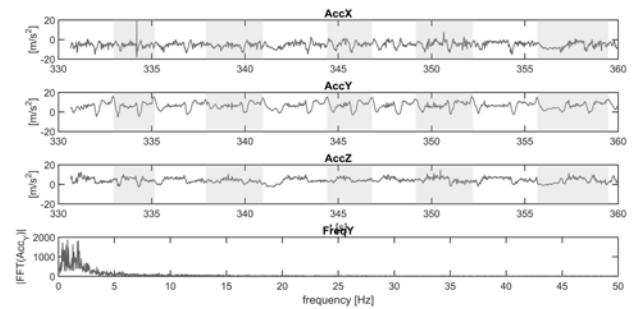


Abbildung 9. Beschleunigungen am Arm (Aktivität: PICK)

Die abgebildeten Sensordaten zeigen die Beschleunigungswerte am Handgelenk des linken Arms während einer Entnahme. Dabei griff der Kommissionierer zehn Mal in die Bereitstellung und legte die Greifeinheit direkt ab.

Auch in den Kontextdaten finden sich statistische Merkmale, die für die Mustererkennung geeignet sind. Während der Messung speicherte das Smartphone 21.228 RSSI-Werte innerhalb eines Palettenregallagers. Es wurden jeweils zwei verschiedene Anbringungsweisen für die Beacons (am Anfang und in der Mitte der Gasse) sowie zwei verschiedene Laufgeschwindigkeiten evaluiert. Anschließend wurde pro Datensatz eine Häufigkeitsanalyse der RSSI-Werte durchgeführt. Da sich beim RSSI-Wert vergleichsweise wenige Messungen über einen großen Wertebereich verteilen, wurden Gruppen gebildet. Da die Gruppenbildung abhängig von den jeweiligen Daten automatisch vom Auswertungsprogramm durchgeführt wurde, verfügen die erzeugten Histogramme über unterschiedlich viele Gruppen. Abbildung 10 zeigt zwei Histogramme, die im Zuge der Häufigkeitsanalyse entstanden sind. Als Grundlage diente die Feldstärke desselben Beacons aufgenommen an zwei verschiedenen Messpunkten im Lager.

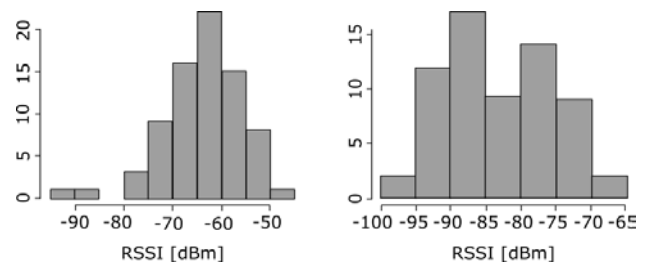


Abbildung 10. Histogramm unterschiedlicher Messpunkte (links = direkt davor, rechts = drei Gassen entfernt)

Die Häufigkeiten gleichen für geringe Distanzen einer schiefen Normalverteilung um einen hohen Signalstärkewert. Bei größerer Entfernung schwächt sich dieser Effekt ab und es ergibt sich ein gleichverteilteres Histogramm mit einer niedrigeren durchschnittlichen Empfangsstärke. Die Boxplots in Abb. 11 zeigen die Lage- und Streuungsparameter unterschiedlich weit entfernter Beacons. Die Länge der Whisker wurde durch den 1,5-fachen Interquartialabstand begrenzt und Ausreißer durch Kreise dargestellt.



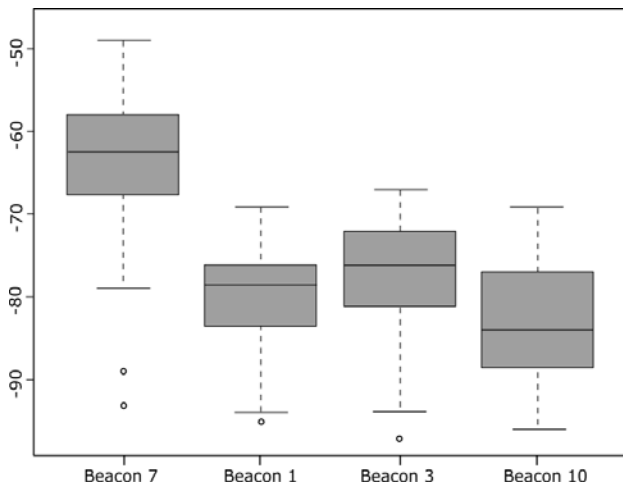


Abbildung 11. Boxplots von untersch. entfernter Beacons

Dabei stand der Kommissionierer bei der Messung unmittelbar vor *Beacon 7* während *Beacon 3* eine Gasse, *Beacon 1* zwei Gassen und *Beacon 10* drei Gassen weit entfernt waren. Die Auswertung der Streuungsparameter (Varianz und Standardabweichung) zeigt, dass diese zunehmen, je näher ein Kommissionierer sich vor einem *Beacon* befindet. Durch die breitere Streuung erscheint es nicht sinnvoll, eine Kontextererkennung auf Basis einzelner Signalwerte vorzunehmen. Stattdessen sollte mit Zeitfenstern von mindestens 500 ms gearbeitet werden, um aussagekräftigere Merkmale zu berechnen.

### 4.3 CHARAKTERISIERUNG DER KOMMISSIONIERUNG

Nach der Sichtung und Analyse der Messergebnisse wurde im nächsten Schritt eine Charakterisierung des Kommissionierprozesses durchgeführt, um die Hauptherausforderungen für die Methodenentwicklung zu identifizieren.

Dazu wurde zunächst die Gesamtheit der potenziell vorkommenden Klassen untersucht (Aktivitätstaxonomie), da die Anzahl der zu unterscheidenden Klassen eine wichtige Einflussgröße darstellt. Im Zuge dessen wurden alle Annotationen der Studienteilnehmer gruppenweise ausgewertet, die mit UNKNOWN gekennzeichneten Stellen im Video betrachtet und nach Bedarf neue Klassen für die Taxonomie definiert. Erst im Anschluss begann die nächste Gruppe mit der Annotation der Daten. Auf diese Weise hat sich die Aktivitätstaxonomie im Zeitverlauf stetig weiterentwickelt. Vor allem zu Beginn der Annotationsstudien war es notwendig, neue Klassen zu definieren, sodass die Anzahl der Unterklassen stark zunahm. Der ersten Gruppe stand lediglich eine Bibliothek mit 14 Klassen zur Verfügung. Die vierte Gruppe hatte mit 34 Klassen schließlich mehr als doppelt so viele Klassen bei der Annotation zur Auswahl. Diese vergleichsweise große Anzahl verschiedener Klassen ist notwendig, um der Diversität der Kommissionierung bzgl. Technik und Organisation gerecht zu werden. Die Entwicklung der Klassenanzahl ist in Abb. 12 dokumentiert.

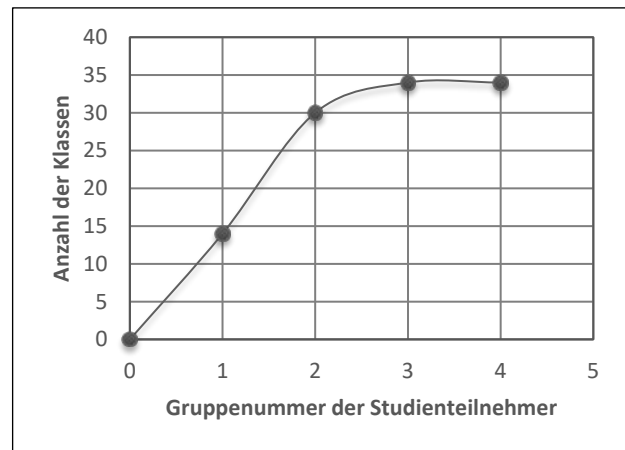


Abbildung 12. Entwicklung der Aktivitätstaxonomie

Ergänzt wurde die Aktivitätstaxonomie mithilfe einer Sammlung von Kommissionierprozessschritten, die von Ellinger definiert wurde [Ell15, S.84]. Nach einem Abgleich wurde die Taxonomie um die folgende 6 Aktivitäten erweitert: Verpackungsmaterial holen, Füllmaterial hinzufügen, Verpackungseinheit aufreißen, Konsolidieren, Sortieren, Kontrollieren und Drucken. So unterscheidet die Taxonomie schließlich 7 Ober- und 40 Unterklassen und stellt eine umfangreiche Sammlung zur Abbildung realer Kommissionierprozesse (FF1 u. FF2) dar.

Anschließend wurde untersucht, aus wie vielen Klassen sich ein Kommissionierprozess zusammensetzt (FF4). Die Auswertung der Aktivitätstabellen ergab, dass bei der Annotation eines einzelnen Systems im Schnitt 10,89 Klassen aus der Taxonomie benutzt wurden. Zudem wurde auch die Aktivitätsdichte innerhalb der Datensätze betrachtet. Die Aktivitätsdichte beschreibt die Anzahl der Aktivitäten, welche pro Zeiteinheit ausgeführt werden. Anhand der angefertigten Annotationen ließ sich eine durchschnittliche Aktivitätsdichte von 12 Aktivitäten pro Minute ermitteln. Weiterhin wiesen die Aktivitäten unterschiedliche Dauern auf. Beispielsweise benötigte ein Kommissionierer im Schnitt für die Fahrt zwischen zwei Entnahmen 28,1 Sekunden wogegen ein Fußweg (5,9 s) oder die Entnahme einer Position (3,4 s) deutlich kürzer waren (vgl. Tab. 4).

Tabelle 4. Auswahl der Dauer unterschiedlicher Aktivitäten

Aktivität	Dauer ( $\varnothing$ und $\sigma$ )	Instanzen	Systeme
DRIVE	28,1 ± 21,4 s	81	5
WALK	5,9 ± 6,6 s	180	11
PICK	8,2 ± 7,1 s	113	14
GRAP	3,4 ± 2,3 s	120	8
PLACE	2,3 ± 2,2 s	90	8

Die in der Tabelle aufgeführten Aktivitäten umfassen ausschließlich Fortbewegungs- und Entnahmeaktivitäten, wobei PICK bzw. GRAP und PLACE zwei verschiedene Varianten einer Entnahme darstellen. Bei einem PICK folgen Hinlangen und Ablegen direkt hintereinander, wogegen bei GRAP und PLACE der Entnahmeprozess durch eine andere Aktivität wie z. B. eine längere Fortbewegung oder einen Mehrwertdienst an der Greifeinheit wie Etikettieren unterbrochen wird.

Im nächsten Schritt wurden Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Kommissionierprinzipien PzW und WzP betrachtet (FF5). Eine Gemeinsamkeit bestand darin, dass die Aktivitätsanzahl pro Prozess annähernd gleich groß ausfiel (PzW: 10,2; WzP: 10,9 Aktivitäten). Es konnten jedoch auch Unterschiede der beiden Prinzipien beobachtet werden. Beispielsweise wird das PzW-Prinzip häufig durch einen Fortbewegungsanteil von 30 bis 50 Prozent charakterisiert [Mar09, S.396], da sich der Kommissionierer zur Ware begeben muss. Bei den betrachteten PzW-Systemen konnte diese Abschätzung bestätigt werden, da die Fortbewegung im Schnitt 47 Prozent der Gesamtprozesszeit ausmachte. Durch die Strecken, die ein Kommissionierer zurücklegen muss, ergibt sich zusätzlich eine geringere Aktivitätsdichte von ca. 10 Aktivitäten pro Minute. Im Gegensatz dazu war der Fortbewegungsanteil mit 15 Prozent bei WzP-Systemen deutlich geringer, da die zu kommissionierenden Waren mit einer Fördertechnik zum Kommissionierer transportiert wurden. Die reduzierte Fortbewegung schlug sich auch in einer höheren Aktivitätsdichte (bis zu 15 Aktivitäten pro Minute) nieder. Auch in der Häufigkeitsverteilung der Aktivitäten zeigten sich deutliche Unterschiede (vgl. Abb. 13). Während in den PzW-Systemen allein die Fortbewegungs- und Entnahmeaktivitäten ca. zwei Drittel der Gesamtprozesszeit ausmachten, lagen diese beiden Oberklassen in WzP-Systemen nur bei etwa einem Drittel des Prozesses. Bei WzP-Systemen überwiegen stattdessen Zusatzaktivitäten wie Hantieren mit Ladehilfsmitteln oder der Einsatz von Hilfsmitteln wie Messer, Stifte oder Terminals. Zudem zeigen die Diagramme deutlich, dass die Aktivitäten bei beiden Kommissionierprinzipien ungleichmäßig verteilt sind (FF6). Dies tritt bei HAR-Problemen häufiger auf (vgl. [BBS14]) und muss aus Sicht der Mustererkennung insbesondere bei der Erzeugung von Trainingsdatensätzen und auch bei der Evaluierung berücksichtigt werden, da ansonsten die Ergebnisse verfälscht werden können.

#### 4.4 EIGENSCHAFTEN DES ANNOTATIONSPROZESSES

Zuletzt wurden die Annotationen und der Annotationsprozess untersucht. Von Menschen annotierte Daten werden in HAR-Problemen häufig als sogenannte *Ground Truth*, *GT* herangezogen (vgl. [BBS14]). Darunter versteht man Faktenwissen über die korrekten Ergebnisse eines Klassifikationsproblems – also hier Wissen über die tatsächlichen Aktivitätsfolgen innerhalb eines Datensatzes.

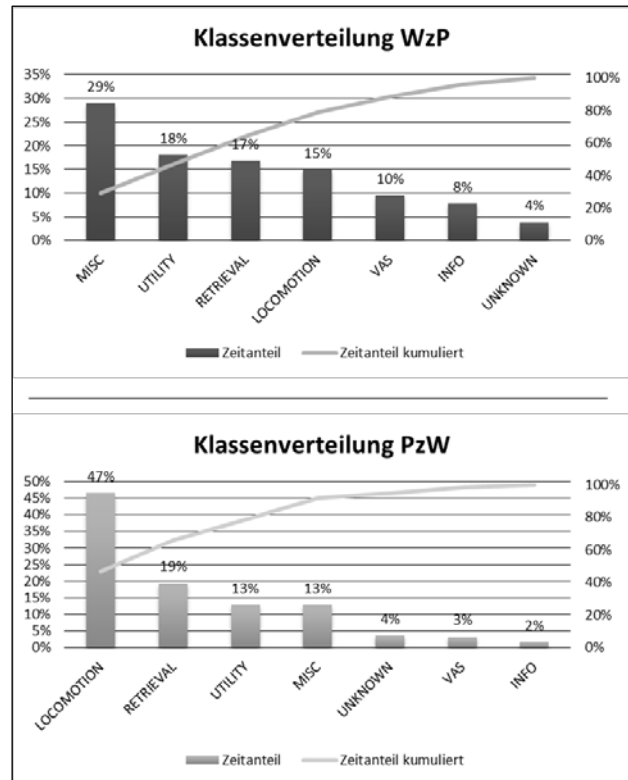


Abbildung 13. Vergleich der Häufigkeitsverteilungen für die beiden Kommissionierprinzipien PzW und WzP, wobei die linke Achse zu den Zeitanteilen (Balken) und die rechte Achse zu den kumulierten Zeitanteilen (Kurve) gehört.

Bei der Betrachtung des Annotationsprozesses ist auffällig, dass im Kommissionierprozess, im Gegensatz zu vielen Alltags- und Sportanwendungen, vergleichsweise viele Aktivitätsübergänge in kurzer Zeit stattfinden. Durchschnittlich sind es in einer 5 minütigen Aufnahme etwa 60 Übergänge. Bei jedem dieser Übergänge muss eine neue Aktivität aus der Taxonomie ausgewählt werden. Zusätzlich muss der Übergangzeitpunkt mithilfe einer Einzelbildbetrachtung gesucht werden. Erfolgen viele Übergänge direkt hintereinander, erhöht dies also den Annotationsaufwand erheblich. Allerdings verringert dies auch die Annotationsgenauigkeit. Umfangreiche Annotationsstudien haben gezeigt, dass insbesondere in den Übergangsbereichen verschiedene Formen von Annotationsfehlern auftreten, die letztlich zu ungenau gesetzten Aktivitätsintervallen führen [NCT14]. Diese Fehlerart wird auch als *Boundary Jitter* bezeichnet (vgl. Abb. 14a).

Die im Rahmen der Feldstudien entstandenen Videos wurden mithilfe von 30 Personen analysiert. Dieser Analyseprozess war sehr zeitaufwändig. Um eine Minute des Videos zu annotieren, wurden von den Teilnehmern im Schnitt 26 Minuten benötigt. Während der Analyse wurden die Videos mithilfe einer Videosoftware betrachtet und die Ergebnisse in Tabellenform festgehalten. Weiterhin wurden Prozessbeobachtungen und Angaben zum Prozess in einem separaten Protokollbogen dokumentiert.

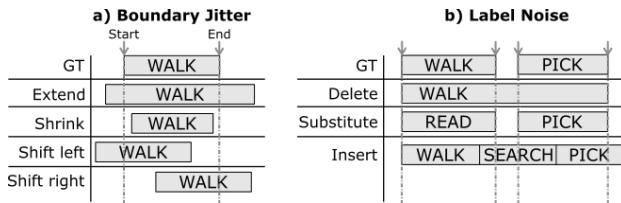


Abbildung 14. Annotationsfehler (frei nach [NCT14])

Um zu bestimmen, wie akkurat diese manuelle Aktivitätserkennung ist, wurden, wie bereits im Studienentwurf erwähnt, Kreuz- und Wiederholtests durchgeführt und ausgewertet (FF7). Für die Auswertung wurden Annotationen desselben Videos mithilfe eines Skripts paarweise miteinander verglichen. Insgesamt wurden 55 Annotationspaare betrachtet. Die dabei erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5. Ergebnisse der Kreuz- und Wiederholtests

Typ	Vergleiche	Übereinstimmungen
Kreuztests	32	74 % (± 11 %)
Wiederholtests	23	90 % (± 8 %)

Insbesondere die Ergebnisse der Kreuztests unterstreichen, dass die manuelle Auswertung von Prozessaufnahmen von Fehlern und subjektiven Eindrücken beeinflusst werden kann. Eine Analyse der Annotationspaare mit einer vergleichsweise geringen Übereinstimmung zeigte die folgenden Gründe für die zum Teil deutlichen Unterschiede von bis zu 50 Prozent: Zum einen wurden die Klassen nicht von allen Annotateuren für den vorgesehenen Zweck verwendet. So wurde bspw. die Klasse PICK durch einzelne Teilnehmer mit der Klasse GRAP verwechselt (s. Abb. 14b, Fehlerart: *Substitute*). PICK sollte per Definition nur für Greifvorgänge genutzt werden, bei denen die Ware direkt abgelegt wird. Sofern nach der Aufnahme noch andere Tätigkeiten ausgeführt werden, z. B. eine längere Fortbewegung zum Ablageort oder Zusatzdienste an der Entnahme, sollte die Klasse GRAP verwendet werden. Diese Unterscheidung wurde jedoch von einigen Teilnehmern nicht berücksichtigt. Zum anderen ergab die Analyse der Annotationen auch Abweichungen durch verschiedene Arten von Sorgfaltsfehlern. Viele dieser Fehler konnten mit einfachen Plausibilitätsprüfungen gefunden werden, da die Start- und Endzeitpunkte der Intervalle vertauscht waren oder benachbarte Intervalle sich überlappten. Ein weiterer Grund waren Lücken in den Annotationen (s. Abb. 14b, Fehlerart: *Delete*). Eine Lücke tritt auf, wenn die Endzeiten eines Zeitintervalls nicht mit dem Anfangswert des darauffolgenden Intervalls übereinstimmen, sodass letztlich Teilen des Videos keine Aktivität zugeordnet wird. Solche Lücken in der Annotation wurden vor der Auswertung der Klasse UNKNOWN zugeordnet.

Die größere Übereinstimmung der Wiederholtests ist vor allem dadurch zu erklären, dass die Annotationen von derselben Person erstellt wurden. Damit wird eine einheitlichere Anwendung der Aktivitätsklassen begünstigt. Außerdem wurden die Wiederholtests aus Systemen gewählt mit denen die Teilnehmer bereits aus anderen Datensätzen vertraut waren. Die häufigsten Gründe für die Abweichungen waren hier abweichende Intervallgrenzen derselben Aktivität (s. Abb. 14a, *Boundary Jitter*) und Einfügungen von zusätzlichen Aktivitäten (s. Abb. 14b, *Insert*). Die Einfügungen waren vor allem bei der Wiederholungsannotation zu beobachten. Tendenziell waren die Wiederholungen durch eine größere Detailhaftigkeit gekennzeichnet.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass von Menschen erstellte Annotationen im Falle der Kommissionierung nicht einer *Ground Truth* im eigentlichen Sinne entsprechen, da sie verschiedene Ungenauigkeiten enthalten können. Dies ist zum einen durch die Vielzahl potenziell auftretender Aktivitäten und zum anderen durch die hohe Aktivitätsdichte bedingt. Dementsprechend wäre ein erstrebenswertes Ziel für die Methodenentwicklung, eine mit der menschlichen Genauigkeit vergleichbare Erkennungsrate von etwa 90 Prozent zu erreichen.

#### 4.5 IMPLIKATIONEN FÜR DIE METHODENENTWICKLUNG

Die Ergebnisse der Feld- und Annotationsstudien bilden eine wertvolle Grundlage für die Methodenentwicklung. Die wichtigsten Erkenntnisse werden im folgenden Abschnitt dargestellt. Dabei werden zunächst die von methodischer Seite relevanten Eigenschaften des Kommissionierprozesses zusammengefasst und danach die sich daraus ergebenden Implikationen für die Methodenentwicklung beschrieben. Aus Sicht der menschlichen Aktivitätserkennung ist der Kommissionierprozess wie folgt charakterisiert:

- Technische und organisatorische Diversität
- Vergleichsweise große Aktivitätstaxonomie mit 7 Ober- und 40 Unterklassen (FF1, FF2)
- 11 Klassen pro Kommissionierprozess (FF4)
- Hohe Aktivitätsdichte, 12 Aktivitäten pro Minute
- Unterschiedliche Aktivitätsdauern und auch Streuung der Dauer innerhalb derselben Klasse
- Kommissionierprinzipien PzW und WzP unterscheiden sich in puncto Aktivitätsdichte und Häufigkeiten der ausgeführten Aktivitäten (FF5)
- Unausgeglichene Häufigkeitsverteilung bei den Aktivitäten (FF6)
- Aufwändige (ca. 26 Minuten pro Videominute) und durch schlechte Werkzeugunterstützung fehleranfällige Annotation der Daten (FF7)

Daraus ergeben sich die folgenden Implikationen für die Methodenentwicklung:

- Aktivitätsspezifische Auswahl von Klassifikationsmethoden. Beispielsweise *Template*-basierte Methoden für die Unterscheidungen von kurzen Armbewegungen und klassische HAR-Methoden für die Erkennung von längeren und dynamischeren Bewegungen wie Laufen oder Fahren.
- Den Unterschieden der beiden Kommissionierprinzipien PzW und WzP Rechnung tragen.
- Berücksichtigung der Varianz in den Aktivitätsdauern insb. bei der Wahl der Zeitfenstergrößen.
- Kontext, Prozesswissen und Zusatzsensorik als Hilfsmittel für den Umgang mit der Inter- und Intra-Klassenvariabilität.
- Berücksichtigung der ungleichen Klassenverteilung insb. beim Erstellen von Trainingsdatensätzen und bei der Evaluierung.
- Reduzierung des Annotationsaufwands und Erhöhung der Genauigkeit durch eine Werkzeugunterstützung. Nach der Entwicklung von überwachten Ansätzen könnten auch andere Ansätze des maschinellen Lernens eingesetzt werden (wie Teilüberwachtes oder aktives Lernen).

Aus Sicht der Methodenentwicklung bleibt also festzuhalten, dass sowohl die Bewegungs- als auch die Kontextdaten aus Kommissionierprozessen Muster enthalten, die als Ansatzpunkte für eine automatische Erkennung herangezogen werden können. Dazu müssen verschiedene spezifische Herausforderungen wie bspw. das große Aktivitätsspektrum berücksichtigt werden. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, bei der Methodenentwicklung zum einen auf Prozesswissen und zum anderen auf aktivitätsspezifische Ansätze der Mustererkennung zurückzugreifen.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dem vorliegenden Beitrag wird von Studien berichtet, die im Vorfeld einer Methodenentwicklung zur automatischen Aktivitäts- und Kontexterkenkung in der Kommissionierung durchgeführt wurden. Diese umfassen zum einen Feldstudien in 7 verschiedenen Unternehmen mit insgesamt 24 Kommissionierbereichen. Dabei wurde jeder Kommissionierbereich als eigenes System behandelt. Neben Bewegungsdaten wurden auch Kontextdaten in Form der Empfangsstärke von *Bluetooth*-Funkbeacons aufgenommen. Zur Datenerfassung dienten dedizierte IMUs am Torso und an den Handgelenken sowie ein mitgeführtes *Smartphone*. Zum anderen wurden Annotationsstudien durchgeführt, die neben Trainings- und Testdatensätzen auch Aufschluss über Genauigkeit und Aufwand der manuellen Analyse der Prozesse liefern sollten.

Als Leitlinie für die Auswertung der Studien wurden sieben Forschungsfragen aufgestellt. Im Rahmen der Auswertung wurden zunächst die Prozessbeobachtungen betrachtet. Dabei lag der Fokus vor allem auf dem Ablauf des Kommissionierprozesses und den verwendeten Hilfsmitteln. Anschließend wurden die Messdaten der verschiedenen Aktivitäten und Kontexte untersucht. Dabei wurden die Daten sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich betrachtet. Anschließend wurde auf Basis der Annotationsergebnisse eine Charakterisierung des Kommissionierprozesses erarbeitet. Die Charakterisierung umfasst neben einer Aktivitätstaxonomie auch Erkenntnisse über die Aktivitätsanzahl, die Aktivitätsdichte, die mittlere Länge und die Häufigkeitsverteilung der beobachteten Aktivitäten. Dabei wurde zwischen PzW- und WzP-Systemen differenziert. Bei der Auswertung der Annotationsstudien lag der Fokus auf dem Arbeitsaufwand und auf den festgestellten Fehlerarten. Abschließend wurden die wichtigsten Implikationen der Ergebnisse für die Methodenentwicklung herausgestellt.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus diesen Studien sollen als nächstes die Methodenentwicklung im Bereich der Aktivitäts- und Kontexterkenkung vorangetrieben werden. Das Ziel ist es, die speziellen Eigenschaften der Kommissionierung und auch die sich daraus ergebenden Anforderungen zu berücksichtigen.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [BBS14] Bulling, Andreas; Blanke, Ulf; Schiele, Bernd: *A tutorial on human activity recognition using body-worn inertial sensors*. In: *ACM Computing Surveys* 46 (2014), Nr. 3, S. 1–33. – DOI 10.1145/2499621
- [Ell15] Ellinger, Marita: *Beitrag zur agentenbasierten Konzeptplanung von Kommissioniersystemen*. Dortmund: Praxiswissen Service, 2015 (Logistik für die Praxis). – ISBN 978-3-86975-109-2
- [FMT<sup>+</sup>16] Feldhorst, Sascha; Masoudenijad, Mojtaba; ten Hompel, Michael; Fink, Gernot A.: *Motion Classification for Analyzing the Order Picking Process using Mobile Sensors : General Concepts, Case Studies and Empirical Evaluation*. In: *International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods*, 2016, S. 706–713
- [FtH15] Feldhorst, Sascha; ten Hompel, Michael: *Bewegungsklassifikation mithilfe mobiler Sensoren zur Analyse des Kommissionierprozesses: Motion Classification of the Order Picking Process using Mobile Sensors*. In: NOCHE, Bernd (Hrsg.): *Tagungsband zum 11. Fachkolloquium der WGTL*. Duisburg, 2015. – ISBN 978-3-00-050736-6

- [GFM<sup>+</sup>16] Grzeszick, Rene; Fink, Gernot A.; Mosblech, Christian; Feldhorst, Sascha; ten Hompel, Michael: Camera-assisted Pick-by-feel. In: WEHKING, Karl-Heinz (Hrsg.): *Tagungsband zum 12. Fachkolloquium der WGTL*, 2016
- [HSL09] Hartmann, Bastian; Schauer, Christoph; Link, Norbert: *Worker behavior interpretation for flexible production*. In: *World Academy of Science, Engineering and Technology* 58 (2009), S. 494–502.
- [KHS<sup>+</sup>13] Koskimäki, Heli; Huikari, Ville; Siirtola, Pekka; Röning, Juha: *Behavior modeling in industrial assembly lines using a wrist-worn inertial measurement unit*. In: *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 4 (2013), Nr. 2, S. 187–194.
- [LML<sup>+</sup>10] Lane, Nicholas D.; Miluzzo, Emiliano; Lu, Hong; Peebles, Daniel; Campbell, Andrew T.; Choudhury, Tanzeem: *A survey of mobile phone sensing*. In: *IEEE Communications Magazine* 48 (2010), Nr. 9, S. 140–150.
- [Mar09] Martin, Heinrich: *Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik ; mit 39 Tabellen*. 7., erweiterte und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2009 (Praxis). – ISBN 978-3-8348-0451-8
- [NCT14] Nguyen-Dinh, Long-Van; Calatroni, Alberto; Tröster, Gerhard: *Robust online gesture recognition with crowdsourced annotations*. In: *Journal of Machine Learning Research* 15 (2014), S. 3187–3220.
- [SRO<sup>+</sup>08] Stiefmeier, Thomas; Roggen, Daniel; Ogris, Georg; Lukowicz, Paul: *Wearable Activity Tracking in Car Manufacturing*. In: *Pervasive Computing, IEEE* 7 (2008), Nr. 2, S. 42–50.
- [Sti99] Stier, Winfried: *Empirische Forschungsmethoden: Mit 53 Tabellen*. 2., verb. Aufl. Berlin: Springer, 1999 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978-3-540-65295-3
- [WLT<sup>+</sup>06] Ward, Jamie A.; Lukowicz, Paul; Tröster, Gerhard; Starner, Thad E.: *Activity recognition of assembly tasks using body-worn microphones and accelerometers*. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 28 (2006), Nr. 10, S. 1553–1566.

**Dipl.-Inform. Sascha Feldhorst**, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen (FLW) der Fakultät Maschinenbau an der TU Dortmund.

**Sandra Aniol**, Studentin der Mathematik an der Ruhr-Universität Bochum.

**Prof. Dr. Michael ten Hompel**, Inhaber des Lehrstuhls für Förder- und Lagerwesen der TU Dortmund und geschäftsführender Leiter des Fraunhofer-Instituts für Materialfluss und Logistik IML und Leiter des Fraunhofer-Instituts für Software- und Systemtechnik ISST.

**Adresse:** Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, Technische Universität Dortmund, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44221 Dortmund, Deutschland  
Telefon: +49 231 755-4073, Fax: +49 231 755-4768  
E-Mail: sascha.feldhorst@tu-dortmund.de