

# **Analyse von Arbeitsabläufen mit 3D-Kameras**

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von  
Dipl.-Ing. oec. Martin Benter

aus  
Bad Saarow

2018

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödning

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Riedel

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Oktober 2018



## **Wissen schafft Innovation**

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Christian Nedeß

Anschrift:

Technische Universität Hamburg

Institut für Produktionsmanagement und -technik

Denickestraße 17

21073 Hamburg

Band 37:

Martin Benter

Analyse von Arbeitsabläufen mit 3D-Kameras

1. Auflage

Hamburg 2018

ISSN 1613-8244

Copyright Martin Benter 2018

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik der Technischen Universität Hamburg. An dieser Stelle möchte ich mich bei den Personen bedanken, die mir während dieser Zeit zur Seite standen.

Mein besonderer Dank gilt Professor Hermann Lödding für die fachliche und organisatorische Unterstützung, die zahlreichen fruchtbaren Diskussionen sowie das angenehme Arbeitsklima. Professor Ralph Riedel danke ich für die Erstellung des Zweitgutachtens und für sein Interesse an meiner Arbeit. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Professor Jochen Kreutzfeldt.

Ein großes Dankeschön gilt meinen Kollegen am Institut für die gemeinsame Zeit, die durch exzellente fachliche Zusammenarbeit und äußerst angenehme soziale Kontakte geprägt war. Hervorzuheben sind an dieser Stelle zunächst Florian Tietze und Thomas Czumanski, die die Grundsteine im Bereich Produktivitätsmanagement am Institut legten und so diese Arbeit erst ermöglichten. Fedor Titov danke ich insbesondere für die Organisation der zahlreichen sozialen Aktivitäten, die das Institutsleben auszeichneten. Weiterhin möchte ich Christoph Koch danken, der mich als langjähriger Büro- und Sportkollege regelmäßig unterstützte und mir oftmals die nötige Motivation gab, meine Ziele zu erreichen. Philipp Halata danke ich für die regelmäßigen Currywurst-Einheiten und für die wertvollen Hinweise auf den letzten Metern der Promotion.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen ehemaligen Studierenden, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten zum Forschungserfolg beigetragen haben. Insbesondere gilt mein Dank Regina Cheung und Rebecca Orth, die sich durch außergewöhnliches Engagement auszeichneten. Den kooperierenden Unternehmen danke ich für ihre Offenheit gegenüber der Themenstellung und die investierte Zeit.

Mein persönlicher Dank gilt meinen Freunden und Verwandten, die mich während der Promotionszeit begleitet haben. Besonders hervorheben möchte ich Barbara Möbius, die sich die Zeit nahm, die Arbeit intensiv Korrektur zu lesen. Meinen Eltern Gabriele und Jürgen Benter sowie meiner Schwester Julia Benter danke ich für die stete, hervorragende Unterstützung.

Hamburg, Oktober 2018

Martin Benter



<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Zielsetzung .....	2
1.3	Aufbau der Arbeit.....	3
<b>2</b>	<b>Grundlagen und bestehende Ansätze.....</b>	<b>5</b>
2.1	Arbeitsproduktivität .....	5
2.1.1	Definition Produktivität.....	5
2.1.2	Arbeitsformen .....	6
2.2	Methoden zur Erfassung von Ist-Zeiten .....	7
2.2.1	Überblick über die Methoden.....	7
2.2.2	Zeitaufnahmen.....	9
2.2.3	Multimomentverfahren.....	10
2.2.4	Defizite der Methoden.....	12
2.3	Methoden zur Bestimmung von Plan-Zeiten.....	13
2.3.1	Überblick über die Methoden.....	14
2.3.2	REFA-Systematik.....	15
2.3.3	MTM-1-Verfahren .....	16
2.3.4	Defizite der Methoden.....	21
2.4	Methoden zur Analyse der Produktivität.....	22
2.4.1	Bewertung der Wertschöpfung.....	23
2.4.2	Primär-Sekundär-Analyse .....	24
2.4.3	Defizite der Methoden.....	27
2.5	Bewegungserfassung mit 3D-Kameras .....	27
2.5.1	Verfahren der Bewegungserfassung.....	28
2.5.2	Bewegungserfassung mit der Microsoft Kinect .....	29
2.5.3	Methoden zur Analyse von Arbeitsabläufen mit 3D-Kameras.....	31
2.6	Fazit .....	33
2.6.1	Zusammenfassung des Forschungsdefizits.....	33
2.6.2	Anforderungen an die Analyse.....	34

<b>3</b>	<b>Erfassung von Ist-Zeiten</b>	<b>35</b>
3.1	Einteilung der Beobachtungszeit	35
3.1.1	Analysevarianten und Zustandsarten	35
3.1.2	Verarbeitung von Aufnahmezeitpunkten zu Zeitdaten	41
3.1.3	Strukturierung der Beobachtungszeit	43
3.2	Versuchsbeschreibung für die Analysearten	45
3.3	Datenaufnahme und -vorbereitung	46
3.3.1	Datenerfassung	46
3.3.2	Datenaufbereitung	48
3.3.3	Datenbereinigung	50
3.3.3.1	Kennzahlen der Erfassungsgüte	51
3.3.3.2	Identifizierung von Fehlern der erfassten Daten	53
3.3.3.3	Möglichkeiten zur Erhöhung der Datenqualität	55
3.4	Zustandserkennung	56
3.4.1	Berechnungsgrößen	57
3.4.2	Allgemeines Vorgehen für die Erkennung von Zuständen	60
3.4.3	Zustandserkennung für die Analysearten	64
3.4.3.1	Einfache Analyse von Körperbewegungen	64
3.4.3.2	Differenzierte Analyse von Körperbewegungen	65
3.4.3.3	Einfache Analyse von Armbewegungen	73
3.4.3.4	Differenzierte Analyse von Armbewegungen	74
3.4.4	Alternative Vorgehen zur Zustandserkennung	77
3.4.5	Manuelle Korrektur und Ergebnisdarstellung	78
3.5	Zusammenfassung gleichartiger Zustände	80
3.5.1	Vorgehen	80
3.5.2	Clustering markanter Positionen	81
3.5.3	Manuelle Korrektur	82
3.6	Ermittlung von Abläufen	83
3.7	Berechnung und Aggregation von Zustandsdaten	86

<b>4</b>	<b>Bestimmung von Plan-Zeiten</b>	<b>91</b>
4.1	Anforderungen an die Plan-Zeitbestimmung	91
4.2	Teilautomatisierung des MTM-1-Verfahrens	92
4.3	Vereinfachung des MTM-1-Verfahrens	97
4.4	Ableitung von Plan-Zeiten aus den Ist-Zeiten	99
4.5	Bewertung der Varianten	100
<b>5</b>	<b>Analyse der Produktivität (Aufwandsartenanalyse)</b>	<b>105</b>
5.1	Definition der Zeitanteile	105
5.2	Bestimmung der Zeitanteile	106
5.2.1	Bestimmung des Tertiäraufwands	106
5.2.2	Bestimmung des Geschwindigkeitsverlusts	108
5.2.3	Bestimmung von Sekundär- und Primäraufwand	110
5.3	Auswertung	115
5.3.1	Auswertung einer Zustandsgruppe	115
5.3.2	Auswertung eines Ablaufs	118
5.3.3	Auswertung der Erfassungszeit	122
5.4	Ableitung von Verbesserungsansätzen	129
<b>6</b>	<b>Evaluation</b>	<b>133</b>
6.1	Erfassungsgüte der Kinect	133
6.2	Anwendungsbeispiele	134
6.2.1	Differenzierte Analyse von Körperbewegungen (Laborumgebung)	134
6.2.2	Einfache Analyse von Körperbewegungen (Industrieumgebung)	139
6.2.3	Differenzierte Analyse von Armbewegungen (Laborumgebung)	144
6.3	Bewertung der Methode	150
<b>7</b>	<b>Schlussbetrachtung</b>	<b>155</b>
7.1	Zusammenfassung	155
7.2	Ausblick	156

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 2-1	Möglichkeiten zur Erfassung der Arbeitszeit.....	7
Abbildung 2-2	Funktionsweise des Multimoment-Häufigkeitsverfahren (MMH).....	11
Abbildung 2-3	Funktionsweise des Multimoment-Zeitmessverfahren (MMZ) .....	12
Abbildung 2-4	Aufwand und Aussagekraft von Methoden zur Erfassung von Ist-Zeiten.....	13
Abbildung 2-5	Ablaufarten für den Menschen nach REFA .....	15
Abbildung 2-6	Ableitung von Plan-Zeiten mit den Ablaufarten .....	16
Abbildung 2-7	Übersicht der MTM-Verfahren .....	16
Abbildung 2-8	Grundbewegungen bei MTM-1 .....	17
Abbildung 2-9	MTM-1-Grundzyklus.....	18
Abbildung 2-10	Zeiteinflussgröße Bewegungslänge beim Hinlangen .....	18
Abbildung 2-11	Zeiteinflussgröße Bewegungsverlauf beim Hinlangen .....	20
Abbildung 2-12	Kodierungsbeispiel für die MTM-1-Bewegung Hinlangen .....	20
Abbildung 2-13	Aufwand und Aussagekraft von Methoden zur Bestimmung von Plan-Zeiten .....	22
Abbildung 2-15	Vektorielle Darstellung von Primär- und Sekundäraufwänden nach Lotter.....	25
Abbildung 2-16	Verfahren der Bewegungserfassung.....	28
Abbildung 2-17	Frontansicht und relevante Bestandteile der Kinect.....	29
Abbildung 2-18	Durch die Kinect erfasste Punkte am menschlichen Körper.....	30
Abbildung 3-1	Einteilung der Zustandsarten bei der Analyse von Körperbewegungen .....	40
Abbildung 3-2	Einteilung der Zustandsarten bei der Analyse von Armbewegungen.....	41
Abbildung 3-3	Ermittlung von Zeitdauern .....	42
Abbildung 3-4	Strukturierung der Beobachtungszeit.....	44
Abbildung 3-5	Versuchsaufbau für die Analyse von Körperbewegungen.....	45
Abbildung 3-6	Versuchsaufbau für die Analyse von Armbewegungen.....	46
Abbildung 3-7	Struktur der aufgenommenen Daten .....	47
Abbildung 3-8	Aufnahmeansicht des Software-Demonstrators .....	47
Abbildung 3-9	Neigung der Kinect zur vollständigen Erfassung der Armbewegungen .....	48
Abbildung 3-10	Aufgenommene Koordinaten der Handgelenke.....	49
Abbildung 3-11	Ansicht zur Koordinatentransformation des Software-Demonstrators .....	49
Abbildung 3-12	Identifizierungsrate und -qualität von Fehlern .....	52
Abbildung 3-13	Ansicht des Software-Demonstrators zur Datenbereinigung .....	54
Abbildung 3-14	Aussortierte Daten nach der Fehleridentifizierung .....	55
Abbildung 3-15	Grundprinzip der Zustandserkennung.....	61
Abbildung 3-16	Vorgehen zur Identifizierung von Zuständen am Beispiel ‚Gehen‘ .....	62
Abbildung 3-17	Idealisierter und erfasster Verlauf der Schultergeschwindigkeit .....	63
Abbildung 3-18	Identifizierung von Körperbewegungen .....	65
Abbildung 3-19	Identifizierung der Neigungsbewegungen .....	66
Abbildung 3-20	Unterscheidung der Neigungsbewegungen.....	67
Abbildung 3-21	Identifizierung der Laufbewegungen .....	68
Abbildung 3-22	Unterscheidung der Laufbewegungen .....	69

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 3-23	Identifizierung der Drehbewegungen .....	70
Abbildung 3-24	Überschneidung von Dreh- und Neigungsbewegungen .....	72
Abbildung 3-25	Überschneidung von Lauf- und Neigungsbewegungen.....	72
Abbildung 3-26	Überschneidung von Lauf- und Drehbewegungen.....	73
Abbildung 3-27	Identifizierung der Armbewegungen (einfache Analyse).....	73
Abbildung 3-28	Identifizierung der Armbewegungen (differenzierte Analyse) .....	75
Abbildung 3-29	Verlauf von Montageabläufen in Anlehnung an den MTM-1-Grundzyklus.....	76
Abbildung 3-30	Darstellung der erkannten Zustandsarten .....	79
Abbildung 3-31	Ergebnis der Clusterung .....	82
Abbildung 3-32	Zustandsgruppen des rechten Arms.....	83
Abbildung 3-33	Ergebnis der Ranganalyse .....	85
Abbildung 3-34	Ermittelter Ablauf.....	86
Abbildung 3-35	Bestimmung der Bewegungslänge .....	87
Abbildung 4-1	Erkannte MTM-1-Grundbewegungen (Körperbewegungen) .....	93
Abbildung 4-2	Erkannte MTM-1-Grundbewegungen (Armbewegungen).....	94
Abbildung 4-3	Verteilung der erfassten Ist-Zeiten einer Armbewegung .....	100
Abbildung 5-1	Tertiäre Zustandsgruppen einer Beobachtung .....	108
Abbildung 5-2	Bestimmung der Mindestbewegungslänge in Anlehnung an die klassische PSA .....	111
Abbildung 5-3	Darstellung sinnvoller Bewegungsräume.....	113
Abbildung 5-4	Boxplots zur Darstellung von Zustandsdaten.....	116
Abbildung 5-5	Kombinierte Darstellung von Bewegungslängen und -dauern .....	117
Abbildung 5-6	Aufwandsarten in der Darstellung von Bewegungslängen und -dauern .....	117
Abbildung 5-7	Darstellung der Aufwandsarten für einen Ablauf.....	119
Abbildung 5-8	Vektordarstellung der Aufwände .....	120
Abbildung 5-9	Vektordarstellung der summierten Aufwände .....	121
Abbildung 5-10	Blockdarstellung eines Standardablaufs.....	122
Abbildung 5-11	Häufigkeit und kumulierte Häufigkeit der Zustandsgruppen .....	123
Abbildung 5-12	Häufigkeit der Nutzung unterschiedlicher Orte.....	124
Abbildung 5-13	Verteilung der Zustandsgruppen.....	125
Abbildung 5-14	Verteilung der Aufwandsarten .....	125
Abbildung 5-15	Häufigkeits-Aufwands-Matrix .....	126
Abbildung 5-16	Zurückgelegte Strecken zwischen den Arbeitsstationen.....	127
Abbildung 5-17	Verweildauern an den Arbeitsstationen .....	128
Abbildung 5-18	Verteilung der Zustandsarten für beide Arme.....	128
Abbildung 5-19	Verteilung der Aufwandsarten für beide Arme .....	129
Abbildung 6-1	Aufbau des Arbeitsplatzes (Anwendungsbeispiel 1).....	135
Abbildung 6-2	Vektordarstellung des ermittelten Ablaufs (Anwendungsbeispiel 1).....	137
Abbildung 6-3	Strecken zwischen den Arbeitsstationen (Anwendungsbeispiel 1).....	137
Abbildung 6-4	Verweildauern an den Arbeitsstationen (Anwendungsbeispiel 1) .....	138

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 6-5	Aufbau des Arbeitsplatzes (Anwendungsbeispiel 2).....	139
Abbildung 6-6	Vektordarstellung des ermittelten Ablaufs (Anwendungsbeispiel 2) .....	141
Abbildung 6-7	Strecken zwischen den Arbeitsbereichen (Anwendungsbeispiel 2).....	142
Abbildung 6-8	Verweildauern in den Arbeitsbereichen (Anwendungsbeispiel 2).....	142
Abbildung 6-9	Häufigkeits-Aufwands-Matrix (Anwendungsbeispiel 2).....	143
Abbildung 6-10	Aufbau des Arbeitsplatzes (Anwendungsbeispiel 3).....	144
Abbildung 6-11	Verteilung der Aufwandsarten (Anwendungsbeispiel 3).....	147
Abbildung 6-12	Vektordarstellung der Aufwände, linker Arm (Anwendungsbeispiel 3) .....	148
Abbildung 6-13	Vektordarstellung der Aufwände, rechter Arm (Anwendungsbeispiel 3).....	149
Abbildung 6-14	Verteilung der Zustandsarten (Anwendungsbeispiel 3) .....	149

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 2-1	Formen menschlicher Arbeit.....	6
Tabelle 2-2	Zeiteinflussgröße Bewegungsfall beim Hinlangen .....	19
Tabelle 2-3	Ausschnitt der Normzeittabelle für die Bewegung Hinlangen.....	21
Tabelle 2-4	Defizite der Methoden zur Analyse der Produktivität.....	27
Tabelle 2-5	Gegenüberstellung der Versionen der Microsoft Kinect .....	29
Tabelle 3-1	Gelenkpunkte und ihre Erfassungsgraten.....	37
Tabelle 3-2	Analysevarianten und dafür erforderliche (erfasste) Körperteile .....	38
Tabelle 3-3	Gelenkpunkte mit transformierten Koordinaten und Tracking-Status .....	50
Tabelle 3-4	Erfassungsrates und -qualität zur Auswahl einer Analyseart.....	55
Tabelle 3-5	Zustandserkennung bei der einfachen Analyse von Körperbewegungen.....	65
Tabelle 3-6	Zustandserkennung bei der differenzierten Analyse von Körperbewegungen .....	71
Tabelle 3-7	Zustandserkennung bei der einfachen Analyse von Armbewegungen .....	74
Tabelle 3-8	Zustandserkennung bei der differenzierten Analyse von Armbewegungen .....	77
Tabelle 3-9	Erkannte Zustände im Beobachtungsablauf.....	79
Tabelle 3-10	Zusammengefasste Zustandsgruppen im Beobachtungsverlauf.....	83
Tabelle 3-11	Zustandsgruppen und ihre Häufigkeit.....	84
Tabelle 3-12	Ablaufschritte mit Zustandsdaten .....	89
Tabelle 4-1	Ableitbare Zeiteinflussgrößen der MTM-1-Körperbewegungen .....	96
Tabelle 4-2	Ableitbare Zeiteinflussgrößen des MTM-1-Grundzyklus.....	97
Tabelle 4-3	Ansätze zur Annahme von Zeiteinflussgrößen.....	99
Tabelle 4-4	Varianten der Plan-Zeitbestimmung.....	101
Tabelle 4-5	Erfasste Ist-Zeiten und bestimmte Plan-Zeiten für einen Ablauf .....	102
Tabelle 5-1	Ablaufschritte im Standardablauf mit Geschwindigkeitsverlusten .....	110
Tabelle 5-2	Bestimmung des Primäraufwands von Bewegungen .....	114
Tabelle 5-3	Aufwandsarten für einen Ablauf.....	115
Tabelle 6-1	Erfassungsrates für unterschiedliche Szenarien.....	134
Tabelle 6-2	Ergebnis der Ermittlung von Ist- und Plan-Zeiten (Anwendungsbeispiel 1) .....	135
Tabelle 6-3	Ergebnis der Ermittlung von Ist- und Plan-Zeiten (Anwendungsbeispiel 2) .....	140
Tabelle 6-4	Ergebnis der Ermittlung von Ist- und Plan-Zeiten, linker Arm (Anwendungsbeispiel 3) .....	145
Tabelle 6-5	Ergebnis der Ermittlung von Ist- und Plan-Zeiten, rechter Arm (Anwendungsbeispiel 3) ....	146
Tabelle 6-6	Aufwände der Teilschritte der Methodik .....	152

## Verzeichnis der Abkürzungen

---

IHP	integrale handlungsorientierte Produktivitätsanalyse
MEK	MTM in der Einzel- und Kleinserienfertigung
MMH	Multimoment-Häufigkeitsverfahren
MMZ	Multimoment-Zeitmessverfahren
MTM	Methods-Time Measurement
GV	Geschwindigkeitsverlust
OWAS	Ovako Working posture Analysis
PA	Primäraufwand
PSA	Primär-Sekundär-Analyse
PST	Prozessstudientabelle
RZA	reduzierte Zeitaufnahmen
RULA	Rapid Upper Limb Assessment
SA	Sekundäraufwand
SDK	Software Development Kit
TA	Tertiäraufwand
TMU	Time Measurement Unit
UAS	Universelles Analysiersystem

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

### Produktivität

$P_A$	: Arbeitsproduktivität [Stk./h]
$AB_{Ist}$	: Ist-Abgang [Stk.]
$Z_{bez}$	: bezahlte Arbeitszeit [h]
$WA$	: Wertschöpfungsanteil [-]
$ZW$	: wertschöpfende Arbeitszeit [h]
$ZNW$	: nicht-wertschöpfende Arbeitszeit [h]
$W$	: Wirkungsgrad [-]
$ZPA$	: Zeitdauer des Primäraufwands [s]
$ZSA$	: Zeitdauer des Sekundäraufwands [s]
$\phi$	: Anstieg des Gesamtvektors [-]

### Einteilung der Beobachtungszeit und Datenqualität

$Z_{Beo}$	: Beobachtungszeit [min]
$Z_{E,kum}$	: kumulierte Dauer erfasster Abläufe [min]
$Z_{NE,kum}$	: kumulierte Dauer nicht erfasster Abläufe [min]
$Z_{KE,kum}$	: kumulierte Dauer korrekt erfasster Abläufe [min]
$Z_{FE,kum}$	: kumulierte Dauer falsch erfasster Abläufe [min]
$Z_{St,kum}$	: kumulierte Dauer Stillstand [min]
$Z_{Bew,kum}$	: kumulierte Dauer Bewegung [min]
$AA_{Beo}$	: Anzahl Aufnahmen im Beobachtungszeitraum [-]
$AA_{E,GP}$	: Anzahl Aufnahmen mit erfasstem Gelenkpunkt GP [-]
$AA_{NE,GP}$	: Anzahl Aufnahmen mit nicht erfasstem Gelenkpunkt GP [-]
$AA_{KE,GP}$	: Anzahl Aufnahmen mit korrekt erfasstem Gelenkpunkt GP [-]
$AA_{FE,GP}$	: Anzahl Aufnahmen mit falsch erfasstem Gelenkpunkt GP [-]
$AA_{E,An}$	: Anzahl Aufnahmen mit erfassten erforderlichen Gelenkpunkten für Analyse An [-]
$AA_{NE,An}$	: Anzahl Aufnahmen mit nicht erfassten erforderlichen Gelenkpunkten für Analyse An [-]
$AA_{KE,An}$	: Anzahl Aufnahmen mit korrekt erfassten erforderlichen Gelenkpunkten für Analyse An [-]
$AA_{FE,An}$	: Anzahl Aufnahmen mit falsch erfassten erforderlichen Gelenkpunkten für Analyse An [-]
$ER$	: Erfassungsrate [-]
$ER_{GP}$	: Erfassungsrate von Gelenkpunkt GP [-]
$ER_{An}$	: Erfassungsrate der erforderlichen Gelenkpunkte für Analyse An [-]
$EQ$	: Erfassungsqualität [-]
$EQ_{GP}$	: Erfassungsqualität von Gelenkpunkt GP [-]
$EQ_{An}$	: Erfassungsqualität der erforderlichen Gelenkpunkte für Analyse An [-]
$AA_{FM,GP}$	: Anzahl Aufnahmen mit fehlerhaft markiertem Gelenkpunkt GP [-]
$AA_{KFM,GP}$	: Anzahl Aufnahmen mit korrekt als fehlerhaft markiertem Gelenkpunkt GP [-]
$IR_{GP}$	: Identifikationsrate für Gelenkpunkt GP [-]
$IQ_{GP}$	: Identifikationsqualität für Gelenkpunkt GP [-]

### Berechnungsgrößen für die Zustandsableitung

$T_a$	: Zeitpunkt von Aufnahme $a$ [s]
$\Delta T_a$	: Zeitdauer zwischen Aufnahme $a-1$ und Aufnahme $a$ [s]
$x_{GP,a}$	: $x$ -Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme $a$ [m]
$y_{GP,a}$	: $y$ -Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme $a$ [m]
$z_{GP,a}$	: $z$ -Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme $a$ [m]
$ab_{GP1,GP2,a}$	: Abstand zwischen Gelenkpunkten GP1 und GP2 bei Aufnahme $a$ [m]
$\Delta ab_{GP1,GP2,a,b}$	: Abstandsänderung zwischen Gelenkpunkten GP1 und GP2 von Aufnahme $a$ zu Aufnahme $b$ [m]
$d_{GP,a,b}$	: Distanz von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme $a$ zu Aufnahme $b$ [m]
$d_{h,GP,a,b}$	: horizontale Distanz von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme $a$ zu Aufnahme $b$ [m]
$d_{v,GP,a,b}$	: vertikale Distanz von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme $a$ zu Aufnahme $b$ [m]
$v_{GP,a}$	: Geschwindigkeit von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme $a$ [m/s]
$v_{h,GP,a}$	: horizontale Geschwindigkeit von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme $a$ [m/s]
$v_{v,GP,a}$	: vertikale Geschwindigkeit von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme $a$ [m/s]
$V_{GP1,GP2,a}$	: Vektor von Gelenkpunkt GP1 zu Gelenkpunkt GP2 bei Aufnahme $a$ [m]
$V_{GP,a,b}$	: Vektor von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme $a$ zu Aufnahme $b$ [m]
$x_{V1,a}$	: $x$ -Betrag von Vektor $V1$ bei Aufnahme $a$ [m]
$y_{V1,a}$	: $y$ -Betrag von Vektor $V1$ bei Aufnahme $a$ [m]
$z_{V1,a}$	: $z$ -Betrag von Vektor $V1$ bei Aufnahme $a$ [m]
$V_x$	: Vektor der $x$ -Koordinatenachse [m]
$V_z$	: Vektor der $z$ -Koordinatenachse [m]
$\alpha_{V1,V2,a}$	: Winkel zwischen Vektoren $V1$ und $V2$ bei Aufnahme $a$ [°]
$\alpha_{h,V1,a}$	: Winkel von Vektor $V1$ in horizontaler Ebene bei Aufnahme $a$ [°]
$\alpha_{v,V1,a}$	: Winkel zwischen Vektor $V1$ und vertikaler Achse bei Aufnahme $a$ [°]
$\Delta\alpha_{V1,V2,a,b}$	: Winkeländerung zwischen Vektoren $V1$ und $V2$ von Aufnahme $a$ zu Aufnahme $b$ [°]
$\Delta\alpha_{h,V1,a,b}$	: Winkeländerung von Vektor $V1$ in horizontaler Ebene von Aufnahme $a$ zu Aufnahme $b$ [°]
$\Delta\alpha_{v,V1,a,b}$	: Winkeländerung zwischen Vektor $V1$ und vertikaler Achse von Aufnahme $a$ zu Aufnahme $b$ [°]
$\omega_{V1,V2,a}$	: Winkelgeschwindigkeit zwischen Vektoren $V1$ und $V2$ bei Aufnahme $a$ [°]
$\omega_{h,V1,a}$	: Winkelgeschwindigkeit von Vektor $V1$ in horizontaler Ebene bei Aufnahme $a$ [°]
$\omega_{v,V1,a}$	: Winkelgeschwindigkeit zwischen Vektor $V1$ und vertikaler Achse bei Aufnahme $a$ [°]

### Ermittelte Zustandsgrößen

$k$	: Nummer des Zustands während der Beobachtungszeit [-]
$A$	: Nummer der Anfangsaufnahme von Zustand $k$ [-]
$E$	: Nummer der Endaufnahme von Zustand $k$ [-]
$T_{k,A}$	: Zeitpunkt der Anfangsaufnahme von Zustand $k$ [s]
$T_{k,E}$	: Zeitpunkt der Endaufnahme von Zustand $k$ [s]
$x_{GP,k,m}$	: Mittelwert der $x$ -Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Zustand $k$ [m]
$y_{GP,k,m}$	: Mittelwert der $y$ -Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Zustand $k$ [m]
$z_{GP,k,m}$	: Mittelwert der $z$ -Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Zustand $k$ [m]
$Z_k$	: Zeitdauer von Zustand $k$ [s]
$D_k$	: Bewegungsdistanz von Zustand $k$ [m]
$L_k$	: Bewegungslänge von Zustand $k$ [m]

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$i$	: Zustandsart [-]
$j$	: Nummer des Auftretens von Zustandsart $i$ [-]
$J_i$	: Anzahl erfasster Zustände von Zustandsart $i$ [-]
$Z_{i,j}$	: Zeitdauer des $j$ -ten Auftretens von Zustandsart $i$ [s]
$L_{i,j}$	: Bewegungslänge des $j$ -ten Auftretens von Zustandsart $i$ [m]
$Z_{i,m}$	: mittlere Zeitdauer von Zustandsart $i$ [s]
$L_{i,m}$	: mittlere Bewegungslänge von Zustandsart $i$ [m]
$g$	: Zustandsgruppe [-]
$h$	: Nummer des Auftretens von Zustandsgruppe $g$ [-]
$H_g$	: Anzahl erfasster Zustände von Zustandsgruppe $g$ [-]
$Z_{g,h}$	: Zeitdauer des $h$ -ten Auftretens von Zustandsgruppe $g$ [s]
$L_{g,h}$	: Bewegungslänge des $h$ -ten Auftretens von Zustandsgruppe $g$ [m]
$Z_{g,m}$	: mittlere Zeitdauer von Zustandsgruppe $g$ [s]
$D_{g,m}$	: mittlere Bewegungsdistanz von Zustandsgruppe $g$ [s]
$L_{g,m}$	: mittlere Bewegungslänge von Zustandsgruppe $g$ [m]
$Z_{g,Plan}$	: Plan-Zeitdauer von Zustandsgruppe $g$ [s]
$Z_{g,Soll}$	: Soll-Zeitdauer von Zustandsgruppe $g$ [s]
$Z_{Ablauf}$	: Zeitdauer des Ablaufs [s]
$Z_{Ablauf,Plan}$	: Plan-Zeitdauer des Ablaufs [s]
$Z_{Ablauf,Soll}$	: Soll-Zeitdauer des Ablaufs [s]

## Aufwandsartenanalyse

$Z_{g,h,GV}$	: Geschwindigkeitsverlust des $h$ -ten Auftretens von Zustandsgruppe $g$ [s]
$Z_{g,PA}$	: Primäraufwand von Zustandsgruppe $g$ [s]
$Z_{g,SA}$	: Sekundäraufwand von Zustandsgruppe $g$ [s]
$Z_{g,GV,m}$	: mittlerer Geschwindigkeitsverlust von Zustandsgruppe $g$ [s]
$G_{rel,g,h}$	: relative Geschwindigkeit des $h$ -ten Auftretens von Zustandsgruppe $g$ [-]
$G_{rel,g}$	: relative Geschwindigkeit von Zustandsgruppe $g$ [-]
$Z_{PA,Ablauf}$	: Primäraufwand des Ablaufs [s]
$Z_{SA,Ablauf}$	: Sekundäraufwand des Ablaufs [s]
$Z_{GV,Ablauf}$	: Geschwindigkeitsverlust des Ablaufs [s]
$G_{rel,Ablauf}$	: relative Geschwindigkeit des Ablaufs [-]
$Z_{PA,Ges}$	: Gesamtprimäraufwand [min]
$Z_{SA,Ges}$	: Gesamtsekundäraufwand [min]
$Z_{GV,Ges}$	: Gesamtgeschwindigkeitsverlust [min]
$Z_{TA,Ges}$	: Gesamttertiäraufwand [min]
$ZA_{PA}$	: Anteil des Primäraufwandes an der Erfassungszeit [-]
$ZA_{SA}$	: Anteil des Sekundäraufwandes an der Erfassungszeit [-]
$ZA_{GV}$	: Anteil des Geschwindigkeitsverlustes an der Erfassungszeit [-]
$ZA_{TA}$	: Anteil des Tertiäraufwandes an der Erfassungszeit [-]
$W_{Ablauf}$	: Wirkungsgrad des Ablaufs [-]
$W_{Erf}$	: Wirkungsgrad des Erfassungszeitraums [-]



# 1 Einleitung

In der Einleitung beschreibt Abschnitt 1.1 zunächst die Problemstellung. Anschließend stellt Abschnitt 1.2 die Ziele der Arbeit vor und Abschnitt 1.3 zeigt die resultierende Struktur.

## 1.1 Problemstellung

Die Fertigungskosten sind ein entscheidender Wettbewerbsfaktor für produzierende Unternehmen. Ein wichtiger Teil dieser Kosten sind die Personalkosten, insbesondere bei hohen Lohnkosten und bei einem hohen Anteil an manuellen Tätigkeiten in der Produktion. Trotz der fortschreitenden Automatisierung treten solche manuelle Tätigkeiten in industriellen Produktionen immer noch häufig auf. Dies gilt besonders für die Montage und Kommissionierung.

Die zentrale Stellgröße zur Steuerung der Personalkosten ist die Arbeitsproduktivität. Sie beschreibt das Verhältnis aus Arbeitsergebnis und eingesetzter Arbeitszeit. Um die Arbeitsproduktivität zu analysieren, untersuchen Unternehmen in der Regel die Verteilung der Arbeitszeit und leiten daraus Verbesserungspotenziale ab. Durch gezielte Verbesserungsmaßnahmen lassen sich dann Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit steigern.

Die bestehenden Analysemethoden sind grundsätzlich in der Lage, die Arbeitsproduktivität dieser Prozesse zu untersuchen. Methoden mit geringem Aufwand sind jedoch nicht detailliert genug, um sinnvolle Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten. Methoden, die über eine hohe Aussagekraft verfügen, erfordern hingegen in der Regel hohen Aufwand sowie aufwändige Schulungen und untersuchen lediglich die Plan-Abläufe. Dies führt dazu, dass sie häufig nur für kleine, sich oft wiederholende Zeitabschnitte angewendet werden und insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen wenig Anwendung finden. Zudem steht der detaillierten Betrachtung der Plan-Abläufe keine entsprechend detaillierte Ist-Analyse gegenüber. Dadurch sind mit diesen Methoden keine Aussagen über Plan-Ist-Unterschiede möglich.

Eine Technologie, die sich dazu eignet, Ist-Analysen von Arbeitsabläufen zu unterstützen, ist die Bewegungserfassung (Motion Tracking). Für den Einsatz in Unternehmen kommen dabei insbesondere 3D-Kameras in Frage, weil sie die Arbeitsabläufe nicht stören. Unternehmen nutzen sie bislang vereinzelt, um ergonomische Analysen durchzuführen oder spezifische Arbeitsprozesse zu erfassen.

Es fehlt somit eine Methodik, die sowohl Plan- als auch Ist-Abläufe detailliert untersucht und zudem einen Vergleich ermöglicht, um Produktivitätspotenziale zu identifizieren. Zudem sind existierende detaillierte Methoden zu aufwändig und nicht an die technologischen Möglichkeiten angepasst.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel ist es, eine Methode zu entwickeln, die manuelle Tätigkeiten detailliert untersucht. Sie soll sich für die Bestimmung von Plan- und Ist-Zeiten eignen und durch die einheitliche Ermittlung dazu in der Lage sein, Abweichungen zwischen Plan- und Ist-Abläufen aufzudecken und somit Potenziale zu identifizieren. Die Verknüpfung mit der Technologie *Bewegungserfassung mittels 3D-Kameras* soll den Methodenaufwand deutlich reduzieren, um so die Anwendungsfälle zu erweitern. Die folgenden Teilziele werden für die Erstellung der Methode definiert:

1) Hohe Detaillierung bei der Erfassung von Ist-Abläufen

Die Methode soll so gestaltet sein, dass sie die Ist-Abläufe von Arbeitsprozessen möglichst detailliert erfasst. Das heißt, dass sie zum einen die einzelnen Arbeitsschritte präzise erfasst und zum anderen Einflussgrößen auf die benötigten Zeiten ermittelt. Dies ermöglicht es, Potenziale in den Ist-Prozessen zu erkennen und Verbesserungsvorschläge abzuleiten.

2) Integrierte Ermittlung des Plan-Ablaufs

Die Methode soll zudem dazu in der Lage sein, zumindest für besonders relevante Ablaufabschnitte Plan-Zeiten mit der gleichen Detaillierung abzuleiten wie bei der Erfassung der Ist-Abläufe. Damit ist ein Vergleich zwischen Plan und Ist möglich.

3) Verbesserungsorientierte Ergebnisse

Aus den Ergebnissen der Untersuchung des Ist-Ablaufs sowie des Plan-Ablaufs soll die Methode konkrete Potenziale ermitteln und Vorschläge für Verbesserungsmaßnahmen liefern. Damit legt sie die Grundlage für die gezielte Verbesserung der Produktivität im industriellen Einsatz.

4) Geringer Anwendungsaufwand

Die Methode soll so gestaltet werden, dass sie möglichst wenig Aufwand beim Einsatz erfordert. Insbesondere soll sie 3D-Kameras als eine Technologie zur Erfassung menschlicher Bewegungen nutzen, um den manuellen Aufwand zu reduzieren. Zudem soll sie so einfach aufgebaut sein, dass keine Schulungen für Methodenanwender notwendig sind.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Die Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Kapitel 2 beschreibt zunächst den Stand der Technik. Dieser umfasst die bestehenden Methoden zur Erfassung von Ist-Zeiten, zur Bestimmung von Plan-Zeiten sowie zur Bewertung der Produktivität und die Defizite dieser Methoden. Zudem stellt es die Bewegungserfassung mit 3D-Kameras vor.

Kapitel 3 zeigt, wie man Ist-Zeiten von Abläufen aus den durch erfassten Bewegungsdaten ableiten kann. Dazu teilt es die Beobachtungszeit in erfassbare Zustände ein und beschreibt, wie man diese Zustände in den Daten erkennen kann. Zudem stellt es dar, wie man die Zustände aufwandsarm zusammenfassen und relevante Zustandsdaten ermitteln kann.

Kapitel 4 befasst sich anschließend damit, wie man für die ermittelten Zustände Plan-Zeiten bestimmen kann. Dafür schlägt es unterschiedliche Verfahren zur Ermittlung vor und bewertet diese anschließend.

Die auf den ermittelten Zeiten basierende Analyse der Produktivität ist Inhalt von Kapitel 5. Es stellt ein Vorgehen zur Bewertung der ermittelten Abläufe sowie mögliche Auswertungsformen vor. Zudem liefert es mögliche Verbesserungsmaßnahmen für die analysierten Abläufe.

Kapitel 6 evaluiert die entwickelte Methodik. Dazu gehört zum einen die Bewertung Erfassungsgüte der Microsoft Kinect 2.0 als Technologie der Bewegungserfassung. Zum anderen stellt es Einsatzszenarien vor, an denen die Methodik getestet wurde.

Kapitel 7 fasst die Arbeit zusammen und beschreibt einen kurzen Ausblick.



## 2 Grundlagen und bestehende Ansätze

Dieses Kapitel erläutert die Grundlagen für die entwickelte Methodik. Dafür definiert es zunächst die Begriffe Produktivität und manuelle Arbeitsabläufe (Abschnitt 2.1). Abschnitt 2.2 zeigt dann, welche Methoden zur Erfassung von Ist-Zeiten dieser Arbeitsabläufe existieren. Analog stellt Abschnitt 2.3 Methoden zur Bestimmung von Plan-Zeiten vor. Abschnitt 2.4 zeigt anschließend, wie sich diese Zeiten nutzen lassen, um die Produktivität zu bewerten. Abschnitt 2.5 stellt Verfahren der Bewegungserfassung im Allgemeinen und die Microsoft Kinect als 3D-Kamera im Speziellen vor. Zudem sind bestehende Methoden, die diese Technologie nutzen, Gegenstand dieses Abschnitts. Den Abschluss bildet die Zusammenfassung des Defizits und die Ableitung der Anforderungen an die entwickelte Methodik (Abschnitt 2.6).

### 2.1 Arbeitsproduktivität

Dieser Abschnitt erläutert den Begriff der Produktivität (Abschnitt 2.1.1) und grenzt ab, welche Formen der Arbeit mit der Methodik untersucht werden (Abschnitt 2.1.2).

#### 2.1.1 Definition Produktivität

Produktivität ist definiert als das Verhältnis zwischen Output und Input eines Systems [vgl. Suma84, S. 3ff.; Bokr06, S. 41; West06, S. 65]. In Produktionsbereichen sind die produzierten Güter der Output, während die zur Erstellung dieses Outputs verbrauchten Ressourcen der Input sind.

Man kann unterschiedliche Typen von Produktivität bilden, je nachdem, welche Art von Input im Fokus steht [vgl. Suma84, S. 7; Webe98, S. 90]. So ergibt sich die Arbeitsproduktivität durch die Betrachtung der Ressource Arbeitskraft als Input, während die Maschinenproduktivität die Ressource maschinelle Arbeit betrachtet.

Output und Input lassen sich jeweils in unterschiedlichen Einheiten messen. Eine gängige und geeignete Kombination ist die Messung des Outputs in produzierten Stückzahlen und die Messung des Inputs in benötigter Mitarbeiterzeit (vgl. Formel 2-1) [vgl. Webe98, S. 100ff.].

$$P_A = \frac{AB_{Ist}}{Z_{bez}} \quad (2-1)$$

$P_A$  : Arbeitsproduktivität [Stk./h]  
 $AB_{Ist}$  : Ist-Abgang [Stk.]  
 $Z_{bez}$  : bezahlte Arbeitszeit [h]

Für die Analyse der Produktivität hat sich insbesondere die Untersuchung des Inputs, also der Mitarbeiter- bzw. Maschinenzeit durchgesetzt. Beispiele dafür sind:

- Lean Management [vgl. Like13, S. 57ff.]: Unterteilung der Zeit in wertschöpfende und nicht-wertschöpfende Anteile,
- Overall Equipment Effectiveness [vgl. Naka95, S. 41ff.]: Unterteilung der Maschinenzeit, insbesondere der Verlustzeiten, in unterschiedliche Anteile und
- REFA-Systematik [vgl. REFA97, S. 20ff.]: Unterteilung der Zeit in Ablaufarten zur Planung der Produktion.

Vorteil dieser Inputbetrachtung ist, dass die Produktion den Input durch die Kapazitätsplanung und -steuerung selbst verändern kann, während der Output in vielen Fällen eine vom Markt vorgegebene Größe ist. Zudem lassen sich aus den Zeitanteilen konkrete Verbesserungsmaßnahmen ableiten.

### 2.1.2 Arbeitsformen

Im Gegensatz zu Maschinen, die in der Regel nur eine bestimmte Arbeitsaufgabe verrichten, ist der Mensch in der Lage, verschiedenste Tätigkeiten zu bewältigen. Eine mögliche Einteilung dieser Tätigkeiten ist die Unterscheidung energetischer und informatorischer Arbeit (vgl. Tabelle 2-1) [vgl. Rohm83, S. 20ff.]. So ist beispielsweise der Transport von Material eine rein energetische Arbeit (mechanisch), bei der der Mensch sehr wenige Informationen verarbeiten muss. Auf der anderen Seite stehen rein geistige Tätigkeiten, für die keine körperliche Arbeit notwendig ist. Ein Beispiel dafür ist die erfinderische Erarbeitung von Lösungsansätzen für ein Problem. Zwischen diesen beiden Extremen existieren weitere Stufen, die beide Typen der Arbeit enthalten.

**Tabelle 2-1 Formen menschlicher Arbeit [vgl. Rohm83, S. 20ff.]**

Typ der Arbeit	energetische Arbeit				
	informatorische Arbeit				
Art der Arbeit	mechanisch	motorisch	reaktiv	kombinativ	kreativ
Beschreibung der Arbeitsaufgabe	Kräfte abgeben	Bewegungen ausführen	reagieren und handeln	Informationen kombinieren	Informationen erzeugen
	„mechanische Arbeit“ im Sinne der Physik	genaue Bewegung bei geringer Kraftabgabe	Informationen aufnehmen und darauf reagieren	Informationen mit Gedächtnis-inhalt verknüpfen	Informationen zu „neuen“ Informationen Verknüpfen
Beispiele	tragen	montieren	Auto fahren	konstruieren	erfinden

13414

Die Technologien der Bewegungserfassung sind in der Lage, menschliche Bewegungen aufzunehmen, können allerdings keine informatorischen Tätigkeiten identifizieren (vgl. Abschnitt 2.5.1). Dies könnte nur dann erfolgen, wenn sich die Tätigkeiten aus dem Aufenthaltsort oder den Bewegungen ableiten lassen. So deutet beispielsweise das Stehen vor einem Computer in der Fertigung auf das Lesen oder die Bearbeitung von Auftragsdaten hin. Eine exakte Identifikation ist so jedoch nicht möglich.

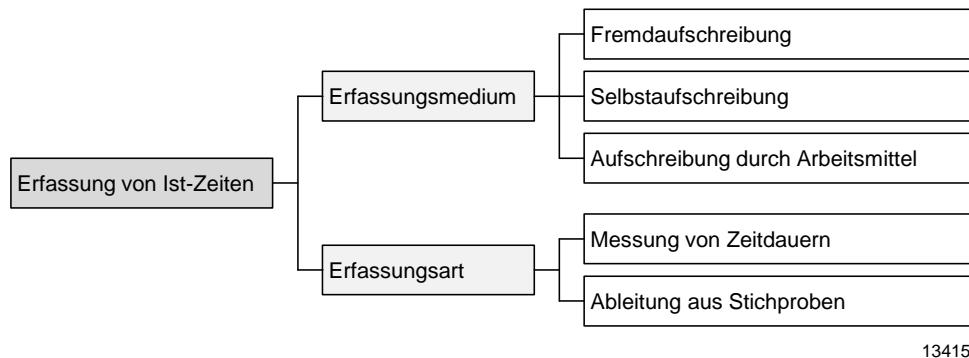
Diese Technologien eignen sich deswegen vorrangig für den Einsatz bei Arbeitsaufgaben, die hauptsächlich energetische Arbeit erfordern. Beispiel sind Kommissionier- und Montage-tätigkeiten, die in nahezu allen Industrieunternehmen vorkommen. Jedoch gibt es auch in diesen Bereichen einen gewissen Anteil an informatorischen Tätigkeiten. In der Unikatfertigung ist dieser Anteil in der Regel höher als in der Serienfertigung [vgl. Czum13, S. 121ff.; Tiet16, S. 124ff.]. Daher eignen sich die Technologien der Bewegungserfassung eher für die Serienfertigung als für die Unikatfertigung.

## 2.2 Methoden zur Erfassung von Ist-Zeiten

Die Erfassung der Ist-Zeiten von Arbeitsabläufen ist der Kern vieler Produktivitätsanalysen [vgl. Czum13, S. 57ff.; Tiet16, S. 62ff.]. Abschnitt 2.2.1 gibt deswegen zunächst einen Überblick über die Methoden zur Erfassung von Ist-Zeiten. Abschnitt 2.2.2 stellt anschließend Zeitaufnahmen und Abschnitt 2.2.3 Multimomentverfahren vor. Abschließend fasst Abschnitt 2.2.4 die Defizite dieser Methoden zusammen.

### 2.2.1 Überblick über die Methoden

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren zur Erfassung von Ist-Zeiten. Diese Verfahren lassen sich zum einen danach einteilen, wer oder was die Arbeitsabläufe aufnimmt (*Erfassungsmedium*) und zum anderen danach, wie die Zeiten bestimmt werden (*Erfassungsart*). Abbildung 2-1 stellt die unterschiedlichen Medien und Arten der Erfassung dar.



13415

Abbildung 2-1 Möglichkeiten zur Erfassung der Arbeitszeit [in Anlehnung an Lucz97, S. 658; REFA97, S. 61]

#### Erfassungsmedium

Die klassischen Zeitermittlungsmethoden beruhen auf der Erfassung durch drei verschiedene Erfassungsmedien:

##### 1) Fremdaufschreibung:

Bei der Fremdaufschreibung erfasst ein externer Beobachter die Abläufe der Mitarbeiter. Dies eignet sich insbesondere für die Erfassung von mechanischen Tätigkeiten, da diese in der Regel gut erkennbar sind [vgl. Schl10, S. 672]. Für informatorische Tätigkeiten ist diese Art der Aufnahme andererseits eher ungeeignet, da der Beobachter die spezifische Tätigkeit nur schlecht erkennen kann.

### 2) Selbstaufschreibung:

Bei der Selbstaufschreibung nimmt der Mitarbeiter die Zeiten der Abläufe selbst auf [vgl. REFA97, S. 292f.]. Ein wichtiger Vorteil ist, dass der Mitarbeiter detailliertes Wissen zu den durchgeführten Tätigkeiten hat und sie deshalb korrekt erheben kann [vgl. Schl10, S. 677]. Damit eignet sich die Selbstaufschreibung neben den mechanischen Tätigkeiten auch für informatorische Tätigkeiten. Andererseits besteht die Möglichkeit, dass der Mitarbeiter die Aufnahme gewollt oder ungewollt beeinflusst.

### 3) Aufschreibung durch Arbeitsmittel:

Im Gegensatz zu den anderen Varianten erfolgt die Erfassung hier nicht durch eine Person, sondern über verwendete Arbeitsmittel. Das umfasst zum Beispiel Systeme zur Erfassung der Anwesenheitszeit, aber auch die Ableitung von Mitarbeiterzeiten aus der Verwendung von Maschinen [vgl. Klet11, S. 80ff.]. Der Vorteil dieser Variante ist der geringe Erfassungsaufwand, da keine Personalkosten für die Durchführung entstehen. Der Nachteil ist, dass die bestehenden Erfassungssysteme keine eindeutigen Schlüsse auf die Mitarbeiterzustände zulassen und sich so nicht für detaillierte Untersuchungen eignen.

Es ist möglich, unterschiedliche Erfassungsmedien zu kombinieren. So könnten beispielsweise regelmäßige Abläufe durch eine Fremdaufschreibung erfasst werden und seltene Abläufe durch eine Selbstaufschreibung.

### Erfassungsart

Die Ist-Zeiten von Abläufen kann man auf unterschiedliche Arten bestimmen. Dazu gehören hauptsächlich die folgenden Varianten:

#### 1) Messung von Zeitdauern:

Bei der Messung der Zeitdauer beobachtet man einzelne oder mehrere aufeinander folgende Ablaufschritte von Anfang bis Ende und notiert die Zeitdauern der einzelnen Schritte (vgl. Abschnitt 2.2.2).

#### 2) Ableitung aus Stichproben:

Bei der Ableitung aus Stichproben erfasst man bei stichpunktartigen Aufnahmen die beobachteten Zustände bzw. Ablaufschritte, ohne dabei deren Zeitdauer direkt aufzunehmen. Man leitet diese anschließend aus den erfassten Daten ab. Bekannte Vertreter sind die Multimomentverfahren, die Abschnitt 2.2.3 erklärt.

Beide Erfassungsarten lassen sich kombinieren, um die Ist-Zeiten der gewünschten Abläufe zu erheben. So könnte man beispielsweise die Anteile der Arbeitszeit durch Stichproben erfassen und für besonders relevante Tätigkeiten die Zeitdauern mit Messungen präzisieren.

## 2.2.2 Zeitaufnahmen

Ein Weg zur Erfassung von Zeitdauern ist es, Ablaufschritte zu beobachten und die benötigte Zeit pro Schritt begleitend zu notieren. Dabei ist es möglich, den untersuchten Arbeitsablauf fortlaufend zu beobachten und die Zeitpunkte der Wechsel zwischen den Ablaufschritten zu notieren (Fortschrittszeitmessung) oder die Zeiten jedes einzelnen Ablaufschrittes separat zu erfassen (Einzelzeitmessung) [vgl. REFA97, S. 86f.]. Die im Folgenden beschriebene integrale handlungsorientierte Produktivitätsanalyse verwendet die Fortschrittszeitmessung und die Prozessstudientabelle die Einzelzeitmessung.

### Zeitaufnahmen bei der integralen handlungsorientierten Produktivitätsanalyse

Die integrale handlungsorientierte Produktivitätsanalyse (IHP) ist eine von Czumanski entwickelte Methode, die Mitarbeiterzustände in Serienfertigungen mit einem hohen Detaillierungsgrad aufnimmt und damit die Arbeitszeit der Mitarbeiter vollständig darstellt [vgl. Czum13, S. 2]. Dafür werden die Zustände mit Hilfe einer detaillierten Zustandshierarchie zunächst nach Häufigkeit in zyklische, losgebundene, periodische und unregelmäßige Zustände unterteilt. Innerhalb dieser Kategorien sieht die IHP eine weitere Detaillierung der Zustände vor [vgl. Czum13, S. 37ff.]. Dadurch ist es möglich, konkrete Produktivitätspotenziale standardisiert zu identifizieren.

Czumanski schlägt dabei insbesondere für die zyklischen Zustände die Erfassung der Zeitdauern durch reduzierte Zeitaufnahmen (RZA) vor [vgl. Czum13, S. 57ff.]. Bei den RZA nimmt der Methodenanwender die Dauern der Zustände durch stichprobenartige Aufnahmen der Abläufe auf und ermittelt im Anschluss die mittlere Zeit je Zustand und Zyklus [vgl. Czum13, S. 37ff.]. Eine geringe Anzahl an Stichproben resultiert dabei in einem niedrigen Aufwand [vgl. Czum13, S. 58].

### Zeitaufnahmen bei der Prozessstudientabelle

Die Prozessstudientabelle (PST) wird verwendet, um Fertigungslinien so zu gestalten, dass die Zykluszeit der Linie dem Kundentakt entspricht. Dazu nimmt der Anwender im ersten Schritt die bestehenden Arbeitsabläufe auf [vgl. Roth06, S. 18ff.].

Anschließend zerlegt er die Abläufe in Arbeitselemente und ermittelt für jedes einzelne Arbeitselement die benötigte Zeit. Dafür nimmt er jedes Arbeitselement isoliert wiederholt auf, bis die niedrigste wiederholbare Zeit für das Arbeitselement bestimmt ist [vgl. Roth06, S. 21ff.]. Ziel ist es demnach nicht, den mittleren Zeitbedarf zu ermitteln, sondern den Zeitbedarf bei störungs- und fehlerfreiem Arbeiten.

### Vor- und Nachteile der Methoden

Bei beiden Ansätzen untersucht ein Beobachter den Arbeitsablauf an einem Arbeitsplatz und erfasst für die einzelnen Ablaufschritte Zeiten, wofür er in der Regel Zeitmessgeräte (z. B. Stoppuhr) verwendet. Er nimmt die Ablaufschritte dabei wiederholt auf, um repräsentative Werte zu ermitteln.

Vorteil dieser Methoden ist, dass sie die tatsächlich benötigten Zeitdauern der einzelnen Ablaufschritte ermitteln. Sie nutzen anschließend zwar lediglich einen repräsentativen Wert, können prinzipiell jedoch auch Schwankungen der benötigten Zeitdauern bestimmen.

Die IHP gibt eine Zustandshierarchie vor, die eine hohe Detaillierung erlaubt und zudem die Möglichkeit bietet, die Ergebnisse sinnvoll zusammenzufassen und zu vergleichen. Die Prozessstudientabelle verwendet keine Hierarchie, sondern gliedert den Arbeitsablauf stattdessen sehr detailliert in Arbeitselemente. Dies erhöht zwar die Genauigkeit, jedoch auch den erforderlichen Aufwand.

Den Methoden ist gemein, dass sie einen Fremdbeobachter erfordern, der den Arbeitsablauf erfasst. Dies führt zu einem relativ hohen Personalaufwand [vgl. Schl10, S. 672ff.]. Dieser hängt vor allem von der Komplexität und der durchschnittlichen Dauer der Arbeitsaufgabe sowie der benötigten Anzahl an Aufnahmen ab. Um den Anwendungsaufwand zu reduzieren, begrenzen beide Methoden die Stichprobenanzahl, was jedoch die Genauigkeit einschränkt.

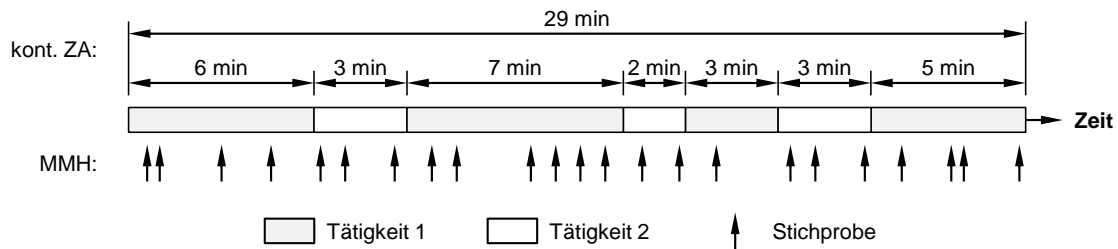
Ein weiteres Problem der Zeitaufnahmen ist, dass der Detaillierungsgrad bei der Beobachtung durch eine externe Person an natürliche Grenzen stößt. Da der Mensch bei der Beobachtung Zeit zur Verarbeitung und Notierung von Zustandswechseln benötigt, ist es nicht möglich, sehr detaillierte Ablaufschritte wie beim MTM-1-Verfahren (vgl. Abschnitt 2.3.3) zu erfassen.

### **2.2.3 Multimomentverfahren**

Multimomentverfahren sind Verfahren zur Erfassung der Arbeitszeit, die auf stichprobenartigen Beobachtungen der Arbeitsabläufe beruhen. Dabei werden so viele Beobachtungen durchgeführt, dass die erzielten Ergebnisse eine gewünschte statistische Aussagekraft erreichen. Sie werden klassischerweise als Fremdbeobachtung durchgeführt und werden unterteilt in das Multimoment-Häufigkeitsverfahren (MMH) und in das Multimoment-Zeitmessverfahren (MMZ) [vgl. Hall69, S. 16ff.].

#### Multimoment-Häufigkeitsverfahren (MMH)

Ziel des MMH ist die Bestimmung von Anteilen der Arbeitszeit. Dazu legt der Methoden-anwender zunächst mögliche Ablaufarten fest und ermittelt, wie viele Beobachtungen für eine gewünschte statistische Genauigkeit des Ergebnisses notwendig sind. Anschließend notiert er auf zuvor festgelegten Rundgängen für jedes relevante Arbeitssystem die beobachtete Ablaufart, zum Beispiel als Strichliste. Aus den Stichproben kann er nach der Aufnahme Anteile der beobachteten Zeit ermitteln (vgl. Abbildung 2-2). Dazu teilt er die Anzahl der Notierungen pro Ablaufart durch die Gesamtanzahl an Notierungen. In dem in Abbildung 2-2 dargestellten Beispiel wurden in einem Zeitraum von 29 Minuten 23 Stichproben aufgenommen. Bei 15 davon wurde Tätigkeit 1 beobachtet. Damit beträgt der durch das MMH ermittelte Anteil am Beobachtungszeitraum 65 %. Er wiederholt die Rundgänge solange, bis er die gewünschte statistische Genauigkeit des Ergebnisses erreicht hat [vgl. Hall69, S. 16ff.; Nieb03, S. 525ff.; Bokr06, S. 705].



	kontinuierliche Zeitaufnahme (kont. ZA)		Multimoment-Häufigkeitsverfahren (MMH)	
	Summe Tätigkeitsdauern	Anteil an Gesamtdauer	Anzahl Stichproben	Anteil an Gesamtstichproben
Tätigkeit 1	21 min	72 %	15	65 %
Tätigkeit 2	8 min	28 %	8	35 %
<b>Summe</b>	<b>29 min</b>	<b>100 %</b>	<b>23</b>	<b>100 %</b>

13416

**Abbildung 2-2 Funktionsweise des Multimoment-Häufigkeitsverfahren (MMH)**  
[vgl. Hall69, S. 24ff.]

Das MMH kann Zeitanteile detailliert erfassen. Das klassische MMH schlägt zwar eine geringe Anzahl an unterschiedlichen Ablaufarten vor, um die Erfassung für den Anwender einfach zu gestalten, prinzipiell kann man diese jedoch sehr detailliert aufgliedern [vgl. Tiet16, S. 33ff.]. Ein weiterer Vorteil des MMH ist, dass der Anwender mehrere Arbeitssysteme in einem Rundgang erfassen und so ganze Fertigungsbereiche aufnehmen kann.

Selbst bei einer detaillierten Untersuchung von Arbeitsabläufen ist es jedoch prinzipbedingt nicht möglich, einzelne Zeitdauern der Arbeitsschritte oder ihre Reihenfolge zu ermitteln. Daher ist es auch nicht möglich, Schwankungen der Einzeldauern zu bestimmen. Aus dem Anteil einer Tätigkeit kann man jedoch ihre Gesamtdauer im Beobachtungszeitraum ermitteln. Ist die Anzahl der durchgeführten Wiederholungen bekannt, kann man daraus einen Mittelwert abschätzen.

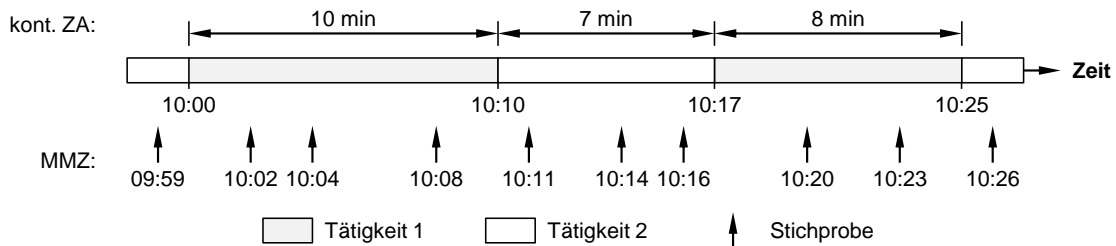
Auch beim MMH erzeugt die Nutzung von Fremdbeobachtern einen deutlichen manuellen Aufwand. Dieser hängt vor allem von der gewünschten statistischen Genauigkeit sowie von der Anzahl der beobachteten Arbeitssysteme ab.

Ein weiteres Problem des MMH ergibt sich aus der kurzen Beobachtungsdauer der Momentaufnahme. Während der Beobachter bei einer Zeitaufnahme beispielsweise aus der Reihenfolge ermitteln kann, ob ein Mitarbeiter Material sucht oder zur Kaffeepause geht, sieht er beim MMH lediglich, dass der Mitarbeiter geht. Damit sind der Detaillierung hier Grenzen gesetzt.

#### Multimoment-Zeitmessverfahren (MMZ)

Ziel des MMZ ist es, die Zeitdauern von Abläufen zu erfassen. Dazu folgt es dem Vorgehen des MMH mit einigen Änderungen. Zunächst legt der Methoden-anwender wie beim klassischen MMH die unterschiedlichen Ablaufarten fest. Bei der Beobachtung in Rundgängen notiert er dann zusätzlich zu der Ablaufart die Beobachtungszeit [vgl. Hall69, S. 106ff.].

Dadurch ist es möglich, den Endzeitpunkt einer abgeschlossenen Tätigkeit beziehungsweise den Startzeitpunkt einer neu begonnenen Tätigkeit abzuschätzen. Dies geschieht, indem man bei einem Wechsel der Ablaufart zwischen zwei Aufnahmen den Zeitpunkt des Tätigkeitswechsels in die Mitte des Zeitraums zwischen den Beobachtungen legt (vgl. Abbildung 2-3). Mit diesen Zeitpunkten kann man dann die Dauer der Ablaufschritte berechnen [vgl. Simo87, S. 9ff.].



Tätigkeit 1	kontinuierliche Zeitaufnahme (kont. ZA)	Multimoment-Zeitmessverfahren (MMZ)		
	Tätigkeitsdauer	Start	Ende	Tätigkeitsdauer
1. Auftreten	10 min	$\emptyset$ (09:59;10:02) = 10:00,5	$\emptyset$ (10:08;10:11) = 10:09,5	9 min
2. Auftreten	8 min	$\emptyset$ (10:16;10:20) = 10:17	$\emptyset$ (10:23;10:26) = 10:24,5	7,5 min
<b>Summe</b>	<b>18 min</b>	-	-	<b>16,5 min</b>

13417

Abbildung 2-3 Funktionsweise des Multimoment-Zeitmessverfahren (MMZ) [vgl. Hall69, S. 106ff.]

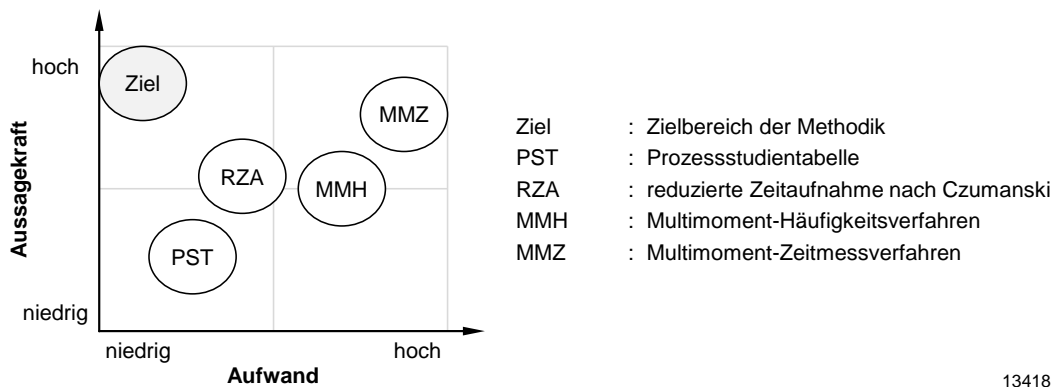
Analog zum MMH kann der Anwender die Abläufe prinzipiell beliebig detailliert erfassen. Ebenso ist das Verfahren in der Lage, mehrere Arbeitssysteme gleichzeitig zu untersuchen. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist die Ermittlung von absoluten Zeitdauern.

Ein entscheidender Nachteil ist die Anwendungsvoraussetzung des MMZ: Es muss sichergestellt sein, dass mindestens einmal pro Ablaufschritt eine Aufnahme stattfindet. Ist dies nicht der Fall, ordnet man die Zeitdauer dieses Ablaufschrittes anderen Schritten zu. Damit eignet sich das Verfahren nicht für kurzzyklische Tätigkeiten wie Kommissionier- oder Montagetätigkeiten und auch der Detaillierung sind damit Grenzen gesetzt [vgl. Mese04, S. 20].

Der Aufwand des MMZ entspricht in etwa dem Aufwand des MMH. Hinzu kommt der Aufwand für die Notierung des Beobachtungszeitpunktes. Bei der Nutzung moderner Aufnahmemittel wie Tablets kann diese Zeit wiederum automatisch erfasst werden [vgl. Tiet16, S. 81ff.]. Wenn man kurzzyklische Tätigkeiten beobachten soll, steigt der Aufwand stark an, da beim MMZ jeder Ablaufschritt mindestens einmal erfasst werden muss.

### 2.2.4 Defizite der Methoden

Die bestehenden Methoden zur Erfassung von Ist-Zeiten eignen sich nur bedingt für eine detaillierte Analyse manueller Arbeitsvorgänge. Es fehlt eine Methode, die Ist-Zeiten mit hoher Aussagekraft erfasst und dabei nur wenig Aufwand verursacht. Abbildung 2-4 zeigt eine Auswahl klassischer Methoden.



13418

**Abbildung 2-4 Aufwand und Aussagekraft von Methoden zur Erfassung von Ist-Zeiten**

Wünschenswert ist eine Erfassungsmethode mit einer hohen Aussagekraft bei geringem Aufwand. Für eine hohe Aussagekraft ist es notwendig, die Ablaufschritte detailliert zu unterteilen und die Ist-Zeiten möglichst genau zu erfassen. Um den Aufwand gering zu halten, sollte die Methode möglichst wenig manuelle Arbeit erfordern.

Zeitaufnahmen (PST, RZA) sowie Multimomentaufnahmen (MMH, MMZ) sind in der Lage, Abläufe zu erfassen und die Ist-Zeiten einzelner Schritte aufzunehmen. Allerdings existiert noch keine Methodik, die so detailliert ist wie die MTM-1-Methodik (vgl. Abschnitt 2.3.3). Zudem erzeugen diese Methoden mit zunehmender Detaillierung steigenden Aufwand; sie finden daher in der Regel nur für Arbeitsschritte Anwendung, die zur vorgesehenen Arbeitsaufgabe gehören. Sie vernachlässigen somit unregelmäßig oder ungeplant auftretende Zustände.

Multimomentverfahren erfassen die Abläufe mehrerer Arbeitssysteme über stichprobenartige Beobachtungen und reduzieren dadurch den Aufwand pro Arbeitssystem. Allerdings erfassen sie die Zeitdauern der einzelnen Ablaufschritte nicht (MMH) oder zumindest nicht so genau wie die Zeitaufnahmen (MMZ). Zudem führt der Einsatz des MMZ bei kurzzyklischen Arbeitsaufgaben zu besonders hohem Aufwand.

Abbildung 2-4 verdeutlicht, dass die Methoden zur Erfassung von Ist-Zeiten eine hohe Aussagekraft erreichen können, aber dafür auch hoher Aufwand erforderlich ist. Ursache dafür ist die aufwändige Aufnahme durch Fremdbeobachter. Die Möglichkeit, manuelle Tätigkeiten durch Arbeitsmittel zu vermeiden, nutzen die Methoden bisher nicht.

### 2.3 Methoden zur Bestimmung von Plan-Zeiten

Neben der Erfassung von Ist-Zeiten ist die Bestimmung von Plan-Zeiten von entscheidender Bedeutung in der Produktion. Diese nutzt man beispielsweise zur Planung der Produktion oder als Vergleich zu den Ist-Werten, um Abweichungen festzustellen. Abschnitt 2.3.1 gibt zunächst einen Überblick über die Verfahren zur Bestimmung von Plan-Zeiten. Abschnitt 2.3.2 und Abschnitt 2.3.3 stellen dann mit der REFA-Systematik und dem MTM-1-Verfahren zwei etablierte Methoden detaillierter vor. Abschnitt 2.3.4 fasst die Defizite der bestehenden Methoden zusammen.

### 2.3.1 Überblick über die Methoden

Wie bei den Ist-Zeiten existieren unterschiedliche Arten der Bestimmung von Plan-Zeiten. Alle gehen jedoch von zuvor erfassten Ist-Zeiten aus, sei es aus im Unternehmen aufgenommenen Zeiten (Berechnen, Vergleichen und Schätzen) oder aus historischen Erfahrungswerten anderer Zeitaufnahmen (Zusammensetzen) [vgl. REFA97, S. 61; Lucz97, S. 658].

#### Berechnen, Vergleichen und Schätzen von Plan-Zeiten

Die Bestimmung von Plan-Zeiten kann über zuvor im Unternehmen aufgenommene Ist-Zeiten erfolgen. Unternehmen können Plan-Zeiten dann auf verschiedenen Wegen ableiten. Liegen die Ist-Zeiten für den betrachteten Arbeitsablauf vor, kann man sie direkt für die Planung verwenden (oder unter Berücksichtigung von geplanten Änderungen im Arbeitsablauf anpassen). Die REFA-Systematik zur Plan-Zeitbestimmung (Abschnitt 2.3.2) folgt diesem Vorgehen. Die Eignung der so bestimmten Zeiten für die Planung ist hoch, wenn die Ist-Zeiten aktuell sind. Für einen Vergleich mit den Ist-Zeiten kann man sie zwar verwenden, dieser zeigt aber keine Verbesserungspotenziale, sondern lediglich Abweichungen zur letzten Bestimmung der Plan-Zeiten auf. Der Aufwand bei diesem Vorgehen entsteht hauptsächlich durch die Aufnahme der Ist-Zeiten. Die darauffolgende Plan-Zeitbestimmung ist aufwandsarm.

Sind die Ist-Zeiten für den betrachteten Arbeitsablauf nicht vollständig bekannt, kann man die Plan-Zeiten mit den Ist-Zeiten von anderen, ähnlichen Arbeitsabläufen bestimmen. Das kann entweder geschehen, indem man einen ähnlichen Arbeitsablauf mit dem betrachteten Ablauf vergleicht und basierend darauf die Plan-Zeit schätzt. Aber man kann zum Beispiel auch zeitbestimmende Faktoren für Ablaufschritte im Vergleichsprozess bestimmen, mit denen man die benötigte Zeit berechnet. Das heißt zum Beispiel, dass man für einen Verschraubungsprozess ermittelt, wie lange für eine Schraube benötigt wird. Für den gleichen Prozess mit zwei Schrauben kann man dann die doppelte Zeit ansetzen. Dieses Vorgehen kann durch weitere Einflussgrößen beliebig erweitert werden, wie beispielsweise durch einen Wiederholeffekt, der die Dauer der zweiten Schraube verkürzt. Die Genauigkeit dieser Plan-Zeiten hängt vom verwendeten Vorgehen ab, sie ist allerdings in jedem Falle geringer als bei der Ableitung aus den Ist-Zeiten desselben Prozesses. Der Aufwand ist jedoch geringer, da keine Erfassung der Ist-Zeiten notwendig ist.

#### Zusammensetzen von Plan-Zeiten

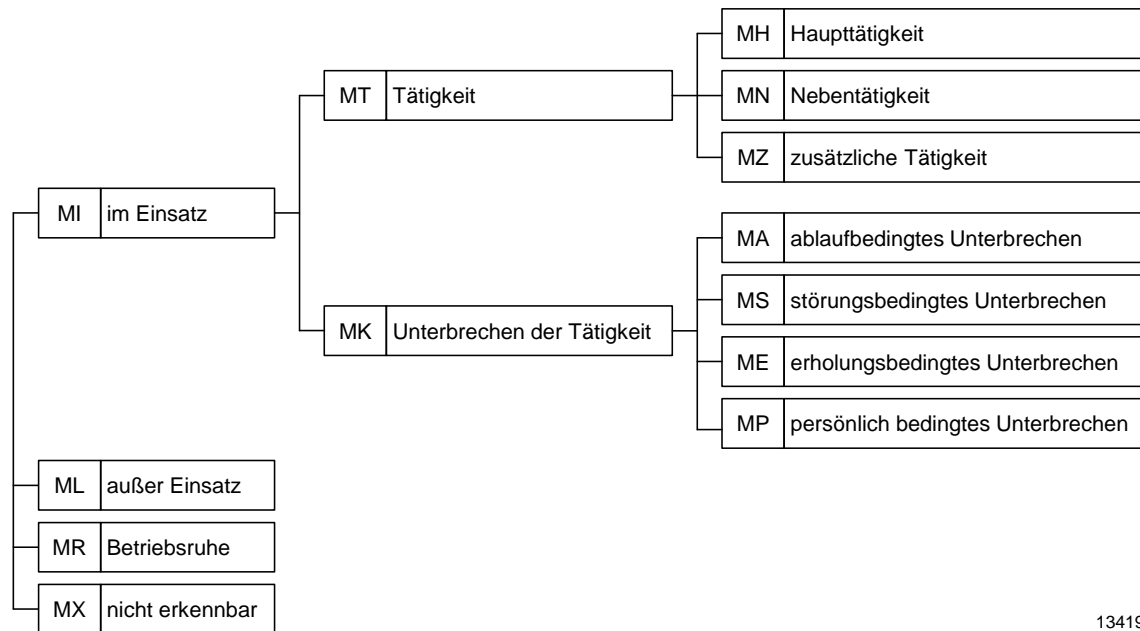
Beim Zusammensetzen von Plan-Zeiten ist keine Aufnahme von Ist-Zeiten im Unternehmen notwendig. Für diese Art der Vorgehensweise zerlegt man den betrachteten Arbeitsablauf zunächst systematisch in Teilschritte. Je nach Methode sind dann Einflussfaktoren zu ermitteln. Für die Teilschritte ermittelt man anschließend Plan-Zeiten in Abhängigkeit von der Art des Teilschrittes und den Einflussfaktoren. Zusammensetzt ergeben die Teilschrittzeiten die Plan-Zeit für den Gesamtablauf. Bekannte Vertreter dieser Systeme vorbestimmter Zeiten sind beispielsweise die Work-Factor-Methode [vgl. Quic60, S. 2ff.] und das MTM-1-Verfahren (vgl. Abschnitt 2.3.3).

Diese Verfahren verfügen über zwei wesentliche Vorteile. Die Verfahren sind relativ detailliert; insbesondere das MTM-1-Verfahren unterteilt manuelle Abläufe in sehr kleine Bausteine und berücksichtigt mehrere Einflussfaktoren auf die Arbeitszeit. Weiterhin eignen sich die so ermittelten Plan-Zeiten sehr gut für einen Vergleich mit den Ist-Zeiten.

Nachteilig bei diesen Methoden ist, dass die bestimmten Zeiten nur bedingt für die Planung von Arbeitsprozessen geeignet sind, wenn die Arbeitsgeschwindigkeit der Werker nicht der Norm entspricht oder wenn die realen Abläufe häufig vom geplanten Ablauf abweichen. Zudem erzeugen diese Methoden einen hohen Aufwand. Dieser steigt zudem bei höherer Detaillierung und bei zunehmender Länge der betrachteten Arbeitsaufgabe.

### 2.3.2 REFA-Systematik

Die REFA-Systematik ist ein in der Industrie etabliertes Verfahren zur Planung von Arbeitsabläufen. Ziel ist es dabei, reproduzierbare Zeiten für Prozesse zu bestimmen [vgl. REFA97, S. 12ff.]. Zu dem Verfahren gehört zunächst eine Erfassung der Ist-Zeiten der Arbeitsabläufe. Dies erfolgt in der Regel durch manuelle Zeitaufnahmen mittels Fremdbeobachtung. Das heißt hier, dass ein Beobachter zuvor festgelegte Ablaufabschnitte einzeln oder den gesamten Arbeitsablauf kontinuierlich erfasst. Für die Erfassung der Ist-Zeiten von Mitarbeitern schlägt die Systematik die in Abbildung 2-5 dargestellten Ablaufarten (z. B. MI - Mitarbeiter Im Einsatz) vor. Die Erfassung erfolgt solange, bis die Ergebnisse statistisch verlässlich sind [vgl. REFA97, S. 23ff.].



13419

Abbildung 2-5 Ablaufarten für den Menschen nach REFA [vgl. REFA97, S. 23ff.]

Zusätzlich zu den Ist-Zeiten kann man die Arbeitsbedingungen und die Leistungsfähigkeit und -bereitschaft der untersuchten Mitarbeiter aufnehmen. Mit den erfassten Zeiten und den zusätzlich aufgenommenen Daten lassen sich dann Plan-Zeiten ableiten. Abbildung 2-6 zeigt, wie man die Ablaufarten zusammenfassen kann, um die Zeitanteile der Plan-Zeit pro Stück zu ermitteln. Durch die aufgenommenen Leistungsdaten kann man auch die Plan-Zeiten für ähnliche Arbeitssysteme mit anderer Leistung berechnen [vgl. REFA97, S. 125ff.]. Dann verändert man beispielsweise die Zeit-Anteile, die der Leistungsgrad beeinflusst.

erfasste Ist-Zeiten		abgeleitete Plan-Zeiten					
MH	Haupttätigkeit	$t_t$	Tätigkeitszeit	$t_g$	Grundzeit	$t_e$	Zeit je Einheit
MN	Nebenaufgabe						
MA	ablaufbedingtes Unterbrechen	$t_w$	Wartezeit				
MZ	zusätzliche Tätigkeit	$t_s$	sachliche Verteilzeit	$t_v$	Verteilzeit		
MS	störungsbedingtes Unterbrechen						
MP	persönlich bedingtes Unterbrechen	$t_p$	persönliche Verteilzeit				
ME	erholungsbedingtes Unterbrechen	$t_{er}$	Erholungszeit				

13420

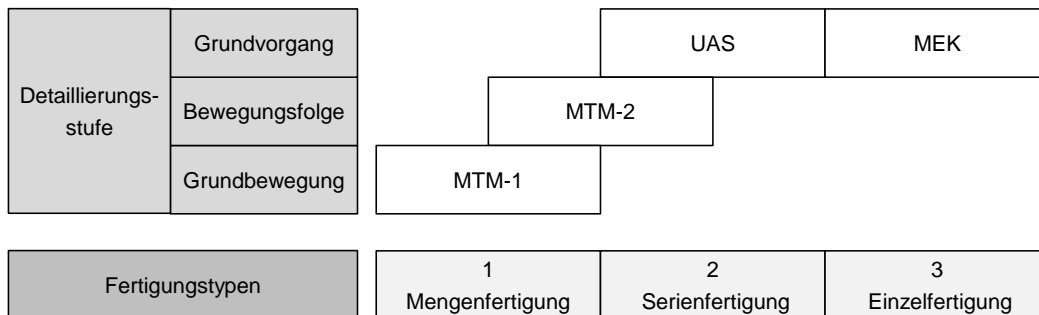
Abbildung 2-6 Ableitung von Plan-Zeiten mit den Ablaufarten [vgl. REFA97, S. 41ff.]

Damit verbindet die Methode die Erfassung von Ist-Zeiten und die Bestimmung von Plan-Zeiten und ermöglicht prinzipiell einen Vergleich beider Größen. Dieser Vergleich ist in der klassischen Methode jedoch nicht vorgesehen und ist zudem durch die Nutzung der Ist-Zeiten als Ausgangsgröße auch nur bedingt sinnvoll. Des Weiteren ist der Aufwand für die erforderliche Erfassung der Ist-Zeiten trotz des geringen Detaillierungsgrades recht hoch. Dieser Ansatz ist daher gut für die Planung geeignet, aber nur eingeschränkt für die Analyse der Produktivität.

### 2.3.3 MTM-1-Verfahren

#### Übersicht der MTM-Verfahren

Innerhalb der Gruppe der MTM-Verfahren („MTM“ - „Methods-Time Measurement“) wurden mehrere Methoden entwickelt, die sich für unterschiedliche Anwendungsfälle besonders eignen. Abbildung 2-7 zeigt eine Auswahl dieser Verfahren [vgl. Bokr06, S. 513].



13421

Abbildung 2-7 Übersicht der MTM-Verfahren [vgl. Bokr06, S. 513]

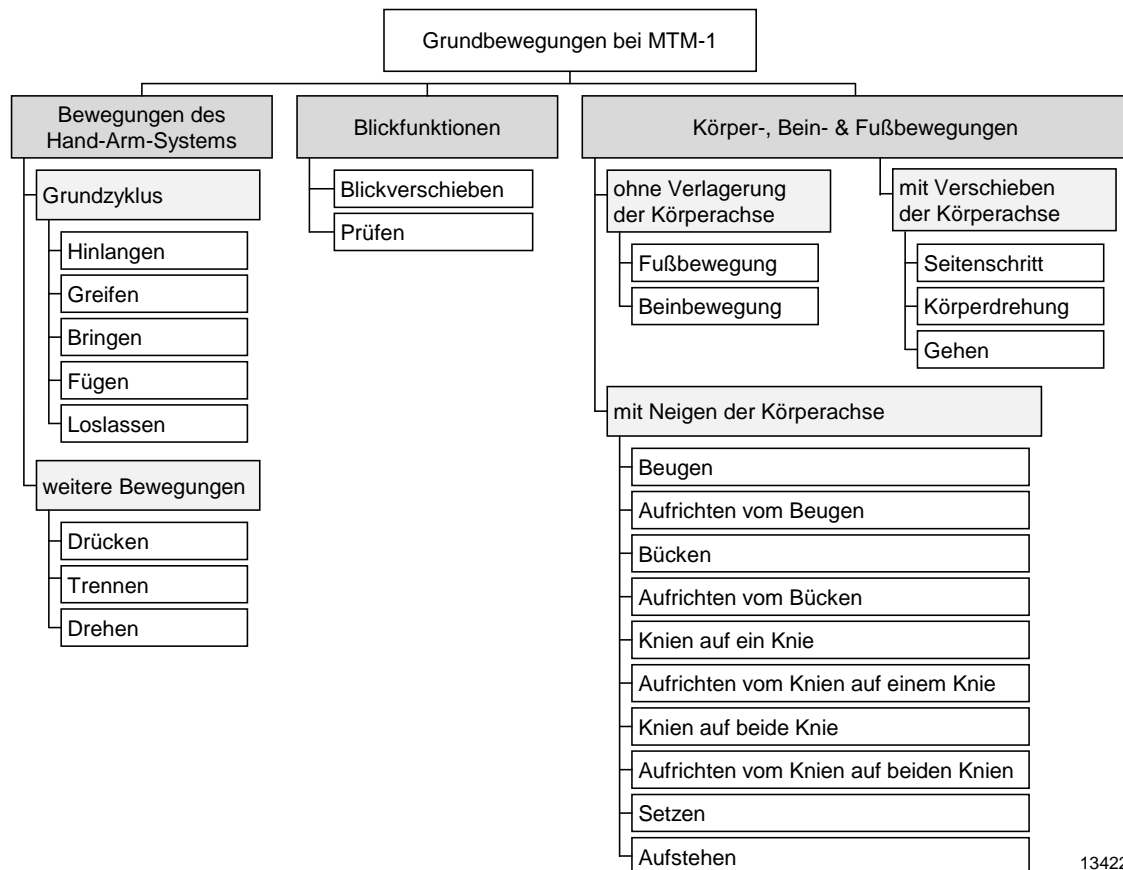
Das detaillierteste Verfahren ist das MTM-1-Verfahren, das Arbeitsabläufe in Grundbewegungen unterteilt. Aufgrund der hohen Detaillierung und des damit verbundenen Methodenaufwandes ist es vorrangig für die Großserienfertigung geeignet [vgl. Bokr06, S. 533ff.]. Für etwas kleinere Serien MTM-2 identifiziert Bewegungsfolgen [vgl. Bokr06, S. 652ff.].

UAS (Universelles Analysiersystem) eignet sich ebenfalls für die Serienfertigung, aufgrund der Betrachtung ganzer Vorgänge und des damit verbundenen geringeren Aufwandes aber auch für Kleinserien [vgl. Bokr06, S. 602ff.]. MEK (MTM in der Einzel- und Kleinserienfertigung) ist am aufwandsärmsten und damit insbesondere für die Einzelfertigung geeignet [vgl. Bokr06, S. 611ff.].

Alle MTM-Verfahren zerlegen den Arbeitsablauf zunächst in Grundbewegungen, Bewegungsfolgen oder Grundvorgänge. Anschließend ermitteln sie für diese Plan-Zeiten, indem sie die Art des Ablaufschrittes und Zeiteinflussgrößen bestimmen. Im Folgenden wird die Ermittlung der Plan-Zeiten mit dem MTM-1-Verfahren vorgestellt. Dabei stehen insbesondere die Ablaufschritte im Fokus, die verstärkt bei manuellen Tätigkeiten auftreten. Die Ausführungen orientieren sich dafür an Bokranz [vgl. Bokr06, S. 533ff.] und der Deutschen MTM-Vereinigung e. V. [vgl. Deut14, S. 31ff.].

Grundbewegungen von MTM-1

Die wichtigsten Bewegungen im MTM-1-Verfahren sind die Grundbewegungen. Diese stellen insbesondere bei Montagetätigkeiten den höchsten Anteil der Arbeitszeit dar [vgl. Lott12, S. 54]. Das Verfahren unterscheidet dabei Bewegungen des Hand-Arm-Systems, Blickfunktionen sowie Körper-, Bein- und Fußbewegungen (vgl. Abbildung 2-8). Insgesamt gibt es 25 verschiedene Grundbewegungen [vgl. Bokr06, S. 536ff.; Deut14, S. 33ff.].

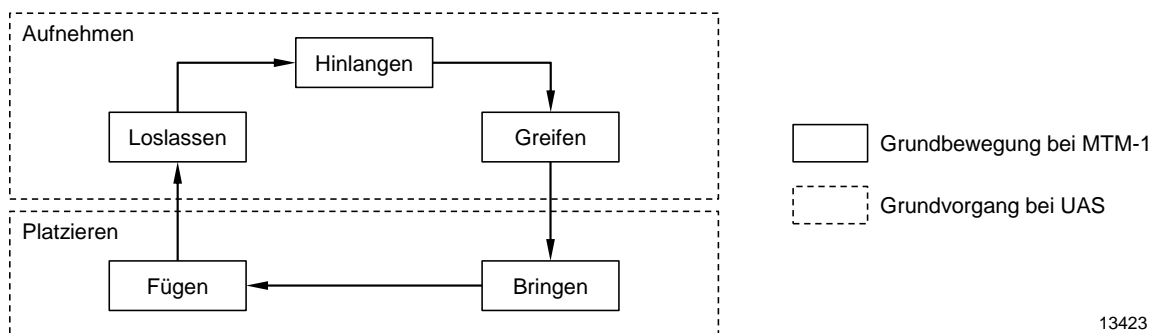


13422

**Abbildung 2-8 Grundbewegungen bei MTM-1 [vgl. Bokr06, S. 536ff.]**

Ein besonders wichtiger Teil dieser Grundbewegungen ist der Grundzyklus, der insbesondere bei Montagetätigkeiten bis zu 85 % des Planablaufs ausmacht [vgl. Lott12, S. 54]. Er besteht aus den Schritten: Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen und Loslassen (vgl. Abbildung 2-9) [vgl. Bokr06, S. 536f.; Deut14, S. 33]. Beim Zusammenbau eines Legomodells bewegt der Monteur beispielsweise zunächst die Hand zur Materialkiste mit dem nächsten Lego-Teil (*Hinlangen*), anschließend nimmt er das Teil auf (*Greifen*) und bewegt die Hand mit dem Teil zum Fügeort (*Bringen*). Danach montiert er das Teil (*Fügen*). Den Abschluss bildet das *Loslassen* des verbauten Teils.

Die vereinfachten MTM-Verfahren fassen die Grundbewegungen zu Abläufen zusammen. UAS fasst beispielsweise die Grundbewegungen *Loslassen*, *Hinlangen* und *Greifen* zum Grundvorgang *Aufnehmen* zusammen und das *Bringen* und *Fügen* zum *Platzieren*. Dies reduziert den Detaillierungsgrad und vor allem den Aufwand der Bewegungsanalyse [vgl. Bokr06, S. 602ff.].



13423

Abbildung 2-9 MTM-1-Grundzyklus [vgl. Deut14, S. 33]

### Zeiteinflussgrößen

Die MTM-Verfahren definieren für jede Bewegungsart spezifische Einflussgrößen, die der Anwender für die Bestimmung der Plan-Zeiten ermitteln muss. Im Folgenden werden die Einflussgrößen der MTM-1-Bewegung *Hinlangen* erläutert [vgl. Mayn48, S. 46ff.; Anti69, S. 15ff.; Bokr06, S. 542ff.; Deut14, S. 41ff.].

#### *Einflussgröße: Bewegungslänge*

Die Bewegungslänge ist eine wichtige Einflussgröße bei vielen Bewegungsarten der MTM-Verfahren. Sie beschreibt den zurückgelegten Weg vom Startpunkt bis zum Endpunkt der Bewegung (vgl. Abbildung 2-10). Im Fall der Bewegungsart *Hinlangen* ist hiermit der zurückgelegte Weg des Handgelenks gemeint [vgl. Anti69, S. 27ff.; Bokr06, S. 537ff.; Deut14, S. 42ff.]. Dieser ist besonders relevant für die benötigte Zeit (vgl. Tabelle 2-3 auf S. 21).



13424

Abbildung 2-10 Zeiteinflussgröße Bewegungslänge beim Hinlangen [vgl. Anti69, S. 27ff.]

*Einflussgröße: Bewegungsfall*

Die zweite Einflussgröße für das *Hinlangen* ist der Bewegungsfall. Tabelle 2-2 stellt die möglichen Ausprägungen dieser Größe dar [vgl. Anti69, S. 16ff.; Bokr06, S. 543; Deut14, S. 47ff.]. Wichtig ist die benötigte Genauigkeit der Bewegung. Gegenstände, die man erst aus einer Menge an ähnlichen Gegenständen auswählen muss (Fall C, z. B. eine Schraube in einer Kiste mit anderen Schrauben) erfordern eine andere Genauigkeit als Gegenstände, die einzeln an stets gleichen Orten stehen. Dies wirkt sich auf die benötigte Zeit für die Bewegung aus (vgl. Tabelle 2-3 auf S. 21).

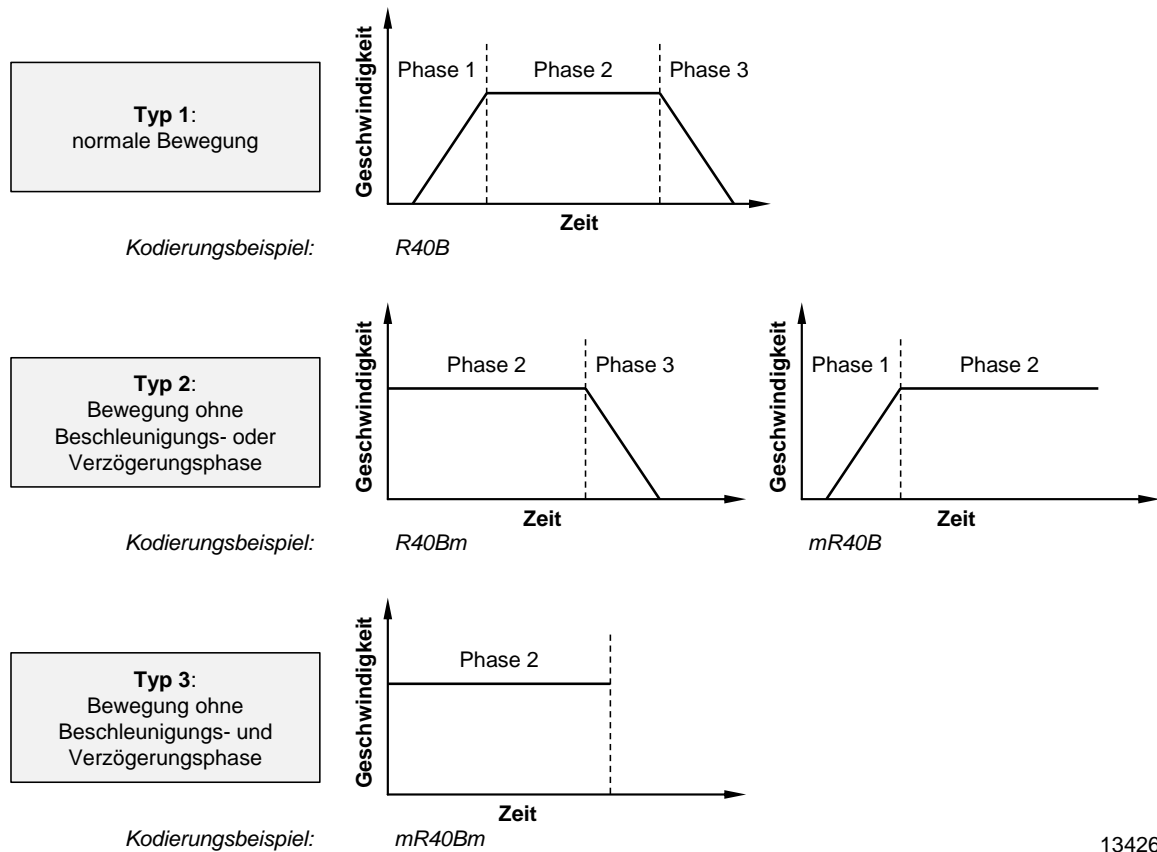
**Tabelle 2-2 Zeiteinflussgröße Bewegungsfall beim Hinlangen [vgl. Anti69, S. 16ff.]**

Bewegungsfall	Beschreibung	
A	automatisches, sorgloses Hinlangen	Hinlangen zu einem alleinstehenden Gegenstand, - der sich an einem genau bestimmten Ort befindet, - der in der anderen Hand liegt oder - auf dem die andere Hand ruht.
B	suchendes Hinlangen	Hinlangen zu einem alleinstehenden Gegenstand, der sich an einem von Arbeitszyklus zu Arbeitszyklus veränderten Ort befindet.
C	auswählendes Hinlangen	Hinlangen zu einem Gegenstand, der mit gleichen oder ähnlichen Gegenständen vermischt ist, sodass er ausgewählt werden muss.
D	genaues, vorsichtiges Hinlangen	Hinlangen zu - einem kleinen Gegenstand, - zu einem scharfkantigen Gegenstand oder - zu einem zerbrechlichen, leicht zu beschädigenden Gegenstand.
E	unbewusstes gewohnheitsmäßiges Hinlangen	Verlegen der Hand in eine unbestimmte Lage, - um die folgende Bewegungen vorzubereiten, - um die Hand aus der Arbeitszone zu entfernen oder - um das Gleichgewicht zu erlangen.

13425

*Einflussgröße: Bewegungsverlauf*

Die dritte Einflussgröße für das *Hinlangen* ist der Bewegungsverlauf [vgl. Anti69, S: 25f.; Bokr06, S. 545; Deut14, S. 55ff.]. Dieser beschreibt, ob es sich um eine Bewegung mit Beschleunigungs- und Verzögerungsphase handelt oder ob diese Phasen wegfallen (vgl. Abbildung 2-11). Im Normalfall ruht die Hand zu Beginn und am Ende einer Bewegung und man muss somit beschleunigen und verzögern (Typ 1). Die Beschleunigungsphase fällt weg, wenn sich die Hand zu Beginn der Bewegung bereits in die gewünschte Richtung bewegt. Dann muss sie nicht mehr beschleunigen (Typ 2, z. B. Betätigung eines Kippschalters und anschließendes *Hinlangen* zu einer Materialkiste in derselben Richtung). Die benötigte Zeit für diesen Bewegungsverlauf ist dementsprechend kleiner. Am schnellsten ist Typ 3, bei dem weder beschleunigt noch verzögert wird.

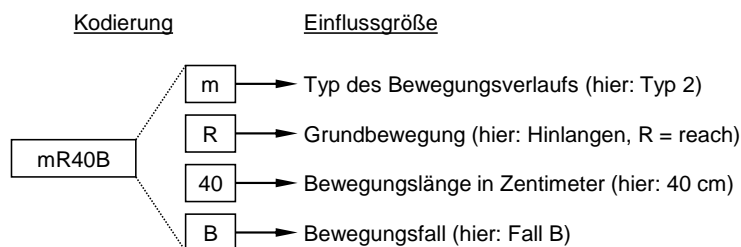


13426

Abbildung 2-11 Zeiteinflussgröße Bewegungsverlauf beim Hinlangen [vgl. Anti69, S: 25f.]

### Kodierung

Die Einflussgrößen der Bewegung können dann kodiert werden, um eine kurze und übersichtliche Schreibweise zu gewährleisten. Abbildung 2-10 zeigt ein Kodierungsbeispiel für die Bewegung *Hinlangen* und ist wie folgt aufgebaut. Das „R“ steht für die Bewegungsart *Hinlangen* (engl. „reach“). Daran schließt sich die Bewegungslänge in Zentimetern und der Bewegungsfall an. Ein „m“ vor dem Code kennzeichnet das Fehlen einer Beschleunigungsphase im Bewegungsverlauf. Analog erfolgt dies, wenn die Verzögerungsphase wegfällt [vgl. Bokr06, S. 542ff.; Deut14, S. 42].



13427

Abbildung 2-12 Kodierungsbeispiel für die MTM-1-Bewegung Hinlangen [vgl. Deut14, S. 42]

Ableitung der Plan-Zeit

Man kann die ermittelten Zeiteinflussgrößen nun nutzen, um die Plan-Zeit für die Bewegung abzuleiten. Dafür geben Tabellen für jede Kodierung eine Normzeit an (vgl. Tabelle 2-3). Beim MTM-1-Verfahren sind diese Tabellen auf Datenkarten vermerkt. Die Zeiten sind Durchschnittswerte, die ein geübter Werker ohne Ermüdung über eine längere Zeit durchhalten kann und werden in TMU (Time Measurement Unit) angegeben [vgl. Deut14, S. 18ff.]. Eine TMU entspricht dabei einem hunderttausendstel einer Stunde. Für das zuvor gezeigte Kodierungsbeispiel (mR40B) ergibt sich eine Plan-Zeit von 12,8 TMU (ca. 0,46 Sekunden) [vgl. Mayn48, S. 44f.]. Der Methodenanwender führt dieses Vorgehen für alle Schritte des Arbeitsablaufs durch und kann dann die Zeit für den gesamten Ablauf ermitteln.

**Tabelle 2-3 Ausschnitt der Normzeitabelle für die Bewegung Hinlängen [vgl. Bokr06, S. 538]**

Bewegungslänge in cm	Normzeitwerte in TMU (1 TMU = 0,036 s)					
	R-A	R-B	R-C R-D	R-E	mR-A R-Am	mR-B R-Bm
10	6,1	6,3	8,4	6,8	4,9	4,3
20	7,8	10,0	11,4	9,2	6,5	7,1
30	9,5	12,8	14,1	11,7	8,0	9,9
40	11,3	15,6	16,8	14,1	9,6	<b>12,8</b>
50	13,0	18,4	19,6	16,5	11,2	15,7
60	14,7	21,2	22,3	19,0	12,8	18,5
70	16,5	24,1	25,0	21,4	14,3	21,4
80	18,2	26,9	27,7	23,9	15,9	24,2

← Plan-Zeit des Kodierungsbeispiels  
= 12,8 TMU

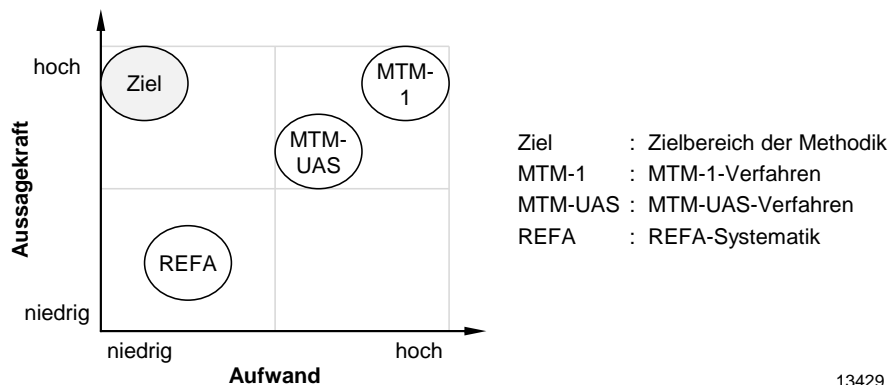
13428

Das MTM-1-Verfahren hat mehrere Vorteile: Es ist zum einen sehr detailliert, da es die Abläufe in sehr kleine Schritte zerlegt. Mit den Einflussgrößen gibt es zudem logische Ansatzpunkte für Verbesserungen vor. Zum anderen ermöglicht es einen Vergleich mit den Ist-Zeiten des Ablaufs. Diese hohe Detaillierung verhindert bisher jedoch eine vergleichbare, praktikable Erfassung der Ist-Zeiten mit den bestehenden Methoden (vgl. Abschnitt 2.2.4).

Ein Nachteil der mit MTM-1 ermittelten Zeiten ist, dass sie sich nur bedingt für die Planung eignen, falls die Ist-Zeiten stark von ihnen abweichen. Das kann beispielsweise der Fall sein, wenn ungeübte Werker montieren oder die Werker oft vom Standardablauf abweichen. Ein weiterer Nachteil ist der hohe Aufwand der Methodik, der sich aus der äußerst detaillierten Betrachtung der einzelnen Bewegungen ergibt. Hinzu kommen notwendige Schulungen, um die Methodik vollständig und korrekt anzuwenden.

**2.3.4 Defizite der Methoden**

Wie bei den Methoden zur Erfassung der Ist-Zeiten eignen sich die Methoden zur Bestimmung der Plan-Zeiten nur eingeschränkt für eine detaillierte Analyse manueller Arbeitsvorgänge. Auch hier fehlt eine Methode, die mit wenig Aufwand eine hohe Aussagekraft erreicht. Abbildung 2-13 zeigt eine Auswahl der Methoden zusammen mit dem Zielbereich einer zu entwickelnden Methode.



13429

Abbildung 2-13 Aufwand und Aussagekraft von Methoden zur Bestimmung von Plan-Zeiten

Für eine hohe Aussagekraft muss die Methode in der Lage sein, Abläufe detailliert zu erfassen und Zeiten zu generieren, die sich als Vergleichswert für die Ist-Zeiten eignen (Soll-Zeiten). Zudem muss sie Zeiten ableiten können, die sich für die Planung eignen.

Die REFA-Systematik (vgl. Abschnitt 2.3.2) ist zwar ausreichend detailliert für die Bestimmung von Plan-Zeiten. Für eine aussagekräftige Analyse eignet sie sich jedoch nur bedingt, da die Ablaufarten keine konkreten Hinweise für Verbesserungsansätze geben. Der Aufwand dieser Methode ist bei bereits aufgenommenen Ist-Zeiten relativ niedrig.

Die MTM-Verfahren und insbesondere das MTM-1-Verfahren (vgl. Abschnitt 2.3.3) erfassen die Abläufe sehr detailliert und erzeugen geeignete Soll-Zeiten; die Werte lassen sich aber nur bedingt für die Planung verwenden, wenn die Ist-Zeiten stark davon abweichen. Zudem ist das MTM-1-Verfahren mit sehr viel Aufwand verbunden, der sich bisher nur für die Großserienfertigung lohnt (vgl. Abbildung 2-7).

Abbildung 2-13 fasst die Überlegungen zusammen und zeigt auf, dass die Methoden zur Bestimmung von Plan-Zeiten eine hohe Aussagekraft erreichen können, dafür jedoch einen hohen Aufwand erfordern. Wie bei den Methoden zur Ist-Zeiterfassung werden diese Methoden bisher nicht durch geeignete Arbeitsmittel unterstützt, um den Aufwand zu reduzieren.

## 2.4 Methoden zur Analyse der Produktivität

Die Plan- und Ist-Zeiten für Arbeitsabläufe können verwendet werden, um zu untersuchen, wie produktiv die Abläufe sind und wo in den Abläufen Potenziale zur Verbesserung sind. Dafür existieren unterschiedliche Analysemethoden. Dieser Abschnitt stellt eine Auswahl vor:

- Bewertung der Wertschöpfung (Abschnitt 2.4.1)
- Primär-Sekundär-Analyse nach Lotter (Abschnitt 2.4.2)

Abschnitt 2.4.3 fasst anschließend die Defizite der bestehenden Methoden zur Analyse der Produktivität zusammen.

### 2.4.1 Bewertung der Wertschöpfung

Ein Ansatz, der insbesondere in der Industrie weite Verbreitung gefunden hat, ist die Unterteilung von Prozessen in wertschöpfende und nicht wertschöpfende Abläufe. Insbesondere die Lehre des Lean Managements mit seinen Methoden zur Vermeidung von nicht wertschöpfenden Vorgängen hat in vielen Unternehmen Einzug gefunden [vgl. Woma04, S. 23ff.].

Eine gängige Einteilung gliedert Arbeitsprozesse in [vgl. Woma04, S. 41ff.; Like13, S. 57ff.]:

- *Wertschöpfende Prozesse* tragen direkt zur Wertschöpfung des Produktes bei und erhöhen somit den Kundennutzen. In klassischen Fertigungen sind zum Beispiel Schweiß- oder Montageprozesse wertschöpfend.
- *Nicht wertschöpfende, aber notwendige Prozesse* tragen zwar nicht direkt zur Wertschöpfung des Produktes bei, sind aber notwendig, um die Wertschöpfung zu realisieren. Dazu gehört zum Beispiel die Vorbereitung von Schweißkanten vor dem Schweißen.
- *Nicht wertschöpfende Prozesse* tragen weder zur Wertschöpfung des Produktes bei, noch werden sie dafür benötigt. Dies umfasst zum Beispiel warten, suchen oder Doppelarbeit.

Diese Unterteilung in wertschöpfende Prozesse und Verschwendung wird genutzt, um alle auftretenden Ablaufschritte zu bewerten. Wenn dies geschehen ist, kann man die Gesamtzeitdauern je Wertschöpfungsart ermitteln und so beispielsweise den Wertschöpfungsanteil im Ablauf bestimmen (vgl. Formel 2-2).

$$WA = \frac{ZW}{ZW + ZNW} \quad (2-2)$$

- WA* : Wertschöpfungsanteil [-]  
*ZW* : wertschöpfende Arbeitszeit [h]  
*ZNW* : nicht-wertschöpfende Arbeitszeit [h]

Liker definiert sieben Arten von Verschwendungen [vgl. Like13, S. 57ff.]:

- hohe Bestände,
- unnötige Bewegungen,
- Ausschuss und Nacharbeit,
- Wartezeit,
- Verschwendung durch Überproduktion,
- unnötige Transporte / Förderung und
- falsche Technologie / Fehler bei der Bearbeitung.

Diese Verschwendungsarten unterstützen den Anwender bei der Identifizierung typischer Verschwendungen in Produktionsprozessen. Zudem erlauben sie es, die erkannten Probleme beziehungsweise Potenziale zu kategorisieren.

Die Definition von wertschöpfenden Tätigkeiten lässt sich auf alle Arbeitsprozesse übertragen. Damit kann man in vielen Anwendungsbereichen Verschwendungen identifizieren und Ansatzpunkte für Verbesserungsmaßnahmen finden. Zudem ist die Methode leicht verständlich.

Problematisch kann zum einen die Subjektivität der Bewertung der Arbeitsschritte sein. Materialtransporte sind zwar immer Verschwendung, aber bei manuellen Prozessen stellt sich beispielsweise die Frage, bis zu welcher Entfernung sie unumgänglich sind. Zum anderen liefert die Methode zwar Ansatzpunkte für Verbesserungen, konkrete Maßnahmen zur Eliminierung von Verschwendung liefert sie jedoch nicht. Zudem besteht die Gefahr, mögliche Verbesserungen der wertschöpfenden Arbeitsabläufe zu übersehen.

Die Methode findet in der Regel bei der Bewertung von Ist-Zeiten Anwendung, um Verschwendungen in den Ist-Abläufen aufzudecken. Sie eignet sich prinzipiell jedoch auch für die Planung von Arbeitsabläufen, um bereits dort Schwachpunkte zu identifizieren und zu beheben. Sie erlaubt dann auch einen Vergleich zwischen Plan- und Ist-Werten.

### 2.4.2 Primär-Sekundär-Analyse

Die Primär-Sekundär-Analyse (PSA) ist eine Methode, die Potenziale zur Verbesserung in Produktionsunternehmen mit geringem Aufwand aufdecken kann und eine Bewertung der Arbeitsprozesse ermöglicht. Sie untersucht dabei in ihrer klassischen Form Abläufe, deren Zeitdauern mit Hilfe der MTM-Methodik ermittelt wurden. Die grundlegende Fragestellung der Methode ist, welcher Anteil der Arbeit den Kundennutzen erhöht [vgl. Lott02, S. 4f.].

Wichtigstes Element zur Beantwortung ist die Unterteilung des Prozessaufwandes in Primäraufwand (PA) und Sekundäraufwand (SA). Primäraufwände sind hierbei Aufwendungen, die direkt zur Wertschöpfung beitragen. Ein Beispiel hierfür sind die Fügevorgänge in einem Montageprozess. Sekundäraufwände hingegen tragen nicht direkt zur Wertschöpfung bei. Ein Beispiel hierfür sind Dokumentationstätigkeiten [vgl. Lott02, S. 6]. Die Unterteilung orientiert sich an den wertschöpfenden und nicht-wertschöpfenden Prozesse des Lean Management (vgl. Abschnitt 2.4.1).

Mit dieser Einteilung der Arbeitsabläufe bewertet der Anwender alle Vorgänge in einem Arbeitssystem. Durch die Zusammenfassung der Primäraufwände und der Sekundäraufwände kann er dann den wirtschaftlichen Wirkungsgrad (vgl. Formel 2-3) bestimmen, der das mögliche Potenzial für Verbesserungen verdeutlicht [vgl. Lott02, S. 6].

$$W = \frac{ZPA}{ZPA + ZSA} \quad (2-3)$$

*W* : Wirkungsgrad [-]  
*ZPA* : Zeitdauer des Primäraufwands [s]  
*ZSA* : Zeitdauer des Sekundäraufwands [s]

Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis zwischen der Dauer der Primäraufwände und der Gesamtdauer. Er nimmt den Wert eins an, wenn die Arbeitsaufgabe ausschließlich aus wertschöpfenden Arbeitsschritten besteht, und wird kleiner, je größer der Anteil an Sekundäraufwänden ist. Besteht die Arbeitsaufgabe nur aus nicht wertschöpfenden Tätigkeiten, nimmt er den Wert null an [vgl. Lott02, S. 6].

Zur grafischen Repräsentation der Primär- und Sekundärvorgänge eignet sich die vektorielle Darstellung (vgl. Abbildung 2-14). Hierbei werden die Primär- in Abszissenrichtung und die Sekundäraufwände in Ordinatenrichtung aufgetragen [vgl. Lott02, S. 6]. Ein horizontaler Vektor stellt dabei einen vollständig primären Vorgang dar, während ein vertikaler Vektor einen vollständig sekundären Vorgang repräsentiert. Die grafische Addition aller Vorgänge ergibt den Vektor des Gesamtvorganges mit dem Anstieg  $\phi$  (vgl. Formel 2-4).

$$\tan \phi = \frac{ZSA}{ZPA} = \frac{1}{W} - 1 \quad (2-4)$$

- $\phi$  : Anstieg des Gesamtvektors [-]  
 $W$  : Wirkungsgrad [-]  
 $ZPA$  : Zeitdauer des Primäraufwands [s]  
 $ZSA$  : Zeitdauer des Sekundäraufwands [s]

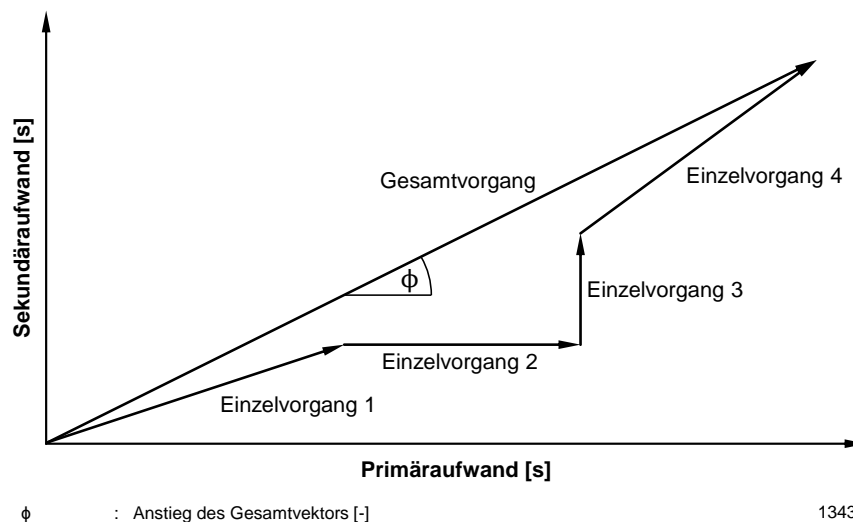


Abbildung 2-14 Vektorielle Darstellung von Primär- und Sekundäraufwänden nach Lotter [vgl. Lott02, S. 6]

Wenn der Anteil an sekundären Vorgängen steigt, sinkt der Wirkungsgrad und die Steigung des Vektors nimmt zu. Umgekehrt repräsentiert ein flacher Aufwandsvektor einen hohen Wirkungsgrad.

### Analysestufen

Das Vorgehen der PSA kann in unterschiedlichen Stufen erfolgen, die verschiedene Bereiche eines Produktionsunternehmens abdecken. Lotter gibt fünf Detaillierungsstufen vor. Die ersten beiden Stufen setzen sich mit den Vorgängen an Montage- oder Fertigungslinien auseinander. Die letzten drei schließen zusätzlich indirekte Bereiche in die Analyse mit ein [vgl. Lott02, S. 9ff.].

### 1) Grundanalyse

Bei der ersten Stufe, der Grundanalyse, untersucht man die Vorgänge in einer Montage- oder Fertigungslinie. Dabei kann man je nach Bedarf die Ergebnisse der Feinanalyse hinzufügen.

### 2) Feinanalyse

Die Feinanalyse untersucht detailliert Arbeitsvorgänge an einer einzelnen Arbeitsstation. Als Grundlage dafür verwendet sie die Grundbewegungen der MTM-Analyse, die einen hohen Anteil der Arbeitstätigkeiten darstellen [vgl. Lott12, S. 54].

### 3) Erweiterte Analyse

Bei der erweiterten Analyse ergänzt man die Ergebnisse der ersten beiden Stufen um unmittelbar zuordenbare indirekte Aufwände ergänzt. Beispiele sind Vorarbeiter und Meister.

### 4) Bereichsanalyse der Einzelbereiche

Diese Stufe umfasst übergeordnete allgemeine Aufwände wie Betriebsleitung und Arbeitsvorbereitung.

### 5) Unternehmensanalyse

Bei der Unternehmensanalyse fasst man die Bereichsanalysen zusammen und ergänzt produktionsnahe und administrative Dienstleistungen.

Bei strenger Definition der Primäraufwände sind nur wenige Vorgänge in Produktionsunternehmen wertschöpfend. Für die Untersuchung einer Montagelinie in den ersten beiden Stufen würde dies beispielsweise bedeuten, dass nur die eigentlichen Fügebewegungen Primäraufwände sind. Der Rest der Vorgänge wie das Hinlangen zu, Greifen und Bringen von Material etc. wären Sekundäraufwände. Eine solch strenge Definition würde zu einem sehr geringen Wirkungsgrad führen und damit die Aussagekraft reduzieren. Zudem ist ein bestimmtes Maß an sekundären Aufwänden notwendig, um die primären Vorgänge durchführen zu können [vgl. Lott12, S. 54].

Um dem gerecht zu werden, verwendet die PSA ein Mindestmaß an Aufwand für Bewegungen. Für jede Bewegung ist dieses Maß dann der Primäraufwand. Der restliche Aufwand ist dann der Sekundäraufwand der Bewegung. Da die PSA auf dem MTM-System basiert, verwendet man die Einflussgrößen auf die Plan-Zeit als Kriterien für die Bestimmung des Mindestaufwandes [vgl. Lott12, S. 54ff.]. So schlägt Lotter beispielsweise vor, eine Mindestlänge für Bewegungen zu definieren, die sich aus der Entfernung zur nächstliegenden Materialkiste ergibt.

Die Methode bietet eine gute Möglichkeit, manuelle Arbeitsabläufe zu bewerten. Sie eignet sich, Prozesse sehr detailliert zu untersuchen und Schwachstellen im Ablauf aufzuzeigen.

Sie ist jedoch ausschließlich für die Bewertung von Plan-Abläufen entworfen worden und identifiziert nur Schwachstellen im Soll-Prozess. Abweichungen vom Soll-Prozess im realen Ablauf untersucht sie nicht. Zudem ist die Einteilung in Primär- und Sekundäraufwände nicht detailliert genug, um einen aussagekräftigen Vergleich zwischen Plan- und Ist-Zeiten zu ermöglichen.

### 2.4.3 Defizite der Methoden

Zur aussagekräftigen Bewertung manueller Arbeitsabläufe muss eine Methode zur Bewertung der Produktivität

- alle Tätigkeiten detailliert und objektiv bewerten,
- die Ergebnisse verständlich darstellen und Verbesserungsvorschläge ableiten sowie
- Ist- und Plan-Abläufe untersuchen und diese vergleichen.

Die Bewertung der Wertschöpfung erlaubt zwar die Bewertung aller Tätigkeiten und stellt die Ergebnisse verständlich dar, in der Regel ist diese Bewertung jedoch subjektiv. Zudem eignet sie sich nur bedingt zur Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen. Sie ermöglicht zudem zwar prinzipiell einen Vergleich von Ist- und Plan-Abläufen. Sie ist in ihrer ursprünglichen Form jedoch nicht dafür vorgesehen.

Die PSA baut auf der Wertschöpfungsbewertung auf und stellt somit eine Methode dar, die sich dazu eignet, alle Tätigkeiten bei manuellen Prozessen zu bewerten. Die Ergebnisse sind zudem durch die Anlehnung an den Wertschöpfungsanteil leicht verständlich. Bei Verwendung der MTM-Verfahren werden außerdem konkrete Ansatzpunkte für Verbesserungen geliefert. Durch die Zusammenfassung der Einflüsse zu nur zwei unterschiedlichen Zeitanteilen reduziert sich die Detaillierung im Ergebnis jedoch stark. Zudem ist die Methode lediglich für die Analyse von Plan-Abläufen vorgesehen. Für die Untersuchung von Ist-Abläufen und einen Vergleich zwischen Plan- und Ist-Abläufen fehlt daher eine durchgängige Bestimmung der Zeiten.

Tabelle 2-4 fasst die Defizite der Methoden zusammen.

**Tabelle 2-4 Defizite der Methoden zur Analyse der Produktivität**

Anforderung	Analysemethode	
	Bewertung der Wertschöpfung	Primär-Sekundär-Analyse
objektive Bewertung einzelner Tätigkeiten	nein	ja
Ableitung konkreter Verbesserungsvorschläge	nein	indirekt
geeignete Darstellung der Ergebnisse	ja	ja
Vergleich von Plan- und Ist-Ablauf	nein	nein

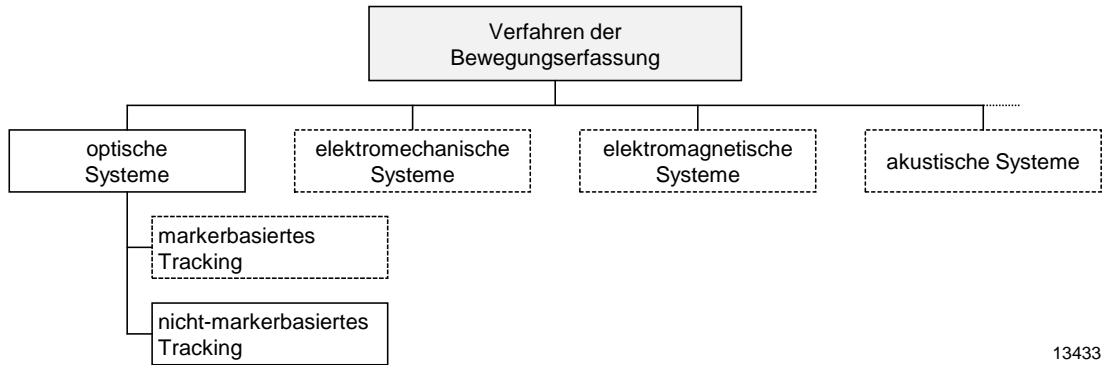
13432

### 2.5 Bewegungserfassung mit 3D-Kameras

Eine detaillierte Untersuchung von Arbeitsvorgängen erfordert mit den klassischen Methoden der Zeiterfassung einen hohen Aufwandaufwand (vgl. Abschnitte 2.2.4 und 2.3.4). Eine Technologie, die sich zur Unterstützung der Zeiterfassung und somit zur Aufwandsreduzierung eignet, ist die Bewegungserfassung (engl. motion tracking). Abschnitt 2.5.1 zeigt zunächst eine Übersicht über die verschiedenen Verfahren, bevor Abschnitt 2.5.2 genauer auf die Bewegungserfassung mit einer 3D-Kamera, der Microsoft Kinect, eingeht. Den Abschluss bildet eine Darstellung bisher existierender Ansätze zur Untersuchung von Arbeitsabläufen mit 3D-Kameras (Abschnitt 2.5.3).

### 2.5.1 Verfahren der Bewegungserfassung

Die Verfahren der Bewegungserfassung sind in der Lage, menschliche Bewegungen zu erkennen und nachzuverfolgen. Die ermittelten Daten werden digital so aufbereitet, dass sie verarbeitet werden können [vgl. Jack06, S. 165; Kita08, S. 1]. Es existieren dabei unterschiedliche technologische Ansätze zur Aufnahme. Abbildung 2-15 stellt einen Teil dieser Ansätze vor [vgl. Jack06, S. 167ff.].



13433

Abbildung 2-15 Verfahren der Bewegungserfassung [vgl. Jack06, S. 167ff.]

Bei den *optischen Systemen* strahlt ein Sender ein optisches Signal, in der Regel Infrarot-Strahlen, aus. Dieses Signal wird reflektiert und von einem Empfänger aufgenommen und ausgewertet [vgl. Jack06, S. 170f.]. Beim *markerbasierten Tracking* reflektieren sogenannte am Körper getragene Marker das optische Signal. Beim *nicht-markerbasierten Tracking* reflektiert der Körper das Signal [vgl. Kita08, S. 8f.]. Dadurch ergibt sich bei der zweiten Variante der Vorteil, dass man nichts am Körper tragen muss. Beide Varianten der *optischen Systeme* sind anfällig für Verdeckungen bei der Aufnahme [vgl. Jack06, S. 171].

Zu den *elektromechanischen Systemen* gehören zum Beispiel Exo-Skelette oder Anzüge, die man am Körper trägt und die über Potentiometer oder Inertialsensoren die Körperhaltung ermitteln. Vorteilhaft bei diesen Systemen ist die Tatsache, dass die Erfassung recht genau ist, da keine Verdeckung auftritt. Nachteilig ist hier, dass die Systeme die untersuchte Person bei der Ausführung der Bewegung behindern können [vgl. Jack06, S. 167f.].

Bei den *elektromagnetischen Systemen* erfolgt das Tracking über ein elektromagnetisches Feld. Dazu positioniert man Sender im Aufnahmebereich und bringt Empfänger am Körper der erfassten Position an, die den elektromagnetischen Fluss messen. Auch hier ist Verdeckung kein großes Problem, die Empfänger schränken jedoch auch hier die Person in ihren Bewegungen ein. Zudem kann die Kalibrierung dieser Systeme sehr aufwändig sein [vgl. Jack06, S. 169].

Die *akustischen Systeme* funktionieren prinzipiell wie die elektromagnetischen Systeme. Das Tracking erfolgt hier aber über akustische Signale im Ultraschallbereich. Vor- und Nachteile sind damit ähnlich. Unterschied ist jedoch, dass hier durch Verdeckung und Reflektion Fehler entstehen können [vgl. Jack06, S. 170].

Diese Arbeit verwendet ein Trackingverfahren, das zu den nicht-markerbasierten optischen Systemen gehört [vgl. Clar12, S. 376]. Abschnitt 2.5.2 stellt dieses Verfahren detaillierter vor.

## 2.5.2 Bewegungserfassung mit der Microsoft Kinect

Die Kinect ist eine von Microsoft entwickelte Kamera, die in der Lage ist, menschliche Bewegungen zu erfassen. Sie wurde ursprünglich als Bewegungssteuerung für eine Spielekonsole entwickelt, ohne eine physische Verbindung zum Nutzer zu benötigen [vgl. Rupp12, S. 215]. Seit 2014 existiert die zweite Version der Kinect, die technisch gegenüber der ersten Version ausgereifter ist. So ist beispielsweise die Auflösung der integrierten Kameras höher (vgl. Tabelle 2-5) [vgl. Lach15, S. 93f.]. Microsoft stellt für die Verwendung ein Software Development Kit (SDK) zur Verfügung, das die Nutzung ohne die Konsole ermöglicht.

Diese Arbeit verwendet die ausgereifere Microsoft Kinect 2.0 als Mittel zur Bewegungserfassung und kürzt sie im weiteren Verlauf mit „Kinect“ ab.

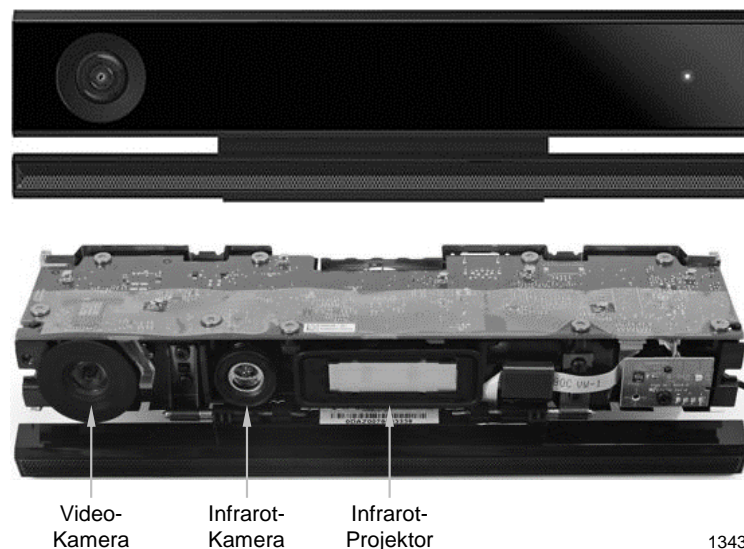
**Tabelle 2-5 Gegenüberstellung der Versionen der Microsoft Kinect [vgl. Lach15, S. 93f.]**

Eigenschaft	Kinect 1.0	Kinect 2.0
Auflösung RGB-Kamera	650 x 480	1920 x 1080
Auflösung Tiefen-Kamera	320 x 240	512 x 424
Reichweite des Trackings	1,2 m - 3,5 m	0,5 m - 4,5 m
erfasste Akteure	2 (4 passiv)	6
erfasste Gelenkpunkte	20	25

13434

### Bauteile

Die wichtigsten Bauteile der Kinect für die Bewegungserfassung sind der eingebaute Infrarot-Projektor sowie die Infrarot-Kamera, die die Erstellung eines Tiefenbildes ermöglichen. Ein weiteres relevantes Bauteil ist die Videokamera, die eine Aufnahme der visuellen Information des beobachteten Ablaufs ermöglicht. Neben diesen Bauteilen sind in der Kinect noch Mikrofone verbaut, die akustische Information aufnehmen können [vgl. Lach15, S. 93f.]. Diese werden für die Bewegungserfassung jedoch nicht genutzt. Abbildung 2-16 zeigt den Aufbau der Kinect mit den wichtigsten Bauteilen.



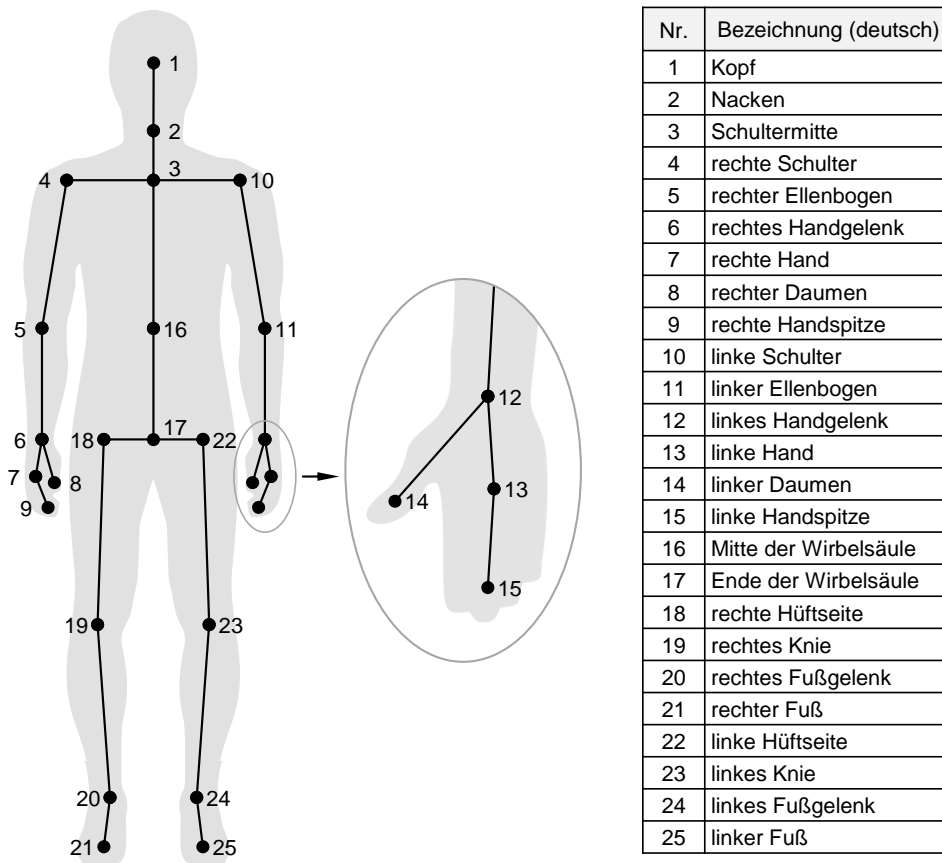
13435

**Abbildung 2-16 Frontansicht und relevante Bestandteile der Kinect [vgl. Geek13, Micr14]**

Funktionsweise

Die Erfassung von Menschen erfolgt über den Infrarot-Projektor und die Infrarot-Kamera. Der Projektor sendet dabei Infrarotlicht in den Beobachtungsbereich, wo Personen oder Objekte das Licht reflektieren. Die Kamera nimmt dann dieses reflektierte Licht auf. Die Kinect ermittelt anschließend über die Laufzeitunterschiede der Infrarotwelle die Abstände zwischen Kinect und reflektierenden Objekten [vgl. Stew15, S. 1 ff.]. Mithilfe dieser Informationen erstellt sie ein Teil-3D-Modell des Aufnahmebereiches. Die Kinect gleicht dieses anschließend mit einer Datenbank von aufgezeichneten Körperhaltungen ab, um Menschen im Aufnahmebereich zu erkennen.

Sind Personen erfasst, ermittelt die Kinect die Position von 25 Gelenkpunkten je Person (vgl. Abbildung 2-17) [vgl. Zhan12, S. 5 ff.]. Mit Hilfe des SDK kann man die Raumkoordinaten dieser erkannten Gelenkpunkte auslesen. Die Bewegungserfassung erfolgt dabei mit einer Aufnahmezeitrate von 30 Aufnahmen pro Sekunde.



13436

**Abbildung 2-17 Durch die Kinect erfasste Punkte am menschlichen Körper**

Ein Einsatz der Kinect für die Erfassung von Ist- und Plan-Zeiten sowie zur Analyse der Arbeitsproduktivität zeichnet sich insbesondere durch die folgenden Vorteile aus:

- Die Möglichkeit des optischen Trackings ohne Marker oder weitere Hilfsmittel erlaubt einen unkomplizierten und aufwandsarmen Aufbau der Kinect am Einsatzort.
- Die Erfassung unterschiedlicher Gelenkpunkte mit einer hohen Aufnahmezeit erlaubt die Zeiterfassung von Bewegungen mit hoher Detaillierung und guter Genauigkeit.
- Der niedrige Preis der Kinect (ca. 150€) und die Kompatibilität mit üblichen Windows-Rechnern resultieren in geringen Anschaffungskosten.

Die Anwendung des markerlosen, optischen Trackings ist jedoch nicht nur mit Vorteilen verbunden. So können beispielsweise Verdeckungen im Sichtfeld der Kamera die Erfassung einschränken. Zudem kann die Erkennung von Körpern in den erfassten Daten ebenfalls fehlerhaft sein.

### 2.5.3 Methoden zur Analyse von Arbeitsabläufen mit 3D-Kameras

Neben den klassischen Methoden zur Analyse von Arbeitsabläufen wurden in den letzten Jahren Methoden entwickelt, die die Kinect und ihre Möglichkeit zur Bewegungserfassung nutzen. Die entwickelten Methoden lassen sich einteilen in Methoden, die die Produktivität untersuchen und in Methoden, die die Ergonomie untersuchen.

#### Methoden zur Untersuchung der Produktivität

Escoria et al. haben eine Methode entwickelt, die typische Tätigkeiten bei Bauarbeiten erkennt [vgl. Esco12, S. 879ff.]. Dafür ordnen sie diesen Tätigkeiten zunächst bestimmten Kombinationen an Körperhaltungen zu. Die aufgenommenen Daten überprüfen sie dann dahingehend, ob in einem Zeitbereich diese Kombinationen vonhaltungen auftreten. Dieser Ansatz eignet sich für Arbeitsaufgaben, bei denen eine geringe Anzahl verschiedenartiger Tätigkeiten auftreten, die sich zudem durch unterschiedliche Körperhaltungen unterscheiden. Ein Nachteil dieses Ansatzes ist, dass man zunächst alle möglichen Tätigkeiten und ihre Haltungen bestimmen muss. Zudem muss man die Zeitbereiche der Tätigkeiten vorher manuell festlegen.

Eine Erweiterung dieser Methode erkennt neben den Haltungen die verwendeten Objekte, was die Identifizierung der Tätigkeiten verbessert [vgl. Kim13, S. 3ff.]. Khosrowpour et al. entwickeln diesen Ansatz zusätzlich weiter. Sie ermöglichen es, typische Tätigkeiten bei längeren Aufnahmen zu erkennen und ihnen automatisch Start- und Endzeitpunkte zuzuordnen [vgl. Khos14, S. 74ff.]. Dies erfolgt, indem sie die Verteilung der Haltungen über den Zeitraum analysieren.

Ein weiterer Ansatz zur Analyse der Produktivität mit der Kinect stammt von Han et al. [vgl. Han14, S. 244ff.]. Bei diesem Ansatz werden Leistungsunterschiede zwischen Mitarbeitern ermittelt, indem unterschiedliche Personen den gleichen Arbeitsablauf durchführen. So kann man beispielsweise geübte und ungeübte Werker vergleichen und Verbesserungspotenziale ableiten.

Dieser Ansatz ist damit zwar prinzipiell für alle Arbeitsaufgaben anwendbar, zeigt jedoch nur Potenziale durch mangelnde Erfahrung auf. Probleme im bestehenden Ablauf des geübten Werkers identifiziert er nicht. Zudem eignet sich diese Methode nur für die Untersuchung einzelner Ablaufabschnitte und damit nicht für längere Zeiträume mit mehreren Abschnitten.

### Methoden zur Untersuchung der Ergonomie

Neben den Methoden zur Untersuchung der Produktivität wurden die Möglichkeiten der Kinect insbesondere genutzt, um ergonomische Untersuchungen zu ermöglichen. So haben Ray und Teizer eine Methode entwickelt, die die Körperhaltungen bei Bautätigkeiten klassifiziert und anschließend die Ergonomie der beobachteten Vorgänge bewertet [vgl. Ray12, S. 439ff.]. Martin et al. entwickelten eine Methodik, die die beobachteten Körperhaltungen auswertet und errechnet, welches Maximalgewicht in der Haltung gehoben werden sollte [vgl. Mart15, S. 50ff.].

Zudem wurden klassische Analysemethoden der Ergonomie durch die Bewegungserfassung der Kinect umgesetzt. So haben Haggag et al. das RULA-Verfahren (*Rapid Upper Limb Assessment*) realisiert, das alle Gelenkwinkel des Oberkörpers untersucht und so die Haltung bewertet [vgl. Hagg13, S. 495ff.]. Diego-Mas und Alcaide-Marzal haben die OWAS-Methode (*Ovako Working posture Analysis System*) umgesetzt, die die Haltung von Armen, Rücken und Beinen sowie die zu bewegende Last auswertet [vgl. Dieg14, S. 976ff.]. Beide Methoden haben den Vorteil, dass sie sich nicht auf bestimmte Tätigkeiten beschränken und somit universell einsetzbar sind.

### Bewertung der bestehenden Methoden

Die existierenden Methoden zur Untersuchung der Produktivität erfüllen noch nicht die Anforderungen für die Erfassung belastbarer Ist- und Plan-Zeiten sowie für eine Produktivitätsanalyse. So erfassen sie beispielsweise nur bestimmte Tätigkeitstypen und bei der Erfassung treffen sie keine Bewertung, ob die Tätigkeiten produktiv sind.

Die Methoden zur Untersuchung der Ergonomie eignen sich im Gegensatz zu den Produktivitätsmethoden für die Bewertung unterschiedlicher Tätigkeiten. Allerdings sind auch sie nicht in der Lage, verschiedene Ablaufabschnitte im aufgenommenen Zeitbereich zu erkennen und eignen sich damit ebenfalls nicht für eine Zeiterfassung.

## 2.6 Fazit

Dieser Abschnitt fasst zunächst die Defizite zunächst zusammen (Abschnitt 2.6.1). Anschließend leitet er daraus die Anforderungen an die neue Methode ab (Abschnitt 2.6.2).

### 2.6.1 Zusammenfassung des Forschungsdefizits

Es existieren unterschiedliche Ansätze zur Untersuchung der Produktivität von Arbeitsabläufen. Sie eignen sich jedoch nur bedingt für eine umfassende Analyse von manuellen Arbeitsvorgängen.

#### Methoden zur Erfassung von Ist-Zeiten (vgl. Abschnitt 2.1.2)

Die bestehenden Methoden zur Erfassung von Ist-Zeiten (Zeitaufnahmen und Multimomentverfahren) eignen sich, um Abläufe relativ detailliert zu erfassen, eine so hohe Detaillierung wie die MTM-1-Analyse erreichen sie jedoch nicht. Sie erfordern zudem einen nicht unerheblichen Erfassungsaufwand, der mit steigendem Detaillierungsgrad zunimmt. Dies liegt unter anderem daran, dass sie fast ausschließlich auf Fremdbeobachtungen basieren. Moderne technologische Arbeitsmittel verwenden sie bisher kaum.

#### Methoden zur Bestimmung von Plan-Zeiten (vgl. Abschnitt 2.3)

Wie die Methoden zur Erfassung von Ist-Zeiten haben sich die Methoden zur Bestimmung von Plan-Zeiten (REFA-Systematik und MTM-1-Verfahren) in ihren Anwendungsgebieten bewährt. Hervorzuheben ist hierbei die MTM-1-Methodik, die eine sehr hohe Detaillierung aufweist. Die durch diese Methoden ermittelten Zeiten eignen sich jedoch nur bedingt für Planungszwecke oder für den Vergleich mit den Ist-Zeiten. Ebenso ist hier mit steigender Detaillierung höherer Aufwand nötig und unterstützende Erfassungsmittel werden ebenfalls bisher kaum verwendet.

#### Methoden zur Analyse der Produktivität (vgl. Abschnitt 2.4)

Die existierenden Methoden zur Bewertung der Produktivität auf Basis von Zeitdaten (Bewertung der Wertschöpfung und Primär-Sekundär-Analyse) unterscheiden lediglich, ob ein Ablaufschritt produktiv oder nicht produktiv ist. Sie treffen keine differenzierte Aussage darüber, welche Einflussgrößen verändert werden müssen, um den Ablauf zu optimieren. Zudem werden die Bewertungen zum Teil subjektiv getroffen. Keine der Methoden sieht einen Vergleich von Plan- und Ist-Zeiten zur Identifizierung von problematischen Ablaufschritten vor.

#### Bewegungserfassung mit 3D-Kameras (vgl. Abschnitt 2.5)

Als ein Verfahren zur Bewegungserfassung eignet sich insbesondere das optische, nicht-markerbasierte Tracking zur Untersuchung von manuellen Arbeitsvorgängen, da der Werker dabei kein Equipment am Körper trägt und so nicht behindert wird. Eine 3D-Kamera, die dieses Trackingverfahren realisiert und sich durch geringe Kosten und einfache Bedienung auszeichnet, ist die Microsoft Kinect 2.0 (Kinect). Sie wurde bereits in mehreren Anwendungsfällen zur Untersuchung von Arbeitsvorgängen verwendet. Diese haben sich bisher jedoch auf ergonomische Gesichtspunkte, spezielle Arbeitsaufgaben oder auf die Erkennung von Abweichungen durch unterschiedliche Erfahrungsstände konzentriert. Sie eignen sich deshalb nicht für eine universelle Produktivitätsanalyse von manuellen Arbeitsvorgängen.

## **2.6.2 Anforderungen an die Analyse**

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Analyse von Arbeitsabläufen, die unter Verwendung der 3D-Kamera Microsoft Kinect 2.0 (Kinect) in der Lage ist, die Defizite der bestehenden Methoden zu beheben. Deshalb werden in Anlehnung an die Defizite die folgenden vier Anforderungen formuliert.

### **Hohe Detaillierung bei der Erfassung von Ist-Abläufen**

Je detaillierter eine Methode Vorgänge erfasst, desto genauer können Verbesserungspotenziale im Ablauf identifiziert und Verbesserungsvorschläge abgeleitet werden. Daher ist eine Anforderung an die Methodik eine hohe Detaillierung bei der Erfassung. Dies umfasst zum einen die detaillierte Unterteilung der Beobachtungszeit in Ablaufschritte. Zum anderen sind auch die möglichen Einflussgrößen auf die Ablaufschritte zu identifizieren. Dies soll in Anlehnung an das bewährte MTM-1-Verfahren geschehen und so detailliertere Vorschläge für die Verbesserung ermöglichen.

### **Integrierte Ermittlung des Plan-Ablaufs**

Insbesondere sehr detaillierte Methoden untersuchen entweder Plan- oder Ist-Abläufe. Da sich diese Abläufe sich in der industriellen Praxis unterscheiden können, ist ein wichtiger Aspekt einer Analyse der Vergleich von Plan und Ist. Die Methodik soll deswegen eine integrierte Bestimmung der Plan-Zeiten ermöglichen. Das bedeutet, dass sie mindestens für relevante Abschnitte des Ist-Ablaufs Plan-Zeiten bestimmt und so mit den Ist-Zeiten vergleichen kann. Unter Plan-Zeiten werden hierbei zum einen Soll-Zeiten für die Identifizierung von Potenzialen und zum anderen verlässliche Zeiten für die Planung verstanden.

### **Verbesserungsorientierte Ergebnisse**

Die detaillierte Erfassung von Ist- und Plan-Abläufen bildet eine geeignete Grundlage für die Analyse der Produktivität. Damit sich die Methode jedoch für den industriellen Einsatz eignet, muss sie die Identifizierung von Verbesserungsmaßnahmen ermöglichen. Dazu ist es einerseits notwendig, konkrete Potenziale im Ablauf zu ermitteln und Verbesserungsvorschläge abzuleiten. Andererseits müssen die Ergebnisse übersichtlich und verständlich dargestellt werden.

### **Geringer Anwendungsaufwand**

Für den industriellen Einsatz ist neben konkreten Ergebnissen ein geringer Methodenaufwand erforderlich. Je detaillierter eine Methode ist, desto mehr Aufwand erzeugt sie in der Regel. Hoher Aufwand stellt jedoch eine Hürde für den Einsatz dar. Ziel ist es, den manuellen Aufwand insbesondere bei der Erfassung durch den Einsatz von 3D-Kameras weitestgehend zu vermeiden. Die Methode zudem so zu gestalten, dass keine speziellen Schulungen für ihren Einsatz notwendig sind.

### **3 Erfassung von Ist-Zeiten**

Ziel der zu entwickelnden Methodik ist die Erfassung von Ist-Zeiten und die Bestimmung von Plan-Zeiten für manuelle Arbeitsabläufe und die darauf basierende Identifizierung von Produktivitätspotenzialen. Dieses Kapitel beschreibt, wie man Arbeitsabläufe mit der Kinect aufnehmen und Ist-Zeiten aus den Bewegungsdaten ableiten kann. Zentrale Voraussetzung ist dabei die Erfassung von Gelenkpunkten über die Zeit. Damit beschränkt sie sich nicht ausschließlich auf die Kinect, sondern erlaubt prinzipiell auch den Einsatz anderer Technologien der Bewegungserfassung.

Dazu stellt dieses Kapitel zunächst dar, welche Zustandsarten die Methodik erfasst (Abschnitt 3.1). Zur Erklärung des weiteren Vorgehens beschreibt es anschließend zwei Versuchsaufbauten (Abschnitt 3.2). Abschnitt 3.3 zeigt, welche Daten die Kinect erfasst und welche Schritte nötig sind, um sie für die Analysen vorzubereiten. Die Methodik identifiziert dann Zustände im Arbeitsablauf mit den vorbereiteten Daten (Abschnitt 3.4). Um die Auswertung zielgerichtet zu gestalten, fasst sie anschließend Arbeitsschritte zusammen (Abschnitt 3.5). Damit ist es dann möglich, wiederholt auftretende Arbeitsabläufe zu erkennen (Abschnitt 3.6). Im letzten Schritt berechnet sie die Ist-Zeiten für die einzelnen Zustände und die Arbeitsabläufe (Abschnitt 3.7).

#### **3.1 Einteilung der Beobachtungszeit**

Eine zentrale Anforderung an die Methodik ist die detaillierte Erfassung von Ist-Abläufen. Dieser Abschnitt schafft die dafür notwendigen Grundlagen, indem er zunächst die zu erfassenden Zustandsarten beschreibt. Für die Erfassung stellt er dabei unterschiedliche Varianten vor, die sich für unterschiedliche Erfassungsqualitäten und Arbeitsaufgaben eignen (Abschnitt 3.1.1). Anschließend geht er darauf ein, wie die Methodik den Beobachtungen der Kinect Zuständen zuordnet und Zeiten ermittelt (Abschnitt 3.1.2). Abschließend zeigt er aufbauend darauf, wie sich die gesamte Beobachtungszeit zusammensetzt (Abschnitt 3.1.3).

##### **3.1.1 Analysevarianten und Zustandsarten**

Die Anwendung der Kinect zur automatisierten Erfassung von Ist-Abläufen erfordert zunächst eine Abgrenzung des Einsatzszenarios und der möglichen erfassbaren Zustandsarten. Die Kinect ist in der Lage, die Position von Gelenkpunkten im Raum zu bestimmen, unterliegt dabei aber technischen Einschränkungen (vgl. Abschnitt 2.5.2). Eine relevante Einschränkung ist die Tatsache, dass sie Gelenkpunkte nur erkennt, wenn sie sich in ihrem Sichtbereich befinden. Verdecken also andere Objekte die Körperteile, kann sie die Lage dieser Körperteile nicht bestimmen. Wenn ein Mitarbeiter beispielsweise an mehreren Arbeitsstationen arbeitet, gibt es in der Regel Orte, an denen er nicht zur Kinect schaut und mit seinem eigenen Körper die Erfassung der Arme verhindert.

### Analysearten

Um diesem Problem zu entgegnen, werden für die Methodik zwei Analysearten definiert, die sich gegenseitig ergänzen:

- die Analyse von Körperbewegungen und
- die Analyse von Armbewegungen.

Die *Analyse von Körperbewegungen* untersucht, welche Bewegungen der Mitarbeiter mit dem Körper durchführt (z. B. Gehen, Drehen, Bücken) und wo sie stattfinden. Diese Analyse eignet sich für alle Anwendungsfälle, in denen der mögliche Einsatzbereich des Mitarbeiters innerhalb des Aufnahmebereichs der Kinect liegt.

Die *Analyse von Armbewegungen* untersucht, welche Bewegungen er mit den Armen durchführt (z. B. Hinlangen, Greifen) und an welche Orte an einem Arbeitsplatz er besonders oft greift. Damit eignet sich die Analyse vorrangig für die Untersuchung eines einzelnen Arbeitsplatzes. Sie kann so zum Beispiel auf eine *Analyse von Körperbewegungen* folgen, wenn diese einen Arbeitsplatz identifiziert hat, an dem der Mitarbeiter besonders viel Zeit verbringt.

Für die Analysen ist es nicht erforderlich, alle Gelenkpunkte des Körpers zu erfassen. Es sind jeweils nur diejenigen erforderlich, die für die Identifizierung der untersuchten Bewegungen notwendig sind. Die Herleitung der erforderlichen Punkte wird im Folgenden beschrieben.

### Analysestufen

Trotz der Unterscheidung in die beiden Analysearten kann nicht bei jeder Beobachtung gewährleistet werden, dass die Kinect alle Gelenkpunkte der relevanten Körperteile korrekt erfasst. Dafür wurde zunächst in Testbeobachtungen untersucht, welche Gelenkpunkte sie erfassen konnte. Ob die Erfassung korrekt war, wurde an dieser Stelle noch nicht untersucht.

Tabelle 3-1 zeigt eine Übersicht über die Erfassungsraten der Gelenkpunkte bei beispielhaften Testaufnahmen. Bei diesen Aufnahmen hat ein Mitarbeiter in einer Versuchsumgebung in einem Zeitraum von jeweils ca. 20 Minuten unterschiedliche Montagetätigkeiten durchgeführt. Die Tabelle zeigt für jeden Gelenkpunkt den ermittelten Anteil der Aufnahmen, bei denen die Kinect den Gelenkpunkt erfasst hat. Sie macht beispielsweise deutlich, dass die Erfassungsrate für die Gelenkpunkte der Extremitäten geringer ist als für die des Rumpfes.

Tabelle 3-1 Gelenkpunkte und ihre Erfassungsgraten

Körperteil	Gelenkpunkte und Erfassungsgraten*				
Kopf + Schultern	Kopf 99 %	Nacken 100 %	Schultermitte 100 %	Schulter - rechts 96 %	Schulter - links 77 %
Rumpf	Wirbelsäule, Mitte 100 %	Wirbelsäule, Basis 100 %	Hüfte - rechts 99 %	Hüfte - links 99 %	
Arm, rechts	Ellenbogen, rechts 93 %	Handgelenk, rechts 70 %			
Hand, rechts	Hand, rechts 53 %	Daumen, rechts 82 %	Handspitze, rechts 83 %		
Arm, links	Ellenbogen, links 93 %	Handgelenk, links 76 %			
Hand, links	Hand, links 63 %	Daumen, links 79 %	Handspitze, links 82 %		
Bein, rechts	Knie, rechts 83 %	Fußgelenk, rechts 63 %			
Fuß, rechts	Fuß, rechts 76 %				
Bein, links	Knie, links 87 %	Fußgelenk, links 76 %			
Fuß, links	Fuß, links 78 %				

\* Erfassungsrate = Anteil der Aufnahmen, bei dem die Kinect Koordinaten für den Gelenkpunkt ermittelt hat.  
Zur Bestimmung der Erfassungsrate wurden drei verschiedene Arbeitsaufgaben aufgenommen und ausgewertet.

13437

Um der Tatsache gerecht zu werden, dass eine vollständige Erfassung nicht immer möglich ist, werden für jede der beiden Analysearten zwei Detaillierungsstufen definiert. Diese Stufen erfordern die Erfassung unterschiedlicher Gelenkpunkte und erzielen somit auch unterschiedlich detaillierte Ergebnisse. Sowohl die Erfassung von Ist-Zeiten als auch die Bestimmung von Plan-Zeiten verwenden diese Unterteilung der Analysen.

#### *Analyse von Körperbewegungen*

Für die Analyse von Körperbewegungen hat sich gezeigt, dass die Kinect den Oberkörper oft gut erkennt, wohingegen die Erfassung der Beine häufig nicht funktioniert (vgl. Tabelle 3-1). Darum werden die folgenden zwei Detaillierungsstufen definiert:

- eine *einfache Analyse von Körperbewegungen*, die nur die Erfassung von Kopf und Schultern benötigt und damit in allen Anwendungsfällen zu guten Erfassungsraten führt und
- eine *differenzierte Analyse von Körperbewegungen*, die zusätzlich die Erfassung des Rumpfes sowie der Beine erfordert. Diese Analyse erlaubt dafür deutlich detailliertere Aussagen über die Art der Körperbewegungen.

*Analyse von Armbewegungen*

Für die Analyse von Armbewegungen erkennt die Kinect die Gelenkpunkte der Arme häufig gut, während sie die Hände in einigen Anwendungsfällen nicht ausreichend gut erkennt. Daher werden auch hier zwei Detaillierungsstufen definiert:

- eine *einfache Analyse von Armbewegungen*, für die lediglich eine gute Erkennung der Arme notwendig ist und
- eine *differenzierte Analyse*, die zudem eine gute Erfassung von Kopf und Schultern sowie Händen benötigt und dafür eine detaillierte Einteilung der Armbewegungen erlaubt.

Tabelle 3-2 stellt zusammenfassend dar, welche Analyse welche erfassten Körperteile erfordert.

**Tabelle 3-2 Analysevarianten und dafür erforderliche (erfasste) Körperteile**

für Analyse erforderliche Körperteile	Analyse der Körperbewegungen		Analyse der Armbewegungen	
	Einfache Analyse	Differenzierte Analyse	Einfache Analyse	Differenzierte Analyse
Kopf + Schultern	<b>x</b>	<b>x</b>		<b>x</b>
Rumpf		<b>x</b>		
Arm, rechts			<b>x</b>	<b>x</b>
Hand, rechts				<b>x</b>
Arm, links		<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
Hand, links				<b>x</b>
Bein, rechts		<b>x</b>		
Fuß, rechts				
Bein, links		<b>x</b>		
Fuß, links				

13438

Für jede Analysevariante werden im Folgenden Zustandsarten definiert, die sich dabei an das MTM-1-Verfahren (vgl. Abschnitt 2.3.3) anlehnen. Sie sind so ausgewählt, dass die Methodik sie mit den jeweils erfassten Körperteilen bestimmen und auswerten kann. Die Zustandsarten sind allgemein unterteilt in Bewegungen und in Stillstände.

Einteilung der Zustandsarten für die Analyse von Körperbewegungen

Das MTM-1-Verfahren unterscheidet zwischen Körperbewegungen:

- ohne Verlagerung der Körperachse (Fußbewegung, Beinbewegung),
- mit Verschieben der Körperachse (z. B. Körperdrehung, Gehen) und
- mit Neigen der Körperachse (z. B. Beugen, Setzen).

Die *Analyse von Körperbewegungen* orientiert sich an dieser Einteilung. Je nach Analysestufe fasst die Methodik die Bewegungen jedoch zusammen, um eine zuverlässige Erkennung zu ermöglichen. Beide Analysestufen betrachten weder Fuß- noch Beinbewegungen. Zum einen ist die Erkennung der dafür nötigen Gelenkpunkte selten gegeben. Zum anderen kann nur schlecht unterschieden werden, ob sie zu einer anderen Bewegung gehören (z. B. beim Gehen) oder ob sie eine Einzelbewegung darstellen (z. B. beim Betätigen eines Fußschalters).

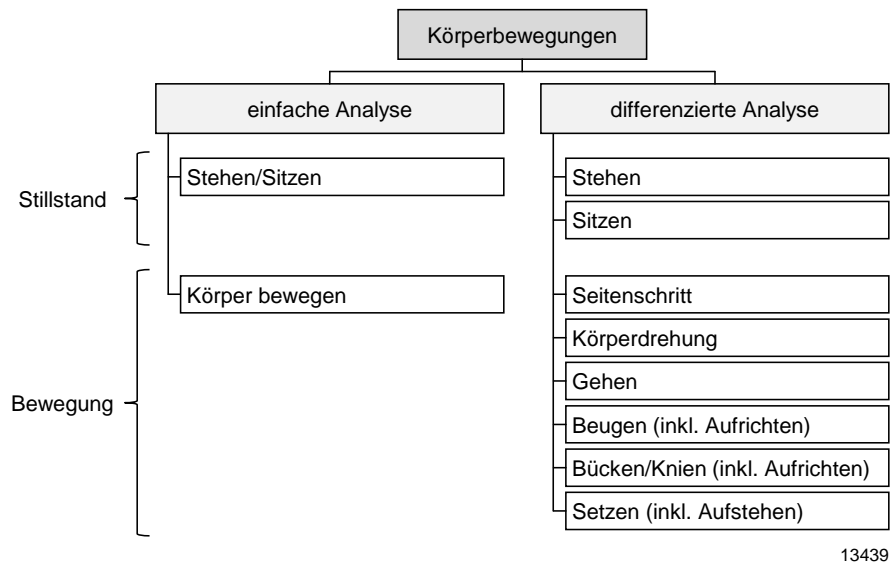
Die *einfache Analyse von Körperbewegungen* hat das Ziel, den Aufenthalt an verschiedenen Arbeitsstationen sowie die Bewegungen zwischen den Stationen zu ermitteln. Daher unterscheidet sie lediglich zwischen den Zustandsarten ‚Körper bewegen‘ und ‚Stehen/Sitzen‘ (vgl. Abbildung 3-1 links). Die Zustandsart ‚Körper bewegen‘ entspricht der MTM-1-Bewegung ‚Körperachse verschieben‘. Das bedeutet, dass die Analyse Drehungen am Arbeitsplatz, aber auch Setzbewegungen etc. nicht erfasst.

Diese einfache Unterteilung der Körperbewegungen hat den Vorteil, dass sie keine hohen Anforderungen an die Datenqualität stellt. So ist diese Analyse bereits mit der erfolgreichen Erfassung der Schultern möglich (vgl. Tabelle 3-2).

Die *differenzierte Analyse von Körperbewegungen* soll die Bewegungen detaillierter unterscheiden (vgl. Abbildung 3-1 rechts). Wie MTM-1 ermittelt sie die Verschiebungsbewegungen ‚Seitenschritt‘, ‚Körperdrehung‘ und ‚Gehen‘. Zudem ermittelt sie auch Neigungsbewegungen. Im Gegensatz zu MTM-1 fasst sie jedoch die Bewegungen ‚Knien‘ und ‚Bücken‘ zusammen. Die Körperhaltung bei diesen Bewegungen ist sehr ähnlich und deswegen nur schlecht zu unterscheiden. Zusätzlich zu diesen Bewegungen erfasst sie die Zustandsarten ‚Sitzen‘ und ‚Stehen‘ getrennt.

Bei dieser Analyse ist es zudem möglich, dass der Mitarbeiter die Bewegungen nicht ausschließlich einzeln, sondern zum Teil auch parallel durchführt. So kann es beispielsweise sein, dass er eine Drehbewegung während einer Laufbewegung vollzieht. Auf die möglichen Kombinationsbewegungen geht Abschnitt 3.4.3.2 ein.

Um die Zustandsarten ermitteln zu können, erfordert die differenzierte Analyse von Körperbewegungen eine höhere Datenqualität. So muss die Kinect hierfür den kompletten Rumpf und die Beine erfassen (vgl. Tabelle 3-2).



**Abbildung 3-1 Einteilung der Zustandsarten bei der Analyse von Körperbewegungen**

### Einteilung der Zustandsarten für die Analyse von Armbewegungen

Beim MTM-1-Verfahren sind die Armbewegungen eingeteilt in:

- den Grundzyklus (Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen, Loslassen) und
- die weiteren Bewegungen (Drücken, Trennen, Drehen).

Wie die Analyse von Körperbewegungen fasst auch die Analyse von Armbewegungen bestimmte Bewegungsarten zusammen, um eine automatisierte Erkennung zu ermöglichen.

Die *einfache Analyse von Armbewegungen* unterscheidet zunächst nur zwischen den Zustandsarten ‚Arm bewegen‘ und ‚Arm nicht bewegen‘ (vgl. Abbildung 3-2 links). Dabei umfasst die Zustandsart ‚Arm bewegen‘ die beiden MTM-1-Bewegungen ‚Hinlangen‘ und ‚Greifen‘ des Grundzyklus sowie weitere Bewegungen des Armes. Die Zustandsart ‚Arm nicht bewegen‘ schließt die MTM-1-Bewegungsarten ‚Greifen‘, ‚Fügen‘ und ‚Loslassen‘ aus dem Grundzyklus ein. Komplexere MTM-1-Bewegungen wie ‚Trennen‘ betrachtet die einfache Analyse von Armbewegungen nicht.

Für die einfache Analyse von Armbewegungen ist lediglich die erfolgreiche Erfassung der Arme bis zu den Handgelenken erforderlich. Die Hände benötigt die Analyse damit nicht (vgl. Tabelle 3-2).

Die *differenzierte Analyse von Armbewegungen* hat das Ziel, die Bewegungen des Grundzyklus zu erkennen (vgl. Abbildung 3-2 rechts). Statt der Zustandsart ‚Arm bewegen‘ erkennt sie in Anlehnung an die MTM-1-Bewegungen ‚Hinlangen‘ und ‚Bringen‘ die Zustandsarten ‚Arm vom Körper weg bewegen‘ und ‚Arm zum Körper hin bewegen‘. Analog ermittelt sie die Stillstände ‚Arm nah am Körper ruhen‘ und ‚Arm fern vom Körper ruhen‘.

Die Analyse würde bei Auftreten des Grundzyklus somit die Zustandsarten:

- Arm vom Körper weg bewegen (Hinlangen),
- Arm fern vom Körper ruhen (Greifen),
- Arm zum Körper hin bewegen (Bringen) und
- Arm nah am Körper ruhen (Fügen und Loslassen)

erkennen. Andere Bewegungen, die dieser Zyklus nicht abbildet, erfasst die Analyse als ‚sonstiges Arm bewegen‘.

Für die differenzierte Analyse von Armbewegungen ist neben der Erfassung der Arme die Erfassung der Schultern und Hände notwendig (vgl. Tabelle 3-2).

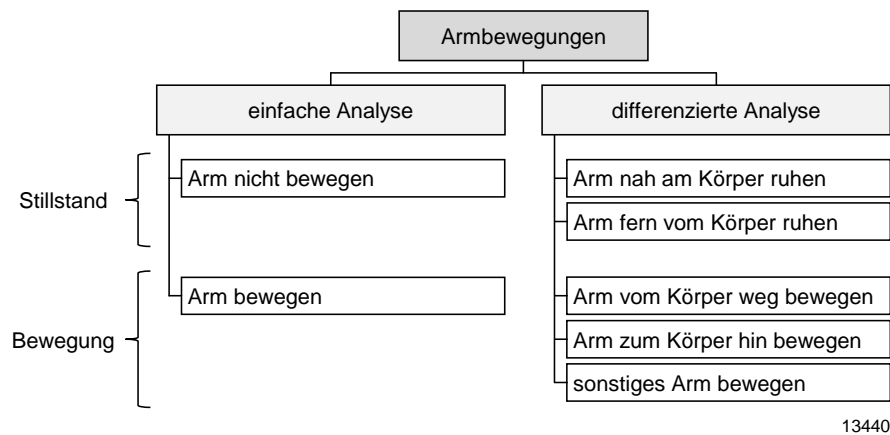


Abbildung 3-2 Einteilung der Zustandsarten bei der Analyse von Armbewegungen

### 3.1.2 Verarbeitung von Aufnahmezeitpunkten zu Zeitdaten

Die Kinect zeichnet die beobachteten Abläufe nicht kontinuierlich auf, sondern diskret mit 30 Aufnahmen pro Sekunde. Dabei ermittelt sie die Körperkoordinaten und den Aufnahmezeitpunkt. Diese Art der Aufzeichnung entspricht damit einer MMZ (vgl. Abschnitt 2.2.3) mit einer sehr hohen Anzahl an Stichproben.

Zur Erkennung von Zuständen mit diesen Daten ist es notwendig, Berechnungsgrößen zu ermitteln. Das umfasst zum einen Größen wie Abstände, die man aus den erfassten Koordinaten ableiten kann. Zum anderen umfasst dies Größen wie Geschwindigkeiten, für die man Zeitdifferenzen ermitteln muss. Zudem ist die Bestimmung der Zustandsdauer nach erfolgter Erkennung der Zustände notwendig. Daher wird im Folgenden zunächst beschrieben, wie die Methodik Zeitdauern ermittelt. Es existieren dafür grundsätzlich zwei verschiedene Ansätze.

Der erste Ansatz lehnt sich an die MMZ-Methode an (vgl. Abschnitt 2.2.3). Man bestimmt dafür zunächst Anfangs- und Endaufnahme eines Zustandes. Der Anfangszeitpunkt des erkannten Zustandes ist dann der Mittelwert von dem Zeitpunkt der letzten Aufnahme des Vorgängerzustands und dem Zeitpunkt der ersten Aufnahme des betrachteten Zustandes (vgl. Formel 3-1). Der Endzeitpunkt ergibt sich analog aus dem Mittelwert von der letzten Aufnahme des betrachteten Zustandes und der ersten Aufnahme des Nachfolgezustandes.

$$Z_k = \frac{T_{k,E} + T_{k+1,A}}{2} - \frac{T_{k-1,E} + T_{k,A}}{2} \quad (3-1)$$

$$Z_k = T_{k,E} - T_{k-1,E} \quad (3-2)$$

- $Z_k$  : Zeitdauer von Zustand  $k$  [s]  
 $T_{k,A}$  : Zeitpunkt der Anfangsaufnahme von Zustand  $k$  [s]  
 $T_{k,E}$  : Zeitpunkt der Endaufnahme von Zustand  $k$  [s]

Der zweite Ansatz verwendet als Startpunkt für die Ermittlung der Zeitdauer die letzte Aufnahme des Vorgängerzustandes. Analog verwendet er die letzte Aufnahme des betrachteten Zustandes als Endpunkt (vgl. Formel 3-2).

Abbildung 3-3 stellt die beiden Ansätze grafisch gegenüber.

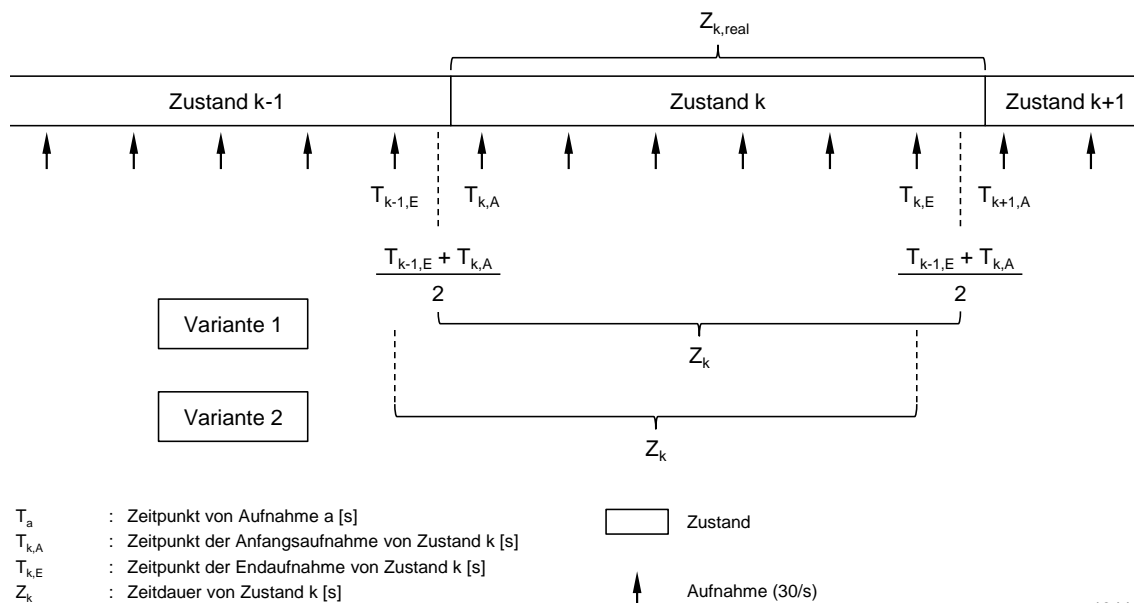


Abbildung 3-3 Ermittlung von Zeitdauern

Die beiden Ansätze haben unterschiedliche Stärken und Schwächen. Bei der ersten Variante entsprechen die verwendeten Start- und Endpunkte im Mittel den tatsächlichen Start- und Endpunkten. Damit entsprechen die berechneten Zeitdauern auch den tatsächlichen Zeitdauern der Zustände. Die zweite Variante verwendet abweichende Start- und Endpunkte; die ermittelten Zeitdauern unterliegen durch die geringen und gleichmäßigen Abstände zwischen zwei Aufnahmen jedoch nur einem kleinen Fehler.

Ein Punkt, der für die zweite Variante spricht, ist die Tatsache, dass für die verwendeten Zeitpunkte die Orte der Gelenkpunkte bekannt sind, während sie für die Zeitpunkte der ersten Variante interpoliert werden müssten. Dadurch entsteht ein systematischer Fehler, wenn beispielsweise Bewegungslänge und -dauer gegenübergestellt werden.

Für das weitere Vorgehen wird Variante 2 verwendet, da sie über nahezu dieselbe Genauigkeit verfügt, einfacher anzuwenden ist und die Orte zu den Zeitpunkten bekannt sind. Die Ermittlung von Zeitdifferenzen bei der Berechnung von Geschwindigkeiten und zurückgelegten Strecken verwendet ebenfalls diesen Ansatz (vgl. Formel 3-3). Damit ist eine einheitliche Ermittlung von Zeitdauern und anderen Berechnungsgrößen für die folgenden Schritte gegeben.

$$\Delta T_a = T_a - T_{a-1} \quad (3-3)$$

$\Delta T_a$  : Zeitdauer zwischen Aufnahme a-1 und Aufnahme a [s]

$T_a$  : Zeitpunkt von Aufnahme a [s]

### 3.1.3 Strukturierung der Beobachtungszeit

Nachdem Abschnitt 3.1.2 beschrieben hat, wie die Methodik Zeiten für die einzelnen Zustände ermittelt, stellt dieser Abschnitt dar, wie sich die Beobachtungszeit aus den erkannten Zuständen und weiteren Zeitanteilen zusammensetzt. Diese Strukturierung ist die Grundlage, um die ermittelten Zeiten zu bewerten und gezielt Produktivitätspotenziale zu identifizieren.

In Anlehnung an die REFA-Systematik (vgl. 2.3.2) kann man die bezahlte Mitarbeiterzeit einteilen in Einsatzzeit und in Zeit, die der Mitarbeiter nicht im Einsatz ist. Dazu gehören beispielsweise Urlaub, Pausen, Krankheit und Fortbildungen. Die Kinect kann diese Zeitanteile, an denen der Mitarbeiter sich nicht an seinem Arbeitsplatz befindet, nicht erfassen. Die Methode konzentriert sich somit auf die Tätigkeiten, die am Arbeitsplatz vorkommen. Man könnte die anderen Tätigkeiten beispielsweise durch Anwendung eines klassischen MMH erfassen. Dies wird im Folgenden jedoch nicht weiter betrachtet.

Zentrale Bezugsgröße für die Methode ist also die Beobachtungszeit. Damit ist die Zeitdauer gemeint, in der man Mitarbeiter mit der Kinect aufnimmt. Sie setzt sich zusammen aus der Zeit, in der die Kinect Abläufe erfasst und aus der Zeit, in der sie keine Abläufe erfasst (vgl. Formel 3-4). Dies ist beispielsweise der Fall, wenn sich der Mitarbeiter aus dem Aufnahmebereich der Kinect entfernt oder wenn die Kinect den Mitarbeiter nicht erkennt (z. B. durch Verdeckungen). Die Erfassungsrate beschreibt den Anteil der erfassten Abläufe an der gesamten Beobachtungszeit (vgl. Formel 3-5).

$$Z_{Beo} = Z_{E,kum} + Z_{NE,kum} \quad (3-4)$$

$$ER = \frac{Z_{E,kum}}{Z_{Beo}} \quad (3-5)$$

$Z_{Beo}$  : Beobachtungszeit [min]

$ER$  : Erfassungsrate [-]

$Z_{E,kum}$  : kumulierte Dauer erfasster Abläufe [min]

$Z_{NE,kum}$  : kumulierte Dauer nicht erfasster Abläufe [min]

Die Zeit, in der die Kinect Abläufe erfasst hat, setzt sich wiederum zusammen aus der Zeit, in der sie Abläufe korrekt erfasst hat und aus der Zeit, in der sie die Abläufe falsch erfasst hat (vgl. Formel 3-6). Falsch erfasste Abläufe entstehen beispielsweise, wenn sie den Mitarbeiter zwar erkennt, aber die Gelenkkoordinaten einzelner Körperteile falsch bestimmt. Abschnitt 3.3.3 geht detaillierter auf diese falsch erfassten Abläufe ein. Die Erfassungsqualität beschreibt den Anteil der korrekt erfassten Abläufe an allen erfassten Abläufen (vgl. Formel 3-7).

$$Z_{E,kum} = Z_{KE,kum} + Z_{FE,kum} \quad (3-6)$$

$$EQ = \frac{Z_{KE,kum}}{Z_{E,kum}} \quad (3-7)$$

- $Z_{E,kum}$  : kumulierte Dauer erfasster Abläufe [min]  
 $EQ$  : Erfassungsqualität [-]  
 $Z_{KE,kum}$  : kumulierte Dauer korrekt erfasster Abläufe [min]  
 $Z_{FE,kum}$  : kumulierte Dauer falsch erfasster Abläufe [min]

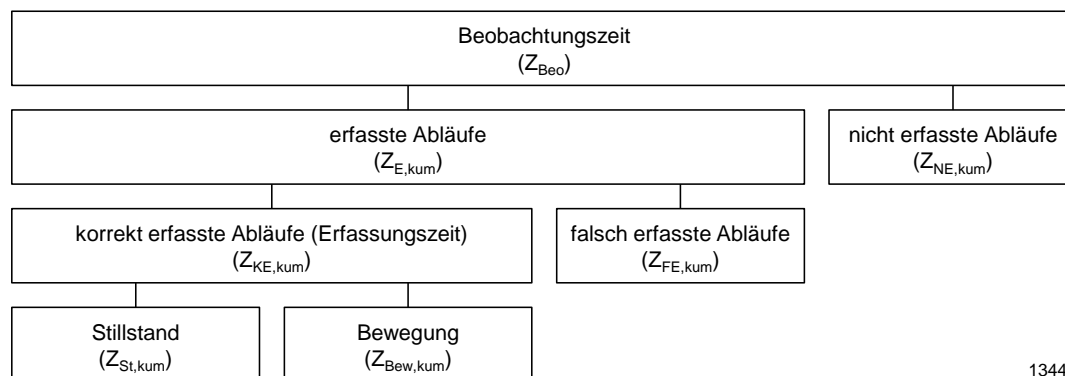
Mit der Erfassungsrate und der Erfassungsqualität stehen dem Methodenanwender zwei Kennzahlen zur Bewertung der Aufnahmequalität zur Verfügung. Ist eine dieser Kennzahlen zu klein, hat die Kinect viele Abläufe nicht oder nicht korrekt erfasst. Diese kann man dann auch nicht richtig auswerten.

Wenn die Kinect erfolgreich Abläufe erfasst hat, kann die Methode die Arbeitsabläufe untersuchen. Die Abläufe lassen sich dabei allgemein einteilen in Arbeitsabläufe, bei denen sich die untersuchten Körperteile bewegen und in Arbeitsabläufe, bei denen sie ruhen (vgl. Formel 3-8).

$$Z_{KE,kum} = Z_{St,kum} + Z_{Bew,kum} \quad (3-8)$$

- $Z_{KE,kum}$  : kumulierte Dauer korrekt erfasster Abläufe [min]  
 $Z_{St,kum}$  : kumulierte Dauer Stillstand [min]  
 $Z_{Bew,kum}$  : kumulierte Dauer Bewegung [min]

Abbildung 3-4 fasst die Modellierung der beobachteten Zeit grafisch dar.



13442

**Abbildung 3-4 Strukturierung der Beobachtungszeit**

### 3.2 Versuchsbeschreibung für die Analysearten

Ziel dieses Abschnittes ist es, für die beiden Analysearten je ein Beispiel zu erläutern. Die nächsten Abschnitte und Kapitel erklären die Schritte der Methodik dann vorrangig an dem Beispiel für die Armbewegungen. Bei spezifischen Schritten für die Körperbewegungen verwenden sie das entsprechende Erklärungsbeispiel.

#### Erklärungsbeispiel für die Analyse von Körperbewegungen

Für die Analyse von Körperbewegungen wurde ein Mitarbeiter bei der Durchführung einer Montageaufgabe in einer Laborumgebung aufgenommen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3-5 dargestellt und besteht aus vier Arbeitsstationen, an denen der Mitarbeiter jeweils Teile der Arbeitsaufgabe durchführen muss

Die Arbeitsaufgabe ist dabei die Montage eines Plastikautos. An jeder Arbeitsstation befinden sich unterschiedliche Einzelteile, sodass der Mitarbeiter alle Arbeitsstationen durchlaufen muss, um ein Auto zu montieren. Im Versuch hat er 12 Autos in ca. 15,5 Minuten montiert.

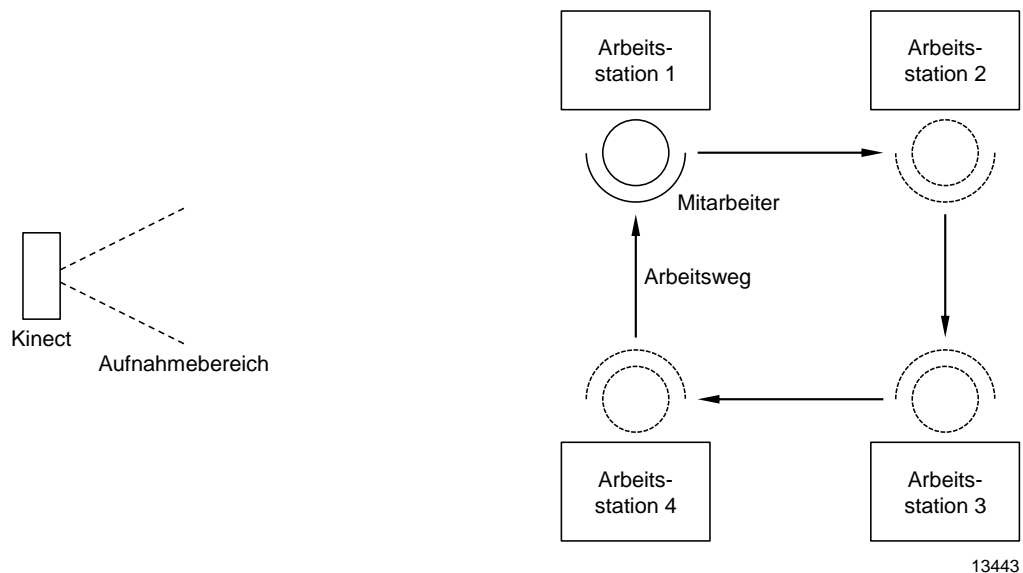


Abbildung 3-5 Versuchsaufbau für die Analyse von Körperbewegungen

#### Erklärungsbeispiel für die Analyse von Armbewegungen

Für die Analyse von Armbewegungen wurde ebenfalls ein Mitarbeiter bei der Durchführung einer Montageaufgabe in einer Laborumgebung aufgenommen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3-6 dargestellt. Er besteht aus einem Tisch, auf dem vier Materialbehälter platziert sind. Der Mitarbeiter steht vor dem Tisch und muss für die Erfüllung der Arbeitsaufgabe in die vier Behälter greifen. Die Kinect steht frontal vor dem Mitarbeiter.

Bei der Arbeitsaufgabe muss der Mitarbeiter kleine Plastiktraktoren montieren, die aus je vier Einzelteilen bestehen. Die Materialbehälter enthalten jeweils einen Typ Einzelteil. Der Versuch dauerte ca. 3,5 Minuten. In dieser Zeit hat der Mitarbeiter 10 Traktoren montiert.

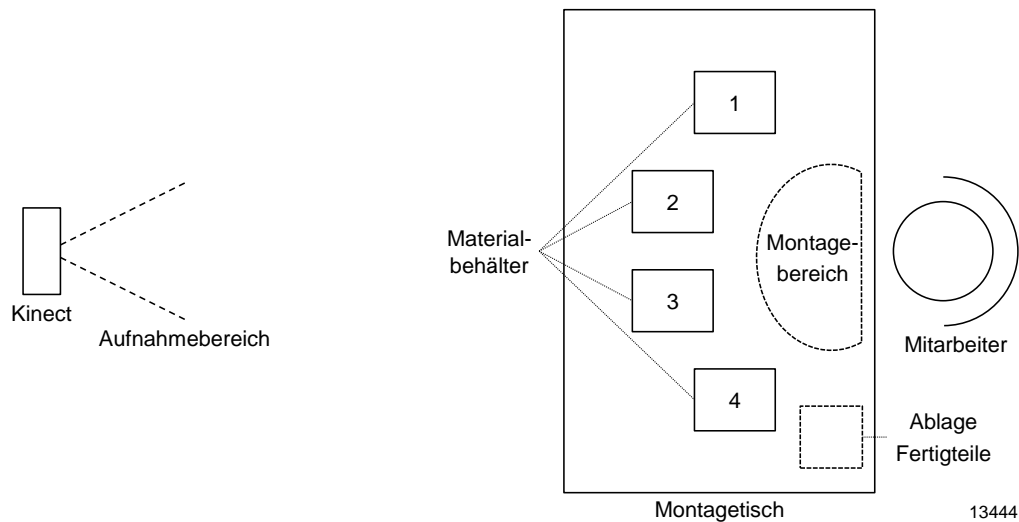


Abbildung 3-6 Versuchsaufbau für die Analyse von Armbewegungen

### 3.3 Datenaufnahme und -vorbereitung

Erster Schritt bei der Erfassung der Ist-Zeiten ist die Aufnahme der Arbeitsaufgabe mit der Kinect und die Aufbereitung der Daten für die weiteren Schritte. Dazu beschreibt Abschnitt 3.3.1 zunächst, welche Daten die Kinect aufnimmt. Anschließend werden die Daten so aufbereitet, dass der Methodenanwender sie intuitiv verstehen kann (Abschnitt 3.3.2). Da nicht alle durch die Kinect ermittelten Daten fehlerfrei sind, werden fehlerhafte Aufnahmen anschließend aussortiert (Abschnitt 3.3.3).

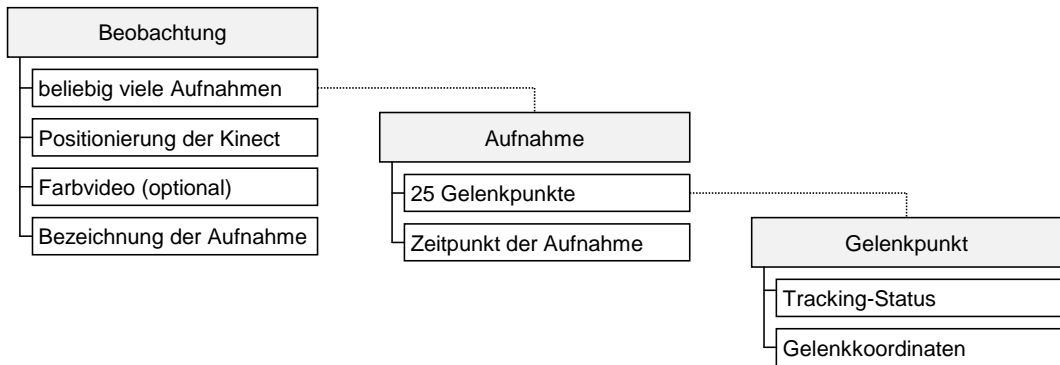
#### 3.3.1 Datenerfassung

Die Kinect ermittelt für jeden Gelenkpunkt die Koordinaten mit einer Rate von 30 Aufnahmen pro Sekunde. Neben diesen Koordinaten ermittelt sie zusätzlich den Tracking-Status, also ob sie einen Ort für den Gelenkpunkt ermittelt hat.

Sie erfasst diese Informationen bei jeder Aufnahme für jeden der 25 Gelenkpunkte. Zudem erfasst sie den Zeitpunkt der Aufnahme. Somit kann man auch Start- und Endpunkte der Mitarbeiterzustände und ihre Zeitdauern ermitteln.

Eine Beobachtung mit der Kinect kann aus einer beliebigen Anzahl an Aufnahmen bestehen. Zusätzlich zu diesen Aufnahmen besteht durch die Videokamera der Kinect die Möglichkeit, ein Farbvideo aufzunehmen. Dieses kann man später benutzen, um einzelne Bewegungen detailliert zu untersuchen. Zudem muss der Anwender bei jeder Beobachtung die Positionierung der Kinect erfassen, damit die ermittelten Koordinaten im richtigen Bezugssystem sind.

Abbildung 3-7 stellt die Struktur der erfassten Daten grafisch dar.



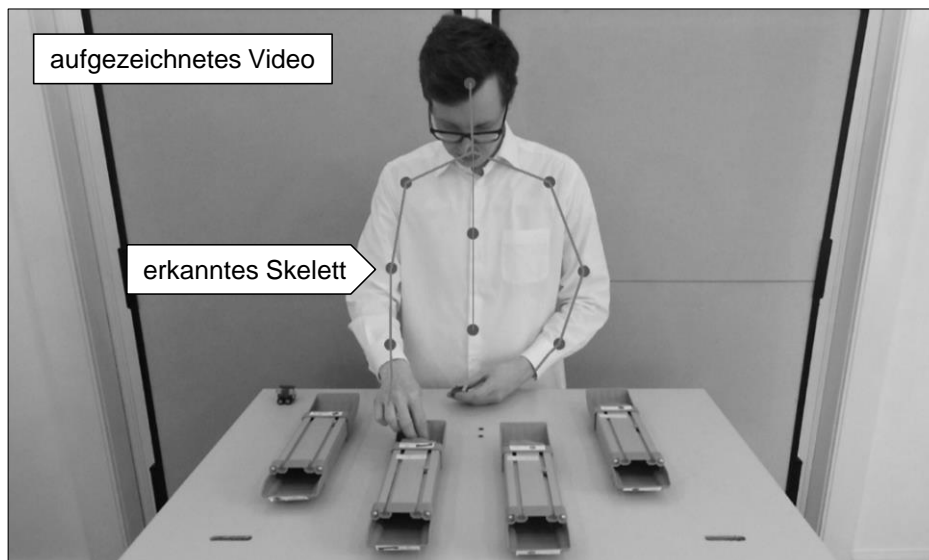
13445

Abbildung 3-7 Struktur der aufgenommenen Daten

### Realisierung der Datenerfassung durch einen Software-Demonstrator

Teile der Methodik sind in einem Software-Demonstrator realisiert, der Schritte automatisiert durchführt und so den Anwender unterstützt. Er reduziert dadurch den notwendigen Methodenaufwand. Im ersten Schritt setzt er die Datenaufnahme mit der Kinect um und ermöglicht so die Erfassung der in Abbildung 3-7 dargestellten Daten. Der Demonstrator wurde unter Verwendung des Kinect-SDK (Software Development Kit) von Microsoft entwickelt.

Abbildung 3-8 zeigt die Ansicht des Demonstrators zur Aufnahme mit der Kinect. Sie besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil ist die Darstellung des aufgezeichneten Farbvideos. Der zweite Teil ist die Darstellung der Gelenkpunkte, die das Video überlagert. Durch die visualisierten Gelenkpunkte und deren Verbindungslinien entsteht so ein virtuelles Skelett der beobachteten Person.



13446

Abbildung 3-8 Aufnahmeansicht des Software-Demonstrators

Mit dem Farbvideo und der Visualisierung des Skeletts kann der Anwender direkt bei Vorbereitung und Durchführung der Aufnahme prüfen, ob die Kinect richtig positioniert ist und ob sie die Person erkennt. Mit den aufgenommenen Daten erfolgen anschließend die nächsten Schritte: die Aufbereitung und Bereinigung der Daten.

### 3.3.2 Datenaufbereitung

Die Koordinaten der erfassten Gelenkpunkte liegen in einem Koordinatensystem, in dessen Ursprung die Kinect liegt und dessen Orientierung von der Positionierung der Kinect bei der Aufnahme abhängt. Der Schritt Datenaufbereitung transformiert sie deshalb in ein Koordinatensystem, das den Methodenanwender bei der Auswertung unterstützt und die Ergebnisse verständlich darstellt.

Diese Transformation besteht dabei aus zwei Schritten: Zunächst wird die Neigung der Kinect gegenüber dem Koordinatensystem des beobachteten Arbeitssystems ausgeglichen und anschließend wird das System so transformiert, dass die Daten anwenderfreundlich dargestellt sind.

#### Ausgleich der Neigung

Je nach beobachtetem Arbeitssystem muss man die Kinect neigen, um die Arbeitsaufgabe vollständig aufzunehmen. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn Materialkisten eine Positionierung direkt vor dem Mitarbeiter verhindern (vgl. Abbildung 3-9). Der Methodenanwender vermerkt dann den Winkel dieser Neigung bei der Erfassung im Software-Demonstrator. Dadurch kann dieser den Winkel automatisiert ausgleichen.

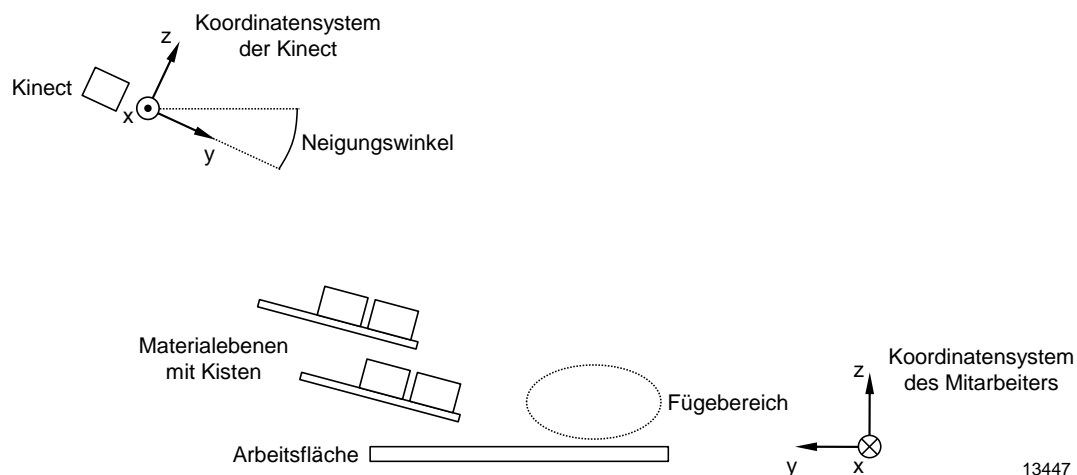


Abbildung 3-9 Neigung der Kinect zur vollständigen Erfassung der Armbewegungen

#### Anwenderfreundliche Darstellung

Für die Interpretation der Koordinaten durch den Anwender ist es von Vorteil, diese so umzuwandeln, dass die aufgezeichneten Punkte aus der Sicht der beobachteten Person dargestellt werden. Für die Aufnahme der Armbewegungen an einem einzelnen Arbeitsplatz kann diese Transformation automatisch erfolgen. Dabei wird der Koordinatenursprung auf den durchschnittlichen Aufenthaltsort des Mitarbeiters gelegt und das System so gedreht, dass es der Sichtrichtung des Mitarbeiters entspricht.

Falls diese automatische Transformation kein zufriedenstellendes Ergebnis liefert, kann der Anwender die Transformation manuell durchführen. Abbildung 3-10 zeigt das Ergebnis der Transformation für eine Aufnahme von Armbewegungen. Bei der Aufnahme von Körperbewegungen muss der Anwender die Transformation stets manuell durchführen, weil es keinen natürlichen Koordinatenursprung wie bei der Analyse von Armbewegungen gibt. Hierbei empfiehlt sich beispielsweise eine Orientierung an besonders wichtigen Arbeitsstationen.

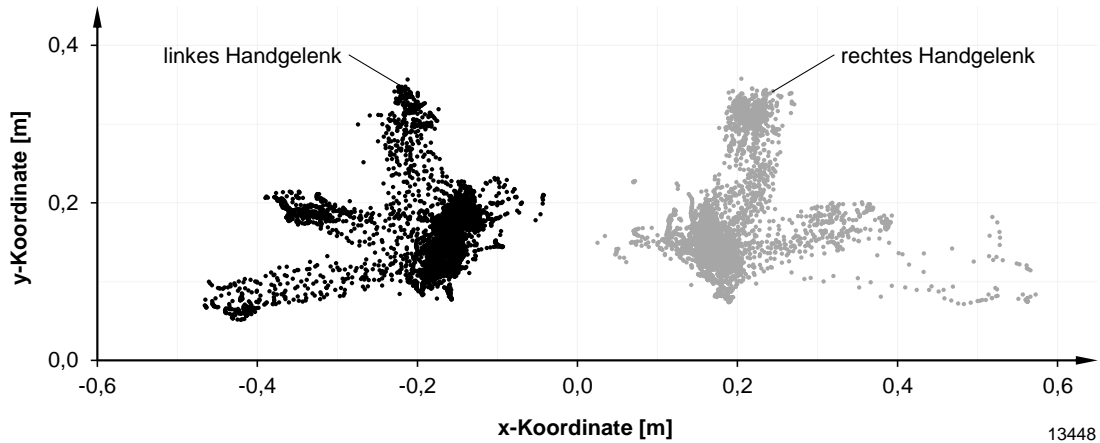


Abbildung 3-10 Aufgenommene Koordinaten der Handgelenke

Realisierung der Datenaufbereitung durch den Software-Demonstrator

Die Transformation wäre sehr aufwändig, wenn man sie manuell durchführen würde. Daher unterstützt der Software-Demonstrator auch diesen Schritt. Zudem bietet er auch hier die Möglichkeit zur Visualisierung der Ergebnisse. So kann der Anwender prüfen, ob die Transformation seinen Wünschen entspricht. Abbildung 3-11 zeigt die Ansicht des Demonstrators für die Koordinatentransformation.

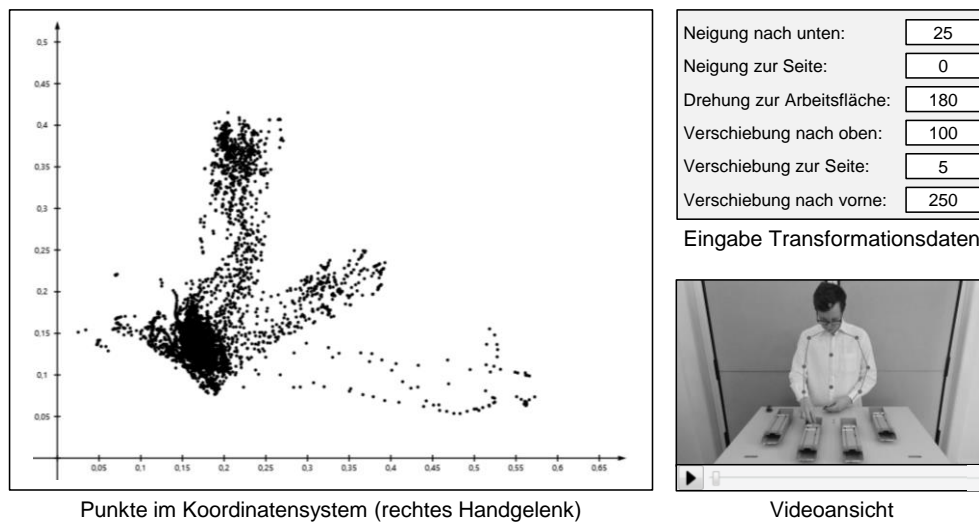


Abbildung 3-11 Ansicht zur Koordinatentransformation des Software-Demonstrators

Ergebnis dieses Schrittes ist eine Beobachtung mit den transformierten Koordinaten für jeden Gelenkpunkt. Tabelle 3-3 zeigt einen beispielhaften Ausschnitt dieser Daten. In den ersten beiden Spalten sind dabei der Index sowie der Zeitpunkt der Aufnahme aufgelistet. In den nachfolgenden vier Spalten sind der Tracking-Status des Kopfes sowie dessen x-, y- und z-Koordinaten aufgelistet. Der Tracking-Status beschreibt, ob die Kinect den Gelenkpunkt erfasst hat. Das ‚T‘ bedeutet an dieser Stelle, dass die Kinect den Gelenkpunkt erfasst hat. Abschnitt 3.3.3 geht detaillierter auf den Tracking-Status ein. Die Koordinaten sowie der Tracking-Status stehen ebenso für die anderen 24 Gelenkpunkte in der Aufnahme zur Verfügung.

**Tabelle 3-3 Gelenkpunkte mit transformierten Koordinaten und Tracking-Status**

Aufnahme $a$ [-]	Zeitpunkt $T_a$ [s]	Gelenkpunkte							
		Schultermitte (SS)				Handgelenk, links (WL)			
		$TS_{SS,a}$	$x_{SS,a}$ [m]	$y_{SS,a}$ [m]	$z_{SS,a}$ [m]	$TS_{WL,a}$	$x_{WL,a}$ [m]	$y_{WL,a}$ [m]	$z_{WL,a}$ [m]
1	0,00	T	-0,005	0,262	1,350	T	-0,171	0,135	1,963
2	0,02	T	-0,006	0,262	1,350	T	-0,177	0,136	1,961
3	0,07	T	-0,007	0,262	1,350	T	-0,195	0,139	1,955
4	0,10	T	-0,008	0,263	1,350	T	-0,213	0,142	1,938
5	0,13	T	-0,010	0,263	1,350	T	-0,233	0,143	1,909
6	0,16	T	-0,014	0,264	1,349	T	-0,234	0,171	1,889
7	0,19	T	-0,018	0,265	1,347	T	-0,254	0,174	1,877
8	0,22	T	-0,022	0,265	1,346	T	-0,270	0,181	1,862
9	0,24	T	-0,027	0,267	1,343	T	-0,280	0,181	1,851
10	0,28	T	-0,032	0,269	1,340	T	-0,289	0,186	1,848

$T_a$  : Zeitpunkt von Aufnahme  $a$  [s]

$TS_{GP,a}$  : Tracking-Status von Gelenkpunkt GP [-]

$x_{GP,a}$  : x-Koordinate von Gelenkpunkt GP [m]

$y_{GP,a}$  : y-Koordinate von Gelenkpunkt GP [m]

$z_{GP,a}$  : z-Koordinate von Gelenkpunkt GP [m]

13450

### 3.3.3 Datenbereinigung

Die Nutzbarkeit der Daten zur Ermittlung von Ist-Zeiten hängt in starkem Maße von der Datenqualität ab. So kann es beispielsweise dazu kommen, dass Gegenstände die Sicht der Kinect auf den Mitarbeiter verdecken. Dann erfasst sie die Gelenkpunkte entweder nicht oder falsch. Zudem kann sie selbst bei unverdeckter Sicht die 3D-Daten nicht immer korrekt interpretieren. Ziel dieses Schrittes ist es daher, fehlerhaft erkannte Daten auszusortieren oder von Anfang an zu vermeiden und so korrekte Daten sicherzustellen.

Dabei werden an dieser Stelle nicht alle Möglichkeiten zur Optimierung der Datenqualität erläutert, sondern lediglich diejenigen, die relevant für die Anwendung der Methode sind und die der Anwender ohne hohen Zusatzaufwand realisieren kann. Dazu werden zunächst grundlegende Begriffe definiert (Abschnitt 3.3.3.1). Anschließend folgt die Vorstellung eines Ansatzes zur Identifizierung von Erfassungsfehlern (Abschnitt 3.3.2). Den Abschluss bilden mögliche Ansatzpunkte zur Optimierung der Qualität der Erfassung (Abschnitt 3.3.3.3).

### 3.3.3.1 Kennzahlen der Erfassungsgüte

Je nach Anwendungszweck existieren unterschiedliche Anforderungen an Daten. Der Begriff Datenqualität beschreibt, inwieweit diese Anforderungen erfüllt werden [vgl. Epp106 , S. 17ff.; Naum07, S. 27]. Zentrale Anforderung an die Bewegungsdaten die korrekte Erfassung der für die Analysen notwendigen Gelenkpunkte (vgl. Tabelle 3-2).

Ein Gelenkpunkt ist dabei richtig erfasst, wenn seine ermittelten Koordinaten den realen Koordinaten des Gelenks entsprechen. Ist er nicht richtig erfasst, hat die Kinect ihn entweder gar nicht erfasst oder sie hat in falsch erfasst (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Man kann somit die Datenqualität einer Beobachtung für einen Gelenkpunkt durch zwei Kennzahlen beschreiben. Zum einen durch die Erfassungsrate, die den Anteil der Aufnahmen beschreibt, bei denen der Gelenkpunkt erfasst wurde (vgl. Formel 3-8), und zum anderen durch die Erfassungsqualität, die den Anteil der richtig erfassten Aufnahmen an den erfassten Aufnahmen beschreibt (vgl. Formel 3-9). Das Produkt dieser beiden Kennzahlen ergibt dann den Anteil der richtig erfassten Aufnahmen an allen Aufnahmen an.

$$ER_{GP} = \frac{AA_{E,GP}}{AA_{Beo}} = 1 - \frac{AA_{NE,GP}}{AA_{Beo}} \quad (3-9)$$

$$EQ_{GP} = \frac{AA_{KE,GP}}{AA_{E,GP}} = 1 - \frac{AA_{FE,GP}}{AA_{E,GP}} \quad (3-10)$$

- $ER_{GP}$  : Erfassungsrate von Gelenkpunkt GP [-]  
 $EQ_{GP}$  : Erfassungsqualität von Gelenkpunkt GP [-]  
 $AA_{Beo}$  : Anzahl Aufnahmen im Beobachtungszeitraum [-]  
 $AA_{E,GP}$  : Anzahl Aufnahmen mit erfasstem Gelenkpunkt GP [-]  
 $AA_{NE,GP}$  : Anzahl Aufnahmen mit nicht erfasstem Gelenkpunkt GP [-]  
 $AA_{KE,GP}$  : Anzahl Aufnahmen mit korrekt erfasstem Gelenkpunkt GP [-]  
 $AA_{FE,GP}$  : Anzahl Aufnahmen mit falsch erfasstem Gelenkpunkt GP [-]

Für die Methodik ist es nicht relevant, alle Gelenkpunkte richtig zu erfassen. Sie benötigt nur die für die jeweilige Analyse notwendigen Punkte. Demnach kann man für jede Analyse ebenfalls die beiden Kennzahlen Erfassungsrate und Erfassungsqualität bestimmen (vgl. Formeln 3-10 und 3-11). Eine Aufnahme kann dabei für eine Analyse verwendet werden, wenn jeder benötigte Gelenkpunkt richtig erfasst ist.

$$ER_{An} = \frac{AA_{E,An}}{AA_{Beo}} = 1 - \frac{AA_{NE,An}}{AA_{Beo}} \quad (3-11)$$

$$EQ_{An} = \frac{AA_{KE,An}}{AA_{E,An}} = 1 - \frac{AA_{FE,An}}{AA_{E,An}} \quad (3-12)$$

- $ER_{An}$  : Erfassungsrate der erforderlichen Gelenkpunkte für Analyse An [-]  
 $EQ_{An}$  : Erfassungsqualität der erforderlichen Gelenkpunkte für Analyse An [-]  
 $AA_{Beo}$  : Anzahl Aufnahmen im Beobachtungszeitraum [-]  
 $AA_{E,An}$  : Anzahl Aufnahmen mit erfassten erforderlichen Gelenkpunkten für Analyse An [-]  
 $AA_{NE,An}$  : Anzahl Aufnahmen mit nicht erfassten erforderlichen Gelenkpunkten für Analyse An [-]  
 $AA_{KE,An}$  : Anzahl Aufnahmen mit korrekt erfassten erforderlichen Gelenkpunkten für Analyse An [-]  
 $AA_{FE,An}$  : Anzahl Aufnahmen mit falsch erfassten erforderlichen Gelenkpunkten für Analyse An [-]

Da verschiedene Einflüsse die Bewegungserfassung der Kinect stören können (vgl. Abschnitt 2.5.2), liegen beide Kennzahlen in der Regel unter eins. Eine niedrige Erfassungsrate schränkt die Aussagekraft des Ergebnisses ein, da nicht alle Bewegungen im Beobachtungszeitraum erfasst sind. Solange die Erfassungsqualität hoch ist, kann man die Daten dennoch für eine Analyse verwenden. Ist die Erfassungsqualität jedoch niedrig, kann die Methodik die Daten fehlinterpretieren. Dann erkennt sie beispielsweise Bewegungen, die im realen Ablauf nicht vorkommen.

Um solche Fehlinterpretationen zu vermeiden, können Algorithmen zur Fehleridentifizierung die fehlerhaften Aufnahmen oder Bereiche aussortieren (vgl. Abschnitt 3.3.3.2). Sie können es jedoch nicht gewährleisten, dass sie die fehlerhaften Daten vollständig markieren und dabei keine fehlerfreien Daten einschließen. Zur Bewertung dieser Abweichung zwischen fehlerhaft markierten und tatsächlich fehlerhaften Daten werden zwei Kennzahlen verwendet. Diese Kennzahlen treffen eine Aussage über die Eignung der Algorithmen zur Fehleridentifizierung.

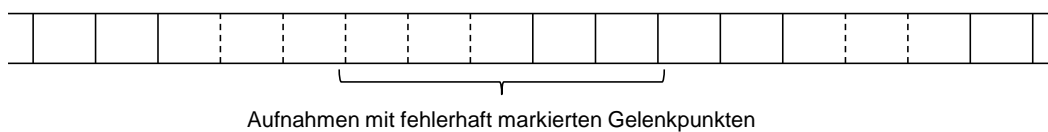
Die Identifikationsrate gibt an, welchen Anteil der tatsächlich fehlerhaften Aufnahmen der Algorithmus identifiziert hat (vgl. Formel 3-13). Die Identifikationsqualität gibt hingegen an, welcher Anteil der fehlerhaft markierten Aufnahmen tatsächlich fehlerhaft ist (vgl. Formel 3-14).

$$IR_{GP} = \frac{AA_{KFM,GP}}{AA_{FE,GP}} \quad (3-13)$$

$$IQ_{GP} = \frac{AA_{KFM,GP}}{AA_{FM,GP}} \quad (3-14)$$

- $IR_{GP}$  : Identifikationsrate für Gelenkpunkt GP [-]
- $IQ_{GP}$  : Identifikationsqualität für Gelenkpunkt GP [-]
- $AA_{FE,GP}$  : Anzahl Aufnahmen mit falsch erfasstem Gelenkpunkt GP [-]
- $AA_{FM,GP}$  : Anzahl Aufnahmen mit fehlerhaft markiertem Gelenkpunkt GP [-]
- $AA_{KFM,GP}$  : Anzahl Aufnahmen mit korrekt als fehlerhaft markiertem Gelenkpunkt GP [-]

Abbildung 3-12 zeigt an einem Beispiel, wie man die Identifikationsrate und die Identifikationsqualität für einen Fehleralgorithmus berechnen kann.



$$\begin{array}{ll}
 AA_{FE,GP} = 7 & IR_{GP} = 3/7 = 42,9 \% \\
 AA_{FM,GP} = 6 & IQ_{GP} = 3/6 = 50 \% \\
 AA_{KFM,GP} = 3 &
 \end{array}$$

- $AA_{FE,GP}$  : Anzahl Aufnahmen mit falsch erfasstem Gelenkpunkt GP [-] | Aufnahme mit korrekt erfasstem Gelenkpunkt
- $AA_{FM,GP}$  : Anzahl Aufnahmen mit fehlerhaft markiertem Gelenkpunkt GP [-] |
- $AA_{KFM,GP}$  : Anzahl Aufnahmen mit korrekt als fehlerhaft markiertem Gelenkpunkt GP [-] |
- $IR_{GP}$  : Identifikationsrate für Gelenkpunkt GP [-] | Aufnahme mit falsch erfasstem Gelenkpunkt
- $IQ_{GP}$  : Identifikationsqualität für Gelenkpunkt GP [-] |

13451

**Abbildung 3-12 Identifizierungsrate und -qualität von Fehlern**

### 3.3.3.2 Identifizierung von Fehlern der erfassten Daten

#### Tracking-Status der Kinect

Die Kinect gibt für jeden Gelenkpunkt neben den Koordinaten der Gelenkpunkte einen Tracking-Status aus (vgl. Abschnitt 3.3.1). Dieser kann drei Werte annehmen:

- *Tracked* – Die Kinect hat die Position des Gelenkpunktes erfasst und kennzeichnet die Daten als vertrauenswürdig.
- *Inferred* – Die Kinect hat die Position des Gelenkpunktes zwar bestimmt, die Vertrauenswürdigkeit ist jedoch gering.
- *Not Tracked* – Die Kinect hat die Position des Gelenkpunktes nicht erfasst.

Die Methodik verwendet aufgrund der geringen Vertrauenswürdigkeit keine Aufnahmen mit dem Tracking-Status „I“ und sortiert diese direkt aus. Nachdem so bereits Aufnahmen aussortiert werden, identifizieren spezielle Algorithmen verbleibende fehlerhafte Daten.

#### Algorithmen zur Identifizierung von fehlerhaften Daten

Nach Aussortierung der Daten mit dem Tracking-Status *Inferred* sind weiterhin fehlerhafte Daten vorhanden. Diese fehlerhaften Daten lassen sich in zwei verschiedene Fehlerarten einteilen [vgl. Lür16, S. 14]:

- Wenn sich zwei Personen gleichzeitig im Aufnahmebereich der Kinect aufhalten, kann es dazu kommen, dass die Kinect zunächst eine Person erfasst und dann von einer Aufnahme zur nächsten auf die zweite Person wechselt. Dann zeichnet sie bis zu diesem Wechsel die Koordinaten der ersten Person auf und danach die der zweiten Person. Dieser Fehler verhindert die korrekte Erfassung aller Bewegungen eines Mitarbeiters.
- Durch Sichtverdeckung oder Fehlinterpretation der 3D-Daten kann es dazu kommen, dass die Kinect die Koordinaten einzelner Körperteile falsch bestimmt. Dann ist es unmöglich, diese Körperteile in der Analyse auszuwerten.

Die Algorithmen zur Fehlererkennung haben das Ziel, diese Fehlerarten in den Daten zu erkennen und zu markieren. Beide Fehlerarten zeichnen sich dabei durch einen charakteristischen Verlauf der Geschwindigkeit bestimmter Gelenkpunkte aus. Die Algorithmen untersuchen deshalb die Gelenkgeschwindigkeiten im Beobachtungszeitraum und identifizieren diese charakteristischen Verläufe [vgl. Lür16, S. 20ff.]. Bei der ersten Fehlerart markieren die Algorithmen dann den kompletten Datensatz, während sie bei der zweiten Art nur die betroffenen Gelenkpunkte markieren. Der Methodenanwender kann anschließend die so markierten Daten manuell überprüfen oder löschen.

Ein Zeitbereich, indem die Erfassung von einer Person auf eine zweite Person wechselt, zeichnet sich beispielsweise durch eine stark erhöhte Geschwindigkeit der Schultergelenke aus. Analog weisen fehlerhaft erfasste Gelenkpunkte ebenfalls zeitweise erhöhte Geschwindigkeitswerte auf. In beiden Fällen prüfen die Algorithmen die entsprechenden Geschwindigkeitswerte [vgl. Lür16, S. 20ff.].

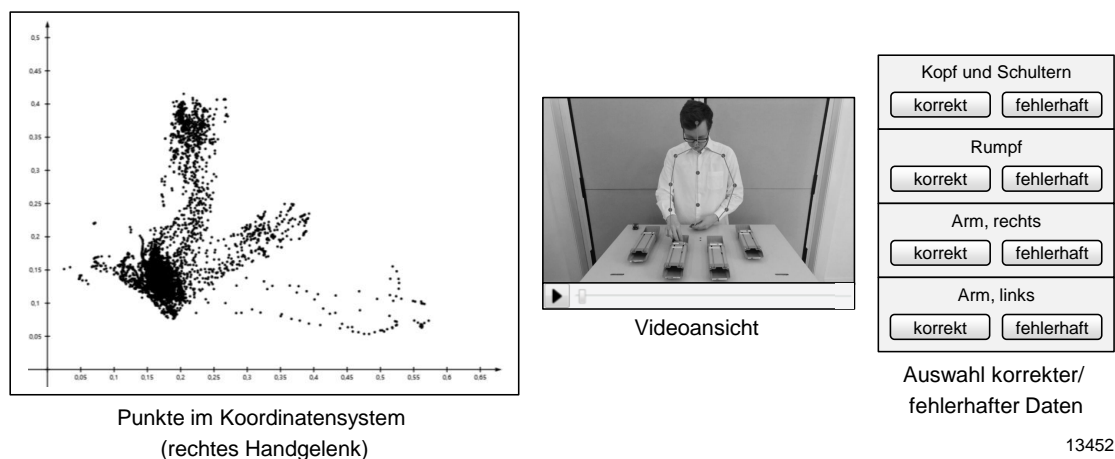
Dies erfolgt beispielsweise, indem die Algorithmen das 75 %-Quartil der Werte einer Gelenkgeschwindigkeit bestimmen. Anschließend markieren sie alle Daten mit höheren Geschwindigkeiten als fehlerhaft. Die Höhe dieser Grenze hat entscheidenden Einfluss auf die Identifikationsrate und -qualität [vgl. Lür16, S. 29ff.]. Eine hohe Grenze resultiert in einer niedrigen Identifikationsrate, aber dafür in einer hohen Identifikationsqualität. Wird eine geringere Grenze gewählt, steigt zwar die Identifikationsrate, die Identifikationsqualität sinkt jedoch.

Um höhere Identifikationsraten zu erreichen, können die Algorithmen zudem an fehlerhafte Bereiche angrenzende Daten ebenfalls als fehlerhaft markieren. Damit steigt die Identifikationsrate noch weiter bei sinkender Identifikationsqualität [vgl. Lür16, S. 29ff.].

### Manuelle Bereinigung durch Software-Demonstrator

Auch nach der Anwendung eines Algorithmus können fehlerhafte Daten in der Aufnahme vorkommen. Deswegen ist der nächste Schritt die manuelle Aussortierung fehlerhafter Daten. Der Software-Demonstrator unterstützt den Anwender dabei auch an dieser Stelle.

Der Demonstrator (vgl. Abbildung 3-13) visualisiert zum einen die erfassten Daten im Koordinatensystem. Daneben stellt er eine Videoansicht zur Überprüfung Erfassung bereit. Im Auswahlbereich kann der Anwender auswählen, ob die Kinect das entsprechende Körperteil korrekt oder fehlerhaft erfasst hat. Die so als fehlerhaft markierten Daten werden dann nicht mehr im Koordinatensystem angezeigt.



**Abbildung 3-13 Ansicht des Software-Demonstrators zur Datenbereinigung**

### Ergebnis der Fehleridentifizierung

Nach der Fehleridentifizierung sind die falsch erfassten Gelenkpunkte aussortiert. Zur Visualisierung des Ergebnisses eignet sich eine Draufsicht (vgl. Abbildung 3-14), bei der diese Aufnahmen hervorgehoben sind (grau: beibehalten, schwarz: aussortiert). Hierbei ist gut ersichtlich, dass die ermittelten Fehler nicht zwangsläufig durch ihre Lage als Ausreißer erkennbar sind.

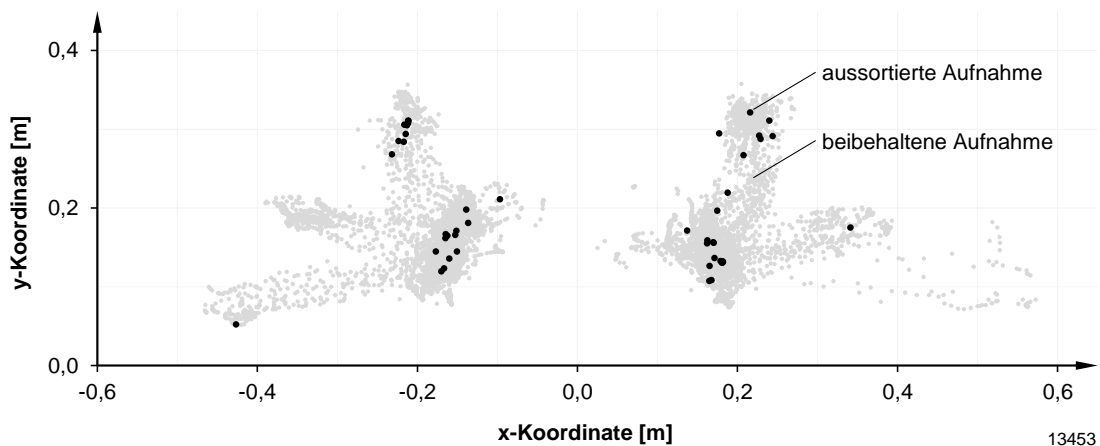


Abbildung 3-14 Aussortierte Daten nach der Fehleridentifizierung

Damit kann man nun für jede Analyse die Erfassungsqualität bestimmen (vgl. Formel 3-11). Zusammen mit der Erfassungsrate kann der Anwender dann bestimmen, welche Analysevariante mit den aufgenommenen Daten sinnvoll ist (vgl. Tabelle 3-4). Die Erfassungsrate beschreibt den Anteil der Aufnahmen, bei dem die Kinect die für die Analyse erforderlichen Gelenkpunkte erfasst hat. Die Erfassungsqualität beschreibt den Anteil der davon fehlerfreien Daten. Das Produkt dieser Werte ergibt den Anteil der nutzbaren Aufnahmen im Beobachtungszeitraum.

Tabelle 3-4 Erfassungsrate und -qualität zur Auswahl einer Analyseart

Analyse	Erfassungsrate $ER_{An}$	Erfassungsqualität $EQ_{An}$	Anteil nutzbarer Aufnahmen $ER_{An} \times EQ_{An}$
einfache Analyse der Körperbewegungen	100 %	100 %	100 %
differenzierte Analyse der Körperbewegungen	75 %	75 %	56 %
einfache Analyse der Armbewegungen	95 %	99 %	94 %
differenzierte Analyse der Armbewegungen	90 %	95 %	86 %

13454

Für eine zuverlässige Anwendung der Methode ist insbesondere eine hohe Erfassungsqualität vorteilhaft, da fehlerhafte Daten zu falschen Ergebnissen führen können. Bei der Anwendung hat sich gezeigt, dass sie bei mindestens 80 % liegen sollte.

Die Beobachtungszeit besteht aus verschiedenen Zeitanteilen, die Abschnitt 3.1.3 erläutert. Nach der Datenbereinigung ist bekannt, welche Zeitanteile nicht oder falsch erfasste Abläufe beinhalten. Für die folgenden Ausführungen ist insbesondere der verbleibende Zeitanteil, also die kumulierte Zeitdauer korrekt erfasster Abläufe ( $Z_{KE,kum}$ ) relevant. Sie wird im Folgenden als Erfassungszeit bezeichnet und bildet die Bezugszeit für die Analyse der Produktivität (Kapitel 5).

### 3.3.3.3 Möglichkeiten zur Erhöhung der Datenqualität

Anstatt die fehlerhaften Daten im Nachhinein auszusortieren, kann der Methoden-anwender die Bedingungen bei der Aufnahme bereits so gestalten, dass die Erfassungsrate und -qualität möglichst hoch sind. Dieser Abschnitt erläutert verschiedene Möglichkeiten.

### Sichtkontakt zwischen Kinect und Mitarbeiter

Ein wichtiger Faktor bei Verwendung der Kinect ist der Sichtkontakt zum Mitarbeiter. Ist er durch eigene Körperteile oder andere Objekte unterbrochen, kann die Kinect Gelenkpunkte nicht korrekt erfassen. Dementsprechend ist sie bei allen Analysen so zu positionieren, dass die relevanten Gelenkpunkte während des Arbeitslaufs nicht verdeckt sind.

Die Verdeckung durch eigene Körperteile tritt insbesondere bei der Analyse von Armbewegungen auf. Wenn der Mitarbeiter beispielsweise nicht zur Kinect gewandt ist, kann der Oberkörper die Arme verdecken. Bei der Analyse von Körperbewegungen können zwar auch einzelne Gelenkpunkte verdeckt sein, die relevanten Schulter- und Hüftgelenkpunkte sind in der Regel jedoch nicht durch andere Körperteile verdeckt.

Der Anwender sollte die Kinect daher so positionieren, dass sich die Arme stets im Aufnahmebereich befinden. Die optimale Positionierung ist dabei frontal vor dem Mitarbeiter, so dass dieser in Richtung der Kinect schaut. Im Vergleich zu einer Positionierung seitlich des Mitarbeiters kann man die Qualität so positiv beeinflussen [vgl. Nguy16, S. 35f.].

### Weitere Einflussfaktoren auf die Erfassungsqualität der Kinect

Neben der Positionierung gibt es weitere Faktoren, die die Qualität der Erfassung beeinträchtigen können. Dazu gehört beispielsweise die Arbeitskleidung der zu beobachtenden Person. Da die Bewegungserfassung der Kinect über die Reflektion der Lichtwellen an der Versuchsperson funktioniert, können unterschiedlich stark reflektierende Kleidungsstücke das Ergebnis beeinflussen [vgl. Nguy16, S. 37f.].

Zudem ist es möglich, dass weitere Umweltbedingungen einen Einfluss haben. So kann die Kinect beispielsweise Lichtwellen im Infrarotbereich aus anderen Quellen ebenfalls aufnehmen. Der Methodenanwender sollte somit nach Möglichkeit solche Quellen aus dem Aufnahmebereich entfernen.

### Ergänzung durch andere Technologien zur Bewegungserfassung

Die entwickelte Methodik zur Bestimmung von Ist- und Plan-Zeiten sowie zur anschließenden Analyse der Produktivität benötigt fehlerfreie Bewegungsdaten. Die Daten müssen jedoch nicht zwangsläufig ausschließlich mit der Kinect bestimmt werden. So ist es denkbar, dass eine zweite Technologie zur Bewegungserfassung die Kinect ergänzt. Ein Beispiel dafür wäre die detaillierte Positionserfassung der Handgelenke durch elektromagnetisches Tracking (vgl. Abschnitt 2.5.1).

## **3.4 Zustandserkennung**

Nach Aufnahme und Vorbereitung der Daten ist es möglich, Zustände im Erfassungszeitraum zu ermitteln. Dieser Abschnitt beschreibt das Vorgehen bei der Ermittlung. Dazu beschreibt er zunächst die verwendeten Berechnungsgrößen (Abschnitt 3.4.1). Anschließend stellt er das allgemeine Vorgehen bei der Erkennung der Zustände vor (Abschnitt 3.4.2), um dann die einzelnen Vorgehensschritte der Analysen detailliert zu erläutern (Abschnitt 3.4.3). Er geht zudem kurz auf mögliche Alternativen der Zustandserkennung ein (Abschnitt 3.4.4) und stellt dar, wie der Anwender die Erkennung beeinflussen kann (Abschnitt 3.4.5). Das Vorgehen ist dabei speziell auf die mit der Kinect erfassten Bewegungsdaten angepasst. Es ist jedoch möglich, dieses Vorgehen an andere Technologien der Bewegungserfassung anzupassen.

### 3.4.1 Berechnungsgrößen

Dieser Abschnitt definiert Größen, die für die Erkennung der Zustände notwendig sind. Man kann diese Größen einteilen in Werte, die sich aus dem Vergleich von Gelenkpunkten bei einer Aufnahme ergeben und Werte, die sich aus dem Vergleich von Gelenkpunkten bei unterschiedlichen Aufnahmen ergeben.

#### Vergleich von Gelenkpunkten bei einer Aufnahme

Die einfachste Größe, die man aus dem Vergleich zweier Gelenkpunkte bestimmen kann, ist der Abstand zwischen den Punkten (vgl. Formel 3-15). Ein charakteristischer Abstand für eine Körperhaltung ist beispielsweise der Abstand zwischen linkem Schultergelenk und linker Hand ( $ab_{SL,HL}$ ). Ist dieser Abstand gering, ist der linke Arm angewinkelt. Der maximale Wert dieses Abstandes entspricht zudem der Länge des Armes.

$$ab_{GP1,GP2,a} = \sqrt{(x_{GP2,a} - x_{GP1,a})^2 + (y_{GP2,a} - y_{GP1,a})^2 + (z_{GP2,a} - z_{GP1,a})^2} \quad (3-15)$$

- $ab_{GP1,GP2,a}$  : Abstand zwischen Gelenkpunkten GP1 und GP2 bei Aufnahme a [m]  
 $x_{GP,a}$  : x-Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a [m]  
 $y_{GP,a}$  : y-Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a [m]  
 $z_{GP,a}$  : z-Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a [m]

Eine weitere wichtige Gruppe von Größen für die Bestimmung von Körperhaltungen sind Vektoren. So kann ein Vektor beispielsweise den Knochen zwischen zwei Gelenkpunkten abbilden (vgl. Formel 3-16). So stellt beispielsweise der Vektor zwischen dem linken Ellbogengelenk und dem linken Schultergelenk den Oberarmknochen dar ( $V_{SL,EL}$ ). Andere wichtige Vektoren sind beispielweise die Wirbelsäule ( $V_{SS,SB}$ ) oder die Schulterachse ( $V_{SL,SR}$ ). Für die Bestimmung von Körperhaltungen sind zudem die Vektoren der Koordinatenachsen als Bezugsgrößen relevant (vgl. Formel 3-17 und Formel 3-18)

$$\overrightarrow{V_{GP1,GP2,a}} = \begin{pmatrix} x_{GP2,a} - x_{GP1,a} \\ y_{GP2,a} - y_{GP1,a} \\ z_{GP2,a} - z_{GP1,a} \end{pmatrix} \quad (3-16)$$

$$\overrightarrow{V_x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3-17)$$

$$\overrightarrow{V_z} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3-18)$$

- $V_{GP1,GP2,a}$  : Vektor von Gelenkpunkt GP1 zu Gelenkpunkt GP2 bei Aufnahme a [m]  
 $V_x$  : Vektor der x-Koordinatenachse [m]  
 $V_z$  : Vektor der z-Koordinatenachse [m]  
 $x_{GP,a}$  : x-Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a [m]  
 $y_{GP,a}$  : y-Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a [m]  
 $z_{GP,a}$  : z-Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a [m]

Durch den Vergleich der Vektoren kann man nun Winkel zur Identifikation von Körperhaltungen berechnen. So lassen sich Gelenkwinkel durch den Vergleich zweier Körpervektoren berechnen (vgl. Formel 3-19). Ein Beispiel dafür ist der Ellenbogenwinkel ( $\alpha_{\text{Oberarm, Unterarm}}$ ). Analog kann man die Orientierungen der Körpervektoren im Raum bestimmen (vgl. Formel 3-20 und 3-21). Relevante Beispiele sind der Winkel des Schultervektors in der horizontalen Ebene ( $\alpha_{\text{h, Schulter}}$ ) und der Winkel des Wirbelsäulenvektors zur vertikalen Koordinatenachse ( $\alpha_{\text{v, Wirbelsäule}}$ ).

$$\cos \alpha_{V1, V2, a} = \frac{x_{V1, a} \times x_{V2, a} + y_{V1, a} \times y_{V2, a} + z_{V1, a} \times z_{V2, a}}{\sqrt{x_{V1, a}^2 + y_{V1, a}^2 + z_{V1, a}^2} \times \sqrt{x_{V2, a}^2 + y_{V2, a}^2 + z_{V2, a}^2}} \quad (3-19)$$

$$\cos \alpha_{h, V1, a} = \frac{x_{V1, a}}{\sqrt{x_{V1, a}^2 + y_{V1, a}^2}} \quad (3-20)$$

$$\cos \alpha_{v, V1, a} = \frac{z_{V1, a}}{\sqrt{x_{V1, a}^2 + y_{V1, a}^2 + z_{V1, a}^2}} \quad (3-21)$$

- $\alpha_{V1, V2, a}$  : Winkel zwischen Vektoren V1 und V2 bei Aufnahme a [°]
- $\alpha_{h, V1, a}$  : Winkel von Vektor V1 in horizontaler Ebene bei Aufnahme a [°]
- $\alpha_{v, V1, a}$  : Winkel zwischen Vektor V1 und vertikaler Achse bei Aufnahme a [°]
- $x_{V1, a}$  : x-Betrag von Vektor V1 bei Aufnahme a [m]
- $y_{V1, a}$  : y-Betrag von Vektor V1 bei Aufnahme a [m]
- $z_{V1, a}$  : z-Betrag von Vektor V1 bei Aufnahme a [m]

### Vergleich zweier Aufnahmen

Wenn man zwei Aufnahmen miteinander vergleicht, kann man zunächst Änderungen der zuvor beschriebenen Handlungsgrößen ermitteln. Dazu gehört zum Beispiel die Änderung des Abstands zweier Gelenke (vgl. Formel 3-22). Damit kann man dann ermitteln, ob der Abstand in einem gewissen Zeitraum zu- oder abnimmt und ebenfalls, um welchen Wert. Analog kann man die Änderung von Winkeln bestimmen (vgl. Formel 3-23).

$$\Delta ab_{GP1, GP2, a, b} = ab_{GP1, GP2, b} - ab_{GP1, GP2, a} \quad (3-22)$$

$$\Delta \alpha_{V1, V2, a, b} = \alpha_{V1, V2, b} - \alpha_{V1, V2, a} \quad (3-23)$$

- $\Delta ab_{GP1, GP2, a, b}$  : Abstandsänderung zwischen Gelenkpunkten GP1 und GP2 von Aufnahme a zu Aufnahme b [m]
- $ab_{GP1, GP2, a}$  : Abstand zwischen Gelenkpunkten GP1 und GP2 bei Aufnahme a [m]
- $\Delta \alpha_{V1, V2, a, b}$  : Winkeländerung zwischen Vektoren V1 und V2 von Aufnahme a zu Aufnahme b [°]
- $\alpha_{V1, V2, a}$  : Winkel zwischen Vektoren V1 und V2 bei Aufnahme a [°]

Eine weitere relevante Größe ist die Distanz zwischen den Orten eines Gelenkpunktes bei unterschiedlichen Aufnahmen (vgl. Formel 3-24). Diese Distanz kann man auch dazu nutzen, um die zurückgelegte Strecke des Gelenkpunktes zu bestimmen. Je nach Anwendungsfall ist es zudem erforderlich, die Distanz nur in horizontaler oder vertikaler Richtung zu bestimmen (vgl. Formeln 3-25 und 3-26).

$$d_{GP,a,b} = \sqrt{(x_{GP,b} - x_{GP,a})^2 + (y_{GP,b} - y_{GP,a})^2 + (z_{GP,b} - z_{GP,a})^2} \quad (3-24)$$

$$d_{h,GP,a,b} = \sqrt{(x_{GP,b} - x_{GP,a})^2 + (y_{GP,b} - y_{GP,a})^2} \quad (3-25)$$

$$d_{v,GP,a,b} = z_{GP,b} - z_{GP,a} \quad (3-26)$$

- $d_{GP,a,b}$  : Distanz von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a zu Aufnahme b [m]  
 $d_{h,GP,a,b}$  : horizontale Distanz von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a zu Aufnahme b [m]  
 $d_{v,GP,a,b}$  : vertikale Distanz von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a zu Aufnahme b [m]  
 $x_{GP,a}$  : x-Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a [m]  
 $y_{GP,a}$  : y-Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a [m]  
 $z_{GP,a}$  : z-Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a [m]

### Geschwindigkeiten

Durch den Vergleich zweier aufeinanderfolgender Aufnahmen kann man die Geschwindigkeit einzelner Gelenkpunkte berechnen (vgl. Formel 3-27). Dies ermöglicht die Erkennung von Zustandsarten, die sich durch erhöhte Gelenkgeschwindigkeit auszeichnen. So ist beispielsweise eine erhöhte Geschwindigkeit des Handgelenks ( $v_{WL}$ ) charakteristisch für Armbewegungen. Analog lassen sich die Geschwindigkeiten in horizontaler oder vertikaler Richtung bestimmen (vgl. Formeln 3-28 und 3-29). Diese werden beispielsweise bei der Erkennung von Laufbewegungen (durch eine horizontale Bewegung des unteren Endes der Wirbelsäule;  $v_{h,SB}$ ) verwendet.

$$v_{GP,a} = \frac{d_{GP,a-1,a}}{\Delta T_a} \quad (3-27)$$

$$v_{h,GP,a} = \frac{d_{h,GP,a-1,a}}{\Delta T_a} \quad (3-28)$$

$$v_{v,GP,a} = \frac{d_{v,GP,a-1,a}}{\Delta T_a} \quad (3-29)$$

- $v_{GP,a}$  : Geschwindigkeit von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a [m/s]  
 $v_{h,GP,a}$  : horizontale Geschwindigkeit von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a [m/s]  
 $v_{v,GP,a}$  : vertikale Geschwindigkeit von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a [m/s]  
 $d_{GP,a,b}$  : Distanz von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a zu Aufnahme b [m]  
 $d_{h,GP,a,b}$  : horizontale Distanz von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a zu Aufnahme b [m]  
 $d_{v,GP,a,b}$  : vertikale Distanz von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a zu Aufnahme b [m]  
 $\Delta T_a$  : Zeitdauer zwischen Aufnahme a-1 und Aufnahme a [s]

Weitere Größen für die Erkennung von Zuständen sind die Winkelgeschwindigkeiten (vgl. Formeln 3-30 bis 3-32). Diese dienen vor allem zur Erkennung von Drehbewegungen (z. B. durch die Winkelgeschwindigkeit des Schultervektors in horizontaler Ebene,  $\omega_{h,Schultern}$ ).

$$\omega_{V1,V2,a} = \frac{\Delta\alpha_{V1,V2,a-1,a}}{\Delta T_a} \quad (3-30)$$

$$\omega_{h,V1,a} = \frac{\Delta\alpha_{h,V1,a-1,a}}{\Delta T_a} \quad (3-31)$$

$$\omega_{v,V1,a} = \frac{\Delta\alpha_{v,V1,a-1,a}}{\Delta T_a} \quad (3-32)$$

- $\omega_{V1,V2,a}$  : Winkelgeschwindigkeit zwischen Vektoren  $V1$  und  $V2$  bei Aufnahme  $a$  [ $^\circ$ ]  
 $\omega_{h,V1,a}$  : Winkelgeschwindigkeit von Vektor  $V1$  in horizontaler Ebene bei Aufnahme  $a$  [ $^\circ$ ]  
 $\omega_{v,V1,a}$  : Winkelgeschwindigkeit zwischen Vektor  $V1$  und vertikaler Achse bei Aufnahme  $a$  [ $^\circ$ ]  
 $\Delta\alpha_{V1,V2,a,b}$  : Winkeländerung zwischen Vektoren  $V1$  und  $V2$  von Aufnahme  $a$  zu Aufnahme  $b$  [ $^\circ$ ]  
 $\Delta\alpha_{h,V1,a,b}$  : Winkeländerung von Vektor  $V1$  in horizontaler Ebene von Aufnahme  $a$  zu Aufnahme  $b$  [ $^\circ$ ]  
 $\Delta\alpha_{v,V1,a,b}$  : Winkeländerung zwischen Vektor  $V1$  und vertikaler Achse von Aufnahme  $a$  zu Aufnahme  $b$  [ $^\circ$ ]  
 $\Delta T_a$  : Zeitdauer zwischen Aufnahme  $a-1$  und Aufnahme  $a$  [s]

### 3.4.2 Allgemeines Vorgehen für die Erkennung von Zuständen

Ziel der Zustandserkennung ist es, jeder Aufnahme im Erfassungszeitraum eine Zustandsart zuzuordnen. Aufeinanderfolgende Aufnahmen einer Zustandsart stellen dann einen Zustand dar, für den Anfangs- und Endzeitpunkt vorliegen. Damit ist die Grundlage für die Bestimmung der Zeitdauer der Zustände geschaffen.

Die Erkennung folgt dabei bei allen Analysen dem gleichen Grundprinzip (vgl. Abbildung 3-15). Dieses Prinzip geht davon aus, dass im Verlauf der Zeit fortwährend Wechsel zwischen den unterschiedlichen Zustandsarten stattfinden. Insbesondere geht es davon aus, dass auf eine Bewegung in der Regel ein Stillstand folgt und umgekehrt. Diese Tatsache nutzt das Vorgehen, indem es zunächst die *Bewegungen identifiziert*. Diese Identifizierung erfolgt über die charakteristischen Verläufe der Berechnungsgrößen (vgl. Abbildung 3-15), die die einzelnen Zustandsarten kennzeichnen. Die Zustandsart ‚Gehen‘ zeichnet sich beispielsweise durch eine zeitweise erhöhte Geschwindigkeit der Schulter aus. Nach der Identifizierung der Bewegungen ordnet das Vorgehen den *restlichen Zeitabschnitten* über logische Zusammenhänge Stillstände zu.

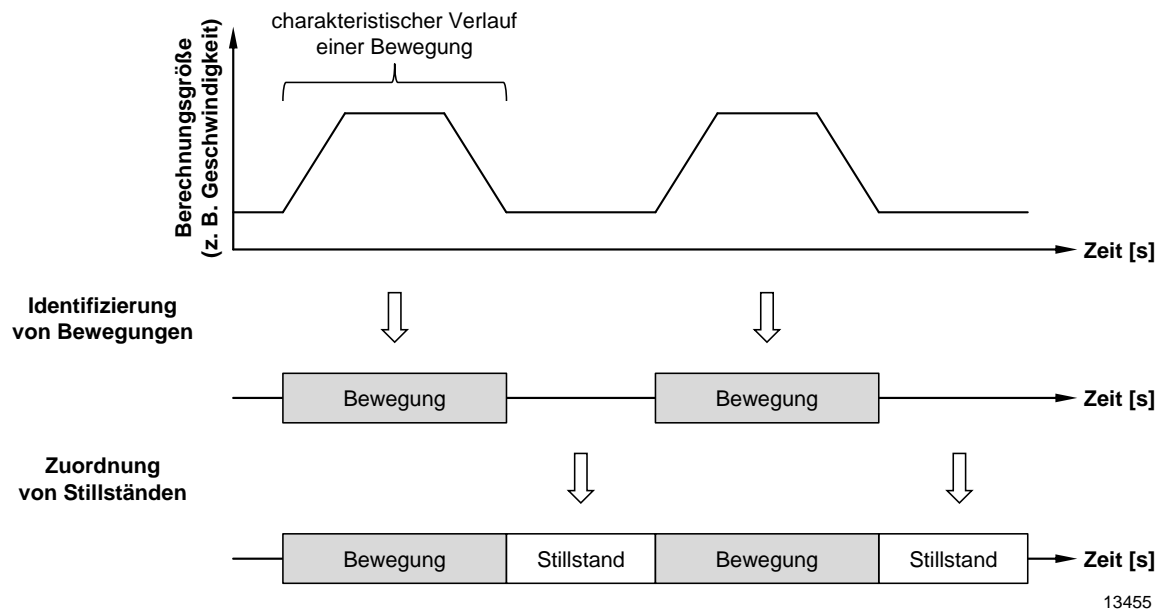


Abbildung 3-15 Grundprinzip der Zustandserkennung

### Identifizierung von Bewegungen über charakteristische Verläufe

Die Identifizierung der Bewegungen, die sich durch charakteristische Verläufe auszeichnen, folgt einem dreistufigen Vorgehen (vgl. Abbildung 3-16):

1) Lokalisierung eines Zustandes:

Die Lokalisierung untersucht die Bewegungsdaten zunächst auf besonders charakteristische Werte oder Wertverläufe, um potenzielle Zustände einer Zustandsart aufzufinden. So weist beispielsweise die Zustandsart ‚Gehen‘ immer eine erhöhte Geschwindigkeit der Gelenkpunkte der Wirbelsäule auf. Die Lokalisierung sucht demnach nach Zeitbereichen, in denen diese Geschwindigkeit einen hohen Wert aufweist. Ergebnis dieses Schrittes sind dann aufeinanderfolgende Aufnahmen, die einer Zustandsart zugeordnet sind.

2) Ermittlung von Anfangs- und Endpunkt:

Neben den so ermittelten Aufnahmen gehören in der Regel noch weitere Aufnahmen zu einem vollständigen Zustand. Das liegt zum Beispiel daran, dass die Geschwindigkeit bei Beginn einer Bewegung nicht direkt auf den für die Lokalisierung verwendeten Wert springt. Daher werden auch hier die typischen Verläufe der Zustandsarten genutzt, um Anfangs- und Endpunkt des Zustandes zu bestimmen. Für das Beispiel ‚Gehen‘ kann man erneut die Geschwindigkeit der Wirbelsäule verwenden, jedoch mit einem geringeren Grenzwert.

3) Verifikation des Zustandes:

Den Abschluss der Identifizierung bildet die Verifikation des ermittelten Zustandes. Sie prüft, ob der erkannte Zustand mit seinem Anfangs- und Endpunkt korrekt ist, also ob in diesem Zeitraum tatsächlich eine der Zustandsart entsprechende Bewegung stattgefunden hat. Dies erfolgt bei der Zustandsart ‚Gehen‘ beispielsweise durch Betrachtung des Abstandes zwischen dem Start- und dem Endpunkt der Bewegung. Unterschreitet dieser Wert einen Mindestabstand, ist davon auszugehen, dass der Zustand fälschlicherweise identifiziert wurde.

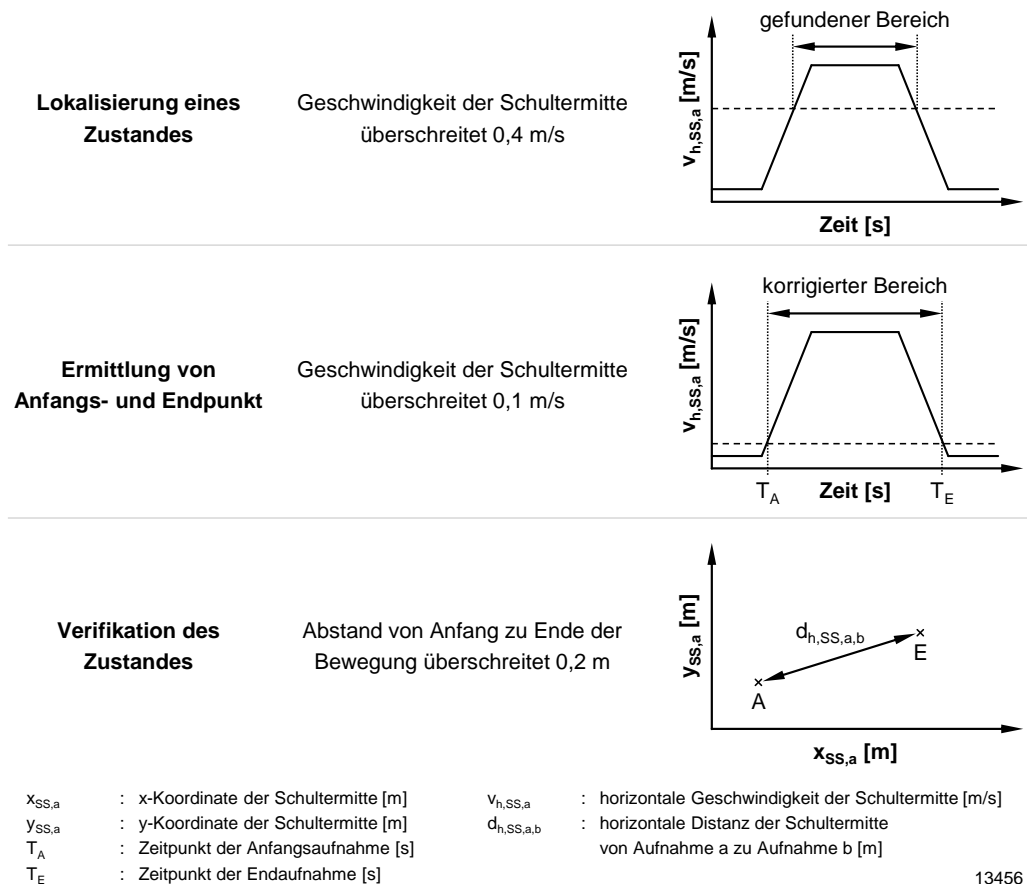
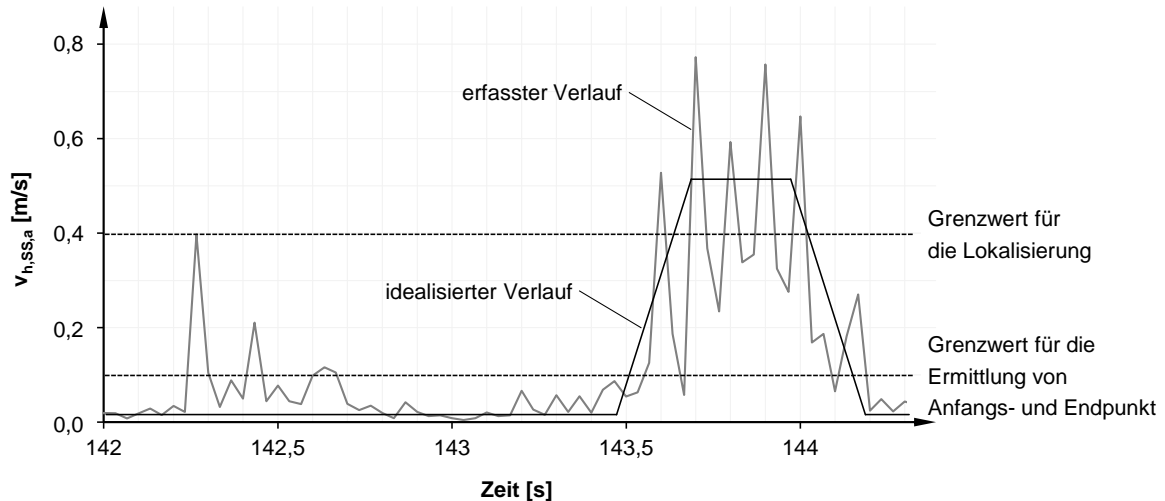


Abbildung 3-16 Vorgehen zur Identifizierung von Zuständen am Beispiel ‚Gehen‘

Abbildung 3-16 zeigt idealtypische Verläufe zur Identifizierung eines Zustandes. Die durch die Kinect erfassten Bewegungsdaten liefern jedoch nicht diese Verläufe. Das liegt zum einen daran, dass sich reale Bewegungen vom Idealverlauf unterscheiden können, zum anderen aber vor allem daran, dass die Kinect die Daten nicht vollständig korrekt erfasst (vgl. Abschnitt 3.3). Daher unterliegen die Verläufe der Berechnungsgrößen Schwankungen (vgl. Abbildung 3-17).

Um diesem Problem zu begegnen, betrachtet die Zustandserkennung je nach Berechnungsgröße mehrere aufeinanderfolgende Aufnahmen, um Fehlerkennungen durch Ausreißer zu vermeiden. Das heißt zum Beispiel, dass sie nicht sofort beim ersten Überschreiten der Grenzggeschwindigkeit einen Zustand identifiziert, sondern nur dann, wenn die Geschwindigkeit auch innerhalb der nächsten Aufnahmen nochmal diesen Wert übersteigt.

Eine Weiterentwicklung der Kinect oder die Verwendung einer anderen Technologie zur Bewegungserfassung könnte die Schwankungen reduzieren. Dies könnte dann eine Vereinfachung der Methodik an dieser Stelle ermöglichen.



$V_{h,SS,a}$  : horizontale Geschwindigkeit der Schultermitte [m/s]

13457

**Abbildung 3-17 Idealisierter und erfasster Verlauf der Schultergeschwindigkeit**

### Zuordnung der restlichen Zeitabschnitte

Nach der Identifizierung über die charakteristischen Verläufe liegen Zeitabschnitte vor, denen eine Zustandsart zugeordnet ist und Zeitabschnitte, für die das nicht der Fall ist (vgl. Abbildung 3-15). Ziel dieses Schrittes ist es, diesen restlichen Zeitabschnitten Zustandsarten zuzuordnen. Dabei unterscheidet die Zuordnung zwischen zwei verschiedenen Arten:

- Zeitabschnitte, die zwischen zwei anderen Abschnitten liegen, denen jeweils eine Zustandsart zugeordnet ist, und
- Zeitabschnitte, die an einen oder zwei Abschnitte grenzen, in denen keine korrekten Bewegungsdaten für die Analyse vorliegen.

Grundidee der Zuordnung im ersten Fall ist es, Informationen über die logische Abfolge der Zustandsarten und über Zustandseigenschaften zu nutzen. Die einfache Analyse von Körperbewegungen identifiziert beispielsweise die Zustandsart ‚Körper bewegen‘. Die restlichen Zeitabschnitte haben somit die Zustandsart ‚Stehen/Sitzen‘. Zudem ist die Geschwindigkeit der Wirbelsäule dann (näherungsweise) null. Die differenzierte Analyse von Körperbewegungen unterscheidet an dieser Stelle zwischen den Zustandsarten ‚Stehen‘ und ‚Sitzen‘. Diese Unterscheidung erfolgt dann beispielsweise danach, ob die letzte Bewegung davor ein ‚Aufrichten‘ oder ein ‚Setzen‘ war. Alternativ könnte man beispielsweise die Höhe des Kopfes prüfen. Diese Zuordnung geht davon aus, dass in diesen Zeitbereichen jeweils nur eine Zustandsart auftritt. Damit sind auch Anfangs- und Endzeitpunkte der zugeordneten Zustände durch die angrenzenden Zeitabschnitte bekannt. Dadurch sind die Zeitdauern dieser Abschnitte dann ebenfalls bekannt.

Bei Zeitabschnitten, die an einen Abschnitt ohne korrekte Bewegungsdaten grenzen, ist die Zustandserkennung nicht in der Lage, verlässlich sowohl Anfangs- als auch Endzeitpunkt zu ermitteln. Es ist zwar denkbar, diesen Abschnitten Zustandsarten zuzuordnen; die so ermittelten Zustände hätten dann jedoch unbekannte Zeitdauern. Sie wären damit für die weiteren Auswertungen unbrauchbar. Diese Zeitabschnitte erhalten somit keine Zustandsart. Stattdessen werden sie den nicht korrekt erfassten Abläufen zugeordnet (vgl. Abschnitt 3.1.3).

### 3.4.3 Zustandserkennung für die Analysearten

Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben das Vorgehen zur Erkennung der Zustände für die unterschiedlichen Analysevarianten mit den verwendeten Berechnungsgrößen und Grenzwerten.

#### 3.4.3.1 Einfache Analyse von Körperbewegungen

Die einfache Analyse von Körperbewegungen unterscheidet lediglich, ob sich der Körper bewegt („Körper bewegen“) oder nicht („Stehen/Sitzen“). Sie erkennt davon die Zustandsart „Körper bewegen“ über charakteristische Verläufe. Dazu untersucht sie nur den Gelenkpunkt Schultermitte („SS“) und hat deswegen nur geringe Anforderungen an die Datenqualität (vgl. Abschnitt 3.1.1).

##### Identifizierung der Zustandsart „Körper bewegen“

Die Identifizierung der Zustandsart „Körper bewegen“ verwendet zwei Berechnungsgrößen:

- die horizontale Geschwindigkeit der Schultermitte ( $v_{h,SS,a}$ ) und
- die horizontale Distanz zwischen den Orten der Schultermitte zu zwei Zeitpunkten ( $d_{h,SS,a,b}$ ).

Die Zustandsart „Körper bewegen“ zeichnet sich dadurch aus, dass sich der Mitarbeiter mit einer gewissen Geschwindigkeit bewegt und dabei eine Distanz zurücklegt (vgl. Abbildung 3-18). Deshalb *lokalisiert* die Zustandsidentifizierung einen Zustand, indem sie prüft, ob die horizontale Geschwindigkeit der Schulter einen Grenzwert überschreitet ( $v_{h,SS,a}$ , vgl. Abbildung 3-18a). *Anfangs- und Endpunkt* des Zustandes ermittelt sie ebenfalls über diese Geschwindigkeit. Sie prüft dabei, ob die Geschwindigkeit einen zweiten, niedrigeren Grenzwert überschreitet. Das heißt, die Bewegung endet, wenn die Geschwindigkeit einer Aufnahme unter diesem Grenzwert liegt ( $v_{h,SS,a}$ , vgl. Abbildung 3-18a). Die Zustandsidentifizierung *verifiziert* den Zustand, wenn die horizontale Distanz der Schultermitte zwischen den ermittelten Start- und Endpunkten eine Mindestdistanz überschreitet ( $d_{h,SS,a,b}$ , vgl. Abbildung 3-18b).



Diese Analyse zeichnet sich durch zwei Besonderheiten aus. Zum einen gehört zu jeder der Neigungsbewegungen eine Aufrichtbewegung (z. B. ‚Setzen‘ - ‚Aufstehen‘). Die Analyse identifiziert diese Aufrichtbewegungen zusammen mit der dazugehörigen Neigungsbewegung. Zum anderen können bei dieser Analyse unterschiedliche Bewegungen gleichzeitig auftreten. So kann der Mitarbeiter den Körper beispielsweise während einer Neigungsbewegung ebenfalls drehen. Deswegen werden im Anschluss an die Zustandsidentifizierung gleichzeitig auftretende Bewegungen zusammengefügt oder getrennt. Danach daran erfolgt dann die Zuordnung der Zustandsarten ‚Sitzen‘ und ‚Stehen‘.

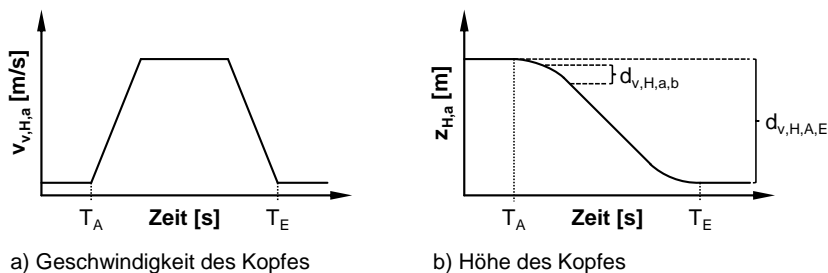
### Identifizierung der Neigungsbewegungen

Die Lokalisierung der Zustandsarten ‚Bücken/Knien‘, ‚Beugen‘ und ‚Setzen‘ sowie die Ermittlung derer Start- und Endpunkte und ein Teil der Verifikation erfolgt über dieselben Algorithmen, da diese Bewegungen ähnliche charakteristische Verläufe aufweisen. Die Zustandserkennung fasst diese Zustandsarten deshalb als Neigungsbewegungen zusammen.

Die Identifizierung der Neigungsbewegungen verwendet zwei Berechnungsgrößen:

- die vertikale Geschwindigkeit des Kopfes ( $v_{v,H,a}$ ) und
- die zurückgelegte vertikale Strecke des Kopfes ( $d_{v,H,a,b}$ ).

Charakteristisch für alle Neigungsbewegungen ist das Absenken von Kopf und Schultern (vgl. Abbildung 3-19). Die Zustandsidentifizierung *lokalisiert* einen Zustand daher, wenn die Geschwindigkeit des Kopfes in vertikaler Richtung ( $v_{v,H,a}$ , vgl. Abbildung 3-19a) einen gewissen Wert überschreitet. Die Bestimmung von *Anfangs- und Endpunkt* erfolgt dann durch Untersuchung der Änderung der Kopfhöhe ( $d_{v,H,a,b}$ , vgl. Abbildung 3-19b). Diese Änderung muss innerhalb eines festgelegten Zeitraums ebenfalls einen Grenzwert überschreiten. Die Identifizierung *verifiziert* Neigungszustände, wenn sich die Höhe des Kopfes von Anfang bis Ende der Bewegung signifikant verändert ( $d_{v,H,A,E}$ , vgl. Abbildung 3-19b).



$z_{H,a}$	: z-Koordinate des Kopfes [m]	$d_{v,H,a,b}$	: vertikale Distanz des Kopfes von Aufnahme a zu Aufnahme b [m]
$T_A$	: Zeitpunkt der Anfangsaufnahme [s]	$d_{v,H,A,E}$	: vertikale Distanz des Kopfes von Anfang zum Ende des erkannten Zustands [m]
$T_E$	: Zeitpunkt der Endaufnahme [s]		
$v_{v,H,a}$	: vertikale Geschwindigkeit des Kopfes [m/s]		

13460

**Abbildung 3-19 Identifizierung der Neigungsbewegungen**

### Verifikation der Zustandsarten ‚Bücken/Knien‘, ‚Beugen‘ und ‚Setzen‘

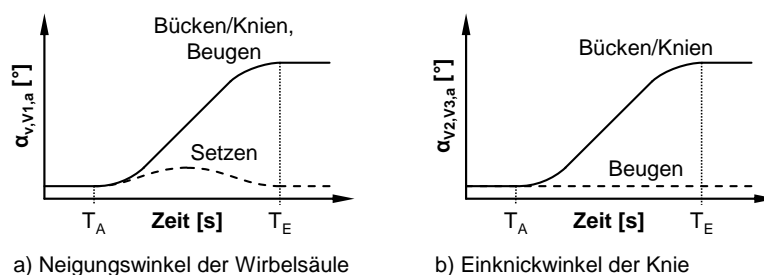
Die Zustandserkennung unterscheidet anschließend, um welche Neigungsbewegung es sich bei dem ermittelten Zustand handelt. Dies geschieht über einem weiteren Verifikationsschritt. Dieser Schritt verwendet die Berechnungsgrößen:

- den Neigungswinkel der Wirbelsäule ( $\alpha_{v,V1,a}$ , Winkel zwischen Wirbelsäule ( $V_{SS,SB,a}$ ) und vertikaler Achse) und
- den Winkel der Knie ( $\alpha_{V2,V3,a}$ , Winkel zwischen linkem Oberschenkel ( $V_{HiL,KL,a}$ ) und linkem Unterschenkel ( $V_{KL,ALa}$ ) bzw. zwischen rechtem Oberschenkel ( $V_{HiR,KR,a}$ ) und rechtem Unterschenkel ( $V_{KR,ARa}$ )).

Die Zustandsart ‚Bücken/Knien‘ zeichnet sich dadurch aus, dass der Mitarbeiter während der Bewegung die Wirbelsäule nach vorn neigt und ein oder beide Kniegelenke einknickt (vgl. Abbildung 3-20). Die *Verifikation* des Zustandes prüft daher, ob der Winkel zwischen Wirbelsäule und vertikalem Vektor ( $\alpha_{v,V1,a}$ , vgl. Abbildung 3-20a) am Ende der Bewegung einen Grenzwert überschreitet. Zudem prüft sie, ob der Winkel der Knie ebenfalls einen Wert übersteigt ( $\alpha_{V2,V3,a}$ , vgl. Abbildung 3-20b).

Beim ‚Beugen‘ neigt der Mitarbeiter die Wirbelsäule ebenfalls nach vorn, die Knie knickt er allerdings nicht signifikant ein (vgl. Abbildung 3-20). Daher muss für die *Verifikation* hier der vertikale Winkel der Wirbelsäule am Ende der Bewegung ebenfalls den Grenzwert überschreiten ( $\alpha_{v,V1,a}$ , vgl. Abbildung 3-20a); der Kniewinkel darf den Grenzwert vom ‚Bücken/Knien‘ jedoch nicht überschreiten ( $\alpha_{V2,V3,a}$ , vgl. Abbildung 3-20).

Die Zustandsart ‚Setzen‘ zeichnet sich dadurch aus, dass der Mitarbeiter die Wirbelsäule zwar zu Anfang der Bewegung nach vorne neigt, jedoch zu Ende wieder in eine annähernd senkrechte Position bringt (vgl. Abbildung 3-20). Daher prüft die *Verifikation*, ob der Winkel zwischen Wirbelsäule und vertikaler Achse am Ende der Bewegung den Grenzwert unterschreitet ( $\alpha_{v,V1,a}$ , vgl. Abbildung 3-20a).



$T_A$  : Zeitpunkt der Anfangsaufnahme [s]  
 $T_E$  : Zeitpunkt der Endaufnahme [s]  
 $\alpha_{v,V1,a}$  : Winkel zwischen Vektor V1 und vertikaler Achse [°]  
 $\alpha_{V2,V3,a}$  : Winkel zwischen Vektoren V2 und V3 [°]

$V_{HiL,KL,a}$  : V1 – Vektor von linker Hüftseite zu linkem Knie [m]  
 $V_{KL,AL,a}$  : V2 – Vektor von linkem Knie zu linkem Fußgelenk [m]  
 $V_{SS,SB,a}$  : V3 – Vektor von Schultermitte zur Wirbelsäulenbasis [m]

13461

Abbildung 3-20 Unterscheidung der Neigungsbewegungen

Die Zustandsidentifizierung kann ebenfalls ermitteln, ob es sich um eine Neigungsbewegung im engeren Sinne oder um eine Aufrichtbewegung handelt. Dies ist durch Untersuchung der Änderung der Kopfhöhe von Anfang bis Ende der Bewegung ( $d_{v,H,A,E}$ , vgl. Abbildung 3-19b) möglich. Hat diese Änderung ein negatives Vorzeichen, handelt es sich um eine Neigung. Ist das Vorzeichen positiv, handelt es sich um ein Aufrichten. Dann wird zudem die Verifikation der einzelnen Zustandsarten so angepasst, dass sie die relevanten Winkel zu Beginn der Neigungsbewegung untersucht.

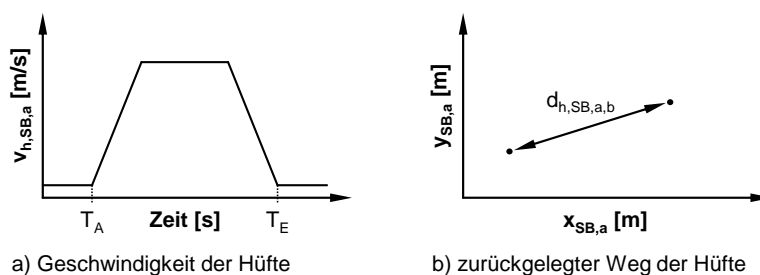
### Identifizierung der Laufbewegungen

Die Zustandserkennung fasst die beiden Zustandsarten ‚Gehen‘ und ‚Seitenschritt‘ zu den Laufbewegungen zusammen, da auch hier die charakteristischen Verläufe ähnlich sind. Deshalb erfolgt die Lokalisierung, die Ermittlung von Anfangs- und Endzeitpunkten sowie ein Teil der Verifikation über dieselben Algorithmen.

Die Identifizierung der Laufbewegungen verwendet zwei Berechnungsgrößen:

- die horizontale Geschwindigkeit der Hüftmitte ( $v_{h,SB,a}$ ) und
- die horizontale Distanz zwischen den Orten der Hüftmitte zu zwei Zeitpunkten ( $d_{h,SB,a,b}$ ).

Die Laufbewegungen zeichnen sich dadurch aus, dass der Mitarbeiter seinen gesamten Rumpf bewegt und dabei eine Strecke zurücklegt. Diese Bewegung erfolgt dabei in horizontaler Richtung (vgl. Abbildung 3-21). Die Zustandserkennung verwendet an dieser Stelle die Hüfte, da sich die Schulter auch bei Neigungsbewegungen in Horizontalrichtung bewegt. Die *Lokalisierung* der Laufbewegungen erfolgt somit durch Prüfung, ob die Geschwindigkeit der Hüftmitte einen Wert überschreitet ( $v_{h,SB}$ , vgl. Abbildung 3-21a). Die Bestimmung von *Anfangs- und Endpunkt* erfolgt ebenfalls mit dieser Geschwindigkeit ( $v_{h,SB}$ , vgl. Abbildung 3-21a). Die Bewegung ist zu Ende, wenn sie einen zweiten Grenzwert für mehrere Aufnahmen unterschreitet. Die *Verifikation* prüft anschließend, ob die horizontale Distanz zwischen den so ermittelten Anfangs- und Endpunkten eine Mindestdistanz übersteigt ( $d_{h,SB,A,E}$ , vgl. Abbildung 3-21b).



$x_{SB,a}$	: x-Koordinate der Wirbelsäulenbasis [m]	$v_{h,SB,a}$	: horizontale Geschwindigkeit der Wirbelsäulenbasis [m/s]
$y_{SB,a}$	: y-Koordinate der Wirbelsäulenbasis [m]	$d_{h,SB,a,b}$	: horizontale Distanz der Wirbelsäulenbasis von Aufnahme a zu Aufnahme b [m]
$T_A$	: Zeitpunkt der Anfangsaufnahme [s]		
$T_E$	: Zeitpunkt der Endaufnahme [s]		

13462

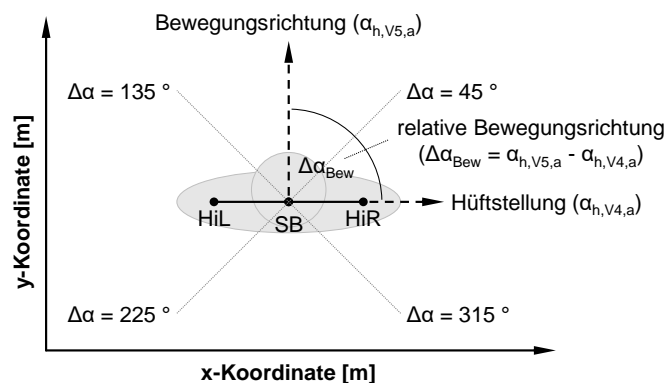
Abbildung 3-21 Identifizierung der Laufbewegungen

### Verifikation der Zustandsarten ‚Gehen‘ und ‚Seitenschritt‘

Die Differenzierung der Laufbewegungen geschieht über einem weiteren Verifikationsschritt. Dieser Schritt verwendet die Berechnungsgrößen:

- die Hüftstellung ( $\alpha_{h,V4,a}$ , Winkel der Hüfte ( $V_{HiL,HiR,a}$ ) in horizontaler Ebene) und
- die Bewegungsrichtung der Hüfte ( $\alpha_{h,V5,a}$ , Winkel des Bewegungsvektors der Hüftmitte ( $V_{SB,a-1,a}$ ) in horizontaler Ebene).

Die Zustandsarten ‚Gehen‘ und ‚Seitenschritt‘ unterscheiden sich durch die Richtung der Bewegung. Beim ‚Gehen‘ läuft der Mitarbeiter von seinem Standpunkt aus nach vorne (oder nach hinten). Beim ‚Seitenschritt‘ bewegt er sich nach links oder rechts. Die *Verifikation* der beiden Zustände untersucht daher die relative Bewegungsrichtung ( $\Delta\alpha$ , vgl. Abbildung 3-22). Man ermittelt diese Richtung, indem man die Differenz zwischen der Bewegungsrichtung der Hüfte ( $\alpha_{h,V5,a}$ ) und der Hüftstellung ( $\alpha_{h,V4,a}$ ) bildet. Liegt dieser Wert dann beispielsweise zwischen  $45^\circ$  und  $135^\circ$ , bewegt sich der Mitarbeiter nach vorne und es liegt die Zustandsart ‚Gehen‘ vor. Liegt der Wert zwischen  $225^\circ$  und  $315^\circ$ , geht er nach hinten und es liegt ebenfalls ein ‚Gehen‘ vor. Bewegt sich die Hüfte nach links oder nach rechts, wird die Zustandsart ‚Seitenschritt‘ ermittelt.



$\Delta\alpha_{Bew}$	: relative Bewegungsrichtung [°]	$V_{HiL,HiR,a}$	: V4 – Vektor von linker Hüftseite zu rechter Hüftseite [m]
$\alpha_{h,V4,a}$	: Winkel von Vektor V4 in horizontaler Ebene [°]	$V_{SB,a-1,a}$	: V5 – Vektor von Wirbelsäulenbasis bei Aufnahme a-1 zu Aufnahme a [m]
$\alpha_{h,V5,a}$	: Winkel von Vektor V5 in horizontaler Ebene [°]		

13556

Abbildung 3-22 Unterscheidung der Laufbewegungen

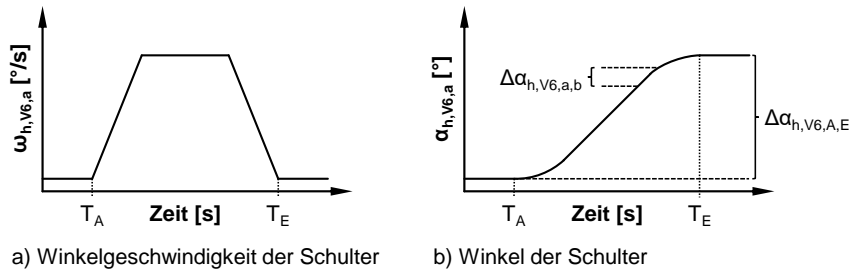
### Identifizierung der Zustandsart ‚Körperdrehung‘

Die Zustandserkennung identifiziert die Zustandsart ‚Körperdrehung‘ mit zwei Berechnungsgrößen:

- die horizontale Drehgeschwindigkeit der Schulterachse ( $\omega_h$  von  $V_{SL,SR}$ ) und
- die Änderung des Schulterwinkels in der horizontalen Ebene ( $\Delta\alpha_h$  von  $V_{SL,SR}$ ).

Wichtigstes charakteristisches Merkmal für Körperdrehungen ist die Rotation des Oberkörpers. Die Zustandserkennung *lokalisiert* eine Drehung demnach, wenn die Winkelgeschwindigkeit der Schulter ( $\omega_h$  von  $ASL,SR$  vgl. Abbildung 3-23a) einen Grenzwert übersteigt. Sie ermittelt anschließend *Anfangs- und Endpunkt*, indem sie die Änderung des Schulterwinkels ( $\Delta\alpha_h$  von  $ASL,SR$ , vgl. Abbildung 3-23b) untersucht. Diese muss ebenfalls innerhalb einer Zeitspanne einen gewissen Wert annehmen.

Die Erkennung *verifiziert* den Zustand, wenn die Schulter in dem erkannten Bewegungsbereich ein Mindestwinkel zurückgelegt hat ( $\Delta\alpha_h$  von  $ASL,SR$ , vgl. Abbildung 3-23b). Alternativ könnte die Identifizierung von Körperdrehungen auch mit dem Hüftgelenk erfolgen. Für die Analyse der Produktivität ist die Betrachtung der Schultern jedoch besser geeignet, da Werker die meisten manuellen Tätigkeiten mit den Armen durchführen und die Schultern somit oft in Bewegung sind.



$T_A$	: Zeitpunkt der Anfangsaufnahme [s]	$\alpha_{h,V6,a}$	: Winkel von Vektor V6 in horizontaler Ebene [°]
$T_E$	: Zeitpunkt der Endaufnahme [s]	$V_{SL,SR,a}$	: V6 – Vektor von linker Schulter zu rechter Schulter [m]
$\omega_{h,V6,a}$	: Winkelgeschwindigkeit von Vektor V6 in horizontaler Ebene [°]	$\Delta\alpha_{h,V6,a,b}$	: Winkeländerung von Vektor V6 in horizontaler Ebene von Aufnahme a zu Aufnahme b [°]

13463

**Abbildung 3-23 Identifizierung der Drehbewegungen**

Es ist hier zudem möglich, aus dem Betrag der Winkelgeschwindigkeit die Drehrichtung abzuleiten. Die Zustandserkennung unterscheidet jedoch nicht zwischen Linksdrehung und Rechtsdrehung, da sie keinen Einfluss auf die benötigte Zeitdauer haben.

Zuordnung der Zustandsart ‚Stehen‘ und ‚Sitzen‘

Die differenzierte Analyse von Körperbewegungen unterscheidet zwischen zwei Stillständen, dem ‚Stehen‘ und dem ‚Sitzen‘. Sie ordnet diese im letzten Schritt den restlichen Zeitabschnitten zu. Dazu prüft sie, ob vor dem betrachteten Zeitabschnitt zuletzt eine Neigungs- oder eine Aufrichtbewegung stattgefunden hat. War die vorhergehende Bewegung eine Neigungsbewegung, ordnet sie dem Zeitabschnitt die Zustandsart ‚Sitzen‘ zu. Bei einer Aufrichtbewegung die Zustandsart ‚Stehen‘.

Tabelle 3-6 fasst die Erkennung der Zustände für die Analyse zusammen und zeigt Richtwerte für die Grenzwerte [vgl. Orth16, S. 33ff.]. Zunächst stellt sie die Identifizierung der Bewegungen (Zustandsarten 1-6) dar. Die Zustandserkennung lokalisiert einen Zustand der Zustandsart ‚Gehen‘ beispielsweise, wenn die horizontale Geschwindigkeit der Hüfte ( $v_{v,SB,a}$ ) den Wert 0,4 m/s dreimal in fünf aufeinanderfolgenden Aufnahmen übersteigt. Ausgehend davon ermittelt sie Anfangs- und Endpunkt, indem sie prüft, wie lange diese Geschwindigkeit über dem Wert 0,02 m/s liegt. Zum Abschluss verifiziert sie den Zustand, wenn die Distanz zwischen Start- zum Endpunkt 0,2 m überschreitet ( $d_{h,SB,A,E}$ ) und der Mitarbeiter sich nach hinten oder vorne bewegt hat ( $\Delta\alpha_{Bew}$ ). Anschließend zeigt sie die Zuordnung der Stillstände (Zustandsarten 7-8). Sie ordnet einem Zeitabschnitt demnach die Zustandsart ‚Stehen‘ zu, wenn die letzte Neigungsbewegung ein Aufrichten war.

Tabelle 3-6 Zustandserkennung bei der differenzierten Analyse von Körperbewegungen

Zustandsart	Bedingungen der Zustandserkennung			
	Lokalisierung eines Zustands	Ermittlung von Anfangs- und Endpunkt	Verifikation des Zustands	
Zustandsart 1: <i>Bücken/Knien</i>	$v_{v,H,a} > 0,4 \text{ m/s}$ (3 von 5 Aufnahmen)	$d_{v,H,a,a+5} > 0,01 \text{ m}$	$d_{v,H,A,E} > 0,2 \text{ m}$	
Zustandsart 2: <i>Beugen</i>	$v_{v,H,a} > 0,4 \text{ m/s}$ (3 von 5 Aufnahmen)	$d_{v,H,a,a+5} > 0,01 \text{ m}$		$\alpha_{v,V1,E} > 20^\circ \wedge$ $\alpha_{v2,V3,E} > 90^\circ$
Zustandsart 3: <i>Setzen</i>	$v_{v,H,a} > 0,4 \text{ m/s}$ (3 von 5 Aufnahmen)	$d_{v,H,a,a+5} > 0,01 \text{ m}$		$\alpha_{v,V1,E} < 20^\circ$
Zustandsart 4: <i>Gehen</i>	$v_{H,SB,a} > 0,4 \text{ m/s}$ (3 von 5 Aufnahmen)	$v_{H,SB,a} > 0,02 \text{ m/s}$	$d_{h,SB,A,E} > 0,2 \text{ m}$	$315^\circ < \Delta\alpha_{Bew} < 45^\circ \vee$ $135^\circ < \Delta\alpha_{Bew} < 225^\circ$
Zustandsart 5: <i>Seitenschritt</i>	$v_{H,SB,a} > 0,4 \text{ m/s}$ (3 von 5 Aufnahmen)	$v_{H,SB,a} > 0,02 \text{ m/s}$	$d_{h,SB,A,E} > 0,2 \text{ m}$	$45^\circ < \Delta\alpha_{Bew} < 135^\circ \vee$ $225^\circ < \Delta\alpha_{Bew} < 315^\circ$
Zustandsart 6: <i>Körperdrehung</i>	$\omega_{h,V6,a} > 50^\circ/\text{s}$ (2 von 3 Aufnahmen)	$\Delta\alpha_{h,V6,a,a+5} > 2^\circ$	$\Delta\alpha_{h,V6,A,E} > 30^\circ$	
Zustandsart 7: <i>Stehen</i>	Zustandsarten 1-6 liegen nicht vor & letzte Neigungsbewegung = Aufrichten			
Zustandsart 8: <i>Sitzen</i>	Zustandsarten 1-6 liegen nicht vor & letzte Neigungsbewegung = Neigung			

$v_{v,H,a}$  : vertikale Geschwindigkeit des Kopfes [m/s]

$v_{h,SB,a}$  : horizontale Geschwindigkeit der Wirbelsäulenbasis [m/s]

$d_{v,H,a,b}$  : vertikale Distanz des Kopfes von Aufnahme a zu Aufnahme b [m]

$d_{h,SB,a,b}$  : horizontale Distanz der Wirbelsäulenbasis von Aufnahme a zu Aufnahme b [m]

$d_{v,H,A,E}$  : vertikale Distanz des Kopfes von Anfang zum Ende des erkannten Zustands [m]

$\alpha_{v,V1,a}$  : Winkel zwischen Vektor V1 und vertikaler Achse [°]

$\alpha_{v2,V3,a}$  : Winkel zwischen Vektoren V2 und V3 [°]

$\alpha_{h,V4,a}$  : Winkel von Vektor V4 in horizontaler Ebene [°]

$\alpha_{h,V5,a}$  : Winkel von Vektor V5 in horizontaler Ebene [°]

$\alpha_{h,V6,a}$  : Winkel von Vektor V6 in horizontaler Ebene [°]

$\omega_{h,V6,a}$  : Winkelgeschwindigkeit von Vektor V6 in horizontaler Ebene [°]

$\Delta\alpha_{Bew}$  : relative Bewegungsrichtung [°] (=  $\alpha_{h,V5,a} - \alpha_{h,V4,a}$ )

$\Delta\alpha_{h,V6,a,b}$  : Winkeländerung von Vektor V6 in horizontaler Ebene von Aufnahme a zu Aufnahme b [°]

$\Delta\alpha_{h,V6,A,E}$  : Winkeländerung von Vektor V6 in horizontaler Ebene von Anfang zum Ende des erkannten Zustands [°]

$V_{HIL,KL,a}$  : V1 – Vektor von linker Hüftseite zu linkem Knie [m]

$V_{KL,AL,a}$  : V2 – Vektor von linkem Knie zu linkem Fußgelenk [m]

$V_{SS,SB,a}$  : V3 – Vektor von Schultermitte zur Wirbelsäulenbasis [m]

$V_{HIL,HIR,a}$  : V4 – Vektor von linker Hüftseite zu rechter Hüftseite [m]

$V_{SB,a-1,a}$  : V5 – Vektor von Wirbelsäulenbasis bei Aufnahme a-1 zu Aufnahme a [m]

$V_{SL,SR,a}$  : V6 – Vektor von linker Schulter zu rechter Schulter [m]

13464

## Überschneidung von Zuständen

Nach der Zustandserkennung untersucht die Analyse im letzten Schritt sich überschneidende Zustände. Damit sind Zeitabschnitte gemeint, für die die Erkennung mehr als eine Zustandsart ermittelt hat. Durch das beschriebene Vorgehen sind Überschneidungen von Lauf- und Neigungsbewegungen sowie Körperdrehungen möglich. Dabei können sich zwei oder drei dieser Zustandsarten überschneiden. Die Analyse entscheidet in diesem Schritt darüber, ob eine Bewegung vorliegt, die sich aus Kombination dieser Zustandsarten ergibt oder ob eine Anpassung der Start- und Endpunkte der erkannten Zustände notwendig ist.

Bei Überschneidung von *Neigungs- und Drehbewegungen* prüft die Analyse zunächst, ob sich die Drehbewegung zu mehr als 50 % ihrer Zeit mit der Neigungsbewegung überschneidet. Ist dies der Fall, wird die Drehbewegung mit der Neigungsbewegung kombiniert. Das heißt, die Analyse ordnet den Zeitabschnitten beider Bewegungen beide Zustandsarten zu (vgl. Abbildung 3-24a).

Ist dies nicht der Fall, beschneidet sie die Drehbewegung. Sie hebt somit die Zuordnung der Überschneidungszeit zu den Drehbewegungen auf (vgl. Abbildung 3-24b). Die Analyse stuft die Neigungsbewegungen an dieser Stelle als wichtiger ein, da sie davon ausgeht, dass Mitarbeiter solche Bewegungen nach Möglichkeit vermeiden sollten.

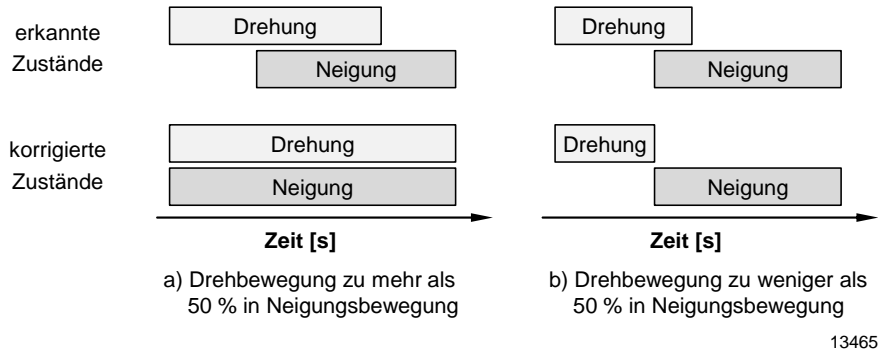


Abbildung 3-24 Überschneidung von Dreh- und Neigungsbewegungen

Überschneiden sich *Lauf- und Neigungsbewegungen*, erkennt die Analyse diesen Zeitabschnitt nur als Neigungsbewegung und hebt die Zuordnung zu den Laufbewegungen auf (vgl. Abbildung 3-25). Solche Überschneidungen von Lauf- und Neigungsbewegungen treten relativ häufig auf. Wenn ein Werker beispielsweise zu einem Regal geht und in ein tief liegendes Fach greift, geht er selten aufrecht bis direkt vor das Regal und bückt sich dann. Vielmehr beginnt er bereits beim Laufen mit der Neigung des Körpers. Das äußert sich dann in einer Überschneidung der erkannten Zustände. Eine Kombination dieser Zustandsarten ist jedoch häufig nicht sinnvoll, da Laufbewegungen im Vergleich zu Neigungsbewegungen in der Regel deutlich länger sind. Zudem sind Neigungsbewegungen oft an einen Ort gebunden (z. B. Regal), während sich Laufbewegungen durch einen zurückgelegten Weg zwischen zwei Orten auszeichnen.

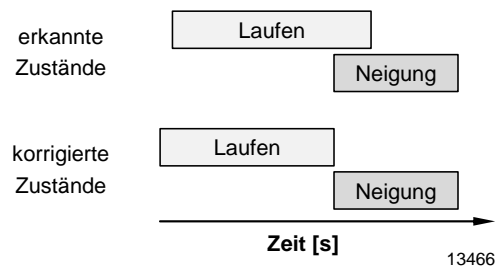
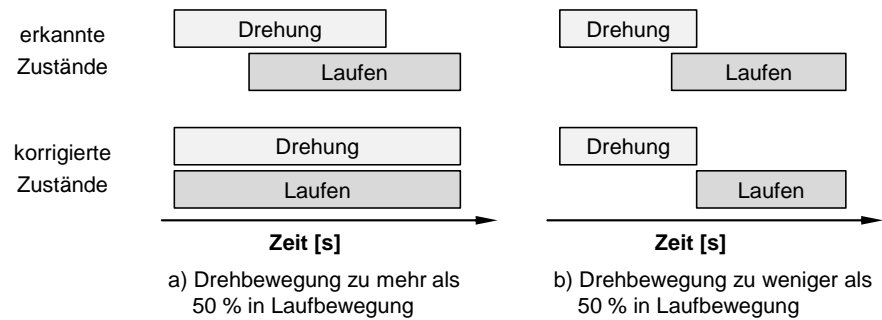


Abbildung 3-25 Überschneidung von Lauf- und Neigungsbewegungen

Bei Überschneidung von *Lauf- und Drehbewegungen* prüft die Analyse, ob die Drehbewegung zu 50 % in der Laufbewegung liegt. Ist dies der Fall, kombiniert sie beide Bewegungen analog zu den Neigungs- und Drehbewegungen (vgl. Abbildung 3-26a). Ist dies nicht der Fall, beschneidet sie die Laufbewegung. Sie hebt also die Zuordnung des Überschneidungsbereiches zu den Laufbewegungen auf (vgl. Abbildung 3-26b). Analog zur Überschneidung von Lauf- und Neigungsbewegungen gehen auch hier die Zustände ineinander über, wenn der Mitarbeiter bereits beim Laufen mit der Drehung beginnt. Die Analyse bevorzugt hier die Drehbewegung, um diese dennoch vollständig zu erfassen.



13467

Abbildung 3-26 Überschneidung von Lauf- und Drehbewegungen

### 3.4.3.3 Einfache Analyse von Armbewegungen

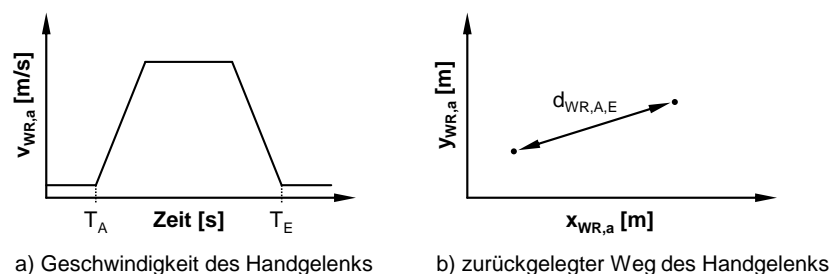
Analog zur einfachen Analyse von Körperbewegungen unterteilt die einfache Analyse von Armbewegungen die Beobachtungszeit in die Zustandsarten ‚Arm bewegen‘ und ‚Arm nicht bewegen‘. Dazu untersucht sie die Gelenkpunkte linkes und rechtes Handgelenk (‚WL‘ und ‚WR‘) und hat keine hohen Anforderungen an die Datenqualität (vgl. Abschnitt 3.1.1). Sie untersucht beide Handgelenke dabei getrennt voneinander.

#### Identifizierung der Zustandsart ‚Arm bewegen‘

Die Identifizierung der Zustandsart ‚Arm bewegen‘ verwendet zwei Berechnungsgrößen:

- die Geschwindigkeit des Handgelenks ( $v_{WL}$  bzw.  $v_{WR}$ ) und
- die Distanz zwischen den Orten des Handgelenks zu zwei Zeitpunkten ( $d_{WL}$  bzw.  $d_{WR}$ ).

Armbewegungen zeichnen sich durch eine erhöhte Geschwindigkeit des Handgelenks aus. Deshalb prüft die Zustandserkennung zur *Lokalisierung* des Zustandes, ob diese Geschwindigkeit einen Grenzwert überschreitet ( $v_{WR}$ , vgl. Abbildung 3-27a). Sie betrachtet die Geschwindigkeit ebenfalls zur Bestimmung von *Anfangs- und Endpunkt*. Hier untersucht sie, in welchem Zeitbereich die Geschwindigkeit einen zweiten niedrigeren Grenzwert überschreitet ( $v_{WR}$ , vgl. Abbildung 3-27a). Die Erkennung *verifiziert* den Zustand, wenn das Handgelenk bei der Bewegung eine Mindestdistanz zurückgelegt hat ( $d_{WR}$ , vgl. Abbildung 3-27b).



$x_{WR,a}$	: x-Koordinate des rechten Handgelenks [m]	$v_{WR,a}$	: Geschwindigkeit des rechten Handgelenks [m/s]
$y_{WR,a}$	: y-Koordinate des rechten Handgelenks [m]	$d_{WR,a,b}$	: Distanz des rechten Handgelenks von Aufnahme a zu Aufnahme b [m]
$T_A$	: Zeitpunkt der Anfangsaufnahme [s]		
$T_E$	: Zeitpunkt der Endaufnahme [s]		

13468

Abbildung 3-27 Identifizierung der Armbewegungen (einfache Analyse)

Zuordnung der Zustandsart ‚Arm nicht bewegen‘

Da die einfache Analyse von Armbewegungen nur zwischen zwei Zustandsarten unterscheidet, ordnet sie den restlichen Zeitabschnitten mit bekannter Zeitdauer die Zustandsart ‚Arm nicht bewegen‘ zu.

Tabelle 3-7 fasst die Erkennung der Zustände für die Analyse zusammen und zeigt Richtwerte für die Grenzwerte. Sie beschreibt als erstes die Zustandsart ‚Arm bewegen‘. Die Erkennung lokalisiert einen Zustand, wenn die Geschwindigkeit des Handgelenks ( $v_{WR,a}$ ) den Wert 0,5 m/s dreimal in fünf aufeinanderfolgenden Aufnahmen übersteigt. Ausgehend davon ermittelt sie Anfangs- und Endpunkt mit zwei Kriterien. Zum einen muss die Geschwindigkeit in vier von fünf Aufnahmen über 0,3 m/s liegen. Zum anderen bei jeder Aufnahme über 0,1 m/s. Ist eine dieser Bedingungen nicht erfüllt, ist das Ende des Zustands erreicht. Sie verifiziert den Zustand, wenn das Handgelenk mindestens 0,2 m zurückgelegt hat ( $d_{WR,A,E}$ ). Die Tabelle zeigt zudem, dass die Erkennung den restlichen Zeitabschnitten die Zustandsart ‚Stehen/Sitzen zuordnet.

**Tabelle 3-7 Zustandserkennung bei der einfachen Analyse von Armbewegungen**

Zustandsart	Bedingungen der Zustandserkennung		
	Lokalisierung eines Zustands	Ermittlung von Anfangs- und Endpunkt	Verifikation des Zustands
Zustandsart 1: <i>Arm bewegen</i>	$v_{WR,a} > 0,5$ m/s (3 von 5 Aufnahmen)	$v_{WR,a} > 0,3$ m/s (4 von 5 Aufnahmen)  $v_{WR,a} > 0,1$ m/s	$d_{WR,A,E} > 0,1$ m
Zustandsart 2: <i>Arm nicht bewegen</i>	Zustandsart 1 liegt nicht vor		

$v_{WR,a}$  : Geschwindigkeit des rechten Handgelenks [m/s]

$d_{WR,A,E}$  : Distanz des rechten Handgelenks von Anfang zum Ende des erkannten Zustands [m]

13469

### 3.4.3.4 Differenzierte Analyse von Armbewegungen

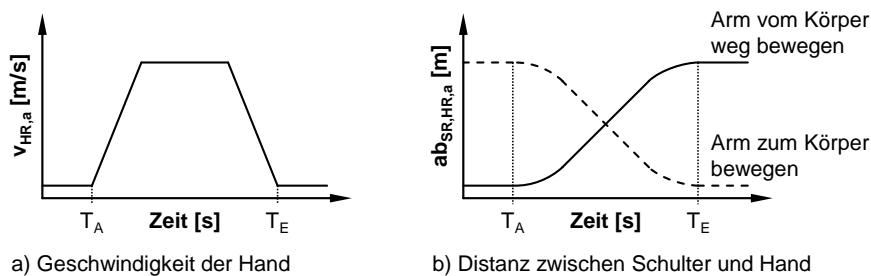
Die differenzierte Analyse von Armbewegungen unterteilt die Bewegungen und Stillstände detaillierter als die einfache Analyse. Sie verfolgt dabei das Ziel, einen Zyklus in Anlehnung an das MTM-1-Verfahren (vgl. Abschnitt 2.3.3) zu erfassen. Sie unterscheidet die Bewegungen in ‚Arm zum Körper bewegen‘, ‚Arm vom Körper weg bewegen‘ und ‚sonstiges Arm bewegen‘. Analog unterteilt sie die Stillstände in ‚Arm nah am Körper ruhen‘ und ‚Arm fern vom Körper ruhen‘ [vgl. Schr16, S. 33ff.]. Mit dieser Anlehnung an den Grundzyklus des MTM-1-Verfahrens kann man später detailliertere Aussagen bei der Plan-Zeitbestimmung treffen. Die Analyse eignet sich damit insbesondere für Montageaufgaben. Zudem betrachtet sie anders als die einfache Analyse die Hände (‚HL‘ und ‚HR‘). Sie kann so die Bewegungslänge der Hände exakter bestimmen. Die erhöhte Detaillierung im Vergleich zur einfachen Analyse geht jedoch auch mit höheren Anforderungen an die Datenqualität einher (vgl. Abschnitt 3.1.1). Sie untersucht wie die einfache Analyse beide Hände getrennt voneinander.

### Identifizierung der Zustandsarten ‚Arm zum Körper bewegen‘ und ‚Arm vom Körper weg bewegen‘

Die Identifizierung der Zustandsarten ‚Arm zum Körper bewegen‘ und ‚Arm vom Körper weg bewegen‘ verwendet zwei Berechnungsgrößen:

- die Geschwindigkeit der Hand ( $v_{HL}$  bzw.  $v_{HR}$ ) und
- die Änderung des Abstands zwischen der Hand und dem zugehörigen Schultergelenk ( $\Delta ab_{SL,HL}$  bzw.  $\Delta ab_{SR,HR}$ ).

Als Spezialfälle der Zustandsart ‚Arm bewegen‘ bei der einfachen Analyse der Armbewegungen zeichnen sich diese Zustandsarten ebenfalls durch eine erhöhte Geschwindigkeit der Hände aus. Zudem sind sie gekennzeichnet durch eine Zu- bzw. Abnahme des Abstands zwischen der betrachteten Hand und dem Schultergelenk. Abbildung 3-29 stellt einen charakteristischen Verlauf dieser Werte für einen beispielhaften Grundzyklus dar. Die Zustandserkennung nutzt diese Charakteristika. Sie *lokalisiert* einen Zustand, indem sie prüft, ob die Geschwindigkeit der Hand einen Grenzwert überschreitet ( $v_{HR}$ , vgl. Abbildung 3-28a). Sie ermittelt *Anfangs- und Endpunkt* anschließend mit zwei Kriterien. Zum einen muss die Handgeschwindigkeit einen zweiten, niedrigeren Grenzwert überschreiten ( $v_{HR}$ , vgl. Abbildung 3-28a). Zum anderen muss die Distanz zwischen Hand und Schulter signifikant ab beziehungsweise zunehmen ( $\Delta ab_{SR,HR}$ , vgl. Abbildung 3-28b). Die Erkennung *verifiziert* den Zustand, wenn die Änderung dieser Distanz vom Anfang- bis zum Endpunkt der Bewegung einen Mindestwert überschreitet ( $\Delta ab_{SR,HR}$ , vgl. Abbildung 3-28b).



$T_A$	: Zeitpunkt der Anfangsaufnahme [s]	$v_{HR,a}$	: Geschwindigkeit der rechten Hand [m/s]
$T_E$	: Zeitpunkt der Endaufnahme [s]	$ab_{SR,HR,a}$	: Abstand zwischen rechter Schulter und rechter Hand [m]

13470

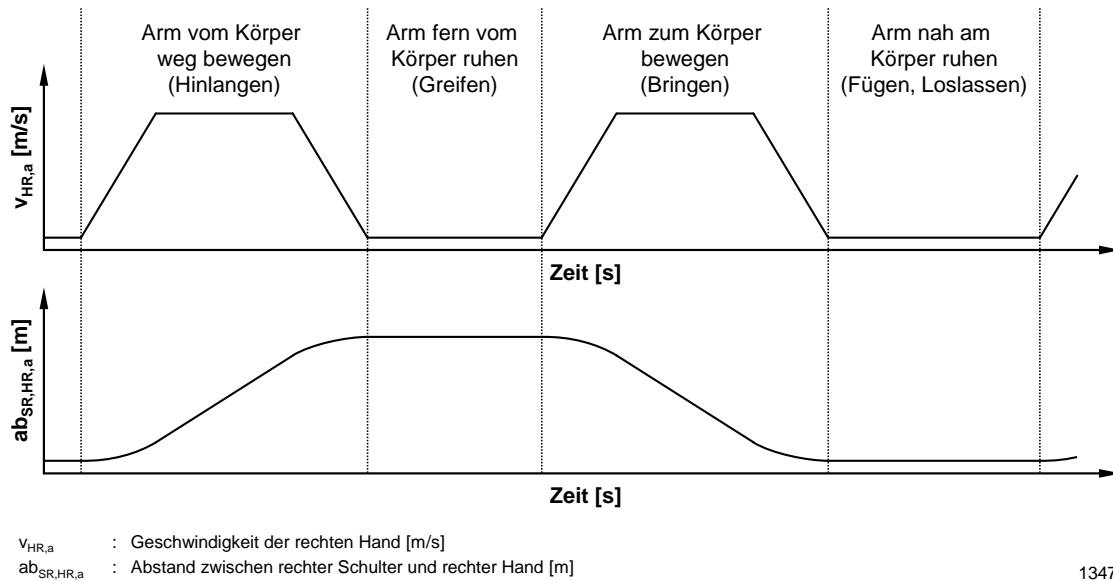
**Abbildung 3-28 Identifizierung der Armbewegungen (differenzierte Analyse)**

### Identifizierung der Zustandsart ‚sonstiges Arm bewegen‘

Die Zustandserkennung identifiziert die Zustandsart ‚sonstiges Arm bewegen‘ wie die Zustandsart ‚Arm bewegen‘ bei der einfachen Analyse von Armbewegungen (vgl. Abschnitt 3.4.3.3) ergänzt um einen zusätzlichen Verifikationsschritt. Die Erkennung darf zuvor keine andere Armbewegung (‚Arm zum Körper bewegen‘ oder ‚Arm vom Körper weg bewegen‘) ermittelt haben. Ein Beispiel dafür ist die Bewegung des Armes von einer Materialkiste zur nächsten, wenn der Mitarbeiter versehentlich zur ersten Materialkiste hingelangt hat und beide Materialkisten etwa gleich weit vom Mitarbeiter entfernt sind.

Zuordnung der Zustandsarten ‚Arm nah am Körper ruhen‘ und ‚Arm fern vom Körper ruhen‘

Die Zuordnung der restlichen Zeitabschnitte zu den Zustandsarten ‚Arm nah am Körper ruhen‘ und ‚Arm fern vom Körper ruhen‘ erfolgt über den Vergleich der Distanz von Hand zur Schulter in einem Zeitabschnitt mit der mittleren Hand-Schulter-Distanz im Aufnahmezeitraum. Ist die Distanz in dem Zeitabschnitt größer als im Aufnahmedurchschnitt, ordnet die Erkennung diesem Zeitraum die Zustandsart ‚Arm fern vom Körper ruhen‘ zu. Ist die Distanz kleiner, ordnet sie ihm die Zustandsart ‚Arm nah am Körper ruhen‘ zu. Abbildung 3-29 zeigt einen vollständigen Grundzyklus mit den erkannten Zustandsarten der differenzierten Analyse von Armbewegungen.



13471

**Abbildung 3-29 Verlauf von Montageabläufen in Anlehnung an den MTM-1-Grundzyklus**

Tabelle 3-8 fasst die Erkennung der Zustände für die Analyse zusammen und zeigt Richtwerte für die Grenzwerte [vgl. Schr16, S. 33ff.]. Zunächst zeigt sie die Identifizierung der Bewegungen (Zustandsarten 1-3). Die Zustandserkennung lokalisiert einen Zustand der Zustandsart ‚Arm zum Körper bewegen‘ beispielsweise, wenn die Geschwindigkeit der Hand ( $v_{HR,a}$ ) den Wert 0,5 m/s in fünf Aufnahmen dreimal übersteigt. Ausgehend davon ermittelt sie Anfangs- und Endpunkt mit zwei Bedingungen. Zum einen muss die Geschwindigkeit in vier von fünf Aufnahmen über dem Wert 0,3 m/s liegen. Zum anderen muss der Abstand zwischen Hand und Schulter ( $\Delta ab_{SR,H,a,b}$ ) innerhalb von 6 Aufnahmen um mindestens 0,1 m abnehmen. Zum Abschluss verifiziert sie den Zustand, wenn die Hand-Schulter-Distanz insgesamt um mindestens 0,2 m abnimmt. Anschließend zeigt sie die Zuordnung der Stillstände (Zustandsarten 4-5). Sie ordnet einem Zeitabschnitt demnach die Zustandsart ‚Arm nah am Körper ruhen‘ zu, wenn die durchschnittliche Hand-Schulter-Distanz ( $\bar{\Delta} ab_{SR,H}$ ) im Zeitabschnitt kleiner ist als die des gesamten Aufnahmezeitraums.

**Tabelle 3-8 Zustandserkennung bei der differenzierten Analyse von Armbewegungen**

Zustandsart	Bedingungen der Zustandserkennung			
	Lokalisierung eines Zustands	Ermittlung von Anfangs- und Endpunkt		Verifikation des Zustands
Zustandsart 1: <i>Arm zum Körper bewegen</i>	3 von 5 Aufnahmen: $v_{HR,a} > 0,5 \text{ m/s}$	4 von 5 Aufnahmen: $v_{HR,a} > 0,3 \text{ m/s}$	$\Delta ab_{SR,HR,a,a+6} < -0,1 \text{ m}$	$\Delta ab_{SR,HR,A,E} < -0,2 \text{ m}$
Zustandsart 2: <i>Arm vom Körper weg bewegen</i>	3 von 5 Aufnahmen: $v_{HR,a} > 0,5 \text{ m/s}$	4 von 5 Aufnahmen: $v_{HR,a} > 0,3 \text{ m/s}$	$\Delta ab_{SR,HR,a,a+6} > 0,1 \text{ m}$	$\Delta ab_{SR,HR,A,E} > 0,2 \text{ m}$
Zustandsart 3: <i>sonstiges Arm bewegen</i>	Zustandsarten 1-2 liegen nicht vor			
	3 von 5 Aufnahmen: $v_{HR,a} > 0,5 \text{ m/s}$	4 von 5 Aufnahmen: $v_{HR,a} > 0,3 \text{ m/s}$	$v_{HR,a} > 0,1 \text{ m/s}$	$d_{HR,A,E} > 0,1 \text{ m}$
Zustandsart 4: <i>Arm nah am Körper ruhen</i>	Zustandsarten 1-3 liegen nicht vor			
	$\emptyset ab_{SR,HR,A,E} < \emptyset ab_{SR,HR}$			
Zustandsart 5: <i>Arm fern vom Körper ruhen</i>	Zustandsarten 1-3 liegen nicht vor			
	$\emptyset ab_{SR,HR,A,E} > \emptyset ab_{SR,HR}$			

$v_{HR,a}$  : Geschwindigkeit der rechten Hand [m/s]

$ab_{SR,HR,a}$  : Abstand zwischen rechter Schulter und rechter Hand [m]

$\Delta ab_{SR,HR,a,b}$  : Abstand zwischen rechter Schulter und rechter Hand von Aufnahme a zu Aufnahme b [m]

$\Delta ab_{SR,HR,A,E}$  : Abstand zwischen rechter Schulter und rechter Hand von Anfang zum Ende des erkannten Zustands [m]

$\emptyset ab_{SR,HR,A,E}$  : mittlerer Abstand zwischen rechter Schulter und rechter Hand des erkannten Zustands [m]

$\emptyset ab_{SR,HR}$  : mittlerer Abstand zwischen rechter Schulter und rechter Hand im gesamten Aufnahmezeitraum [m]

13472

### 3.4.4 Alternative Vorgehen zur Zustandserkennung

Die vorgestellten Algorithmen zur Erkennung von Zuständen basieren auf der Identifizierung charakteristischer Verläufe von Bewegungen in den Daten. Anschließend werden den restlichen Zeiten Stillstände zugeordnet. Es gibt jedoch noch weitere Möglichkeiten, Zustände zu erkennen. Dieser Abschnitt stellt einige Möglichkeiten vor.

#### Identifizierung von Stillständen [vgl. Bent15, S. 313ff.]

Eine alternatives Verfahren zur Identifizierung von Bewegungen ist die Identifizierung von Stillständen. Dieses Verfahren ermittelt dann beispielsweise zunächst, ob die Geschwindigkeit des betrachteten Körperteils einen bestimmten Wert für eine definierte Zeitspanne unterschreitet [vgl. Bent15, S. 321ff.]. Nachdem es so die Stillstände ermittelt hat, ordnet es den restlichen Zeitabschnitten Bewegungen zu. Damit ist dieses Verfahren eine Umkehrung des in Abschnitt 3.4.2 vorgestellten Vorgehens.

Diese Art, Zustände zu erkennen, eignet sich nur dann, wenn keine zwei Bewegungen aufeinander folgen. Deshalb kann man die einfachen Analysen damit zwar durchführen, bei den differenzierten Analysen würde es jedoch scheitern. Bei der differenzierten Analyse von Körperbewegungen kann beispielsweise auf ein ‚Gehen‘ ein ‚Setzen‘ folgen. Diese wären dann nicht durch einen Stillstand unterbrochen und das Verfahren würde somit nur eine Bewegung erkennen.

### Kontinuierliche Zustandsidentifizierung

Eine weitere Alternative ist die kontinuierliche Erkennung von Zuständen. Dieser Ansatz sucht nicht wie bei den anderen Identifizierungsvarianten nach charakteristischen Abläufen im gesamten Zeitraum, sondern untersucht die Aufnahmen von Anfang bis Ende sukzessiv.

Ein Beispiel dafür ist die Abwandlung der Analyse von Körperbewegungen. Dabei kann die Analyse beispielsweise die aktuelle Geschwindigkeit des Hüftgelenks und die Distanz zum letzten Haltepunkt untersuchen. Sobald die Geschwindigkeit zunimmt und die Distanz ansteigt, erkennt sie eine Körperbewegung. Wenn die Geschwindigkeit sinkt und die Distanz zum letzten Punkt nicht mehr deutlich zunimmt, ist ein neuer Haltepunkt erreicht. Anschließend verwendet die Analyse diesen Haltepunkt als neuen Referenzpunkt.

Ein solches Vorgehen vermeidet Zustandsüberschneidungen wie bei der differenzierten Analyse von Körperbewegungen von vornherein. Allerdings sind für diese Analyse komplexere Algorithmen nötig. Das liegt insbesondere daran, dass die erfolgreiche Erkennung eines Zustandes von der Erkennung des Vorgängerzustands abhängig ist. So führt ein falscher Endzeitpunkt des Vorgängers zu einem ebenso falschen Anfangszeitpunkt. Zudem können durch diese verschobenen Zeitpunkte zurückgelegte Strecken fehlerhaft sein.

### **3.4.5 Manuelle Korrektur und Ergebnisdarstellung**

#### Realisierung durch Software-Demonstrator und manuelle Korrektur

Die manuelle Erkennung der Zustände mit den aufgenommenen Daten wäre sehr aufwändig. Daher unterstützt ein zweiter Software-Demonstrator den Methodenanwender bei der Umsetzung der Algorithmen. Dieser Demonstrator führt die Schritte der Zustandserkennung automatisch durch.

Da sich die Bewegungsgeschwindigkeit bei den aufgenommenen Abläufen zum Teil stark unterscheiden, kann der Anwender die Grenzwerte in dem Demonstrator an die Arbeitsaufgabe anpassen. So kann es beispielsweise bei sehr langsam durchgeführten Armbewegungen notwendig sein, die Grenzgeschwindigkeiten abzusenken. Zudem ist es mit dem Demonstrator möglich, die automatisch erkannten Zustände manuell zu editieren.

#### Ergebnis

Nach der Zustandserkennung ist jeder Aufnahme eine Zustandsart zugeordnet. Für jeden einzelnen erkannten Zustand kann man nun markante Koordinaten und relevante Zeitpunkte ermitteln. Für Bewegungen sind beispielsweise Anfangs- und Endkoordinaten markant, für Stillstände der Mittelwert der Koordinaten. Formel 3-33 zeigt die Berechnung dieses Mittelwertes. Relevante Zeitpunkte sind insbesondere der Anfangs- und der Endzeitpunkt (Ermittlung in Anlehnung an Formel 3-2).

$$x_{GP,k,m} = \frac{1}{E - A + 1} \times \sum_{a=A-1}^E x_{G,a} \quad (3-33)$$

- $x_{GP,k,m}$  : Mittelwert der x-Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Zustand k [m]
- $x_{G,a}$  : x-Koordinate von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme a [m]
- A : Nummer der Anfangsaufnahme von Zustand k [-]
- E : Nummer der Endaufnahme von Zustand k [-]

Tabelle 3-9 zeigt das Ergebnis der Zustandserkennung. Die Liste zeigt einen Ausschnitt der erkannten Zustände mit ihren Anfangs- und Endzeitpunkten sowie mit ihren markanten Koordinaten.

**Tabelle 3-9 Erkannte Zustände im Beobachtungsablauf**

Zustand $k [-]$	Bezeichnung der Zustandsart	Zeitpunkte		Koordinaten					
		Anfang	Ende	Anfang		Ende		Mittelwert	
		$T_{k,A}$ [s]	$T_{k,E}$ [s]	$x_{WR,k,A}$ [m]	$y_{WR,k,A}$ [m]	$x_{WR,k,E}$ [m]	$y_{WR,k,E}$ [m]	$x_{WR,k,m}$ [m]	$y_{WR,k,m}$ [m]
1	nicht erfasst	0,00	2,11	0,190	0,075	0,173	0,083	0,183	0,082
2	Arm bewegen	2,11	2,57	0,173	0,083	0,313	0,150	0,227	0,136
3	Arm nicht bewegen	2,57	3,04	0,313	0,150	0,326	0,140	0,322	0,146
4	Arm bewegen	3,04	3,51	0,326	0,140	0,194	0,080	0,257	0,121
5	Arm nicht bewegen	3,51	3,82	0,194	0,080	0,189	0,074	0,191	0,077
6	Arm bewegen	3,82	4,42	0,189	0,074	0,224	0,297	0,208	0,214
7	Arm nicht bewegen	4,42	4,82	0,224	0,297	0,240	0,310	0,227	0,308
8	Arm bewegen	4,82	5,51	0,240	0,310	0,187	0,129	0,215	0,233
9	Arm nicht bewegen	5,51	6,61	0,187	0,129	0,191	0,101	0,185	0,107
10	Arm bewegen	6,61	7,28	0,191	0,101	0,234	0,315	0,224	0,228

$T_{k,A}$  : Zeitpunkt der Anfangsaufnahme von Zustand  $k$  [s]

$T_{k,E}$  : Zeitpunkt der Endaufnahme von Zustand  $k$  [s]

$x_{WR,a}$  : x-Koordinate des rechten Handgelenks [m]

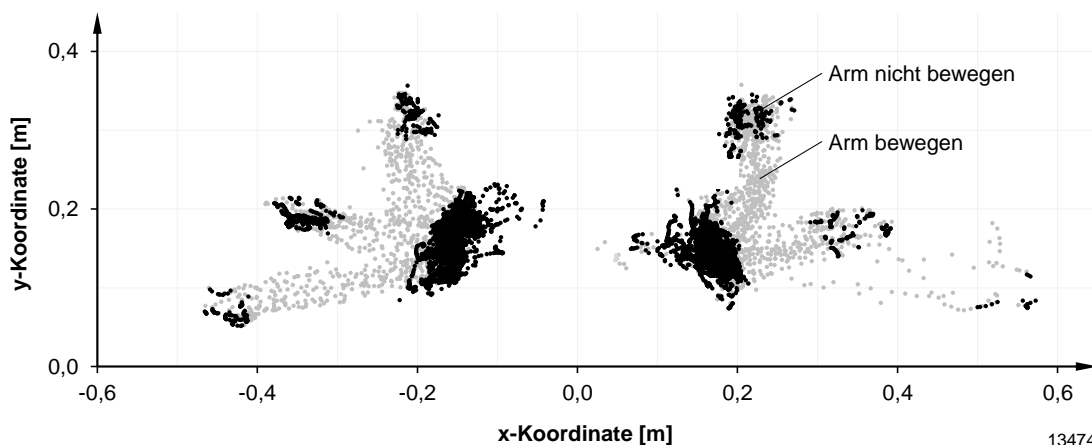
$y_{WR,a}$  : y-Koordinate des rechten Handgelenks [m]

$x_{WR,k,m}$  : Mittelwert der x-Koordinate des rechten Handgelenks bei Zustand  $k$  [m]

$y_{WR,k,m}$  : Mittelwert der y-Koordinate des rechten Handgelenks bei Zustand  $k$  [m]

13473

Um die Ergebnisse zu visualisieren und den Nutzer bei der Überprüfung der Ergebnisse zu unterstützen eignet sich eine Draufsicht, die die Zustandsarten bei den Aufnahmen darstellt (vgl. Abbildung 3-30).



13474

**Abbildung 3-30 Darstellung der erkannten Zustandsarten**

### 3.5 Zusammenfassung gleichartiger Zustände

Schon bei kurzen Aufnahmen können sehr viele Mitarbeiterzustände auftreten, sodass die Anzahl der erkannten Zustände schnell zunehmen kann. Daher ist es hilfreich, gleichartige Zustände zusammenzufassen, um die Auswertung zu erleichtern und die Ergebnisse verständlicher zu machen.

#### 3.5.1 Vorgehen

Ziel dieses Schrittes ist es, gleichartige Zustände einer Zustandsart zu Zustandsgruppen zusammenzufassen. Zwei Bewegungen sind dabei gleichartig, wenn sie den gleichen Start- und Endpunkt haben und zwei Stillstände sind gleichartig, wenn sie den gleichen Mittelpunkt haben. Da diese Punkte selten vollständig identisch sind, erfolgt die Durchführung der Zusammenfassung mit einem Cluster-Verfahren (Abschnitt 3.5.2).

Die Definition der Gleichartigkeit erfordert die Auswahl eines zentralen Gelenkpunktes. Die Zusammenfassung verwendet für die Analyse von Körperbewegungen die Schultermitte und für die Analyse von Armbewegungen das entsprechende Handgelenk. Sie ist dabei durch zwei verschiedene Varianten umsetzbar:

##### Variante 1

Variante 1 fasst die Start- und Endpunkte beziehungsweise die Mittelpunkte jeder Zustandsart separat zusammen. Dadurch entstehen beispielsweise einzelne Cluster der Start- und Endpunkte für die Zustandsart ‚Arm bewegen‘ sowie Cluster der Mittelpunkte für die Zustandsart ‚Arm nicht bewegen‘. Anschließend fasst diese Variante die Zustände zu Gruppen zusammen.

##### Variante 2

Variante 2 clustert alle Start- und Endpunkte der Bewegungen sowie Mittelpunkte der Stillstände gemeinsam. Das bedeutet beispielsweise, dass sie alle Start- und Endpunkte der Zustandsart ‚Arm bewegen‘ zusammen mit den Mittelpunkten der Zustandsart ‚Arm nicht bewegen‘ clustert.

Da Variante 1 je Zustandsart zusammenfasst, entstehen dort kleinere, besser abgegrenzte Cluster als bei Variante 2. Diese detailliertere Variante bietet sich dann an, wenn eine sehr hohe Anzahl gleichartiger Zustände auftritt. Variante 2 ist dagegen anwenderfreundlicher, weil sie insgesamt weniger Cluster erzeugt. Zudem ist sie besser für Anwendungsfälle geeignet, in denen sich die Zustände nicht so oft wiederholen. Da ein wichtiges Ziel der Methode die Anwenderfreundlichkeit ist und der vorhergesehene Anwendungszweck eine Aufnahme von maximal einer Schicht ist, verwendet die Methodik Variante 2.

### 3.5.2 Clusterung markanter Positionen

Die Zusammenfassung der Punkte erfolgt durch Anwendung eines Clusterverfahrens. Für die Zusammenfassung der markanten Positionen wurde an dieser Stelle ein hierarchisches Clusterverfahren ausgewählt. Ein solches Verfahren durchläuft die folgenden Schritte [vgl. Back11, S. 398ff.]:

- Bestimmung der Ähnlichkeiten
- Auswahl des Fusionierungsalgorithmus
- Bestimmung der Clusteranzahl

#### Bestimmung der Ähnlichkeiten

Die Ähnlichkeit zweier Objekte beschreibt, inwiefern sich ihre Eigenschaften gleichen. Diese Ähnlichkeit wird in der Regel indirekt durch ein Distanzmaß angegeben, das die Unähnlichkeit zweier Objekte misst [vgl. Stei77, S. 51f.; Fahr96, S. 440f.]. Je nach Art der Objekte verwenden die Clusterverfahren dabei unterschiedliche Distanzmaße. Da das Verfahren hier Punkte im Raum zusammenfassen soll, verwendet es das euklidische Distanzmaß, also den räumlichen Abstand zwischen zwei Punkten (vgl. Formel 3-12).

#### Auswahl des Fusionierungsalgorithmus

Das Verfahren verwendet das Distanzmaß nun, um die einzelnen Objekte zu Gruppen zusammenzufassen. Die Gruppen sollen dabei aus Objekten bestehen, die sich sehr ähnlich sind, also zwischen denen die Distanzen möglichst gering sind. Dies kann mit agglomerativen und divisiven Verfahren geschehen [vgl. , Stei77, S. 73ff.; Fahr96, S. 453ff.]. Bei den agglomerativen Verfahren ist jedes Objekt zunächst eine einzelne Gruppe. Die Verfahren fassen diese Gruppen dann Schritt für Schritt zu immer größeren Gruppen zusammen. Dies geschieht, indem sie die zwei Gruppen mit der geringsten Distanz zu einer Gruppe zusammenfügen. Sie wiederholen dies, bis die gewünschte Anzahl an Gruppen erreicht bzw. die Unähnlichkeit der Gruppen einen Grenzwert überschreitet. Die divisiven Verfahren kehren dieses Vorgehen um. Sie fassen zunächst alle Objekte zu einer Gruppe zusammen und teilen diese danach in Gruppen mit steigender Ähnlichkeit auf [vgl. , Stei77, S. 75ff.; Fahr96, S. 457ff.]. Die Methodik verwendet an dieser Stelle ein agglomeratives Verfahren.

Für die Zusammenfassung der Gruppen und der damit verbundenen Bestimmung der Distanz der Gruppe zu den anderen Gruppen existieren unterschiedliche Fusionierungsalgorithmen. Ein einfach verständlicher Algorithmus, der sich für die Methodik eignet und das euklidische Distanzmaß verwendet, ist der Single-Linkage-Algorithmus. Er bestimmt die Distanz zwischen zwei Gruppen durch die kürzeste Distanz zwischen zwei einzelnen Objekten der Gruppen [vgl. , Stei77, S. 77f.; Fahr96, S. 460ff.].

#### Bestimmung der Clusteranzahl

Die agglomerativen Clusterverfahren fassen die Gruppen solange zusammen, bis sie ein Abbruchkriterium erreichen. Da bei der Zusammenfassung die Anzahl der Gruppen abnimmt und somit besser handzuhaben ist, auf der anderen Seite jedoch die Ähnlichkeit innerhalb der Gruppen abnimmt, lassen sich zwei Arten von Abbruchkriterien bilden [vgl. , Stei77, S. 170f.; Back11 Fahr96, S. 436ff.].

Zum einen kann man eine maximale Anzahl an Gruppen festlegen. Dieser Ansatz eignet sich jedoch nicht für die vorgestellte Methodik, da bei den analysierten Arbeitsplätzen stark variierende Anzahlen an Clustern (z. B. Materialkisten) auftreten können. Der zweite Ansatz ist die Festlegung einer maximalen Distanz, bei der die Verfahren noch Gruppen zusammenführen. Die Methodik verwendet diesen Ansatz.

Bei der Analyse von Armbewegungen hat sich eine maximale Distanz von 5 cm als Richtwert bewährt und bei der Analyse von Körperbewegungen eine Distanz von 40 cm. Der Methoden-anwender kann die Werte jedoch bei Bedarf an die Arbeitsaufgabe anpassen.

### 3.5.3 Manuelle Korrektur

Analog zu den vorgelagerten Schritten unterstützt auch hier ein Software-Demonstrator den Nutzer bei der Durchführung der Clusterung. Der Demonstrator gibt ihm zum Beispiel die Möglichkeit, die maximale Distanz und damit die Anzahl der Cluster anzupassen.

Nach diesem Schritt sind alle Punkte einem Cluster zugeordnet. Abbildung 3-31 visualisiert das Ergebnis der Clusterung.

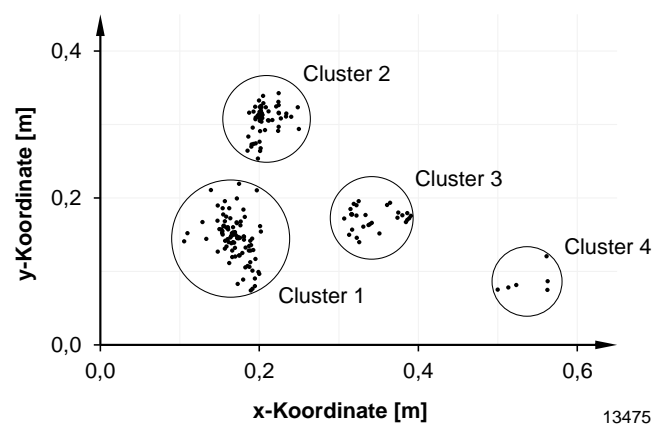


Abbildung 3-31 Ergebnis der Clusterung

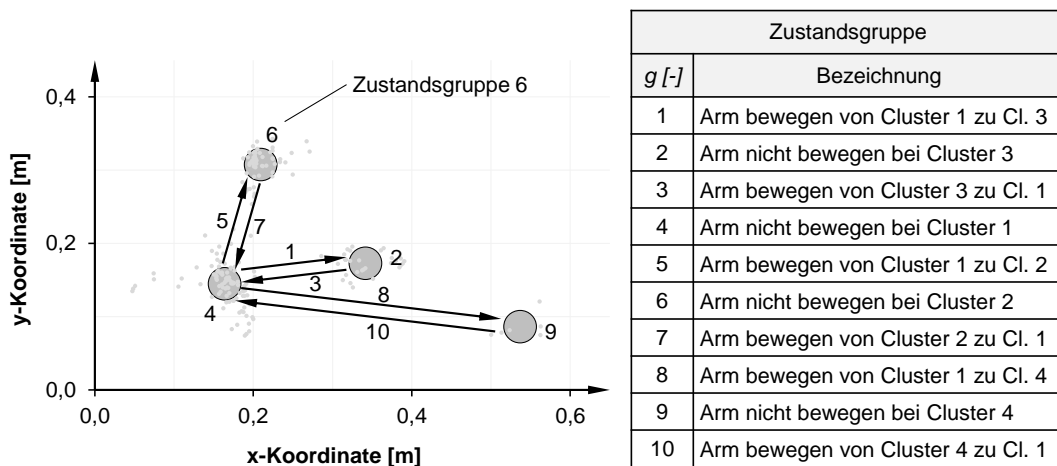
Damit kann man nun mit dem vorgestellten Vorgehen (vgl. Abschnitt 3.5.1) die Zustände zu Zustandsgruppen zusammenfassen. Tabelle 3-10 zeigt einen Ausschnitt der Zustandsliste mit den so zugeordneten Zustandsgruppen.

Tabelle 3-10 Zusammengefasste Zustandsgruppen im Beobachtungsverlauf

Zustand $k [-]$	Zustandsgruppe	
	$g [-]$	Bezeichnung
1	1	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 3
2	2	Arm nicht bewegen bei Cluster 3
3	3	Arm bewegen von Cluster 3 zu Cluster 1
4	4	Arm nicht bewegen bei Cluster 1
5	5	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 2
6	6	Arm nicht bewegen bei Cluster 2
7	7	Arm bewegen von Cluster 2 zu Cluster 1
8	4	Arm nicht bewegen bei Cluster 1
9	5	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 2

13476

Zur Visualisierung des Ergebnisses eignet sich auch hier eine Draufsicht auf den Arbeitsbereich (vgl. Abbildung 3-32). Diese Draufsicht stellt alle Zustandsgruppen des rechten Armes dar, die während der Erfassungszeit auftreten.



13477

Abbildung 3-32 Zustandsgruppen des rechten Arms

### 3.6 Ermittlung von Abläufen

Die Zusammenfassung reduziert die Anzahl der unterschiedlichen Zustände deutlich und ermöglicht zudem die gezielte Betrachtung einzelner Zustandsgruppen. Im nächsten Schritt ermittelt die Methodik Abfolgen von Ablaufschritten, um die Auswertung weiter zu vereinfachen.

Die Ermittlung von Abläufen ist aus zwei Gründen sinnvoll: Zum einen ist davon auszugehen, dass die Schritte eines häufig wiederholten Ablaufs zur Arbeitsaufgabe gehören. Alle anderen Schritte sind somit Nebentätigkeiten, die nicht produktiv sind. Zum anderen machen solche Abläufe in der Regel den größten Anteil der Zeit aus, sodass die detaillierte Untersuchung dieser Schritte ein besonders hohes Potenzial verspricht.

Die genaue Betrachtung von Tätigkeiten, die nur sporadisch vorkommen, ist hingegen wenig sinnvoll. Zudem hilft das Wissen über die Reihenfolge, den Vorgang zu verstehen und eventuell vorhandene Schwachstellen im Ablauf zu identifizieren.

Die Ablaufferkennung erfolgt in drei Schritten:

- Auswahl des ersten Ablaufschrittes,
- Ermittlung des Ablaufs mittels Ranganalyse und
- Auswahl des letzten Ablaufschrittes.

Der Methodenanwender kann dieses Vorgehen wiederholen, wenn in der Beobachtungszeit mehrere relevante Abläufe vorkommen.

### Auswahl des ersten Ablaufschrittes

Die Ablauffermittlung beginnt mit der Auswahl des ersten Ablaufschrittes. Der Anwender wählt diesen dazu manuell aus der Liste der ermittelten Zustandsgruppen aus (vgl. Tabelle 3-11). Die Liste enthält an dieser Stelle zudem die Häufigkeit des Auftretens und ist auch nach dieser Häufigkeit sortiert. Damit unterstützt sie den Anwender, indem sie seltene Zustände, die voraussichtlich nicht zum Standardablauf gehören, abgrenzt.

Die Auswahl des Ablaufschrittes erfolgt am besten in Kooperation mit dem beobachteten Mitarbeiter und unter Verwendung des aufgenommenen Videos. In dem dargestellten Beispiel ist der erste Ablaufschritt die Zustandsgruppe 1 (,Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 3').

**Tabelle 3-11 Zustandsgruppen und ihre Häufigkeit**

Zustandsgruppe		Häufigkeit
<i>g</i> [-]	Bezeichnung	
4	Arm nicht bewegen bei Cluster 1	31
5	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 2	20
7	Arm bewegen von Cluster 2 zu Cluster 1	20
6	Arm nicht bewegen bei Cluster 2	20
1	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 3	10
3	Arm bewegen von Cluster 3 zu Cluster 1	10
2	Arm nicht bewegen bei Cluster 3	10
8	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 4	2
10	Arm bewegen von Cluster 4 zu Cluster 1	2
9	Arm nicht bewegen bei Cluster 4	2

13478

Ermittlung des Ablaufs mittels Ranganalyse

Die Ranganalyse ermittelt, welche Ablaufschritte auf den ausgewählten Start-Ablaufschritt folgen. Dafür untersucht sie die gesamte Aufnahme wie folgt:

- Jeder Zustand, der zur Zustandsgruppe des ersten Ablaufschritts gehört, hat den Rang null.
- Alle anderen Zustände haben den Rang des Vorgängers plus eins.

Damit ist jedem Zustand ein Rang zugeordnet, der der Nummer des Auftretens nach dem letzten Auftreten des Start-Ablaufschrittes entspricht. Nun ermittelt die Analyse für jede Rangnummer, welche Zustandsgruppe am häufigsten auftritt. Abbildung 3-33 zeigt die Darstellung der häufigsten Zustandsgruppen je Rang. So ist in der Abbildung beispielsweise zu erkennen, dass auf den Start-Ablaufschritt am häufigsten ‚Arm nicht bewegen an Cluster 3‘ folgt.

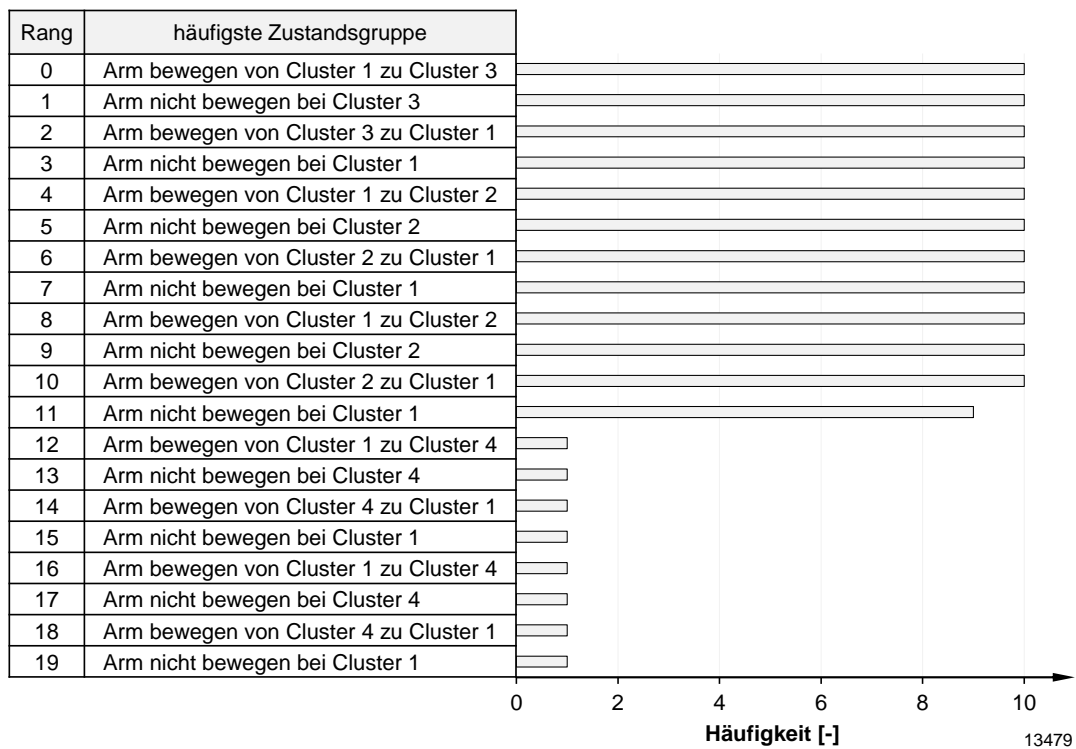
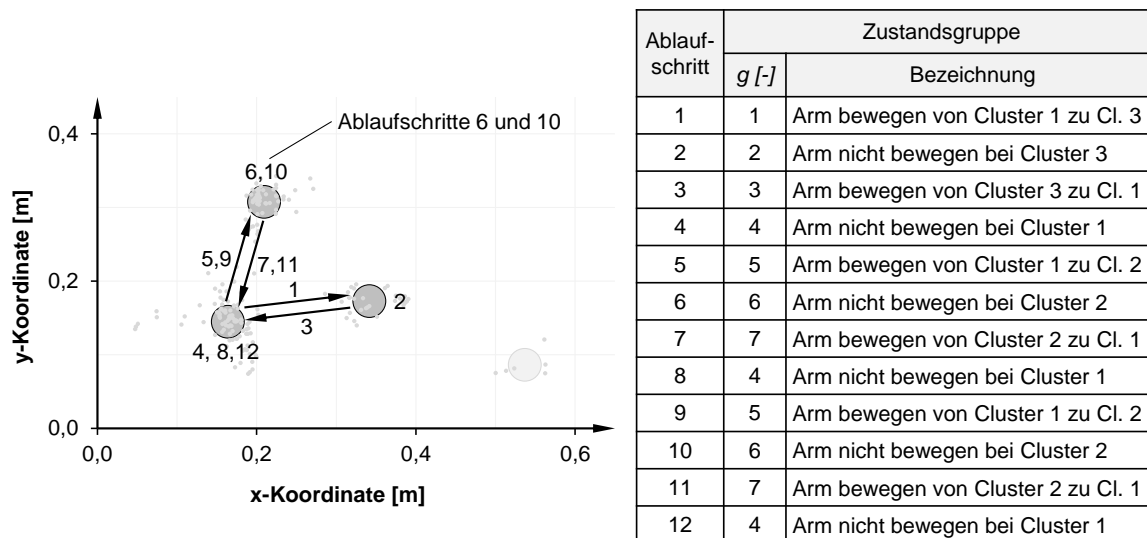


Abbildung 3-33 Ergebnis der Ranganalyse

Auswahl des letzten Ablaufschrittes

Die Ranganalyse bestimmt die häufigste Zustandsgruppe pro Rang, die Anzahl der sinnvollen Ränge wählt sie jedoch nicht automatisch aus. Daher erfolgt dies anschließend, indem der Anwender den letzten Ablaufschritt manuell auswählt. Ergebnis ist ein Ablauf, der aus mehreren Zustandsgruppen besteht. Abbildung 3-34 stellt den so ermittelten Ablauf dar. Durch Darstellung des Ablaufs kann man beispielsweise deutlich erkennen, dass der Mitarbeiter nur einmal in die rechte Kiste greift, während er den Bewegungszyklus zur linken Kiste zweimal hintereinander durchführt.



13480

Abbildung 3-34 Ermittelter Ablauf

Wenn mehrere unterschiedliche Abläufe in der Beobachtungszeit auftreten, kann der Anwender das Vorgehen zur Ablauferkennung wiederholen. Ergebnis sind dann ein oder mehrere Abläufe sowie Zustandsgruppen, die nicht zu diesen Abläufen gehören.

Das Vorgehen bestimmt aufwandsarm die realen Abläufe im Erfassungszeitraum. Zudem schafft es die Grundlage für die Auswahl von Zuständen, die zur geplanten Arbeitsaufgabe gehören (vgl. Abschnitt 5.2.1). Ein Nachteil dieses Vorgehens ist, dass es sich nur bedingt eignet, wenn viele unterschiedliche Abläufe auftreten. Dann nimmt der Aufwand deutlich zu oder es kann dazu kommen, dass die Ranganalyse keine eindeutigen Ergebnisse liefert.

### 3.7 Berechnung und Aggregation von Zustandsdaten

Nachdem die Methodik jedem Zeitabschnitt eine Zustandsart zugeordnet und die resultierenden Zustände zu Zustandsgruppen zusammengefasst hat, berechnet und aggregiert sie in diesem Schritt die Zustandsdaten. Wichtige Daten sind die Zustandszeiten und die Bewegungslängen. Wie in Abschnitt 3.1.2 vorgestellt, kann man für jeden einzelnen Zustand die Zeitdauer mit Formel 3-2 ermitteln. Für die Berechnung der Bewegungslänge existieren hingegen unterschiedliche Ansätze, die dieser Abschnitt zunächst vorstellt. Anschließend zeigt er, wie man die Zustandsdaten für Zustandsarten, -gruppen und Abläufe ermittelt.

#### Berechnung der Bewegungslänge

Die Bewegungslänge lässt sich auf zwei Arten ermitteln. Ein Ansatz ist die Verwendung der direkten Distanz zwischen Anfangs- und Endpunkt der Bewegung (vgl. Formel 3-34). Die Alternative ist die Berechnung der zurückgelegten Strecke. Dabei summiert man alle Distanzen zwischen den einzelnen Aufnahmen von Anfangs- bis Endpunkt auf (vgl. Formel 3-35).

$$D_k = d_{GP,A,E} \quad (3-34)$$

$$L_k = \sum_{a=A}^E d_{GP,a-1,a} \quad (3-35)$$

- $D_k$  : Bewegungsdistanz von Zustand  $k$  [m]  
 $L_k$  : Bewegungslänge von Zustand  $k$  [m]  
 $d_{GP,a,b}$  : Distanz von Gelenkpunkt GP bei Aufnahme  $a$  zu Aufnahme  $b$  [m]  
 $A$  : Nummer der Anfangsaufnahme von Zustand  $k$  [-]  
 $E$  : Nummer der Endaufnahme von Zustand  $k$  [-]

Die Distanz entspricht der direkten Verbindung zwischen Start- und Endpunkt. Sie zeigt somit auch den Mindestweg der Bewegung an. Häufig legt der Körper oder das Körperteil bei einer Bewegung jedoch nicht diesen direkten Weg zurück. So finden Armbewegungen häufig in einer bogenartigen Bewegung statt und bei Körperbewegungen muss man zum Teil Maschinen oder Hilfsmitteln ausweichen. Die zurückgelegte Strecke liegt somit deutlich näher an der tatsächlichen Bewegungsform. Ein Problem bei dieser Art der Erkennung ist jedoch die Anfälligkeit gegenüber fehlerhaften Daten. Wenn die ermittelte Position des Gelenkes bei einigen Aufnahmen falsch ist, kann die ermittelte Bewegungslänge deutlich von der realen Länge abweichen. Abbildung 3-35 visualisiert die beiden Arten zur Bestimmung der Bewegungslänge.

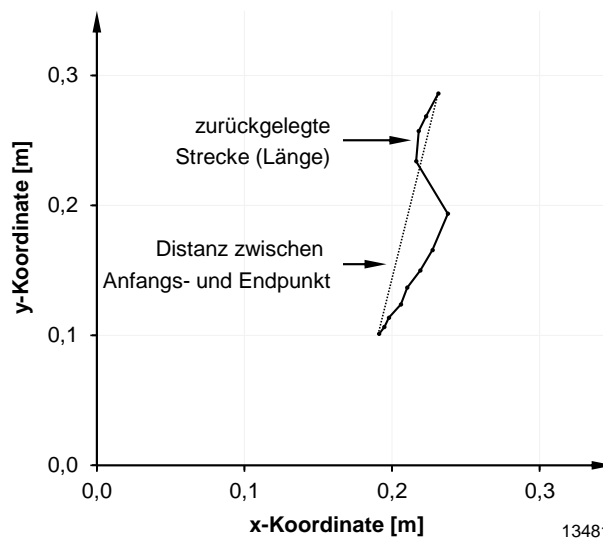


Abbildung 3-35 Bestimmung der Bewegungslänge

### Aggregation für die Zustandsarten und -gruppen

Mit den ermittelten Werten der einzelnen Zustände kann man nun die Daten für die Zustandsarten oder Zustandsgruppen bestimmen. An dieser Stelle sind insbesondere die Mittelwerte relevant. Formeln 3-35 bis 3-37 zeigen exemplarisch, wie man die Mittelwerte je Zustandsgruppe ermittelt. Die Daten für die Zustandsarten kann man analog bestimmen.

$$D_{g,m} = \frac{1}{H_g} \times \sum_{h=1}^{H_g} D_{g,h} \quad (3-35)$$

$$L_{g,m} = \frac{1}{H_g} \times \sum_{h=1}^{H_g} L_{g,h} \quad (3-36)$$

$$Z_{g,m} = \frac{1}{H_g} \times \sum_{h=1}^{H_g} Z_{g,h} \quad (3-37)$$

- $D_{g,m}$  : mittlere Bewegungsdistanz von Zustandsgruppe  $g$  [m]  
 $L_{g,m}$  : mittlere Bewegungslänge von Zustandsgruppe  $g$  [m]  
 $Z_{g,m}$  : mittlere Zeitdauer von Zustandsgruppe  $g$  [s]  
 $D_{g,h}$  : Bewegungsdistanz des  $h$ -ten Auftretens von Zustandsgruppe  $g$  [m]  
 $L_{g,h}$  : Bewegungslänge des  $h$ -ten Auftretens von Zustandsgruppe  $g$  [m]  
 $Z_{g,h}$  : Zeitdauer des  $h$ -ten Auftretens von Zustandsgruppe  $g$  [s]  
 $g$  : Zustandsgruppe [-]  
 $h$  : Nummer des Auftretens von Zustandsgruppe  $g$  [-]  
 $H_g$  : Anzahl erfasster Zustände von Zustandsgruppe  $g$  [-]

### Aggregation für die Abläufe

Mit den ermittelten Mittelwerten der Zustandsgruppen kann man nun ebenfalls die mittlere Zeitdauer eines Ablaufs bestimmen. Dies geschieht, indem man die Summe der Mittelwerte der einzelnen Ablaufschritte bildet (vgl. Formel 3-38). Die so ermittelte Zeit entspricht der Grundzeit der REFA-Systematik (vgl. Abschnitt 2.3.2). Man kann analog die Summe der Bewegungslängen im Standardablauf ermitteln

$$Z_{\text{Ablauf}} = \sum Z_{g,m} \quad \forall \text{ relevanten } g \quad (3-38)$$

- $Z_{\text{Ablauf}}$  : Zeitdauer des Standardablaufs [s]  
 $Z_{g,m}$  : mittlere Zeitdauer von Zustandsgruppe  $g$  [s]  
 $g$  : Zustandsgruppe [-]

### Ergebnis

Die berechneten und aggregierten Zustandsdaten ermöglichen nun die übersichtliche Visualisierung der wichtigsten Daten eines erfassten Ist-Ablaufes. Dafür eignet sich beispielsweise eine tabellarische Darstellung (vgl. Tabelle 3-12).

Tabelle 3-12 Ablaufschritte mit Zustandsdaten

Ablaufschritt	Zustandsgruppe		Zustandsdaten (Mittelwerte)		
	$g$ [-]	Bezeichnung	Distanz $D_{g,m}$ [cm]	Länge $L_{g,m}$ [cm]	Zeitdauer $Z_{g,m}$ [s]
1	1	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 3	26,5	43,5	0,5
2	2	Arm nicht bewegen bei Cluster 3	-	-	0,4
3	3	Arm bewegen von Cluster 3 zu Cluster 1	24,6	29,9	0,5
4	4	Arm nicht bewegen bei Cluster 1	-	-	4,2
5	5	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 2	33,3	53,5	0,6
6	6	Arm nicht bewegen bei Cluster 2	-	-	0,5
7	7	Arm bewegen von Cluster 2 zu Cluster 1	31,2	43,5	0,7
8	4	Arm nicht bewegen bei Cluster 1	-	-	4,2
9	5	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 2	33,3	53,5	0,6
10	6	Arm nicht bewegen bei Cluster 2	-	-	0,5
11	7	Arm bewegen von Cluster 2 zu Cluster 1	31,2	43,5	0,7
12	4	Arm nicht bewegen bei Cluster 1	-	-	4,2
<b>Summe</b>			<b>180,1</b>	<b>267,4</b>	<b>17,6</b>

13482

Die Methodik zur Erfassung der Ist-Zeiten erkennt mit dem dargestellten Vorgehen (Abschnitt 3.3 bis Abschnitt 3.7) in den Bewegungsdaten der Kinect relevante Zustände und ermittelt deren Zustandsdaten. Zudem stellt sie die Daten dem Anwender übersichtlich zur Verfügung. Das Vorgehen ist dabei nicht auf die Kinect als Erfassungstechnologie beschränkt, sondern kann auf andere Technologien der Bewegungserfassung übertragen werden. Eine solche Übertragung würde dann eventuell eine Anpassung einzelner Schritte erfordern (z. B. Zustandserkennung, Abschnitt 3.4.3). Eine andere Technologie könnte zudem zu einer höheren Datenqualität führen, was wiederum mit einer erhöhten Belastbarkeit der Ergebnisse einherginge (z. B. Berechnung Bewegungslänge, Abschnitt 3.7).



## 4 Bestimmung von Plan-Zeiten

Kapitel 3 beschreibt, wie die Methodik Zustände erkennt, zu Zustandsgruppen sowie Abläufen zusammenfasst und Zustandsdaten ermittelt. Zentrale Voraussetzung dafür ist die Erfassung von Bewegungsdaten, jedoch nicht zwangsläufig die Verwendung der Kinect als Erfassungstechnologie. Dieses Kapitel beschreibt, wie die Methodik Plan-Zeiten aus den Bewegungsdaten beziehungsweise den Ergebnissen der Ist-Zeiterfassung bestimmen kann. Damit ist es ebenfalls unabhängig von der Kinect als Technologie der Bewegungserfassung. Die Plan-Zeitbestimmung erfolgt dabei für die ermittelten Zustandsgruppen.

Dafür diskutiert dieses Kapitel unterschiedliche Ansätze zur Plan-Zeitbestimmung. Zunächst stellt Abschnitt 4.1 die Anforderungen an die Varianten dar, bevor die anschließenden Abschnitte diese Varianten beschreiben. Die erste Variante ist die *teilautomatisierte Umsetzung des MTM-1-Verfahrens* (Abschnitt 4.2). Die zweite Variante *vereinfacht* das *MTM-1-Verfahren* (Abschnitt 4.3), um den manuellen Aufwand der Durchführung zu reduzieren. Beide Verfahren stellen Systeme vorbestimmter Zeiten dar und bestimmen daher die Plan-Zeiten unabhängig von den Ist-Zeiten. Die dritte Variante, die *Ableitung von Plan-Zeiten aus den Ist-Zeiten* (vgl. Abschnitt 4.4) verwendet ähnlich wie die REFA-Systematik (vgl. Abschnitt 2.3.2) Ist-Zeiten, um aussagekräftige Plan-Zeiten zu bestimmen. Abschnitt 4.5 schließt das Kapitel ab, indem er die Verfahren bewertet und das Ergebnis der Plan-Zeit-Bestimmung darstellt (Abschnitt 4.5).

### 4.1 Anforderungen an die Plan-Zeitbestimmung

Die Methodik bestimmt Plan-Zeiten grundsätzlich für zwei verschiedene Einsatzzwecke (vgl. Abschnitt 2.3):

- Für die Planung von Produktionsprozessen (*Plan-Zeiten* i. e. S.) und
- für den Vergleich mit den Ist-Zeiten, um Potenziale in den Abläufen zu identifizieren (*Soll-Zeiten*).

Die Varianten zur Bestimmung von Plan-Zeiten müssen also zum einen in der Lage sein, verlässliche Werte für Planungszwecke abzuleiten. Dazu müssen sie die bestehenden Abläufe möglichst gut abbilden. Das heißt, sie gehen hierbei nicht wie bei der Prozessstudientabelle (vgl. Abschnitt 2.2.2) davon aus, dass Ausreißer oder Probleme bei wiederholter Durchführung nicht mehr auftreten. Stattdessen gehen sie davon aus, dass die beobachteten Abläufe den Regelfall darstellen und berücksichtigen Ausreißer somit für die Planung.

Zum anderen müssen sich die Ergebnisse der Plan-Zeitbestimmung für einen Vergleich mit den Ist-Zeiten zur Identifizierung von Potenzialen eignen. Dazu müssen sie sinnvolle Soll-Werte liefern. Damit sind in Anlehnung an das MTM-1-Verfahren Zeiten gemeint, die ein geübter Werker bei guter Gestaltung der Arbeit erreichen kann [vgl. Deut14, S. 18ff.].

Eine wichtige Anforderung an die Gesamtmethodik ist zudem der möglichst geringe manuelle Anwendungsaufwand (vgl. Abschnitt 2.6.2). Diese Anforderung gilt somit auch für die Bestimmung der Plan-Zeiten. Analog gilt hier ebenfalls, dass möglichst kein spezielles Methodenwissen notwendig ist.

### 4.2 Teilautomatisierung des MTM-1-Verfahrens

Die Erfassung von Ist-Zeiten kann mit den Bewegungsdaten Zustandsarten erkennen, die an das MTM-1-Verfahren angelehnt sind (vgl. Abschnitt 2.3.3). Eine vollständige Automatisierung des Verfahrens ist jedoch nicht möglich. Zum einen kann die Methodik nicht alle Bewegungsarten nach MTM-1 automatisch ermitteln und zum anderen kann sie für die einzelnen Bewegungen nicht alle Einflussgrößen automatisch bestimmen. Deshalb ist für die Anwendung nach wie vor ein MTM-1-Experte notwendig. Man kann die Bewegungsdaten dennoch nutzen, um einen Großteil der erforderlichen Informationen automatisiert zu bestimmen.

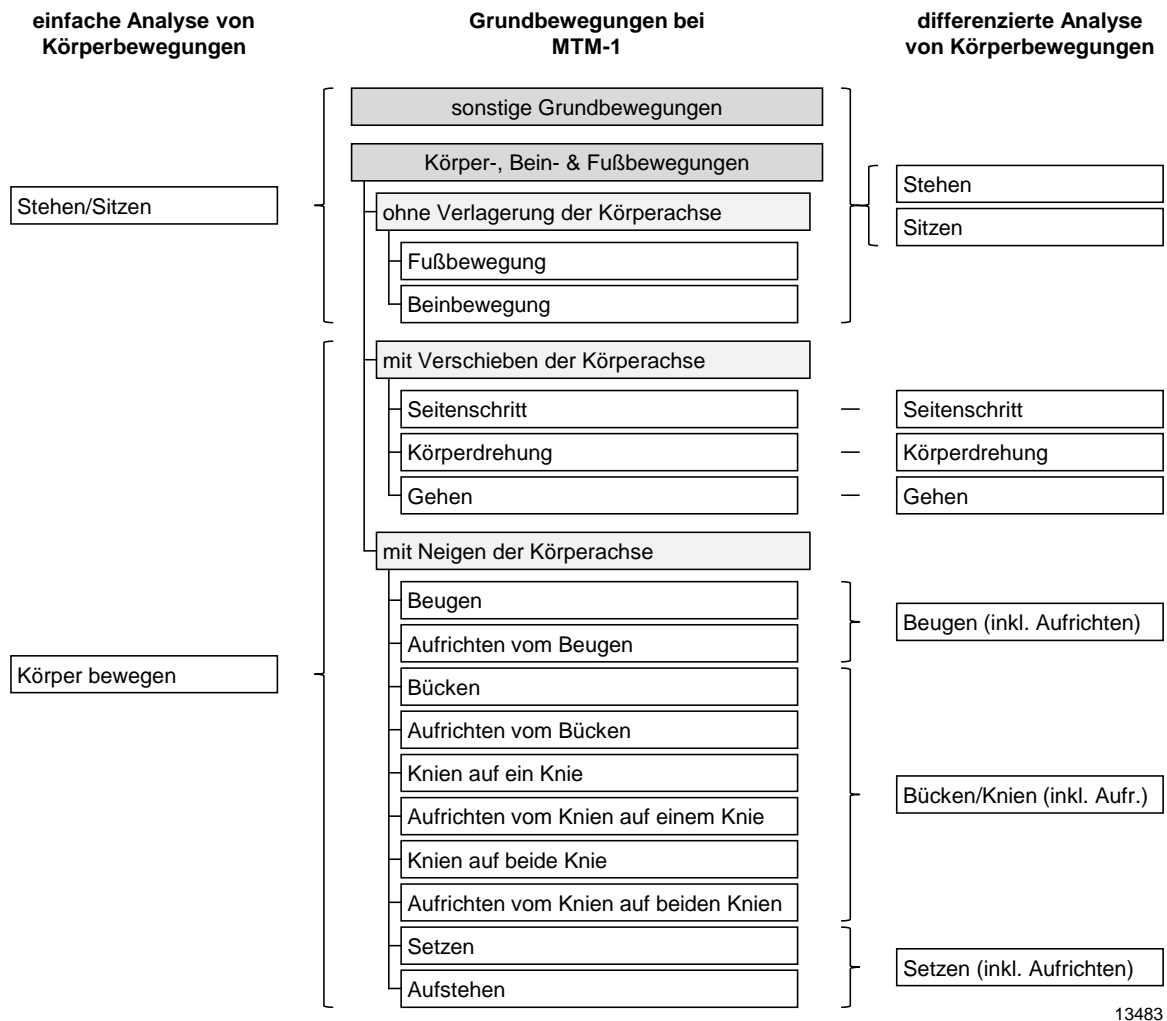
Die erste Variante zur Ermittlung von Plan-Zeiten ist deshalb die teilweise Automatisierung des klassischen MTM-1-Verfahrens. Ziel dieses Ansatzes ist es, die Vorteile von MTM-1 zu realisieren, dabei den Methodenaufwand aber deutlich zu senken. Da diese Variante der Plan-Zeitbestimmung das MTM-1-Verfahren nicht abändert, sondern lediglich unterstützt, zeigt dieser Abschnitt nicht das vollständige Verfahren auf. Er geht stattdessen nur auf die Teile der Methode ein, die durch die Bewegungserfassung unterstützt werden können.

#### Erkennung der Bewegungsarten

Ein wichtiger Schritt des MTM-1-Verfahrens ist die Auswahl der richtigen Bewegungsart (vgl. Abbildung 2-8). Diesen Schritt kann die entwickelte Methodik zum Teil umsetzen, da sie zur Erhebung der Ist-Zeiten Zustandsarten in Anlehnung an das MTM-1-Verfahren unterscheidet. Abschnitt 3.1.1 beschreibt, welche Zustandsarten die Methodik bestimmt. Sie kann demnach nicht alle Bewegungsarten erkennen, könnte aber eine Auswahl für den Anwender vorgeben. So fasst beispielsweise die *einfache Analyse von Armbewegungen* ‚Hinlangen‘- und ‚Bringen‘ zu ‚Arm bewegen‘ zusammen. Bei der Durchführung von MTM-1 müsste der Anwender dann für jede Zustandsgruppe dieser Zustandsart auswählen, welche der beiden Bewegungsarten vorliegt.

Zudem fasst die Methodik bei der Ist-Zeiterfassung zum Teil mehrere Grundbewegungen nach MTM-1 zu einem Zustand zusammen. So unterscheidet sie beispielsweise nicht zwischen Fügen und Loslassen. Wenn auf diese Vorgänge noch eine Wartezeit folgt, bei der die Hand weiter am selben Ort verbleibt, erkennen die Algorithmen diese drei Schritte als einen einzigen Zustand. In diesem Fall müsste der Anwender demnach die einzelnen Schritte manuell festlegen.

Abbildung 4-1 zeigt eine Übersicht, welche Zustandsarten die Analysen der Körperbewegungen erfassen und zwischen welchen Grundbewegungen der Anwender anschließend auswählen muss [Erweiterung von Bokr06, S. 566ff.].



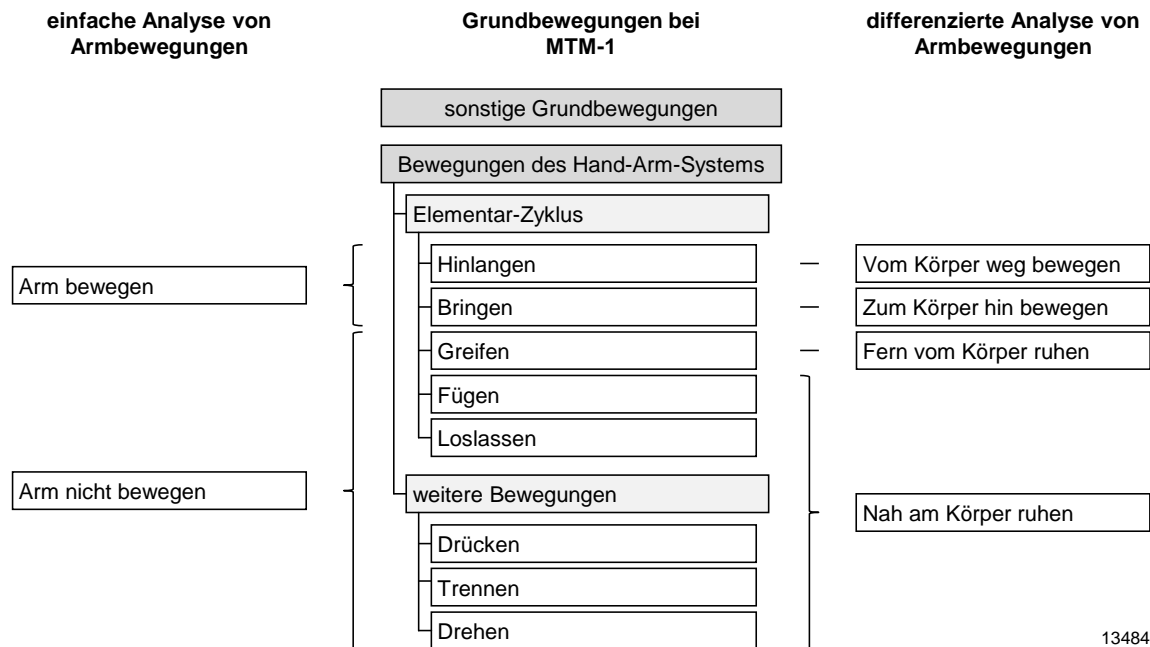
13483

**Abbildung 4-1** Erkannte MTM-1-Grundbewegungen (Körperbewegungen)  
[Erweiterung von Bokr06, S. 566ff.]

Wenn die differenzierte Analyse von Körperbewegungen beispielsweise die Zustandsarten ‚Stehen‘ oder ‚Sitzen‘ erkennt, können die MTM-1-Grundbewegungen ‚Fußbewegung‘ oder ‚Beinbewegung‘ auftreten. Allerdings kann der Mitarbeiter in dieser Zeit auch Bewegungen des Hand-Arm-Systems durchführen. Für das vollständige MTM-1-Verfahren müsste der Anwender also für jede dieser Zustandsgruppe die entsprechende Bewegungsart auswählen. Die Analyse erkennt jedoch die Bewegungen mit Verschieben der Körperachse analog zu dem MTM-1-Verfahren. Hier ist also keine manuelle Auswahl des Anwenders notwendig. Ebenso ist es möglich, die Bewegungen mit Neigen der Körperachse detailliert zu erkennen. Die differenzierte Analyse von Körperbewegungen unterscheidet zwar nur zwischen drei Zustandsarten, man kann die MTM-1-Grundbewegungen jedoch mit den Bewegungsdaten ableiten. So kann beispielsweise ein ‚Beugen‘ und ein ‚Aufrichten vom Beugen‘ automatisiert unterschieden werden, indem man die Höhe des Kopfes am Anfang und am Ende der Bewegung vergleicht. Analog kann man bei sehr guter Datenqualität die Höhe der Knie betrachten, um zwischen ‚Knien auf einem Knie‘ und ‚Knien auf zwei Knien‘ zu unterscheiden.

Bei der einfachen Analyse von Körperbewegungen ist aufgrund der höheren Aggregation bei beiden erkannten Zustandsarten eine anschließende Auswahl der richtigen MTM-1-Grundbewegung notwendig.

Abbildung 4-2 zeigt analog die Übersicht für die Analysen von Armbewegungen [Erweiterung von Bokr06, S. 542ff.].



13484

**Abbildung 4-2** Erkannte MTM-1-Grundbewegungen (Armbewegungen)  
[Erweiterung von Bokr06, S. 542ff.]

Wie bei der Analyse von Körperbewegungen ist hier bei der einfachen Analyse von Armbewegungen stets eine Auswahl der MTM-1-Grundbewegung notwendig.

Die differenzierte Analyse unterscheidet die Zustandsarten allerdings etwas detaillierter und erlaubt daher einen Rückschluss auf die MTM-1-Grundbewegungen. So kann sie beispielsweise einen Vorschlag für die Bewegungsarten ‚Hinlangen‘, ‚Bringen‘ und ‚Greifen‘ liefern. Dies funktioniert jedoch nur beim idealen Grundzyklus, bei dem der Mitarbeiter beispielsweise in eine entfernte Kiste greift, um das aufgenommene Material anschließend nah am Körper zu montieren. Nimmt er das Material nah am Körper auf, um es entfernt zu platzieren, ist die Zuordnung falsch. Daher ist hier stets eine Überprüfung des Anwenders notwendig. Bei der Zustandsart ‚sonstiges Arm bewegen‘, die nicht in der Abbildung dargestellt ist, ist ebenfalls stets eine Prüfung notwendig. Dann kann jede der drei genannten MTM-1-Grundbewegungen auftreten. Eine automatisierte Erkennung der anderen Bewegungsarten des Hand-Arm-Systems mit den Bewegungsdaten ist nicht möglich.

Beide Abbildungen zeigen auf, dass insbesondere bei den Stillständen die Auswahl der Grundbewegung schwierig ist. Das liegt vor allem daran, dass bei Stillständen keine charakteristischen Bewegungsverläufe stattfinden. Zudem beschreibt das MTM-1-Verfahren Stillstände wie Wartezeiten nicht explizit.

### Ermittlung von Zeiteinflussgrößen

Neben der Erkennung der Bewegungsart ist es mit den erfassten Daten möglich, einige der Zeiteinflussgrößen zu bestimmen. Dieser Abschnitt geht an dieser Stelle nicht auf alle Einflussgrößen detailliert ein, sondern nur auf diejenigen, die man bestimmen kann. Zunächst beschreibt er die Ermittlung der Einflussgröße Bewegungslänge, da diese für viele Bewegungsarten eine relevante Größe ist. Anschließend stellt er dar, welche spezifischen Zeiteinflussgrößen der Bewegungsarten man aus den erfassten Daten ableiten kann.

#### *Bestimmung der Bewegungslänge*

Die Bewegungslänge ist eine Größe, die insbesondere dann Einfluss auf die Plan-Zeit eines Arbeitsablaufs hat, wenn dieser aus vielen Bewegungen besteht. Man kann sie jedoch sehr detailliert mit den Bewegungsdaten bestimmen. Für jede einzelne Bewegung kann man so zum einen die direkte Entfernung vom Anfangspunkt zum Endpunkt und zum anderen die zurückgelegte Strecke ermitteln (vgl. Abschnitt 3.7).

Die klassische MTM-1-Analyse verwendet die tatsächliche Länge des Bewegungsbogens (vgl. Abbildung 2-10). Daher sollte auch eine Teilautomatisierung die tatsächlich zurückgelegte Strecke nutzen. Für eine Zustandsgruppe würde sie demnach den Mittelwert der Bewegungslänge ( $L_{g,m}$ , vgl. Formel 3-36) verwenden.

Falls die Erfassungsqualität gering ist, kann man alternativ die direkte Entfernung ( $D_{g,m}$ , vgl. Formel 3-35) mit einem Aufschlag für den Bewegungsbogen verwenden. Im klassischen MTM-1-Verfahren beträgt dieser Aufschlag 10 % [vgl. Bokr06, S. 535].

#### *Einflussgrößen bei den MTM-1-Körperbewegungen*

Bei den Körperbewegungen kann man relativ viele Einflussgrößen aus den Bewegungsdaten ableiten, da die Einflussgrößen überwiegend die Bewegung des Körpers beschreiben und weniger die Objekte, mit denen der Mitarbeiter agiert (vgl. Tabelle 4-1) [Erweiterung von Bokr06, S. 566ff.].

So kann man die Bewegungslängen bei der Beinbewegung und beim Seitenschritt sowie die Anzahl der zurückgelegten Schritte beim Gehen gut mit den erfassten Daten bestimmen. Die Bewegungsfälle des Seitenschritts und der Körperbewegung beschreiben, wie viele Schritte der Mitarbeiter bei der Bewegung durchführt. Damit kann man sie ebenfalls ableiten. Voraussetzung dafür ist jedoch die vollständige Erfassung der Beine.

Dagegen kann man mit den Bewegungsdaten den Kraftaufwand und die Art des Gehens nicht bestimmen. Die Kinect erkennt nur Menschen im Sichtfeld und erfasst nicht, ob Gegenstände im Weg liegen oder ob aufzubringende Kräfte die Bewegungen erschweren.

**Tabelle 4-1 Ableitbare Zeiteinflussgrößen der MTM-1-Körperbewegungen  
[Erweiterung von Bokr06, S. 566ff.]**

Grundbewegung	Zeiteinflussgröße	aus 3D-Daten ableitbar?
Fußbewegung	Kraftaufwand	nein
Beinbewegung	Bewegungslänge	ja
Seitenschritt	Bewegungslänge	ja
	Bewegungsfall	ja (bei hoher Datenqualität)
Körperdrehung	Bewegungsfall	ja (bei hoher Datenqualität)
Gehen	Anzahl Schritte	ja
	Art des Gehens	nein
Beugen, Aufrichten vom Beugen, Bücken, Aufrichten vom Bücken, Knien auf ein Knie, Aufrichten vom Knien auf ein Knie, Knien auf beide Knie, Aufrichten vom Knien auf beiden Knien, Setzen, Aufstehen	keine Zeiteinflussgrößen	-

13485

### *Einflussgrößen beim MTM-1-Grundzyklus*

Bei der Analyse von Armbewegungen steht der MTM-1-Grundzyklus im Vordergrund. Für die Bewegungsarten dieses Zyklus kann man nur eine Einflussgröße neben der Bewegungslänge mit den erfassten Daten ermitteln, den Typ des Bewegungsverlaufs (vgl. Tabelle 4-2) [Erweiterung von Bokr06, S. 542ff.]. Er beschreibt, ob eine Beschleunigungs- oder Verzögerungsphase bei der Bewegung auftritt (vgl. Abbildung 2-11).

Alle anderen Einflussgrößen wie die Art des Greifens, die Beschaffenheit des Gegenstandes, der Symmetriefall etc. kann man auch bei sehr guter Bewegungserfassung nicht aus den Gelenkkoordinaten ableiten. Das liegt daran, dass sie die zu handhabenden Objekte beschreiben und nicht das Verhalten des menschlichen Körpers. So beschreiben die Gegenstandslage und -dimension beim Greifen die Eigenschaften des aufzunehmenden Objektes und die Art des Greifens gibt wieder, wieviel Kontrollaufwand dabei nötig ist. Der Bewegungsfall beim Hinlangen und Bringen beschreibt, mit welcher Genauigkeit der Mitarbeiter zu einem Ort greifen muss. Dies kann man ebenfalls nicht aus den Daten ermitteln. Beim Fügen sind wiederum die Eigenschaften der zu fügenden Gegenstände von Bedeutung (Passungsklasse, Symmetriebedingung und Handhabung), die man nicht aus den Bewegungsdaten ableiten kann.

**Tabelle 4-2 Ableitbare Zeiteinflussgrößen des MTM-1-Grundzyklus  
[Erweiterung von Bokr06, S. 542ff.]**

Grundbewegung	Zeiteinflussgröße	aus 3D-Daten ableitbar?
Hinlangen	Bewegungslänge	ja
	Bewegungsfall	nein
	Typ des Bewegungsverlaufs	ja
Greifen	Art des Greifens	nein
	Gegenstandslage	nein
	Gegenstandsdimension	nein
Bringen	Bewegungslänge	ja
	Bewegungsfall	nein
	Typ des Bewegungsverlaufs	ja
	Kraftaufwand	nein
Fügen	Passungsklasse	nein
	Symmetriebedingung	nein
	Handhabung	nein
Loslassen	Fall des Loslassens	nein

13486

Bei der Erfassung von Bewegungsdaten mit der Kinect ist eine hohe Datenqualität nicht in jedem Anwendungsfall gegeben (vgl. Abschnitt 3.3.3). Daher gehen die folgenden Ausführungen davon aus, dass die Einflussgrößen unbekannt sind, die man nur bei hoher Datenqualität ableiten kann.

#### Fazit zur Teilautomatisierung des MTM-1-Verfahrens

Mit den durch die Kinect erfassten Bewegungsdaten ist es möglich, einen Teil der Bewegungsarten des MTM-1-Verfahrens automatisiert zu bestimmen. Für andere Bewegungsarten kann die Methodik dem Anwender lediglich eine Gruppe an Bewegungen vorschlagen, aus der er dann die Richtige auswählen muss (vgl. Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2). Zudem ist es möglich, einige Zeiteinflussgrößen automatisiert zu ermitteln (vgl. Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2).

Es ist also mit den Daten nicht möglich, alle Grundbewegungen eindeutig zu bestimmen. Ebenso ist es nicht möglich, alle relevanten Zeiteinflussgrößen zu ermitteln. Somit kann die Methodik einen geschulten MTM-1-Experten nicht vollständig ersetzen. Da der Verzicht auf spezielle Schulungen jedoch eine der Anforderungen an die Gesamtmethodik ist (vgl. Abschnitt 2.6.2), eignet sich diese Variante der Plan-Zeitermittlung nur bedingt.

### **4.3 Vereinfachung des MTM-1-Verfahrens**

Eine Alternative zur Durchführung des klassischen MTM-1-Verfahrens ist die Vereinfachung der Vorgehensweise. Ziel dieser Variante ist es, die Vorteile des MTM-1-Verfahrens weitgehend zu erhalten, aber den Methodenaufwand deutlich zu reduzieren und den Bedarf für spezifisches Wissen zu eliminieren. Da die entwickelte Methodik insbesondere Bewegungen gut identifiziert (vgl. Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2), begrenzt sich diese Variante auf Bewegungen. Die Plan-Zeiten von Stillständen ermittelt sie nicht.

Die Vereinfachung des MTM-1-Verfahrens erfolgt in zwei Schritten. Zunächst trifft sie Annahmen für die nicht ermittelbaren Einflussgrößen, um so eine automatisierte Plan-Zeitbestimmung für jede Grundbewegung zu ermöglichen. Anschließend fasst sie die Grundbewegungen nach MTM-1 zu den Zustandsarten der Ist-Zeiterfassung zusammen (vgl. Abschnitt 3.1.1).

### Annahmen für die nicht ableitbaren Einflussgrößen

Es ist nicht möglich, alle Zeiteinflussgrößen automatisiert zu erfassen, die für das MTM-1-Verfahren notwendig sind (vgl. Abschnitt 4.2). Um dennoch Zeiten zu bestimmen, trifft die Vereinfachung sinnvolle Annahmen für die Einflussgrößen. Dafür gibt es verschiedene Ansätze:

- Verwendung des *optimistischsten Wertes* und
- Verwendung des *durchschnittlichen Wertes*.

Der erste mögliche Ansatz ist die Verwendung des *optimistischsten Wertes*, das heißt die Kombination aus Einflussgrößen, bei dem die resultierende Zeit am geringsten ist (vgl. Ansatz 1 in Tabelle 4-3). Die ermittelte Plan-Zeit ist dann also das Minimum an Zeit, das nach MTM-1 unter Berücksichtigung der ableitbaren Einflussgrößen erreichbar ist. Damit eignet sich diese Zeit insbesondere für die Identifizierung von Verbesserungspotenzialen, da man dann die Ist-Zeiten mit der kleinsten erreichbaren Zeit vergleicht. Allerdings eignet sie sich nur eingeschränkt für die Planung, da nicht immer ideale Bedingungen vorliegen und man die Plan-Zeiten so systematisch zu klein annehmen würde.

Der zweite Ansatz ist die Verwendung des *durchschnittlichen Wertes*. Man kann diesen beispielsweise berechnen, indem man

- die best- und die schlechtmöglichste Kombination ermittelt und den Durchschnitt der resultierenden Zeiten bildet (vgl. Ansatz 2a in Tabelle 4-3) oder
- alle möglichen Kombinationen ermittelt und deren Durchschnitt bildet (vgl. Ansatz 2b in Tabelle 4-3).

Die resultierenden Werte sind besser für die Planung geeignet als beim ersten Ansatz, jedoch können auch hier in der Realität Abweichungen auftreten. Zudem stellen sie nur bedingt gute Vergleichswerte dar, da sie implizit nicht-optimale Annahmen treffen.

Da beide Ansätze nicht vollständig für die Planung geeignet sind, verwendet die Vereinfachung den ersten Ansatz, da er sich besonders gut für die Bestimmung von Soll-Zeiten eignet.

Tabelle 4-3 zeigt die mit den unterschiedlichen Ansätzen ermittelten Plan-Zeiten beispielhaft für die MTM-1-Grundbewegungen ‚Hinlangen‘ und ‚Loslassen‘.

Tabelle 4-3 Ansätze zur Annahme von Zeiteinflussgrößen

MTM-1-Grundbewegung	erkannte Einflussgrößen	Plan-Zeit in TMU						
		MTM-1				Ansatz 1	Ansatz 2a	Ansatz 2b
Hinlangen	Bewegungslänge: 40 cm Bewegungsverlauf: Typ 1	R40A	R40B	R40C/ R40D	R40D	Min	Min + Max /2	$\Sigma/4$
		11,3	15,6	16,8	14,1	11,3	14,5	14,1
Loslassen	-	RL1	RL2			Min	Min + Max /2	$\Sigma/2$
		2	0			0	1	1

13487

#### Zusammenfassung der MTM-1-Grundbewegungen zu Zuständen

Abschnitt 4.2 hat gezeigt, welche MTM-1-Grundbewegungen die Methodik erkennen kann und bei welchen sie an ihre Grenzen stößt. Eine sinnvolle automatisierte Bestimmung von Plan-Zeiten auf Basis von MTM-1 ist für erkannte Stillstände nicht möglich. Das liegt daran, dass die Methodik nicht ermittelt, ob und welche MTM-1-Bewegungsarten während dieser Stillstände stattfinden. Daher beschränkt sich die Vereinfachung des MTM-1-Verfahrens auf Bewegungen.

Die Methodik erkennt dabei nicht die MTM-1-Bewegungsarten, sondern die in Abschnitt 3.1.1 definierten Zustandsarten (vgl. Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2). Die Methodik muss daher für jede Zustandsart einen Zeitwert aus den Plan-Zeiten der möglichen MTM-1-Bewegungsarten ermitteln. Dies erfolgt hier, indem sie den Durchschnitt der Zeiten dieser Bewegungsarten bildet. So ergibt sich beispielsweise die Plan-Zeit für einen erkannten ‚Arm bewegen‘-Zustand aus dem Durchschnitt der beiden Zeitwerte für die Bewegungsarten ‚Hinlangen‘ und ‚Bringen‘.

Der Anwender kann das vereinfachte Verfahren automatisiert und ohne zusätzliche Schulungen durchführen. Es verursacht damit keinen zusätzlichen Aufwand. Wichtigster Nachteil dieses Verfahrens ist die Tatsache, dass es für Stillstände keine Plan-Zeiten ermitteln kann.

#### **4.4 Ableitung von Plan-Zeiten aus den Ist-Zeiten**

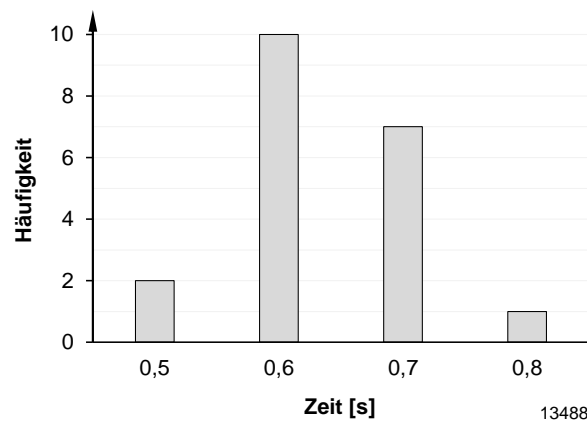
Die dritte Variante zur Bestimmung von Plan-Zeiten nutzt kein System vorgegebener Zeiten. Sie verwendet stattdessen ähnlich wie die REFA-Systematik (vgl. Abschnitt 2.3.2) die Ist-Zeiten, um aussagekräftige Plan-Zeiten zu bestimmen. Diese Variante der Plan-Zeitbestimmung erlaubt es, zwei verschiedene Zeitwerte abzuleiten, ohne dabei zusätzlichen Aufwand zu erzeugen.

##### Ermittlung des Mittelwertes

Zum einen kann man wie bei der REFA-Systematik die Mittelwerte aus den bestehenden Zeiten ableiten (vgl. Abschnitt 2.3.2). Dieser Wert hat den Vorteil, dass er die realen Vorgänge gut abbildet und somit verlässliche Plan-Zeiten darstellt. Durch die hohe Auflösung der Arbeitsschritte erreicht er zudem eine höhere Genauigkeit als die klassische REFA-Systematik.

### Ermittlung des Modalwertes

Ein wichtiger Vorteil der Erkennung von Zuständen mit Bewegungsdaten ist die automatisierte Ableitung von Ist-Zeiten. So kann man viele Wiederholungen eines Vorgangs aufwandsarm auswerten. Durch die detaillierte Auflösung der Zeit ist es zudem möglich, die Zeiten jedes einzelnen Zustands zu bestimmen und somit die Verteilung der Ist-Zeiten für eine Zustandsgruppe zu ermitteln (vgl. Abbildung 4-3).



**Abbildung 4-3 Verteilung der erfassten Ist-Zeiten einer Armbewegung**

So kann man nun den Modalwert ermitteln, also denjenigen Wert, der am häufigsten auftritt [vgl. Bosc05, S. 20]. Bei einer Verteilung wie dem in Abbildung 4-3 dargestellten Beispiel ist der Modalwert (0,6 Sekunden) kleiner als der Mittelwert (0,64 Sekunden). In Anlehnung an die Bestimmung der niedrigsten wiederholbaren Zeit bei der Prozessstudientabelle [vgl. Roth06, S. 21ff.] kann man diesen Wert als Alternative zum Mittelwert verwenden. Dieser Wert ist somit auch geeignet, um Verbesserungspotenzial zu identifizieren, wenn sich Mittelwert und Modalwert unterscheiden.

Die Ableitung der beiden Werte aus den Ist-Zeiten kann vollständig automatisiert erfolgen und erfordert daher keinen zusätzlichen Aufwand oder Schulungen. Zudem kann man diese Variante der Plan-Zeitbestimmung bei Bewegungen und bei Stillständen anwenden.

## **4.5 Bewertung der Varianten**

Ziel der Gesamtmethodik ist die integrierte Bestimmung von Ist- und Plan-Zeiten für die beobachteten Abläufe sowie die Identifizierung von Verbesserungspotenzialen bei möglichst geringem Aufwand. Dieser Abschnitt vergleicht die vorgestellten Verfahren zur Bestimmung von Plan-Zeiten miteinander, indem er untersucht, ob sie die gestellten Anforderungen (vgl. Abschnitt 4.1) erfüllen.

### Teilautomatisierung des MTM-1-Verfahrens

Ziel des klassischen MTM-1-Verfahrens ist die Bestimmung von Plan-Zeiten, die Mitarbeiter dauerhaft ohne Ermüdung erreichen können. Damit eignen sie sich sehr gut als *Soll-Zeiten* für einen Vergleich mit den gemessenen Ist-Zeiten. Zudem liefern die Zeiteinflussgrößen Ansatzpunkte für Verbesserungen. Sie eignen sich nur bedingt für die Planung (*Plan-Zeiten*), wenn die Ist-Zeiten stark von den Plan-Zeiten abweichen. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn die Mitarbeiter nicht ausreichend geübt sind.

Ein weiteres Problem dieser Variante ist, dass man sie nicht vollständig automatisiert durchführen kann. Zudem ist weiterhin MTM-1-Wissen erforderlich und man muss einen Großteil der Einflussgrößen manuell bestimmen.

### Vereinfachung des MTM-1-Verfahrens

Diese Vereinfachung des MTM-1-Verfahrens trifft geeignete Annahmen, um automatisiert Plan-Zeiten zu bestimmen. Die Verwendung des bestmöglichen Wertes geht beispielsweise von ideal gestalteten Arbeitsplätzen aus. Die ermittelten Zeiten eignen sich dann sehr gut für die Identifikation von Verbesserungspotenzialen (*Soll-Zeiten*). Sie sind jedoch ebenfalls nicht als *Plan-Zeiten* geeignet, da reale Arbeitsplätze häufig nicht optimal gestaltet sind.

Diese Variante kann vollständig automatisiert erfolgen und erzeugt somit keinen zusätzlichen manuellen Aufwand. Sie ermittelt jedoch lediglich Zeiten für Bewegungen und nicht für Stillstände.

### Ableitung der Plan-Zeiten aus den Ist-Zeiten

Wie in den Anforderungen beschrieben (vgl. Abschnitt 4.1), geht die Methodik davon aus, dass aufgetretene Ausreißer während der Aufnahme keine Ausnahme darstellen. Deswegen sollte die Planung diese ebenfalls berücksichtigen. Die Verwendung des Mittelwertes der Ist-Zeiten als *Plan-Zeit* eignet sich somit sehr gut für diesen Zweck, da er die tatsächlichen Vorgänge am besten widerspiegelt. Als *Soll-Zeit* ist er Wert jedoch ungeeignet, da er prinzipbedingt keine Verbesserungspotenziale aufdeckt.

Der Modalwert der Ist-Zeiten eignet sich als *Plan-Zeit* nicht so gut wie der Mittelwert, da er Ausreißer nicht berücksichtigt. Allerdings kann er als *Soll-Zeit* Potenzial im Ist-Ablauf durch einen Vergleich mit den Ist-Zeiten aufdecken. Dieser Vergleich verdeutlicht dann insbesondere die Auswirkungen der Ausreißer auf die Ist-Zeiten.

Die Ableitung aus den Ist-Zeiten ist vollständig automatisierbar und erfordert somit keinen manuellen Aufwand. Ein Nachteil gegenüber den anderen Varianten ist, dass er keinen sinnvollen Soll-Ist-Vergleich ermöglicht, wenn der Modalwert dem Mittelwert entspricht.

### Auswahl der Varianten

Tabelle 4-4 fasst die Varianten der Plan-Zeitbestimmung zusammen und zeigt, welche Anforderungen sie erfüllen.

**Tabelle 4-4 Varianten der Plan-Zeitbestimmung**

Variante	Erfüllung der Anforderungen		
	eignet sich für <i>Soll-Zeiten</i>	eignet sich für <i>Plan-Zeiten</i> i.e.S.	automatisiert durchführbar
Teilautomatisierung des MTM-1-Verfahrens	ja	nein	nein
Vereinfachung des MTM-1-Verfahrens	ja (nur bei Bewegungen)	nein	ja
Ableitung von Plan-Zeiten aus den Ist-Zeiten – Mittelwert	nein	ja	ja
Ableitung von Plan-Zeiten aus den Ist-Zeiten – Modalwert	ja	nein	ja

Das Verfahren, das sich am besten zur Bestimmung des Verbesserungspotenzials über einen Soll-Ist-Vergleich eignet, ist das vereinfachte MTM-1-Verfahren. Es eignet sich jedoch lediglich für Bewegungen. Daher verwendet es die Methodik nur zur Bestimmung der *Soll-Zeiten* von Bewegungen. Die *Soll-Zeiten* der Stillstände ermittelt es mit dem Modalwert der Ist-Zeiten.

Der Mittelwert der Ist-Zeiten spiegelt die realen Abläufe am besten wider und eignet sich somit am besten für die Planung von Produktionsprozessen. Die Methodik verwendet diesen Wert somit zur Bestimmung von *Plan-Zeiten*.

### Ergebnis der Plan-Zeitbestimmung

Mit den ausgewählten Verfahren liefert die Plan-Zeitbestimmung somit zwei Werte für jede Zustandsgruppe. Einen Soll-Wert, der sich für einen Vergleich mit der Ist-Zeit eignet und so das Potenzial von Verbesserungsmaßnahmen aufzeigen kann, und einen Wert für die Planung, aus dem man verlässliche Zykluszeiten ableiten kann.

Tabelle 4-5 zeigt die erfassten Ist-Zeiten und die dazugehörigen bestimmten Plan-Zeiten des ermittelten Ablaufs (vgl. Tabelle 3-12). Dabei wurden die Soll-Zeiten der Bewegungen (Ablaufschritte 1,3,5,7,9,11) mithilfe des *vereinfachten MTM-1-Verfahrens* bestimmt und die Soll-Zeiten der Stillstände (Ablaufschritte 2,4,6,8,10,12) aus den *Modalwerten der Ist-Zeiten*. Die Zeiten für die Planung wurden ebenfalls aus den *Ist-Zeiten abgeleitet (Mittelwert)*. Für die Analyse der Produktivität (Kapitel 5) vergleicht die Methodik insbesondere Ist-Zeiten und Soll-Zeiten. Die aus den Ist-Zeiten abgeleiteten Plan-Zeiten verwendet sie dafür nicht.

**Tabelle 4-5 Erfasste Ist-Zeiten und bestimmte Plan-Zeiten für einen Ablauf**

Ablaufschritt	Zustandsgruppe		Ist-Zeit $Z_{g,m}$ [s]	Soll-Zeit $Z_{g,Soll}$ [s]	Plan-Zeit $Z_{g,Plan}$ [s]
	$g$ [-]	Bezeichnung			
1	1	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 3	0,5	0,6	0,5
2	2	Arm nicht bewegen bei Cluster 3	0,4	0,3	0,4
3	3	Arm bewegen von Cluster 3 zu Cluster 1	0,5	0,6	0,5
4	4	Arm nicht bewegen bei Cluster 1	4,2	3,0	4,2
5	5	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 2	0,6	0,7	0,6
6	6	Arm nicht bewegen bei Cluster 2	0,5	0,4	0,5
7	7	Arm bewegen von Cluster 2 zu Cluster 1	0,7	0,7	0,7
8	4	Arm nicht bewegen bei Cluster 1	4,2	3,0	4,2
9	5	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 2	0,6	0,7	0,6
10	6	Arm nicht bewegen bei Cluster 2	0,5	0,4	0,5
11	7	Arm bewegen von Cluster 2 zu Cluster 1	0,7	0,7	0,7
12	4	Arm nicht bewegen bei Cluster 1	4,2	3,0	4,2
<b>Summe</b>			<b>17,6</b>	<b>14,1</b>	<b>17,6</b>

13490

Analog zur Berechnung der Zykluszeit des Ist-Ablaufs ist es nun möglich, die Zykluszeit des Soll-Ablaufs zu bestimmen (vgl. Formel 4-1).

$$Z_{\text{Ablauf,Soll}} = \sum Z_{g,\text{Soll}} \quad \forall \text{ relevanten } g \quad (4-1)$$

- $Z_{\text{Ablauf,Soll}}$  : Soll-Zeitdauer des Ablaufs [s]  
 $Z_{g,\text{Soll}}$  : Soll-Zeitdauer von Zustandsgruppe g [s]  
g : Zustandsgruppe [-]



## 5 Analyse der Produktivität (Aufwandsartenanalyse)

Kapitel 3 stellt das Vorgehen zur Erfassung von Ist-Zeiten und Kapitel 4 das Vorgehen zur Bestimmung von Plan-Zeiten vor. Dieses Kapitel beschreibt darauf aufbauend, wie die Methodik unter Verwendung dieser ermittelten Zeiten die Produktivität der aufgenommenen Abläufe bewertet. Dafür benötigt sie neben den ermittelten Zeiten hier ebenfalls Bewegungsdaten. Es ist für die Analyse der Produktivität jedoch irrelevant, mit welcher Technologie man diese erfasst. Die entwickelte Aufwandsartenanalyse basiert dabei auf der Primär-Sekundär-Analyse (PSA, vgl. Abschnitt 2.4.2).

Die PSA unterscheidet zwischen wertschöpfenden (primären) und nicht-wertschöpfenden (sekundären) Aufwänden. Im Gegensatz dazu definiert die Aufwandsartenanalyse vier unterschiedliche Zeitannteile, die Abschnitt 5.1 beschreibt. Anschließend erläutert Abschnitt 5.2 das Vorgehen zur Bestimmung der einzelnen Anteile, bevor Abschnitt 5.3 darstellt, wie die Methode die Produktivität mit den ermittelten Anteilen bewertet. Abschließend zeigt Abschnitt 5.4, welche Verbesserungsansätze man aus den gewonnenen Informationen ableiten werden können.

### 5.1 Definition der Zeitannteile

Die PSA mit ihrer Einteilung in primäre und sekundäre Aufwände untersucht den Plan-Ablauf einer Bewegung. Sie identifiziert deshalb nur Potenziale, die durch eine ungünstige Gestaltung der Arbeitsaufgabe entstehen. Die Erfassung der Ist-Abläufe mit der Kinect erlaubt es jedoch, die Arbeitszeit aussagekräftiger zu bewerten. Daher passt die Aufwandsartenanalyse die Definitionen der Primär- und Sekundäraufwände an und definiert zusätzlich Geschwindigkeitsverluste und Tertiäraufwände.

#### Primäraufwand

Der Primäraufwand eines Arbeitsschrittes ist der nötige Zeitbedarf, wenn der Arbeitsplatz günstig gestaltet ist und der Mitarbeiter den Schritt in Soll-Geschwindigkeit durchführt. Ein Arbeitsplatz ist dabei günstig gestaltet, wenn die Bewegungslängen aller Bewegungen so kurz wie möglich gehalten sind. Durchführung in Soll-Geschwindigkeit bedeutet, dass die Ist-Zeitdauer eines Arbeitsschrittes der Soll-Zeitdauer entspricht.

Die Summe der Primäraufwände aller Arbeitsschritte im Beobachtungszeitraum ergibt den Gesamtprimäraufwand.

#### Sekundäraufwand

Der Sekundäraufwand eines Arbeitsschrittes ist der zeitliche Mehraufwand, der durch ein ungünstiges Layout des Arbeitsplatzes entsteht. Dieser Mehraufwand entsteht somit vorrangig durch unnötig große Bewegungslängen. Für eine ‚Hinlangen‘-Bewegung bedeutet dies beispielsweise, dass die verwendete Materialkiste weiter als nötig vom Montageplatz entfernt ist.

Die Summe der Sekundäraufwände aller Arbeitsschritte im Beobachtungszeitraum ergibt den Gesamtsekundäraufwand. Primär- und Sekundäraufwand eines Arbeitsschrittes entsprechen dann der Soll-Zeit des Schrittes.

### Geschwindigkeitsverlust

Primär- und Sekundäraufwand beschreiben den Zeitaufwand für einen Arbeitsschritt bei Soll-Geschwindigkeit. Der Geschwindigkeitsverlust stellt demnach den Mehraufwand dar, der durch eine kleinere Geschwindigkeit bei der Durchführung entsteht. So führt ein Mitarbeiter eine ‚Hinlangen‘-Bewegung beispielsweise langsamer durch, weil er ungeübt ist oder weil die Arbeitsaufgabe ungünstig gestaltet ist.

Die Summe der Geschwindigkeitsverluste aller Arbeitsschritte ergibt den Gesamtgeschwindigkeitsverlust. Im Gegensatz zu den anderen Aufwänden können Geschwindigkeitsverluste einzelner Arbeitsschritte negativ sein, wenn der Mitarbeiter diese schneller durchführt als geplant. Ebenso kann die Summe der Geschwindigkeitsverluste negativ sein. Die Summe aus Primär- und Sekundäraufwand sowie Geschwindigkeitsverlust eines Arbeitsschrittes ergibt die Ist-Zeit des Schrittes.

### Tertiäraufwand

Im Gegensatz zur klassischen PSA treten bei der Aufnahme realer Arbeitsabläufe neben den vorgesehenen Ablaufschritten Zustände auf, die nicht zur Arbeitsaufgabe gehören und somit nicht wertschöpfend sind. Die Aufwandsartenanalyse bezeichnet diese Arbeitsschritte als Tertiäraufwand. Dies umfasst bei einer Montageaufgabe beispielsweise Fehlerkorrekturen oder Unterbrechungen der Arbeitsaufgabe.

Die Summe dieser Ablaufschritte ergibt den Gesamttertiäraufwand. Die Summe aller Aufwandsarten entspricht der Erfassungszeit.

## **5.2 Bestimmung der Zeitanteile**

Dieser Abschnitt beschreibt, wie man die unterschiedlichen Aufwände mit den zuvor ermittelten Daten bestimmen kann. Zunächst bestimmt der Anwender die unterschiedlichen Verlustarten, bis die wertschöpfenden Anteile (der Primäraufwand) übrigbleiben. Dazu ermittelt er zunächst, welche Zustände nicht zum Arbeitsablauf gehören (Tertiäraufwand, Abschnitt 5.2.1). Anschließend ermittelt er den Geschwindigkeitsverlust der einzelnen Zustände (Abschnitt 5.2.3). Den Abschluss bildet die Unterscheidung zwischen Primär- und Sekundäraufwand (Abschnitt 5.2.3).

### **5.2.1 Bestimmung des Tertiäraufwands**

Der erste Schritt bei der Durchführung der Aufwandsartenanalyse ist die Bestimmung der Zustände, die zur Arbeitsaufgabe gehören und somit als wertschöpfend oder zumindest als erforderlich erachtet werden. Alle übrigen Zustände gehören nicht zur Arbeitsaufgabe und sind daher Tertiäraufwand. Diese Unterscheidung kann auf drei verschiedene Arten erfolgen:

- 1) Manuelle Auswahl von Zuständen, die zur Arbeitsaufgabe gehören und keinen Tertiäraufwand darstellen,
- 2) Manuelle Auswahl von Zustandsgruppen, die zur Arbeitsaufgabe gehören und keinen Tertiäraufwand darstellen und
- 3) Zuordnung aller Schritte eines Ablaufs (vgl. Abschnitt 3.6) zu den wertschöpfenden Arbeitsschritten und Zuordnung aller restlichen Zustandsgruppen zu den Tertiäraufwänden.

### Manuelle Auswahl von Zuständen

Bei der manuellen Auswahl von Zuständen untersucht der Methodenanwender alle erkannten Zustände einzeln daraufhin, ob sie zur Arbeitsaufgabe gehören. Dies kann beispielsweise unter Verwendung des aufgenommenen Videos erfolgen.

Bei dieser Variante kann der Methodenanwender sicherstellen, dass alle Zustände korrekt zugeordnet sind. Nachteilig dabei ist der äußerst hohe manuelle Aufwand, der die Anwendung deutlich erschwert.

### Manuelle Auswahl von Zustandsgruppen

Bei der manuellen Auswahl von Zustandsgruppen prüft der Anwender die zuvor ermittelten Zustandsgruppen (vgl. Abschnitt 3.5) daraufhin, ob sie wertschöpfende Arbeitsschritte darstellen. Auch hier kann er das aufgenommene Video verwenden, um einzelne Zustandsgruppen gezielt zu untersuchen.

Im Gegensatz zur manuellen Auswahl von einzelnen Zuständen ist diese Variante durch die zuvor erfolgte Zusammenfassung zu Gruppen deutlich aufwandsärmer. Ein Nachteil dieses Ansatzes ist jedoch, dass man einzelne Zustände falsch zuordnen kann. So gehört beispielsweise ein ‚Hinlangen‘ vom Montageplatz zu einer Materialkiste in der Regel zur Montageaufgabe. Dies muss jedoch nicht immer der Fall sein.

### Zuordnung aller Ablaufschritte eines Ablaufs

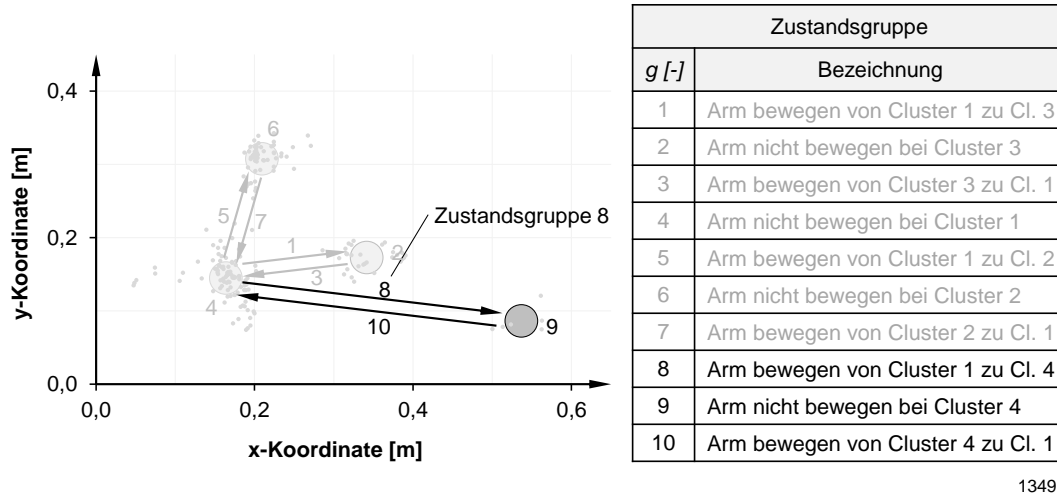
Bei der Zuordnung über einen erkannten Ablauf erfolgt keine manuelle Prüfung. Man geht stattdessen davon aus, dass alle Schritte eines Ablaufs (vgl. Abschnitt 3.6) wertschöpfend oder zumindest erforderlich sind und somit keinen Tertiäraufwand darstellen.

Diese Variante hat den Vorteil, dass sie keinerlei Aufwand für den Methodenanwender erzeugt. Die Bewertung erfolgt hierbei automatisch. Nachteil dieser Variante ist, dass die Schritte des Ablaufs nicht daraufhin geprüft werden, ob sie tatsächlich wertschöpfend sind. So kann der Mitarbeiter beispielsweise gewisse Bewegungen zwar in jedem Zyklus durchführen, diese können aber dennoch nicht-wertschöpfend sein und somit Tertiäraufwand darstellen.

### Auswahl einer Variante und Ergebnis der Bestimmung der Tertiäranteile

Die Zuordnung über den ermittelten Ablauf eignet sich am besten für eine aufwandsarme Methodik, da sie keinen zusätzlichen manuellen Aufwand erzeugt. Daher sollte der Methodenanwender diese Variante immer dann anwenden, wenn er zuvor ein Ablauf ermittelt hat. Ist dies nicht der Fall, sollte die Zuordnung über die manuelle Auswahl von Zustandsgruppen erfolgen. Hierbei entsteht zwar manueller Aufwand, dafür ist diese Variante in allen Einsatzszenarien anwendbar. Die Zuordnung über die Auswahl einzelner Zustände eignet sich sehr gut für Detailanalysen spezifischer Arbeitsschritte. Aufgrund des damit verbundenen hohen Aufwandes eignet sie sich jedoch nur für kurze Arbeitsfolgen.

Ergebnis dieses Schrittes ist die Einteilung der Zustände in tertiäre und nicht-tertiäre Aufwände. Abbildung 5-1 stellt das Ergebnis einer Zuordnung über den erkannten Ablauf grafisch dar. Die Zustandsgruppen 8, 9 und 10 wurden dabei als Tertiäraufwand identifiziert. In der Beispielaufnahme legt der Mitarbeiter bei diesen Zustandsgruppen fehlerhafte Teile ab.



13491

Abbildung 5-1 Tertiäre Zustandsgruppen einer Beobachtung

Nach Bestimmung der tertiären Zustände kann man nun den Gesamttertiäraufwand ermitteln (vgl. Formel 5-1) sowie der Anteil dieses Aufwandes an der Erfassungszeit (vgl. Formel 5-2).

$$Z_{TA,Ges} = \sum_g \left( \sum_{h=1}^{H_g} Z_{g,h} \right) \forall \text{ tertiären } g \quad (5-1)$$

$$ZA_{TA} = \frac{Z_{TA,Ges}}{Z_{KE,kum}} \quad (5-2)$$

- $Z_{TA,Ges}$  : Gesamttertiäraufwand [min]
- $H_g$  : Anzahl erfasster Zustände von Zustandsgruppe g [-]
- $Z_{g,h}$  : Zeitdauer des h-ten Auftreten von Zustandsgruppe g [s]
- $ZA_{TA}$  : Anteil des Tertiäraufwandes an der Erfassungszeit [-]
- $Z_{KE,kum}$  : kumulierte Dauer korrekt erfasster Abläufe [min]

### 5.2.2 Bestimmung des Geschwindigkeitsverlusts

Nächster Schritt bei Durchführung der Aufwandsartenanalyse ist die Bestimmung der Geschwindigkeitsverluste. Dies erfolgt durch Gegenüberstellung von Soll- und Ist-Zeiten der nicht-tertiären Zustände. Für jeden Zustand einer wertschöpfenden Zustandsgruppe kann man so den Zeitverlust durch Abweichung von der Soll-Geschwindigkeit bestimmen (vgl. Formel 5-3). Ein positiver Wert spiegelt hierbei eine niedrigere Geschwindigkeit wieder, während ein negativer Wert für eine erhöhte Geschwindigkeit steht. Als leicht verständliche Größe beschreibt die relative Geschwindigkeit einer Bewegung das Verhältnis von Soll- und Ist-Zeitdauer (vgl. Formel 5-4). Eine relative Geschwindigkeit von 50 % bedeutet beispielsweise, dass die Ist-Zeitdauer doppelt so lang wie die Soll-Zeitdauer ist.

$$Z_{g,h,GV} = Z_{g,h} - Z_{g,Soll} \quad (5-3)$$

$$G_{rel,g,h} = \frac{Z_{g,Soll}}{Z_{g,h}} \quad (5-4)$$

- $Z_{g,h,GV}$  : Geschwindigkeitsverlust des  $h$ -ten Auftreten von Zustandsgruppe  $g$  [s]  
 $G_{rel,g,h}$  : relative Geschwindigkeit des  $h$ -ten Auftreten von Zustandsgruppe  $g$  [-]  
 $Z_{g,h}$  : Zeitdauer des  $h$ -ten Auftreten von Zustandsgruppe  $g$  [s]  
 $Z_{g,Soll}$  : Soll-Zeitdauer von Zustandsgruppe  $g$  [s]

Nachdem man den Geschwindigkeitsverlust für jedes Auftreten einer Zustandsgruppe bestimmt hat, kann man den mittleren Geschwindigkeitsverlust (vgl. Formel 5-5) sowie die mittlere relative Geschwindigkeit der Zustandsgruppe ermitteln (vgl. Formel 5-6).

$$Z_{g,GV,m} = \frac{1}{H_g} \times \sum_{h=1}^{H_g} Z_{g,h,GV} \quad (5-5)$$

$$G_{rel,g} = \frac{Z_{g,Soll}}{Z_{g,m}} = \frac{Z_{g,m} - Z_{g,GV,m}}{Z_{g,m}} \quad (5-6)$$

- $Z_{g,GV,m}$  : mittlerer Geschwindigkeitsverlust von Zustandsgruppe  $g$  [s]  
 $G_{rel,g}$  : relative Geschwindigkeit von Zustandsgruppe  $g$  [-]  
 $H_g$  : Anzahl erfasster Zustände von Zustandsgruppe  $g$  [-]  
 $Z_{g,h,GV}$  : Geschwindigkeitsverlust des  $h$ -ten Auftreten von Zustandsgruppe  $g$  [s]  
 $Z_{g,Soll}$  : Soll-Zeitdauer von Zustandsgruppe  $g$  [s]  
 $Z_{g,m}$  : mittlere Zeitdauer von Zustandsgruppe  $g$  [s]

Zudem kann man den Geschwindigkeitsverlust für einen kompletten Ablauf bestimmen. Dies geschieht, indem man die einzelnen Geschwindigkeitsverluste addiert (vgl. Formel 5-7). Analog zu Formel 5-6 kann man hier ebenfalls eine relative Geschwindigkeit für den Ablauf bestimmen (vgl. Formel 5-8).

$$Z_{GV,Ablauf} = \sum_g Z_{g,GV,m} \quad \forall g \text{ des Ablaufs} \quad (5-7)$$

$$G_{rel,Ablauf} = \frac{Z_{Ablauf,Soll}}{Z_{Ablauf}} = \frac{Z_{Ablauf} - Z_{GV,Ablauf}}{Z_{Ablauf}} \quad (5-8)$$

- $Z_{GV,Ablauf}$  : Geschwindigkeitsverlust des Ablaufs [s]  
 $G_{rel,Ablauf}$  : relative Geschwindigkeit des Ablaufs [-]  
 $Z_{g,GV,m}$  : mittlerer Geschwindigkeitsverlust von Zustandsgruppe  $g$  [s]  
 $Z_{Ablauf,Soll}$  : Soll-Zeitdauer des Ablaufs [s]  
 $Z_{Ablauf}$  : Zeitdauer des Ablaufs [s]

Des Weiteren kann man die gesamte Zeitdauer aller Geschwindigkeitsverluste im Erfassungszeitraum (vgl. Formel 5-9) sowie den Anteil an der Erfassungszeit (vgl. Formel 5-10) bestimmen.

$$Z_{GV,Ges} = \sum_g \left( \sum_{h=1}^{H_g} Z_{g,h,GV} \right) \forall \text{ nicht-tertiären } g \quad (5-9)$$

$$ZA_{GV} = \frac{Z_{GV,Ges}}{Z_{KE,kum}} \quad (5-10)$$

- $Z_{GV,Ges}$  : Gesamtgeschwindigkeitsverlust [min]
- $ZA_{GV}$  : Anteil des Geschwindigkeitsverlustes an der Erfassungszeit [-]
- $H_g$  : Anzahl erfasster Zustände von Zustandsgruppe  $g$  [-]
- $Z_{g,h,GV}$  : Geschwindigkeitsverlust des  $h$ -ten Auftreten von Zustandsgruppe  $g$  [s]
- $Z_{KE,kum}$  : kumulierte Dauer korrekt erfasster Abläufe [min]

Tabelle 5-1 zeigt das Ergebnis der Berechnung der Geschwindigkeitsverluste für den ermittelten Ablauf. Dafür listet sie die Ist- und Soll-Zeiten sowie die Geschwindigkeitsverluste je Ablaufschritt auf.

**Tabelle 5-1 Ablaufschritte im Standardablauf mit Geschwindigkeitsverlusten**

Ablaufschritt	Zustandsgruppe		Ist-Zeit $Z_{g,m}$ [s]	Soll-Zeit $Z_{g,Soll}$ [s]	GV $Z_{g,GV,m}$ [s]
	$g$ [-]	Bezeichnung			
1	1	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 3	0,5	0,6	-0,1
2	2	Arm nicht bewegen bei Cluster 3	0,4	0,3	0,1
3	3	Arm bewegen von Cluster 3 zu Cluster 1	0,5	0,6	-0,1
4	4	Arm nicht bewegen bei Cluster 1	4,2	3,0	1,2
5	5	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 2	0,6	0,7	-0,1
6	6	Arm nicht bewegen bei Cluster 2	0,5	0,4	0,1
7	7	Arm bewegen von Cluster 2 zu Cluster 1	0,7	0,7	0,0
8	4	Arm nicht bewegen bei Cluster 1	4,2	3,0	1,2
9	5	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 2	0,6	0,7	-0,1
10	6	Arm nicht bewegen bei Cluster 2	0,5	0,4	0,1
11	7	Arm bewegen von Cluster 2 zu Cluster 1	0,7	0,7	0,0
12	4	Arm nicht bewegen bei Cluster 1	4,2	3,0	1,2
<b>Summe</b>			17,6	14,1	3,5

13492

### 5.2.3 Bestimmung von Sekundär- und Primäraufwand

Letzter Schritt der Aufwandsartenanalyse ist die Bestimmung des Sekundäraufwandes der einzelnen Ablaufschritte. Der anschließend verbleibende Aufwand ist dann den Primäraufwand. Unter Sekundäraufwand versteht die Analyse Aufwände, die durch ungünstige Gestaltung des Layouts am Arbeitsplatz entstehen, also durch unnötig lange Bewegungen. Sie identifiziert somit keinen Sekundäraufwand bei Stillständen.

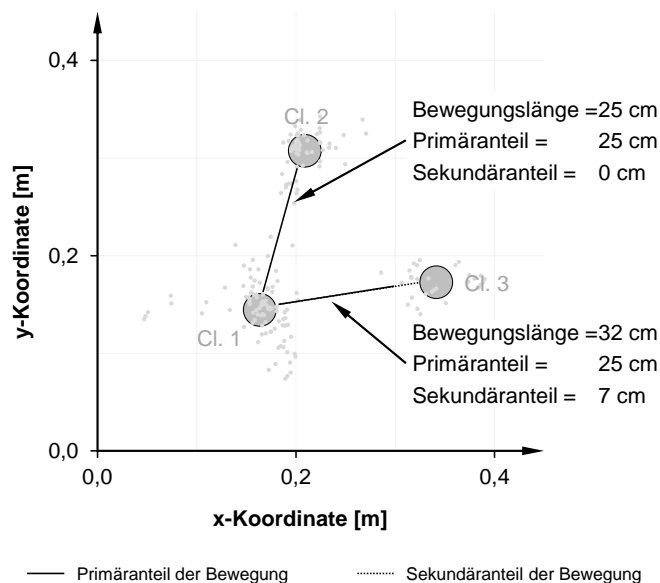
Für die Bestimmung des Sekundäraufwands muss man ermitteln, welcher Anteil der Bewegungen produktiv ist. Dafür gibt es die folgenden Ansätze:

- Bestimmung der Mindestbewegungslänge:
  - in Anlehnung an die klassische PSA,
  - manuelle Auswahl der kürzesten sinnvollen Bewegung,
- Definition sinnvoller Bewegungsräume:
  - Bestimmung des ergonomisch günstigen Greifraumes,
  - manuelle Definition des produktiven Arbeitsraumes.

### Ermittlung der Mindestbewegungslänge in Anlehnung an die PSA

Bei der klassischen PSA bestimmt der Anwender die Mindestbewegungslänge, indem er zunächst den Fügepunkt festlegt und anschließend die Distanz zur nächsten Materialkiste ermittelt [vgl. Lott12, S. 54ff.]. Diese Distanz ist dann die Primärreichweite. Der Zusatzaufwand bei allen anderen Bewegungen, der durch eine höhere Bewegungslänge entsteht, ist somit der Sekundäraufwand.

Die Erfassung der Vorgänge mit der Kinect erlaubt es, das Vorgehen der PSA weitestgehend zu automatisieren. Das Vorgehen erfolgt hierbei in zwei Teilschritten. Zunächst bestimmt man den Fügebereich, das heißt den Bereich, indem die eigentliche Montage erfolgt. In der Regel ist dies der Cluster mit den meisten markanten Positionen. Der Mittelpunkt dieses Clusters ist dann der Fügepunkt. Für die Bestimmung der nächsten Materialkiste prüft man für alle anderen Cluster des ermittelten Ablaufs, welcher Cluster die kürzeste Distanz zum Fügepunkt aufweist. Diese Distanz ist dann die Mindestbewegungslänge. Abbildung 5-2 verdeutlicht dieses Vorgehen.



13493

**Abbildung 5-2 Bestimmung der Mindestbewegungslänge in Anlehnung an die klassische PSA [vgl. Lott12, S. 54ff.]**

Die dargestellten Schritte des Vorgehens können bei vielen Montageabläufen automatisiert durchgeführt werden. Im nicht idealen Fall ermittelt das Vorgehen jedoch eventuell nicht den gewünschten Abstand. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn der Cluster mit den meisten markanten Positionen nicht der Fügebereich ist oder wenn der nächste Cluster nicht die nächste Materialkiste ist. In diesem Fall muss der Anwender die entsprechend richtigen Bereiche manuell auswählen. Ein weiteres Problem dieses Ansatzes ist, dass er eine Montageaufgabe voraussetzt, die über einen Fügebereich verfügt. Zudem ist das Vorgehen auf Armbewegungen zugeschnitten und kann deshalb nicht auf die Analyse von Körperbewegungen übertragen werden.

### Manuelle Auswahl der kürzesten sinnvollen Bewegung

Eine Alternative zur Bestimmung der Mindestlänge in Anlehnung an die PSA ist die manuelle Auswahl der kürzesten sinnvollen Bewegung. Hierbei prüft der Anwender die Bewegungen des ermittelten Ablaufs, ob sie sich als Mindestbewegungslänge für die Ermittlung des Sekundäraufwands eignen. Dafür gilt, dass man die anderen Bewegungen zumindest theoretisch sinnvoll auf die Länge der Mindestbewegung reduzieren kann. So kann man beispielsweise in einem Fertigungsbereich mit großen Drehmaschinen nicht alle Arbeitsstationen so anordnen, dass nur einzelne Schritte von Station zu Station notwendig sind. Nachdem der Anwender die Bewegung ausgewählt hat, dient ihre Länge als Mindestbewegungslänge, um den Sekundäraufwand der anderen Bewegungen zu bestimmen.

Das manuelle Vorgehen ermöglicht die Anwendung bei allen Analysen und Arbeitsaufgaben, erfordert jedoch dabei manuellen Aufwand. Dieser Aufwand ist jedoch nicht besonders hoch. Des Weiteren muss der Methodenanwender in der Lage sein, die kürzeste sinnvolle Bewegung richtig auszuwählen. Wenn dies der Fall ist, kann man mit dieser Variante gute Ergebnisse erzielen.

### Definition des ergonomisch günstigen Griffraumes

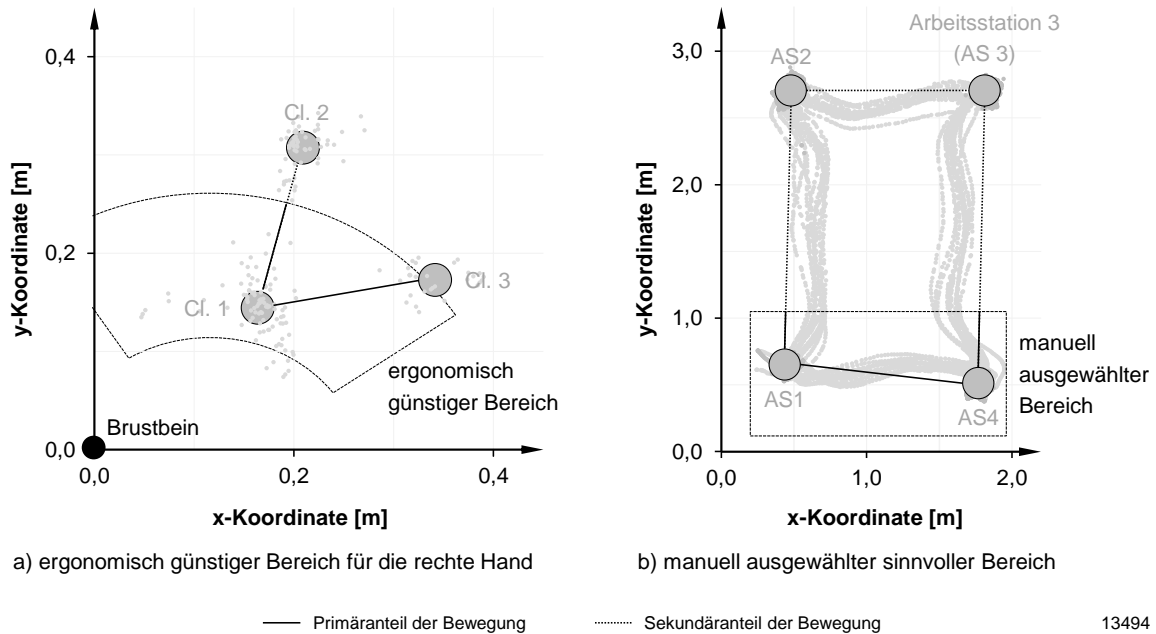
Die Bestimmung des primären Aufwandes einer Bewegung muss nicht ausschließlich durch den Vergleich mit einer Mindestbewegungslänge erfolgen. Stattdessen kann man alternativ prüfen, ob sie in einem sinnvollen Bewegungsraum stattfindet. Eine Möglichkeit, einen solchen Bewegungsraum zu definieren, ist die Ableitung aus ergonomischen Gesichtspunkten.

Für Armbewegungen an einem Arbeitsplatz existieren ergonomische Gestaltungsrichtlinien. Diese geben an, welche Bereiche günstig für den menschlichen Körper sind und welche nicht [vgl. VDI80, S.68f., Land07, S. 156f.]. Man kann diesen ergonomisch günstigen Bereich nun als sinnvollen Bewegungsraum verwenden (vgl. Abbildung 5-3a). Der Anteil der Bewegung, der innerhalb dieses Raums erfolgt, ist dann der Primäranteil. Der außerhalb des Raums erfolgte Anteil ist demnach der Sekundäranteil.

Vorteilhaft bei diesem Ansatz ist, dass kein manueller Input vom Anwender notwendig ist. Zudem ist dieser Ansatz im Gegensatz zur Bestimmung einer Mindestbewegungslänge unabhängig von der vorliegenden Gestaltung der Arbeitsaufgabe. Er basiert stattdessen auf Erkenntnissen über Risiken für die Mitarbeiter. Allerdings ist die Anwendung dieses Ansatzes stark eingeschränkt. Zum einen identifiziert er keinen Sekundäraufwand bei Arbeitsaufgaben, die nur wenig Platz einnehmen. Zum anderen identifiziert er bei größerem Platzbedarf fast ausschließlich Sekundäraufwand. Zudem kann man ihn nur bei der Analyse von Armbewegungen einsetzen.

Manuelle Definition des produktiven Arbeitsraumes

Eine weitere Möglichkeit zur Definition eines sinnvollen Arbeitsraumes ist es, diesen Raum manuell festzulegen. Dazu legt der Methodenanwender Bereiche fest, in denen Bewegungen produktiv sind. Dieses Vorgehen ist zum Beispiel sinnvoll, wenn ein definierter Arbeitsplatz für eine Arbeitsaufgabe vorgesehen ist und Bewegungen zu anderen Orten als Verschwendung angesehen werden. Abbildung 5-3b verdeutlicht dies am Beispiel einer Analyse von Körperbewegungen.



13494

**Abbildung 5-3 Darstellung sinnvoller Bewegungsräume**

Auch hier ermöglicht die manuelle Vorgabe die Durchführung bei allen Anwendungsfällen. Analog ist damit jedoch manueller Aufwand verbunden. Zudem beeinflusst auch hier der Anwender mit seiner Auswahl die Güte des Ergebnisses.

Auswahl des Vorgehens und Ergebnis

Die Definition sinnvoller Arbeitsräume eignet sich nur bedingt dazu, Produktivitätspotenziale zu erkennen. Eine Ableitung aus ergonomischen Gesichtspunkten offenbart vor allem Schwachstellen bei der körperlichen Belastung der Mitarbeiter und somit nicht zwangsläufig Produktivitätspotenziale. Die manuelle Definition durch den Anwender wiederum erfolgt zu einem gewissen Teil willkürlich. Daher verwendet die Methodik bevorzugt die Ansätze, die eine Mindestbewegungslänge bestimmen. Wenn möglich, erfolgt dies basierend auf der klassischen PSA. Ist dies nicht möglich, legt der Methodenanwender die Mindestbewegungslänge manuell fest.

Mit der ermittelten Mindestbewegungslänge kann man nun für jede Zustandsgruppe die Mindestbewegungszeit (den Primäraufwand) bestimmen. Dies geschieht, indem man die Soll-Zeit dieser Zustandsgruppe bei Verwendung der Mindestbewegungslänge ermittelt. Tabelle 5-2 verdeutlicht dieses Vorgehen mit aus dem MTM-1-Verfahren abgeleiteten Soll-Zeiten.

Sie zeigt beispielsweise für die Zustandsgruppe des ersten Ablaufschrittes die ermittelte Soll-Zeit für die tatsächliche Länge der Bewegung (R45B; 17,0 TMU). Die Mindestbewegungszeit für diese Zustandsgruppe ist dann die Soll-Zeit bei angepasster Bewegungslänge, aber bei unveränderten sonstigen Zeiteinflussgrößen (R30B; 12,8 TMU).

**Tabelle 5-2 Bestimmung des Primäraufwands von Bewegungen**

Ablaufschritt	Zustandsgruppe		Primär- und Sekundäraufwand			Primäraufwand		
	$g$ [-]	Bezeichnung	Strecke [cm]	MTM-1-Kodierung	Soll-Zeit [TMU]	Strecke [cm]	MTM-1-Kodierung	Soll-Zeit [TMU]
1	1	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 3	43,5	R45B	17,0	29,9	R30B	12,8
3	3	Arm bewegen von Cluster 3 zu Cluster 1	29,9	M30B	13,3		M30B	13,3
5	5	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 2	53,5	R55A	13,9		R30A	9,5
7	7	Arm bewegen von Cluster 2 zu Cluster 1	43,5	M45B	16,8		M30B	13,3

13495

Nach der Bestimmung des Primäraufwands für jede Zustandsgruppe kann man nun den Sekundäraufwand der Zustandsgruppen bestimmen (vgl. Formel 5-11).

$$Z_{g,SA} = Z_{g,Soll} - Z_{g,PA} \quad (5-11)$$

$Z_{g,SA}$  : Sekundäraufwand von Zustandsgruppe  $g$  [s]

$Z_{g,Soll}$  : Soll-Zeitdauer von Zustandsgruppe  $g$  [s]

$Z_{g,PA}$  : Primäraufwand von Zustandsgruppe  $g$  [s]

Zudem kann man wie bei den Geschwindigkeitsverlusten den Primäraufwand für einen kompletten Ablauf bestimmen (vgl. Formel 5-12). Dies kann nun ebenfalls für den gesamten Primäraufwand in der Erfassungszeit (vgl. Formel 5-13) sowie für den Anteil an der Erfassungszeit (vgl. Formel 5-14) erfolgen. Diese Werte kann man analog für den Sekundäraufwand berechnen.

$$Z_{PA,Ablauf} = \sum_g Z_{g,PA} \quad \forall g \text{ des Ablaufs} \quad (5-12)$$

$$Z_{PA,Ges} = \sum_g Z_{g,PA} \times H_g \quad \forall \text{ nicht-tertiären } g \quad (5-13)$$

$$ZA_{PA} = \frac{Z_{PA,Ges}}{Z_{KE,kum}} \quad (5-14)$$

$Z_{PA,Ablauf}$  : Primäraufwand des Ablaufs [s]

$Z_{PA,Ges}$  : Gesamtprimäraufwand [min]

$ZA_{PA}$  : Anteil des Primäraufwandes an der Erfassungszeit [-]

$Z_{g,PA}$  : Primäraufwand von Zustandsgruppe  $g$  [s]

$H_g$  : Anzahl erfasster Zustände von Zustandsgruppe  $g$  [-]

$Z_{KE,kum}$  : kumulierte Dauer korrekt erfasster Abläufe [min]

Ergebnis dieses Schrittes sind ermittelte Primär- und Sekundäraufwände sowie Geschwindigkeitsverluste für alle wertschöpfenden Zustandsgruppen. Tabelle 5-3 zeigt diese Aufwandarten für den ermittelten Ablauf.

**Tabelle 5-3 Aufwandarten für einen Ablauf**

Ablaufschritt	Zustandsgruppe		Ist-Zeit $Z_{g,m}$ [s]	PA $Z_{g,PA}$ [s]	SA $Z_{g,SA}$ [s]	GV $Z_{g,GV,m}$ [s]
	$g$ [-]	Bezeichnung				
1	1	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 3	0,5	0,5	0,1	-0,1
2	2	Arm nicht bewegen bei Cluster 3	0,4	0,3	-	0,1
3	3	Arm bewegen von Cluster 3 zu Cluster 1	0,5	0,5	0,1	-0,1
4	4	Arm nicht bewegen bei Cluster 1	4,2	3,0	-	1,2
5	5	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 2	0,6	0,5	0,2	-0,1
6	6	Arm nicht bewegen bei Cluster 2	0,5	0,4	-	0,1
7	7	Arm bewegen von Cluster 2 zu Cluster 1	0,7	0,5	0,2	0,0
8	4	Arm nicht bewegen bei Cluster 1	4,2	3,0	-	1,2
9	5	Arm bewegen von Cluster 1 zu Cluster 2	0,6	0,5	0,2	-0,1
10	6	Arm nicht bewegen bei Cluster 2	0,5	0,4	-	0,1
11	7	Arm bewegen von Cluster 2 zu Cluster 1	0,7	0,5	0,2	0,0
12	4	Arm nicht bewegen bei Cluster 1	4,2	3,0	-	1,2
<b>Summe</b>			17,6	13,1	1,0	3,5

13496

### 5.3 Auswertung

Nach der Ermittlung der einzelnen Aufwände kann man die Aufnahme auswerten, um Produktivitätspotenziale zu identifizieren. Dafür bietet die Aufwandsartenanalyse die folgenden Möglichkeiten:

- Auswertung einzelner Zustandsgruppen (Abschnitt 5.3.1),
- Auswertung eines Ablaufs (Abschnitt 5.3.2) und
- Auswertung der Erfassungszeit (Abschnitt 5.3.3).

Die einzelnen Auswertungsmöglichkeiten schließen sich dabei nicht aus, sondern ergänzen sich. So kann man beispielsweise mit der Auswertung eines Ablaufs oder der Erfassungszeit besonders zeitintensive Zustandsgruppen ermitteln. Mit der Auswertung einzelner Zustandsgruppen kann man diese dann gezielt untersuchen.

#### 5.3.1 Auswertung einer Zustandsgruppe

Für die Auswertung einzelner Zustandsgruppen liegen die folgenden Informationen vor:

- Zustandsdauern,
- Bewegungslängen bei Bewegungen und
- Primär- und Sekundäraufwand sowie Geschwindigkeitsverluste.

Diese Informationen liegen – mit Ausnahme von Primär- und Sekundäraufwand – für jedes Auftreten der Zustandsgruppe vor. Die Aufwandsartenanalyse schlägt damit die folgenden Darstellungsformen vor:

- Boxplot von Bewegungslänge beziehungsweise Zeitdauer und
- kombinierte Darstellung von Bewegungslängen und Zeitdauern.

### Boxplot von Bewegungslänge beziehungsweise Zeitdauer

Für jede Zustandsgruppe besteht durch die detaillierte Erfassung der Ist-Abläufe die Möglichkeit, die Verteilung der Zustandsdaten darzustellen (vgl. Abschnitt 3.7). Die Darstellung durch einen erweiterten Boxplot fasst diese Daten übersichtlich zusammen. Bei einem klassischen Boxplot werden der Medianwert, beide Quartile und beide Extremwerte dargestellt [vgl. Mitt12, S. 71ff.]. Diese Darstellung bietet sich bei der Aufwandsartenanalyse insbesondere für die Bewegungslänge (vgl. Abbildung 5-4a) und für die Zeitdauer (vgl. Abbildung 5-4b) an.

In dem dargestellten Beispiel der Bewegungslängen für eine ‚Arm bewegen‘-Bewegung (Abbildung 5-4a) ist zusätzlich zu den klassischen Werten eines Boxplots der Mittelwert sowie die Mindestbewegungslänge eingetragen. Mit dieser Form der Darstellung kann der Anwender schnell einfache Aussagen über die Verteilung treffen. In der Darstellung ist beispielsweise ersichtlich, dass die Bewegungslängen stark schwanken und stets über der Mindestbewegungslänge liegen. Starke Schwankungen können hier darauf hindeuten, dass Start und Ziel der Bewegung nicht ortskonstant sind. Dies kann beispielsweise durch einen variierenden Fügeort oder verschobene Materialkisten begründet sein.

Analog sind in Abbildung 5-4b die Zeitdauern der Bewegung dargestellt. Hier sind ebenfalls zusätzlich der Mittelwert sowie die Soll- und die Primär-Zeitdauer eingetragen. So kann der Anwender einfach feststellen, dass die Bewegung in der Regel länger dauert als die Soll-Zeit, diese zum Teil jedoch auch unterschreitet.

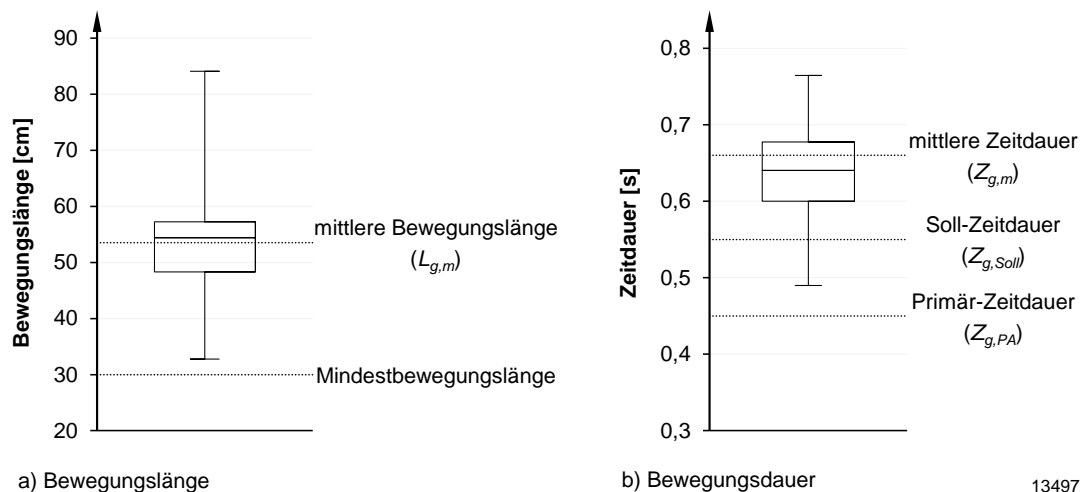
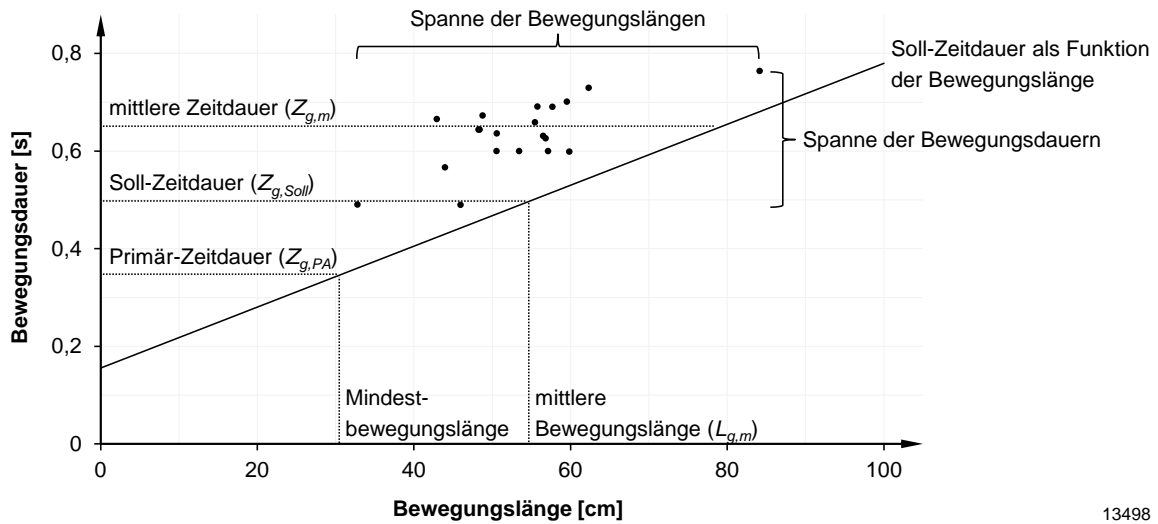


Abbildung 5-4 Boxplots zur Darstellung von Zustandsdaten

Kombinierte Darstellung von Bewegungslängen und Zeitdauern

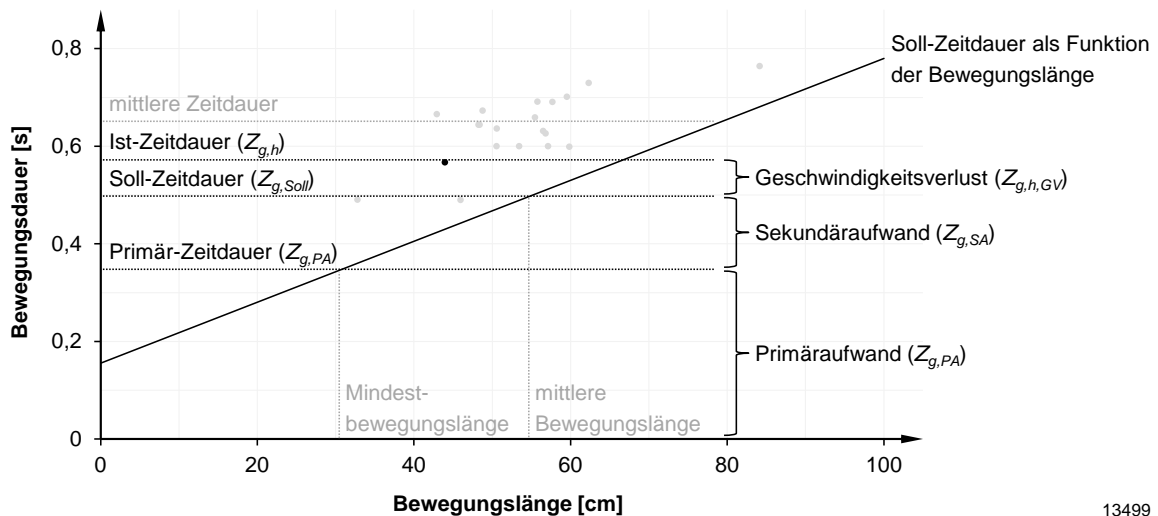
Beide Boxplot-Darstellungen eignen sich, um Verteilungen zu visualisieren. Neben dieser getrennten Darstellung von Bewegungslängen und Zeitdauern kann man diese auch gemeinsam abbilden (vgl. Abbildung 5-5). Hierbei stellt jeder einzelne Punkt ein Auftreten der Zustandsgruppe dar. Während die Soll-Zeit bei der Boxplot-Darstellung als ein Wert dargestellt ist, kann man sie hier als Funktion der Bewegungslänge darstellen. Die in den Boxplots dargestellten Informationen können hier ebenfalls aufgetragen werden.



13498

**Abbildung 5-5 Kombinierte Darstellung von Bewegungslängen und -dauern**

In dieser Darstellungsform kann man zudem die einzelnen Verlustarten grafisch darstellen. Abbildung 5-6 zeigt dies für einen der Punkte exemplarisch, um die Darstellung übersichtlich zu halten. In dieser Abbildung ist ersichtlich, dass nicht jedes Auftreten einer Zustandsgruppe eine einzelne Soll-Zeitdauer aufweist, sondern die Zustandsgruppe als Ganzes. Damit können Geschwindigkeitsverluste also auch aus Schwankungen in der Bewegungslänge resultieren.



13499

**Abbildung 5-6 Aufwandsarten in der Darstellung von Bewegungslängen und -dauern**

### 5.3.2 Auswertung eines Ablaufs

Für die Auswertung eines Ablaufs eignen sich die vorgestellten Darstellungsformen nur bedingt, da die Visualisierung aller Verteilungen eines Ablaufs unübersichtlich wäre. Statt der detaillierten Betrachtung aller Zustandsgruppen steht an dieser Stelle vielmehr der Vergleich der Zustandsgruppen im Vordergrund. Besonders relevante Informationen für diese Auswertung sind insbesondere die Aufwandsarten je Zustandsgruppe. Zusätzlich definiert die Aufwandsartenanalyse an dieser Stelle einen Wirkungsgrad in Anlehnung an die klassische PSA (vgl. Abschnitt 2.4.2). Sie schlägt hier die folgenden Darstellungsformen vor:

- Balkendiagramm der Aufwände,
- Vektordarstellung der Aufwände in Anlehnung an die PSA und
- Blockdarstellung der Aufwände und Geschwindigkeiten.

#### Berechnung des Wirkungsgrades eines Ablaufs

Ein zentrales Element der klassischen PSA zur Bewertung der Produktivität ist der Wirkungsgrad (vgl. Abschnitt 2.4.2). Die Aufwandsartenanalyse definiert diesen jedoch anders als die PSA. Man berechnet den Wirkungsgrad an dieser Stelle, indem man den Anteil der Primäraufwände am Gesamtaufwand des Ablaufs bestimmt (vgl. Formel 5-15).

$$W_{\text{Ablauf}} = \frac{Z_{PA,\text{Ablauf}}}{Z_{\text{Ablauf}}} \quad (5-15)$$

$W_{\text{Ablauf}}$  : Wirkungsgrad des Standardablaufs [-]  
 $Z_{PA,\text{Ablauf}}$  : Primäraufwand des Standardablaufs [s]  
 $Z_{\text{Ablauf}}$  : Zeitdauer des Standardablaufs [s]

#### Balkendiagramm der Aufwände

Eine übersichtliche Art der Darstellung aller Aufwände eines Ablaufs ist ein Balkendiagramm (vgl. Abbildung 5-7). Es visualisiert die zuvor bestimmten Aufwandsarten (vgl. Tabelle 5-3) für alle Zustandsgruppen.

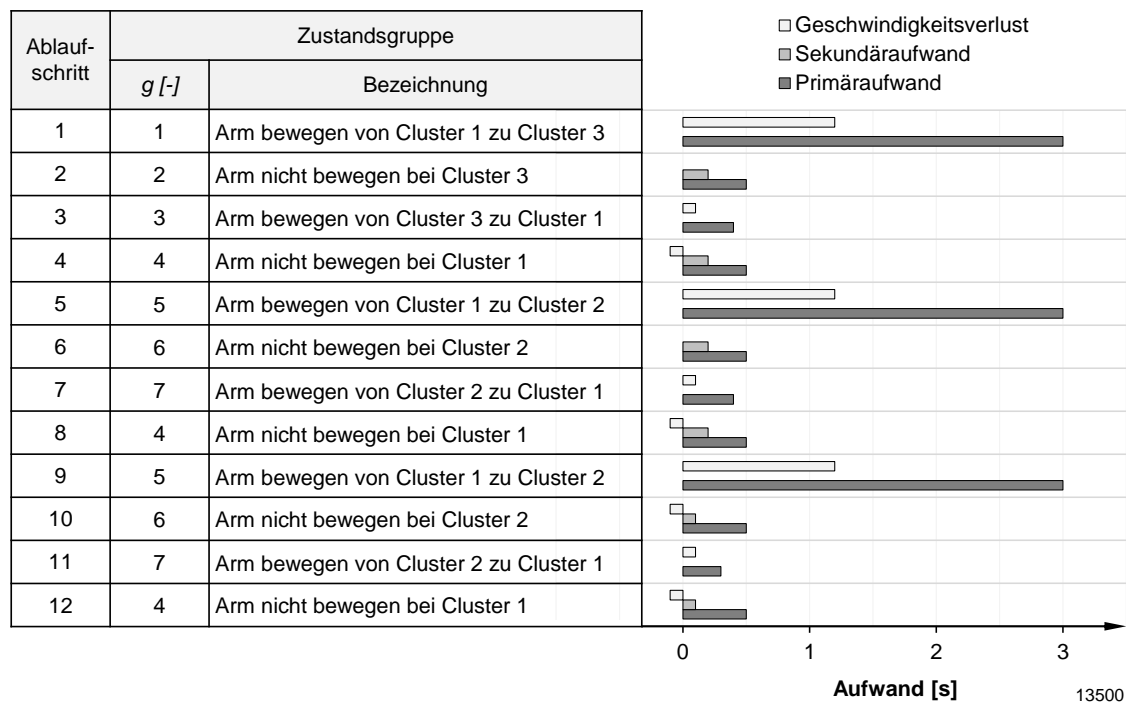


Abbildung 5-7 Darstellung der Aufwandsarten für einen Ablauf

Diese Darstellungsform erlaubt es, die einzelnen Aufwände schnell zu erfassen und miteinander zu vergleichen. So kann der Anwender einfach Zustandsgruppen erkennen, die besonders hohen Primär- oder Sekundäraufwand beziehungsweise hohe Geschwindigkeitsverluste erzeugen. Im Beispiel erzeugen die Ablaufschritte 1, 5 und 7 besonders viel Primäraufwand.

#### Vektordarstellung der Aufwände in Anlehnung an die PSA

Die zweite Darstellungsform für die Auswertung eines Ablaufs ist eine Erweiterung der vektoriellen Darstellung der klassischen PSA (vgl. Abbildung 2-14).

In der klassischen Vektordarstellung zeigt eine Achse den Primäraufwand und die andere Achse den Sekundäraufwand. In der angepassten Form (vgl. Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9) ist der Gesamtaufwand an der Abszisse abgetragen und die Aufwandsarten an der Ordinate. Man kann die Aufwände dann entweder getrennt voneinander (vgl. Abbildung 5-8) oder summiert (vgl. Abbildung 5-9) darstellen.

Bei der getrennten Auftragung der Aufwandsarten (vgl. Abbildung 5-8) zeichnen sich problematische Ablaufschritte besonders durch einen hohen Anstieg des Sekundäraufwands oder der Geschwindigkeitsverluste aus. Ein horizontaler Vektor für einen Ablaufschritt bedeutet, dass dieser Schritt keinen zusätzlichen Aufwand dieser Aufwandsart verursacht. Ein hoher Anstieg bedeutet hingegen besonders viel Aufwand dieser Aufwandsart. Ein negativer Anstieg ist hier nur für die Geschwindigkeitsverluste möglich.

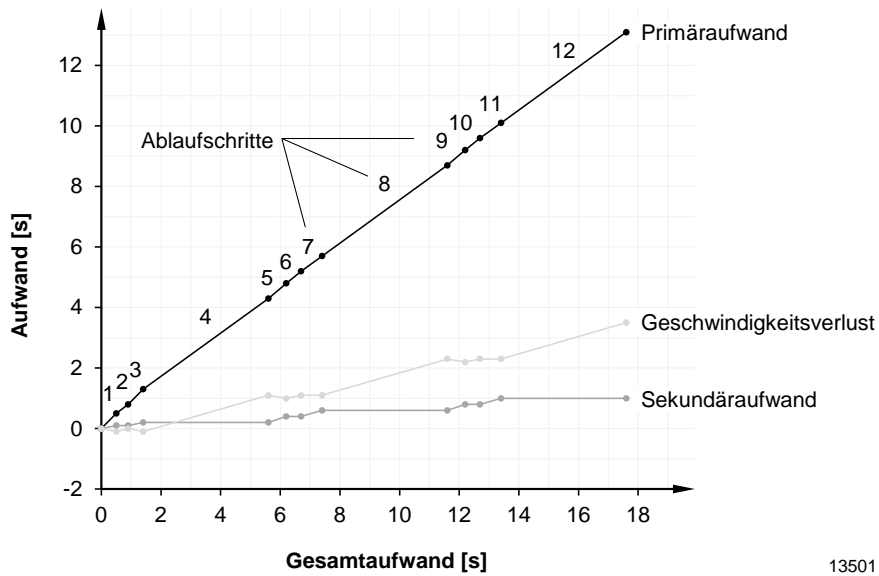
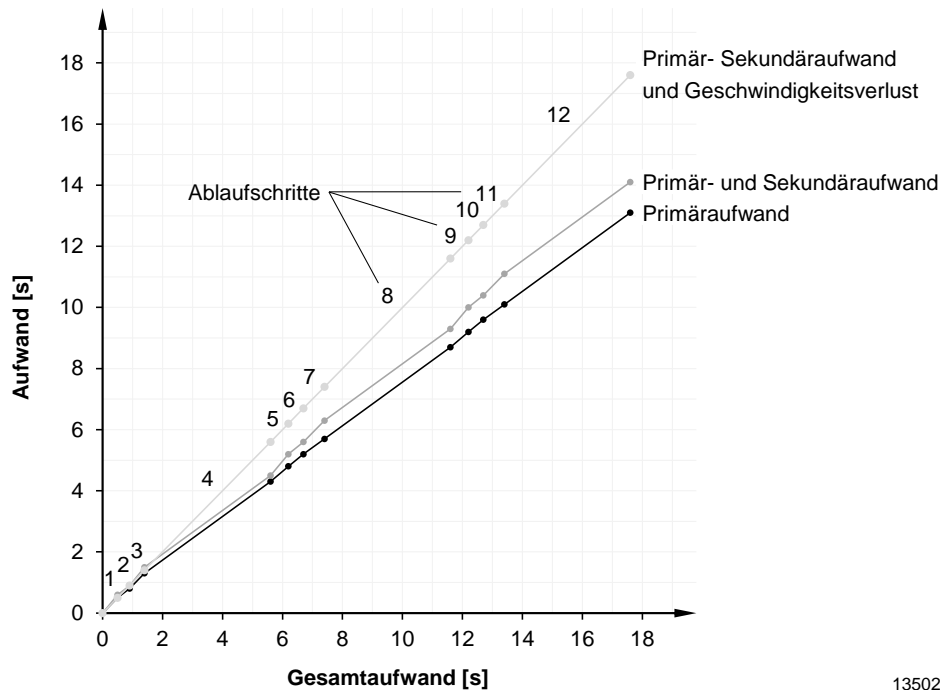


Abbildung 5-8 Vektordarstellung der Aufwände

Wie bei der klassischen PSA kann man hier Gesamtvektoren für die einzelnen Aufwandsarten bilden. Der Anstieg dieser Vektoren ist dann dem Anteil der entsprechenden Aufwandsart am Gesamtaufwand des Ablaufs (vgl. Formel 5-15). Der Anstieg des Primäraufwandsvektors entspricht somit dem Wirkungsgrad des Ablaufs. Die optimale Gestaltung des Arbeitsablaufs, also die Minimierung aller nicht primären Aufwände, hat eine Erhöhung dieses Wirkungsgrads zum Ziel. Im Idealzustand ist der Anstieg des Gesamtvektors des Primäraufwands besonders hoch. Analog ist der Vektor des Sekundäraufwands dann eine Horizontale während die Geschwindigkeitsverluste einen negativen Anstieg haben.

Die summierte Darstellung der Aufwände (vgl. Abbildung 5-9) kumuliert die einzelnen Aufwandsarten. Der Anstieg der Vektoren entspricht somit den summierten Anteilen am Gesamtaufwand. Die Summe aller Aufwandsarten ist dann der Gesamtaufwand, der einen Anstieg von eins aufweist.



13502

Abbildung 5-9 Vektordarstellung der summierten Aufwände

Diese vektorielle Darstellung stellt die Aufwände ebenfalls übersichtlich dar. Zudem erlaubt sie es, diejenigen Ablaufschritte zu identifizieren, die besonders viel Aufwand erzeugen. Sie verliert jedoch an Übersichtlichkeit, wenn der Ablauf aus vielen Schritten besteht und die Aufwandsanteile pro Schritt ähnlich hoch sind.

#### Blockdarstellung der Aufwände und Geschwindigkeiten

Eine weitere Form der Auswertung ist die Visualisierung der einzelnen Ablaufschritte als Blöcke (vgl. Abbildung 5-10). Dabei ist wie bei der vektoriellen Darstellung der Gesamtaufwand an der Abszisse abgetragen. An der Ordinate ist die relative Geschwindigkeit der Schritte abgetragen. Zusätzlich ist die Soll-Geschwindigkeit (1) als horizontale Linie eingetragen. Dies erlaubt es, die Geschwindigkeitsverluste übersichtlich darzustellen. Die Fläche zwischen dieser Linie und der Oberseite eines Blocks stellt den mittleren Geschwindigkeitsverlust dieses Ablaufschritts dar. Die Fläche darunter stellt die Summe aus Primär- und Sekundäraufwand dar.

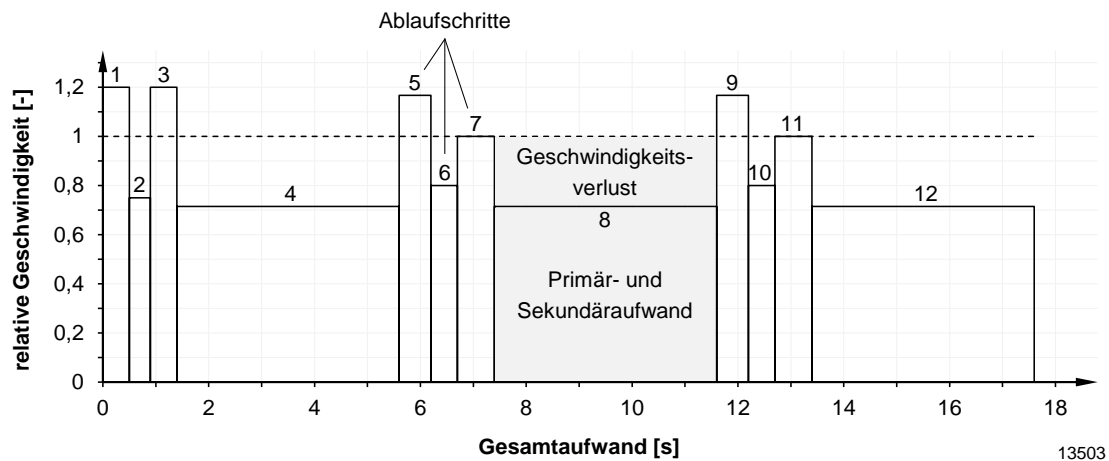


Abbildung 5-10 Blockdarstellung eines Standardablaufs

Diese Form der Auswertung stellt die relative Geschwindigkeit der einzelnen Ablaufschritte in den Vordergrund. So kann man sehr einfach Schritte mit einer besonders hohen oder niedrigen Geschwindigkeit identifizieren. Im dargestellten Beispiel sind insbesondere die Ablaufschritte 4, 8 und 12 relativ langsam. Zudem visualisiert sie die absoluten Geschwindigkeitsverluste ebenfalls verständlich als Fläche. Die Länge der einzelnen Blöcke verdeutlicht, welche Schritte besonders aufwändig sind. Dabei kann man jedoch nicht zwischen Primär- und Sekundäraufwänden unterscheiden.

### 5.3.3 Auswertung der Erfassungszeit

Die bisher aufgeführten Darstellungsformen werten ausschließlich nicht-tertiäre Zustandsgruppen aus. Zur Erfassungszeit gehören daneben aber auch die tertiären Zustandsgruppen, die je nach Anwendungsfall einen nicht unerheblichen Anteil haben können. Die Aufwandsartenanalyse kombiniert an dieser Stelle die bisher verwendeten Informationen und definiert ebenfalls einen Wirkungsgrad für die Erfassungszeit. Die Analyse schlägt die folgenden Darstellungsformen vor:

- Häufigkeiten der Zustandsgruppen,
- Aufwände der Zustandsgruppen,
- Häufigkeits-Aufwands-Matrix,
- spezifische Auswertungen für die Analyse von Körperbewegungen und
- spezifische Auswertungen für die Analyse von Armbewegungen.

#### Berechnung des Wirkungsgrades der Erfassungszeit

Die Berechnung des Wirkungsgrades der Erfassungszeit unterscheidet sich von den anderen Wirkungsgraden durch die Berücksichtigung der tertiären Zustandsgruppen. Man berechnet den Wirkungsgrad hier, indem man das Verhältnis zwischen Gesamtaufwand der Primäraufwände und der Erfassungszeit bildet (vgl. Formel 5-16).

$$W_{Erf} = \frac{Z_{PA,Ges}}{Z_{KE,kum}} \quad (5-16)$$

- $W_{Erf}$  : Wirkungsgrad des Erfassungszeitraums [-]  
 $Z_{PA,Ges}$  : Gesamtprimäraufwand [min]  
 $Z_{KE,kum}$  : kumulierte Dauer korrekt erfasster Abläufe [min]

Damit existieren nun zwei unterschiedliche Arten von Wirkungsgraden bei der Aufwandsartenanalyse; für Abläufe und für die Erfassungszeit. Ein niedriger Wirkungsgrad eines Ablaufs ist dabei ein Anzeichen für die ungünstige Gestaltung dieses Ablaufs. Wenn die Wirkungsgrade aller relevanten Abläufe im Erfassungszeitraum niedrig sind, ist auch der Wirkungsgrad der gesamten Erfassungszeit niedrig. Ist dieser jedoch deutlich geringer als die Wirkungsgrade der Abläufe, ist dies ein Anzeichen für viele tertiäre Tätigkeiten.

### Häufigkeiten der Zustandsgruppen

Eine interessante Auswertung der gesamten Erfassungszeit ist die Darstellung der Häufigkeiten der Zustandsgruppen. Für die Auswertung ist es sinnvoll, diese Häufigkeiten zu kumulieren und der Größe nach zu sortieren (Abbildung 5-11). Um die relevanten Zustandsgruppen hervorzuheben, sind die tertiären von den nicht-tertiären Zustandsgruppen abgegrenzt. Im dargestellten Beispiel tritt Zustandsgruppe 1 am häufigsten auf.

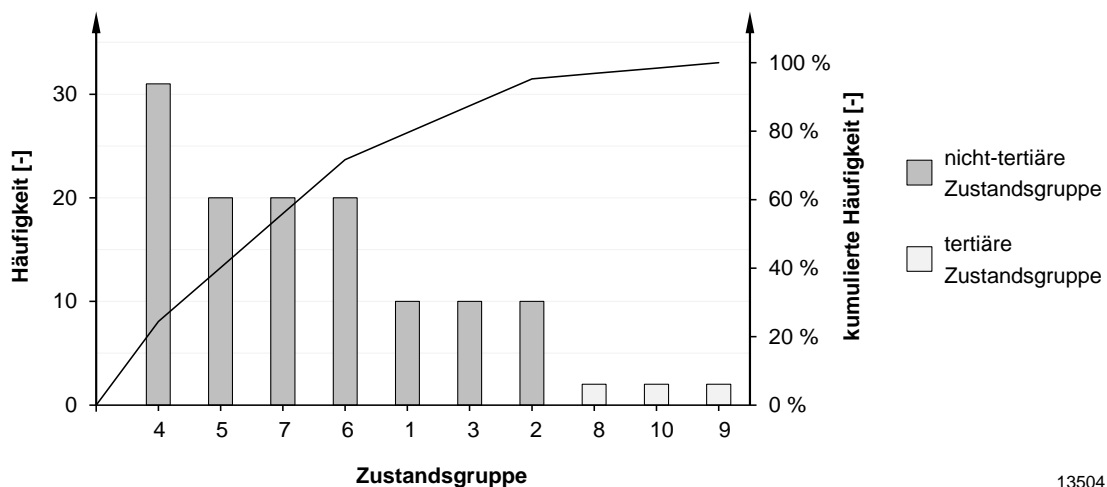


Abbildung 5-11 Häufigkeit und kumulierte Häufigkeit der Zustandsgruppen

Mit dieser Identifizierung häufiger Zustände kann man unabhängig von der Art der beobachteten Tätigkeit ermitteln, welche Ablaufabschritte besonders oft auftreten. Diese bieten dann in der Regel besonders hohes Potenzial für Verbesserungsmaßnahmen.

Bei klassischen Montageaufgaben (Analyse von Armbewegungen) kann man diese Auswertung zudem anpassen, indem man nur die Stillstände betrachtet. Wenn man dann zusätzlich die Orte benennt, entsteht eine übersichtliche Auswertung. Abbildung 5-12 zeigt eine solche Darstellung. Man kann bei diesem Beispiel gut erkennen, dass sich die Hände des Mitarbeiters häufig am Fügeort und bei Materialkiste 1 befinden. Analog ist dies beispielsweise mit den Arbeitsstationen bei der Analyse von Körperbewegungen umsetzbar.

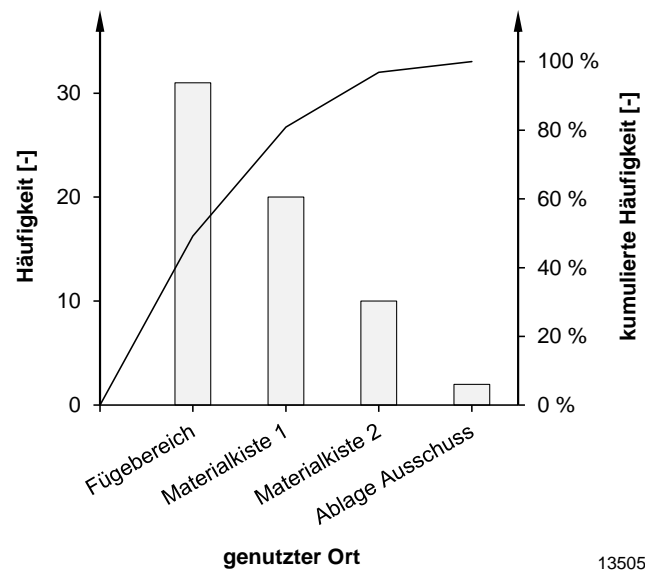


Abbildung 5-12 Häufigkeit der Nutzung unterschiedlicher Orte

Bei der Darstellung von Häufigkeiten ist schnell ersichtlich, welche Zustandsgruppen besonders oft auftreten, beziehungsweise zu welche Orten der Mitarbeiter besonders oft greift beziehungsweise geht. Sie eignet sich deshalb gut, um einen schnellen Überblick über die Erfassungszeit zu bekommen. Allerdings kann die Darstellung aller Zustandsgruppen insbesondere bei komplexeren Arbeitsaufgaben unübersichtlich sein. Zudem betrachtet diese Darstellungsform die Aufwände der einzelnen Zustandsgruppen nicht.

#### Aufwände der Zustandsgruppen

Neben der Häufigkeit ist insbesondere der benötigte zeitliche Aufwand der Zustandsgruppen eine relevante Information für die Auswertung. Auch hierfür gibt es unterschiedliche Formen der Darstellung.

Eine mögliche Form sind Kreisdiagramme. Diese zeigen schnell und übersichtlich die Verteilung der Erfassungszeit. Hier bieten sich insbesondere zwei Varianten an: die Darstellung aller auftretenden Zustandsgruppen (vgl. Abbildung 5-13) und die Darstellung der Aufwandsanteile (vgl. Abbildung 5-14).

Die Darstellung der Zustandsgruppen (vgl. Abbildung 5-13) zeigt schnell auf, welche der Gruppen einen besonders hohen Anteil der Erfassungszeit einnehmen. In dem dargestellten Beispiel macht die Zustandsgruppe ‚Arm nicht bewegen bei 1‘ den Hauptanteil der Zeit aus (70,9 %). Daher sollten sich anschließende Verbesserungsmaßnahmen auf diese Zustandsgruppe konzentrieren. Diese Darstellungsform eignet sich besonders dann, wenn relativ wenig unterschiedliche Zustandsgruppen auftreten und das Diagramm so übersichtlich bleibt. Bei komplexeren Abläufen könnte man die Gruppen zu übergeordneten Kategorien zusammenfassen, um die Übersichtlichkeit zu bewahren.

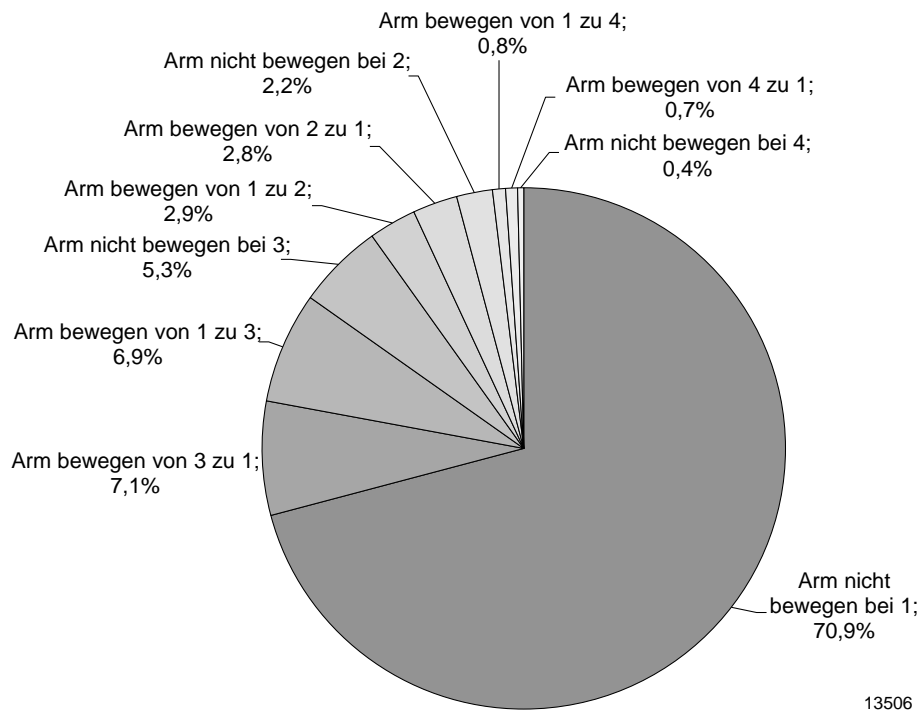


Abbildung 5-13 Verteilung der Zustandsgruppen

Die Darstellung der Aufwandsanteile (vgl. Abbildung 5-14) zeigt analog, welche Aufwandsarten einen hohen Anteil an der Erfassungszeit stellen. Der Anwender kann so schnell erkennen, wo die Hauptprobleme für einen reduzierten Wirkungsgrad der Erfassungszeit liegen. In dem dargestellten Beispiel sind dies die Geschwindigkeitsverluste, die den höchsten Zeiteanteil neben den Primäraufwänden einnehmen.

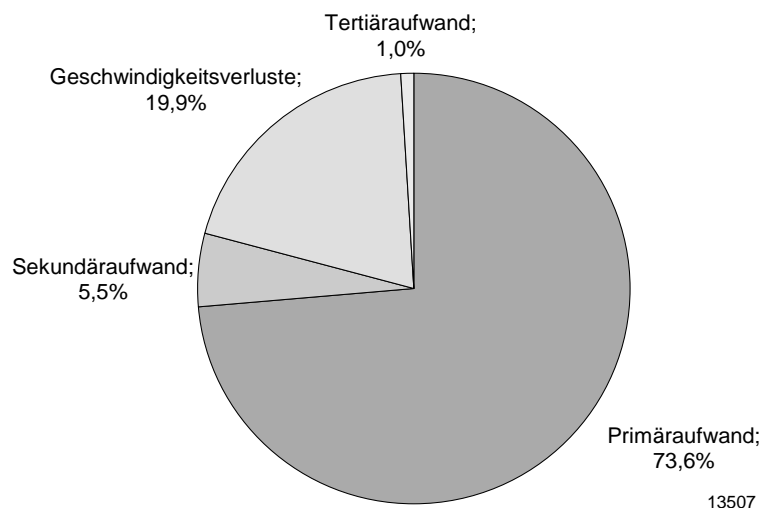


Abbildung 5-14 Verteilung der Aufwandsarten

Beide Kreisdiagramme haben den Vorteil, dass sie für alle Anwender ohne Vorkenntnisse verständlich sind. Sie geben zudem eine gute Übersicht über die Erfassungszeit und erlauben die Auswahl von Ansatzpunkten für Verbesserungsmaßnahmen.

### Häufigkeits-Aufwands-Matrix

Eine Darstellungsform, die die Häufigkeit der Zustandsgruppen sowie ihren zeitlichen Aufwand berücksichtigt, ist die Häufigkeits-Aufwands-Matrix (vgl. Abbildung 5-15). Dabei trägt man die Häufigkeit der Zustände an der Abszisse auf und den Aufwand (die mittlere Zeitdauer) je Auftreten an der Ordinate. Durch die logarithmische Skalierung der Achsen ergeben sich dann Gesamtaufwandslinien, die die Matrix in verschiedene Bereiche einteilen. So haben in Abbildung 5-15 beispielsweise alle Zustandsgruppen, die links unter der ersten Linie liegen, einen Gesamtaufwand von weniger als einer Sekunde. Die Zustandsgruppen, die zwischen der ersten und der zweiten Linie liegen, haben einen Gesamtaufwand von mehr als einer und weniger als zehn Sekunden.

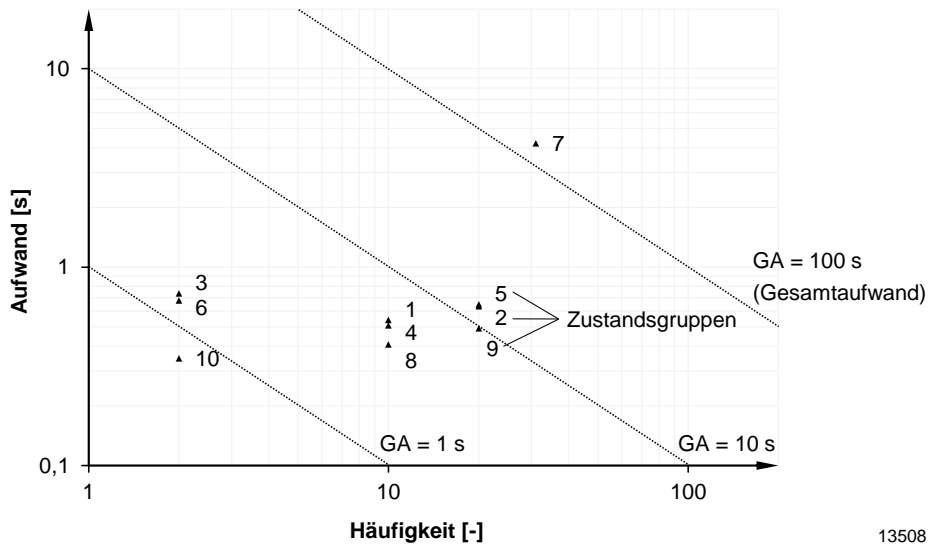


Abbildung 5-15 Häufigkeits-Aufwands-Matrix

Damit kann der Anwender schnell Zustandsgruppen identifizieren, die viel Zeit beanspruchen (oben rechts in der Matrix). Diese Gruppen bieten dann hohes Potenzial bei Verbesserungsmaßnahmen. Alternativ kann er auch Zustandsgruppen identifizieren, die eine kurze Zeitdauer haben, aber besonders häufig auftreten (unten rechts in der Matrix). Analog treten Zustandsgruppen oben links in der Matrix selten auf, verursachen aber bei jedem Auftreten relativ viel Aufwand. Mit diesen Informationen kann man dann den Einfluss von Optimierungen einzelner Zustandsgruppen auf die Gesamtabläufe abschätzen.

### Spezifische Auswertungen für die Analyse von Körperbewegungen

Neben diesen Darstellungen von Häufigkeiten und Aufwänden der Zustandsgruppen kann man je nach Analyseart spezifische Auswertungen vornehmen. Diese Auswertungen stellen Informationen und Potenziale in den Vordergrund, die charakteristisch für Körper- beziehungsweise Armbewegungen sind.

Die Analyse von Körperbewegungen erfasst Bewegungen und Stillstände an verschiedenen Arbeitsstationen sowie Bewegungen zwischen den einzelnen Arbeitsstationen. Damit sind insbesondere Auswertungen über die zurückgelegten Strecken (vgl. Abbildung 5-16) zwischen einzelnen Arbeitsstationen sowie über die Verweildauern an den einzelnen Arbeitsstationen (vgl. Abbildung 5-17) interessant.

Für die Auswertung der zurückgelegten Strecken (vgl. Abbildung 5-16) zwischen den einzelnen Arbeitsstationen ist eine Draufsicht auf den Untersuchungsbereich wie bei einem Spaghetti-Diagramm sinnvoll. Diese Ansicht wird dann durch relevante Informationen ergänzt. In diesem Fall sind das die Länge und Zeitdauer der einzelnen Bewegungen zwischen den Stationen sowie deren Häufigkeit. Während der Anwender beim Spaghetti-Diagramm alle zurückgelegten Wege ohne Information über die Dauer manuell notieren muss, werden diese Daten hier automatisiert bestimmt. Zusätzlich könnte man diese Auswertung durch Darstellung der sekundären Anteile der Bewegungen erweitern.

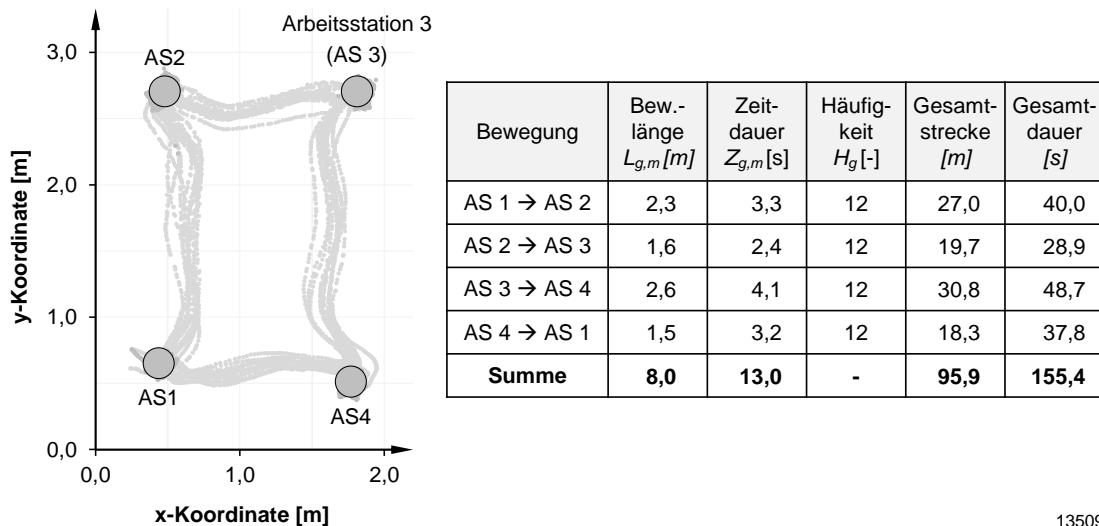


Abbildung 5-16 Zurückgelegte Strecken zwischen den Arbeitsstationen

Diese Darstellung eignet sich besonders für die Identifizierung von Problemen im Layout. In dem dargestellten Beispiel kann man beispielsweise schnell erkennen, dass die Bewegung von Arbeitsstation 3 zu Arbeitsstation 4 die größte Strecke und Zeitdauer aufweist. Dies ist sowohl für die einzelnen Bewegungen als auch insgesamt der Fall. Wenn möglich, sollte man also die Entfernung zwischen diesen Arbeitsstationen verringern. Diese Darstellung ist zudem auch für ungeübte Anwender leicht nachvollziehbar.

Eine Abwandlung dieser Darstellung fasst die Zustandsgruppen zusammen, bei denen der Mitarbeiter an den einzelnen Arbeitsstationen verbleibt (vgl. Abbildung 5-17). So stehen nicht die Bewegungen zwischen den Stationen im Fokus, sondern vielmehr die Verweildauer an den Stationen. Die Auswertung enthält dabei die Zeitdauer jedes einzelnen Verweilvorgangs an einer Station als auch die Gesamtverweildauer. Eine mögliche Erweiterung dieser Auswertung wäre die Unterteilung der Verweildauer nach Zustandsarten. So könnte sie beispielsweise darstellen, wieviel Zeit der Mitarbeiter im Sitzen oder im Stehen verbringt.

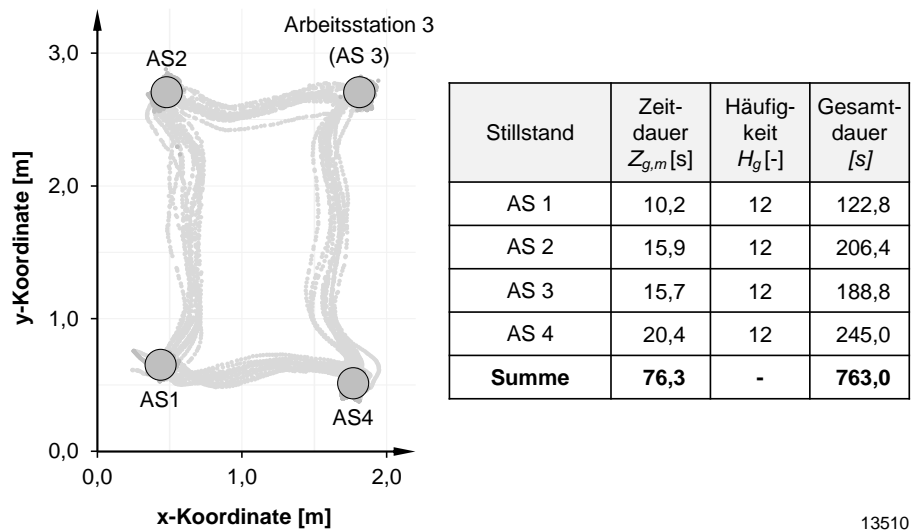


Abbildung 5-17 Verweildauern an den Arbeitsstationen

Mit den dargestellten Informationen kann der Anwender schnell erkennen, an welcher Arbeitsstation der Mitarbeiter besonders viel Zeit verbringt. In dem dargestellten Beispiel ist dies Arbeitsstation 4. An dieser Arbeitsstation besteht somit vermutlich am meisten Potenzial für Verbesserungsmaßnahmen.

Spezifische Auswertungen für die Analyse von Armbewegungen

Wie bei der Analyse von Körperbewegungen gibt es auch bei der Analyse von Armbewegungen spezifische Informationen, die man für eine gezielte Auswertung nutzen kann. Bei manuellen Arbeitsvorgängen kann man beispielsweise die Arbeitsteilung zwischen den Armen untersuchen. Dafür eignen sich besonders Balkendiagramme, die die Erfassungszeit nach Zustandsart (Abbildung 5-18) oder nach Aufwandsart (Abbildung 5-19) einteilen und so die Arme miteinander vergleichen.

Mit der Einteilung der Zeit in die Zustandsarten (vgl. Abbildung 5-18) kann der Anwender einfach ermitteln, ob die Bewegungen gleichmäßig auf die Arme verteilt sind beziehungsweise welcher Arm besonders viele Bewegungen durchführt. In dem dargestellten Beispiel ist ersichtlich, dass der Mitarbeiter den linken Arm weniger bewegt als den rechten Arm.

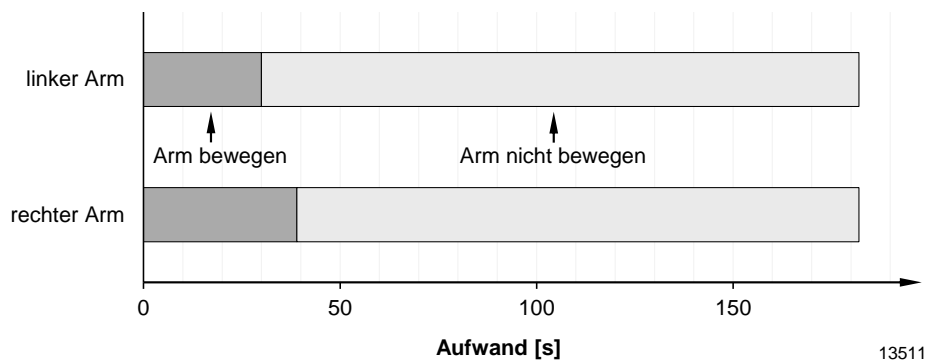


Abbildung 5-18 Verteilung der Zustandsarten für beide Arme

Mit der Einteilung der Zeit in Aufwandsarten (vgl. Abbildung 5-19) kann der Anwender beispielsweise ermitteln, ob ein Arm besonders viele tertiäre Bewegungen durchführt. Zudem kann er untersuchen, ob ein Arm mehr Geschwindigkeitsverluste erzeugt als der andere oder ob ein Arm besonders lange Bewegungen durchführt. In dem dargestellten Beispiel ist deutlich zu erkennen, dass der rechte Arm mehr Primäraufwand erzeugt als der linke Arm. Damit hat er ebenfalls einen höheren Wirkungsgrad.

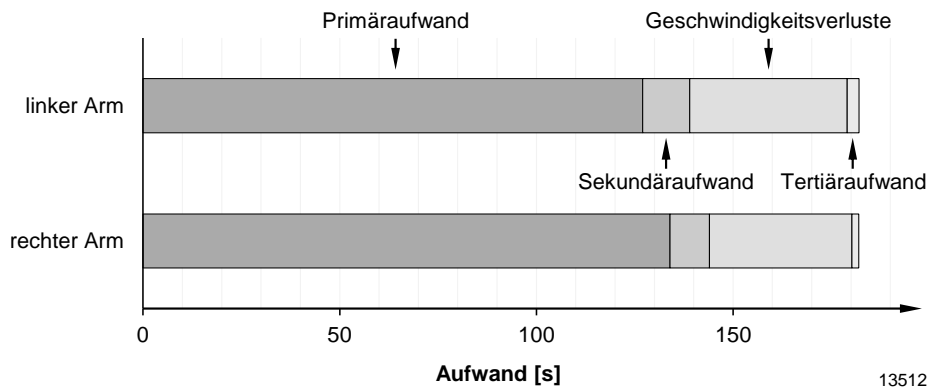


Abbildung 5-19 Verteilung der Aufwandsarten für beide Arme

Der Vergleich der beiden Arme identifiziert insbesondere Verbesserungspotenzial, das durch eine Ungleichverteilung der Arbeit zwischen den Armen oder durch Leistungsunterschiede der Arme entsteht. So kann der Anwender beispielsweise erkennen, ob eine Gleichverteilung der Arbeit auf beide Arme notwendig ist.

#### 5.4 Ableitung von Verbesserungsansätzen

Die unterschiedlichen Darstellungsformen zeigen dem Anwender Verbesserungspotenzial auf und erlauben bereits erste Rückschlüsse auf konkrete Maßnahmen. Dieser Abschnitt diskutiert ergänzend, welche Ansätze für die einzelnen Aufwandsarten bestehen. Dabei wählt er keine konkreten Maßnahmen oder -methoden aus, da sie sich je nach Arbeitsaufgabe stark unterscheiden können. Die Auswahl dieser Methoden muss demnach im Anschluss durch den Methodenanwender erfolgen.

##### Tertiäraufwand

Als Tertiäraufwand gekennzeichnete Zustandsgruppen gehören nicht zur Arbeitsaufgabe und sind somit nicht wertschöpfend. Daher sollte man sie – entsprechend der Definition der Wertschöpfung – nach Möglichkeit vermeiden. Da es jedoch nicht sinnvoll oder gewünscht ist, alle tertiären Aufwände zu eliminieren, werden an dieser Stelle zwei verschiedene Arten definiert.

Es gibt zum einen tertiäre Aufwände, die der Erholung des Mitarbeiters dienen. Dazu gehören beispielsweise kurze Pausen am Arbeitsplatz, Laufbewegungen zur Toilette oder Arm- bewegungen zur Lockerung der Muskulatur. Diese Tätigkeiten sind zwar tertiäre Aufwände, sollten aber nicht im Fokus von Optimierungsbestrebungen stehen. Ein besonders hoher Anteil dieser Unterbrechungen des Arbeitsablaufs deutet jedoch darauf hin, dass die eigentliche Arbeitsaufgabe nicht ergonomisch gestaltet ist und den Werker zu stark geistig oder körperlich ermüdet.

Alle anderen tertiären Aufwände sind nach Möglichkeit zu reduzieren oder zu eliminieren. Die Aufwandsartenanalyse deckt dabei vor allem die Verschwendungsarten unnötige Transporte und Bewegungen als Tertiäraufwand auf (vgl. Abschnitt 2.4.1). Die anderen Verschwendungen wie Ausschuss und Nacharbeit oder unnötige Bestände erkennt sie nicht als tertiäre Aufwände. Zur Bestimmung der Gründe für die erkannten Verschwendungen eignet sich beispielsweise das Ishikawa-Diagramm [vgl. Ishi85, S. 63]. Dieses schlägt für ein Problem fünf unterschiedliche Ursachenkategorien vor, mit der der Anwender mögliche Ursachen systematisch einteilen kann. Anschließend kann er Lösungen für die Ursachen des Problems entwerfen.

### Geschwindigkeitsverluste

Die Aufwandsartenanalyse ermittelt die Differenz zwischen den Ist-Zeiten und den Soll-Zeiten der Zustandsgruppen und bestimmt daraus den Geschwindigkeitsverlust. Die detaillierte Erfassung der Ist-Zeiten erlaubt es zudem, die Schwankungen der Zeiten zu ermitteln. Ziel von Verbesserungen sollte es demnach sein, die mittleren Geschwindigkeitsverluste zu reduzieren und die Schwankungen abzubauen.

Ein hoher Anteil an Geschwindigkeitsverlusten, also starke Unterschiede zwischen der mittleren Ist-Zeit und der Soll-Zeit einer Zustandsgruppe (vgl. Abbildung 5-4b), kann auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen sein. Möglich sind beispielsweise mangelnde Übung des Mitarbeiters bei der Arbeitsaufgabe oder ergonomisch ungünstige Bewegungen. Mögliche Lösungsansätze dafür wären zusätzliches Training oder eine verbesserte ergonomische Gestaltung der Arbeitsaufgabe. Durch Verwendung des vereinfachten MTM-1-Verfahren zur Bestimmung der Soll-Zeiten (vgl. Abschnitt 4.3), kann die Ursache auch in der ungünstigen Gestaltung der Zeiteinflussgrößen nach MTM-1 liegen. Diese Verluste kann man reduzieren, indem man die Arbeitsaufgabe so umgestaltet, dass die optimalen Einflussgrößen vorliegen.

Starke Schwankungen zwischen den einzelnen Ist-Zeiten (vgl. Abbildung 5-4b) deuten hingegen auf eine ungenügende Prozesssicherheit hin. Diese kann ebenfalls durch mangelnde Übung, aber auch durch sich ändernde Umweltfaktoren begründet sein. Dementsprechend wären hier ebenfalls zusätzliches Training oder eine Optimierung dieser Faktoren denkbare Maßnahmen. Welche Umweltfaktoren die Schwankungen oder einen hohen Geschwindigkeitsverlust verursachen und welche Maßnahmen man auswählen sollte, kann die Aufwandsartenanalyse an dieser Stelle jedoch nicht ermitteln.

### Sekundäraufwand

Jede Bewegung, die länger ist als die kürzeste sinnvolle Bewegung, erzeugt Sekundäraufwand. Dieser stellt somit den zusätzlichen Aufwand dar, der durch ein suboptimales Arbeitsplatzlayout entsteht. Hiermit werden wie bei den Tertiäraufwänden überwiegend unnötige Bewegungs- und Transportstrecken aufgedeckt.

Ziel sollte hier deshalb ebenso sein, diese Aufwände soweit wie möglich zu reduzieren. Das kann durch Optimierung des Layouts geschehen. Wenn es physisch realisierbar ist, sollte man alle Wege auf das Maß der Mindestbewegungslänge reduzieren. Wenn dies nicht umsetzbar ist, sollte man wie bei der 5S-Methode häufig genutzte Materialien und Werkzeuge möglichst nah am Einsatzort platzieren [vgl. Hira95, S. 33ff.]. Dazu kann der Anwender die bestehenden Auswertungen nutzen, um besonders häufige und aufwändige Bewegungen zu ermitteln (vgl. Abbildung 5-15).

### Primäraufwand

Bei strenger Anwendung der Definition der Primäraufwände stellen diese Aufwände die wertschöpfenden Anteile der Arbeitszeit dar. Sie stehen damit nicht im Fokus für Verbesserungsmaßnahmen. Dennoch ist es teilweise möglich, sie deutlich zu reduzieren. So ist es beispielsweise denkbar, die Arbeitsaufgabe umzugestalten und so Arbeitsschritte einzusparen oder die Mindestbewegungslänge zu reduzieren. Der Methodenanwender sollte somit auch stets prüfen, ob die Primäraufwände vermeidbar sind.



## 6 Evaluation

Kapitel 3 bis 5 beschreiben die entwickelte Methodik zur integrierten Bestimmung von Ist- und Plan-Zeiten sowie die darauf basierende Analyse der Produktivität. Ziel dieses Kapitels ist die kritische Bewertung der Methodik. Zunächst beschreibt es dazu, welche Erfassungsgüte die Kinect bei unterschiedlichen Szenarien erzielt und wann sie somit sinnvoll zum Einsatz kommen kann (Abschnitt 6.1). Anschließend stellt es ausgewählte Evaluationsbeispiele und deren Ergebnisse vor (Abschnitt 6.2). Zum Abschluss zeigt es auf, ob die Methodik die an sie gestellten Anforderungen erfüllt (Abschnitt 6.3).

Obwohl die Methodik nicht abhängig ist von der Nutzung der Kinect als Technologie der Bewegungserfassung, erfolgt die Evaluation an dieser Stelle ausschließlich mit der Kinect. Andere Technologien der Bewegungserfassung könnten insbesondere zu einer abweichenden Erfassungsgüte führen und weitere Einsatzszenarien ermöglichen.

### 6.1 Erfassungsgüte der Kinect

Für die Anwendung der Methodik in der Praxis ist eine hohe Güte der Bewegungserfassung eine notwendige Voraussetzung. Nur wenn korrekte Koordinaten des beobachteten Mitarbeiters vorliegen, kann die Methodik die Zustände richtig erkennen und die Zeitdauern korrekt ermitteln. Daher ist der erste Schritt der Evaluation, die Erfassungsgüte in unterschiedlichen Anwendungsbeispielen zu bestimmen. Damit ist eine Aussage möglich, in welchen Szenarien man die entwickelte Methodik verwenden kann.

Abschnitt 3.3 beschreibt, wie die Kinect Daten erfasst und welche Kennzahlen die Erfassungsgüte beschreiben. An dieser Stelle wird die Erfassungsrate der für die Analyse erforderlichen Gelenkpunkte ( $ER_{An}$ ) zur Bewertung einer Aufnahme verwendet.

Zur Bewertung der Erfassungsgüte der Kinect werden sechs verschiedene Szenarien untersucht. In jedem Szenario sind dabei mehrere Wiederholungen der aufgenommenen Arbeitsaufgabe erfolgt. Nach der Aufnahme wurden die Erfassungsraten aus den Bewegungsdaten der Kinect abgeleitet.

Tabelle 6-1 zeigt die Ergebnisse für die unterschiedlichen Szenarien. Sie verdeutlicht, wie stark die Erfassungsgüte von dem betrachteten Szenario abhängt. Bei der Gewährleistung nahezu idealer Bedingungen (Laborumgebung) kann die Kinect hohe Erfassungsraten erzielen. Dadurch können in diesen Szenarien alle Analysevarianten zum Einsatz kommen. In den Szenarien unter industriellen Bedingungen ist die Erfassungsgüte dafür nicht ausreichend. Insbesondere die Analyse von Armbewegungen ist in Produktionsumgebungen sehr schwer realisierbar. Das liegt daran, dass häufig Gegenstände (z. B. Werkstücke oder Werkzeuge) die Sicht auf die Arme verdecken oder Regale beziehungsweise andere Arbeitsstationen eine geeignete Positionierung der Kinect verhindern.

Tabelle 6-1 Erfassungsraten für unterschiedliche Szenarien

Szenario					Erfassungsrate ( $ER_{An}$ )	
Nr.	Umgebung	Analyseart	Anzahl Aufnahmen	mittlere Dauer	einfache Analyse	differenzierte Analyse
1	Labor	Arm	8	12 min	100,0 %	95,3 %
		Körper	3	15 min	100,0 %	85,2 %
2	Industrie	Körper	1	25 min	100,0 %	33,3 %
3	Industrie	Arm	3	35 min	48,6 %	26,6 %
4	Industrie	Arm	2	23 min	39,8 %	9,8 %
		Körper	1	18 min	100,0 %	11,4 %
5	Industrie	Körper	3	30 min	100,0 %	36,3 %
6	Industrie	Körper	5	17 min	100,0 %	22,5 %

13513

Die Tabelle zeigt somit insbesondere auf, inwieweit die Kinect als Technologie der Bewegungserfassung für die entwickelte Methodik geeignet ist und wo sie an ihre Grenzen stößt. In diesen problematischen Anwendungsfällen müsste man die Erfassung von Bewegungsdaten demnach mit einer anderen Technologie durchführen beziehungsweise ergänzen. Der Fokus der Evaluation liegt hier jedoch auf der Bewertung der entwickelten Methodik zur Auswertung der Bewegungsdaten. Daher betrachtet die Evaluation im Folgenden insbesondere die Anwendungsbeispiele, in denen eine hohe Erfassungsgüte vorliegt.

## 6.2 Anwendungsbeispiele

Dieser Abschnitt stellt ausgewählte Anwendungsbeispiele vor. Dazu beschreibt er jeweils kurz die erfasste Arbeitsaufgabe und präsentiert die Ergebnisse der Methode.

Für die Analyse von Körperbewegungen wurden zwei Szenarien ausgewählt. Ein Szenario in einer Laborumgebung, bei dem eine differenzierte Analyse möglich war (Anwendungsbeispiel 1, Abschnitt 6.2.1) und ein Szenario in einer Industrieumgebung, bei dem eine einfache Analyse durchgeführt wurde (Anwendungsbeispiel 2, Abschnitt 6.2.2). Für die Analyse von Armbewegungen wurde aufgrund der schlechten Erfassungsgüte in den untersuchten Industrieumgebungen lediglich ein Szenario in Laborumgebung ausgewählt (Anwendungsbeispiel 3, Abschnitt 6.2.3).

### 6.2.1 Differenzierte Analyse von Körperbewegungen (Laborumgebung)

#### Beschreibung der erfassten Aufgabe

Als Evaluationsbeispiel für die differenzierte Analyse von Körperbewegungen wurde eine Montage von Getrieben in einer Laborumgebung untersucht. Die zu montierenden Getriebe bestehen dabei aus je 2 Gehäuseteilen und 16 weiteren Einzelteilen. Der Aufbau des Arbeitsplatzes ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Er besteht aus drei Arbeitsstationen, an denen der Mitarbeiter jeweils Teile der Arbeitsaufgabe durchführen musste. Die Aufnahme dauerte 14 Minuten und 48 Sekunden. Der Mitarbeiter hat in dieser Zeit 8 Getriebe montiert.

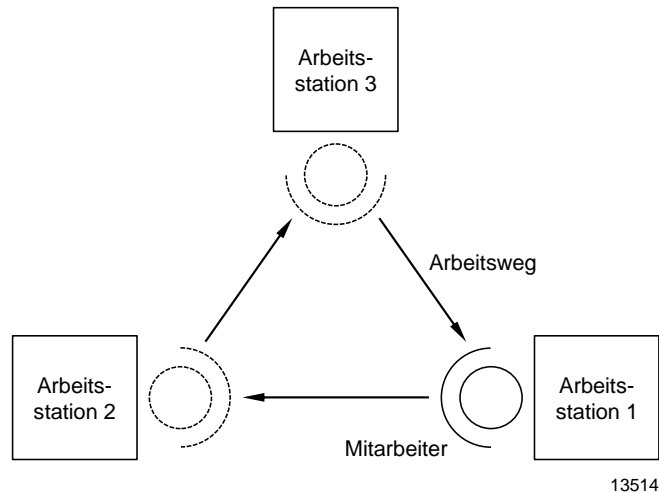


Abbildung 6-1 Aufbau des Arbeitsplatzes (Anwendungsbeispiel 1)

Ermittlung von Ist- und Plan-Zeiten

Im ersten Anwendungsbeispiel wurden bei der Erfassung der Ist-Zeiten die vorgeschlagenen Richtwerte für die Zustandserkennung (vgl. Abschnitt 3.4.3.2) und für die Zusammenfassung der Zustände (vgl. Abschnitt 3.5) angewendet. Ergebnis der Ist-Zeiterfassung ist der in Tabelle 6-2 dargestellte Ablauf mit den ermittelten Distanzen und Ist-Zeiten. Die gesamte mittlere Ist-Dauer eines Ablaufs beträgt somit 111,6 Sekunden. Dabei legt der Mitarbeiter im Schnitt 5,63 Meter zurück.

Tabelle 6-2 Ergebnis der Ermittlung von Ist- und Plan-Zeiten (Anwendungsbeispiel 1)

Ablaufschritt	Bezeichnung der Zustandsgruppe <i>g</i>	Distanz $D_{g,m}$ [cm]	Ist-Zeit $Z_{g,m}$ [s]	Soll-Zeit $Z_{g,Soll}$ [s]
1	Stehen bei AS 1	-	34,2	30,2
2	Gehen + Körperdrehung von AS 1 zu AS 2	125	2,4	1,8
3	Setzen bei AS 2	16	0,9	0,7
4	Sitzen bei AS 2	-	35,7	35,0
5	Aufrichten vom Setzen bei AS 2	21	0,7	0,7
6	Gehen + Körperdrehung von AS 2 zu AS 3	178	2,8	2,4
7	Stehen bei AS 3	-	29,7	28,2
8	Körperdrehung bei AS 3	7	0,7	0,6
9	Bücken/Knien bei AS 3	38	1,0	0,8
10	Aufrichten vom Bücken/Knien + Körperdrehung bei AS 3	33	1,0	1,4
11	Gehen + Körperdrehung von AS 3 zu AS 1	145	2,5	2,2
<b>Summe</b>		<b>563</b>	<b>111,6</b>	<b>104,0</b>

13515

Die Soll-Zeiten für die ermittelten Ablaufschritte wurden mit dem vereinfachten MTM-1-Verfahren für die Bewegungen (vgl. Abschnitt 4.3) und mit Hilfe der Modal-Werte für die Stillstände (vgl. Abschnitt 4.4) bestimmt. Das Ergebnis dieses Schrittes ist ebenfalls in Tabelle 6-2 dargestellt. Die ermittelte Soll-Dauer des Arbeitsablaufs beträgt 104,0 Sekunden. Damit ist der Ist-Ablauf 7,6 Sekunden langsamer als der Soll-Ablauf.

Die Auflistung der Ablaufschritte in Tabelle 6-2 zeigt auf, dass der Mitarbeiter an Arbeitsstation 1 und 3 stehend gearbeitet, während er sich an Arbeitsstation 2 zur Durchführung der Arbeitsaufgabe hinsetzt. Zudem zeigt die Tabelle, dass er sich am Ende des Ablaufs hinkniet beziehungsweise bückt. Das liegt daran, dass er die fertigen Getriebe in einem tiefliegenden Regalfach platzieren muss.

### Analyse der Produktivität (Aufwandsartenanalyse)

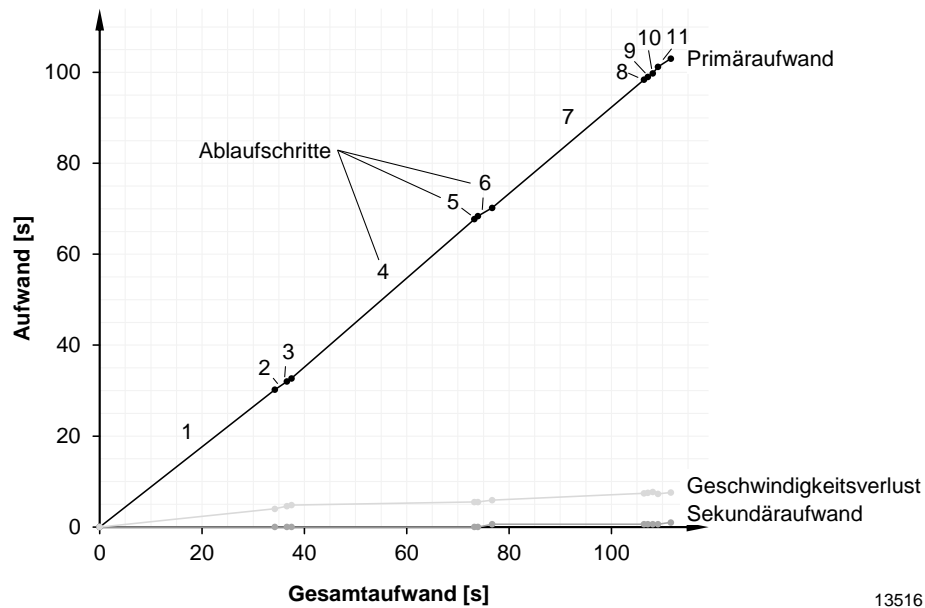
Bei der Aufwandsartenanalyse wurden in diesem Anwendungsfall alle Zustandsgruppen des erkannten Ablaufs als nicht-tertiär festgelegt. Alle anderen Zustandsgruppen wurden somit als Tertiäraufwand eingestuft. Des Weiteren wurde zur Bestimmung der Sekundäraufwände die Mindestbewegungslänge manuell festgelegt, da eine automatisierte Ermittlung in Anlehnung an die klassische PSA nicht möglich war (vgl. Abschnitt 5.2.3). Da die verwendeten Arbeitsstationen sehr flexibel sind, kann man alle Bewegungen mit relativ wenig Aufwand auf die kürzeste Distanz zwischen zwei Arbeitsstationen reduzieren (vgl. Tabelle 6-2, Ablaufschritt 2).

Die Analyse der Produktivität hat ergeben, dass während der Aufnahme die folgenden Aufwände entstanden sind:

- Primäraufwand:	92,3 %
- Sekundäraufwand:	0,9 %
- Geschwindigkeitsverlust:	6,8 %
- Tertiäraufwand:	0,0 %

Auffällig ist der fehlende Tertiäraufwand. Das liegt daran, dass der Mitarbeiter in der Beobachtungszeit die Arbeitsaufgabe ohne Unterbrechungen durchgeführt hat. Der ermittelte Sekundäraufwand ist ebenfalls relativ gering. Damit ist das Potenzial einer Änderung des Layouts nicht besonders hoch. Der größte Verlust bei dem Anwendungsbeispiel entsteht durch eine geringe Geschwindigkeit. Diese kann dadurch begründet sein, dass der Mitarbeiter nicht ausreichend geübt war. Den mit Abstand größten Anteil der Arbeitszeit macht dennoch der Primäraufwand aus.

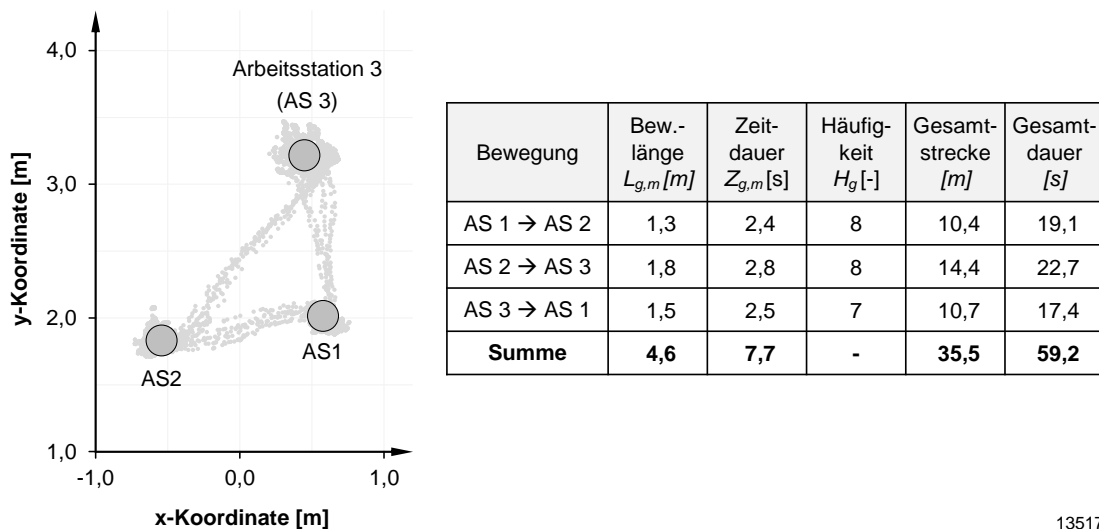
Um die nicht-tertiären Aufwandsarten detaillierter zu betrachten, eignet sich besonders die Darstellung des ermittelten Ablaufs im Vektordiagramm (vgl. Abbildung 6-2). Es wird klar, dass die Stillstände (Ablaufschritte 1, 4, 7) besonders hohen Primäraufwand erzeugen. Dies kommt durch die hohen Montagezeiten im Vergleich zu den Bewegungsdauern zustande. Die Stillstände erzeugen zudem den größten Anteil des Geschwindigkeitsverlusts. Eine Stabilisierung und Reduzierung der Montagezeiten würde demnach den Gesamtaufwand des Ablaufs positiv beeinflussen. Für die systematische Untersuchung der Montagezeiten eignet sich beispielsweise eine Analyse von Armbewegungen an den einzelnen Arbeitsstationen.



13516

Abbildung 6-2 Vektordarstellung des ermittelten Ablaufs (Anwendungsbeispiel 1)

Die Darstellung des Ablaufs im Vektordiagramm zeigt weiterhin auf, dass die Stillstände einen höheren Anteil an der Gesamtzeit haben als die Bewegungen. Die Bewegungen sind dennoch nicht-wertschöpfende Zeitanteile, die man oft mit einfachen Maßnahmen vermeiden kann. Zur Verdeutlichung stellt Abbildung 6-3 die Bewegungen des Mitarbeiters zwischen den einzelnen Arbeitsstationen dar. Man kann hier gut erkennen, dass die längste Bewegung der Weg zwischen den Arbeitsstationen 2 und 3 ist. Eine Anpassung des Layouts zur Kürzung dieser Strecke resultiert demnach am ehesten in einer Reduzierung des Sekundäraufwands. Die Abbildung stellt dar, wieviel Strecke ein Mitarbeiter bei dieser Arbeitsaufgabe insgesamt zurücklegen muss. In dem Beispiel legt er 4,6 m pro Durchgang und 35,5 m während der gesamten Beobachtungszeit zurück.



13517

Abbildung 6-3 Strecken zwischen den Arbeitsstationen (Anwendungsbeispiel 1)

Abbildung 6-4 zeigt analog die Verweildauern an den einzelnen Arbeitsstationen. Das umfasst an dieser Stelle nicht nur die Stillstände, sondern auch Bewegungen, bei denen der Mitarbeiter an der Arbeitsstation verbleibt. Dazu gehören beispielsweise das Hinsetzen auf den Stuhl oder das Bücken zum Regalfach. Man kann in der Abbildung erkennen, dass der Mitarbeiter am meisten Zeit an Arbeitsstation 2 verbringt. Eine detaillierte Betrachtung der Vorgänge an dieser Station birgt somit das größte Potenzial. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Arbeitsstationen sind dennoch relativ klein, sodass auch die Betrachtung der anderen Stationen sinnvoll ist.

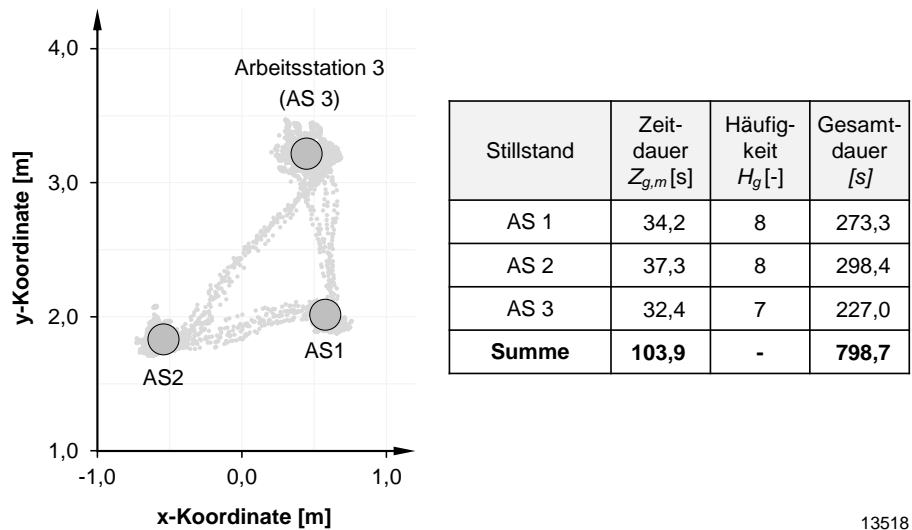


Abbildung 6-4 Verweildauern an den Arbeitsstationen (Anwendungsbeispiel 1)

### Fazit

Mit der entwickelten Methodik war es bei diesem Anwendungsbeispiel möglich, die Arbeitsvorgänge detailliert zu erfassen. Eine wichtige Voraussetzung war die hohe Erfassungsgüte, die in der Laborumgebung sichergestellt werden konnte. Die Analyse hat gezeigt, dass insbesondere die Stillstände an den Arbeitsstationen hohen Aufwand erzeugen. Eine Schlussfolgerung wäre daher eine detaillierte Untersuchung der Vorgänge an den Stationen mit einer Analyse von Armbewegungen. Zudem hat die Untersuchung aufgedeckt, dass der Mitarbeiter ungeübt ist und dass das Arbeitsplatzlayout noch nicht optimal ist. Mit diesen Erkenntnissen hat die Analyse eine gute Grundlage für zielgerichtete Verbesserungen der Arbeitsabläufe geschaffen.

## 6.2.2 Einfache Analyse von Körperbewegungen (Industrieumgebung)

### Beschreibung der erfassten Aufgabe

Das zweite Anwendungsbeispiel ist eine einfache Analyse von Körperbewegungen in einer Industrieumgebung. Dazu wurde eine Kommissioniertätigkeit in einem Produktionsbereich aufgenommen. Der Aufbau des beobachteten Arbeitsplatzes ist in Abbildung 6-5 dargestellt. Er besteht aus vier Arbeitsbereichen, in denen der Mitarbeiter unterschiedliche Tätigkeiten zur Kommissionierung von Produktionsaufträgen durchführt. Um einen Auftrag zu kommissionieren, entnimmt der Mitarbeiter Materialien aus dem Lager, verpackt diese je nach Beschaffenheit und verlädt sie in Transportbehälter. Abschließend stellt er sie für den Transport zur Produktion bereit. Die Aufnahmedauer betrug bei diesem Szenario 24 Minuten und 40 Sekunden. In dieser Zeit hat der Mitarbeiter 24 Teile für 5 Aufträge kommissioniert.

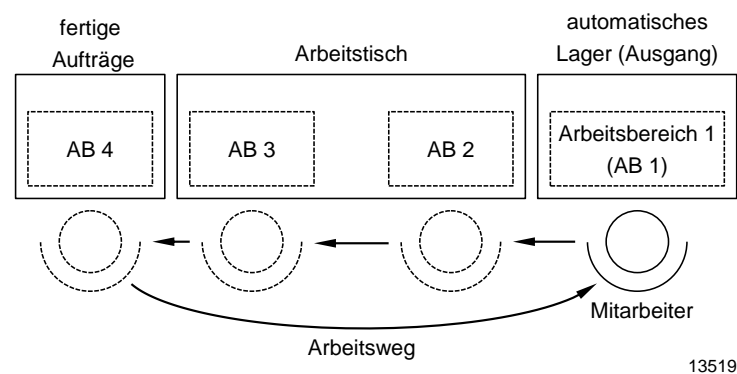


Abbildung 6-5 Aufbau des Arbeitsplatzes (Anwendungsbeispiel 2)

### Ermittlung von Ist- und Plan-Zeiten

Bei diesem Anwendungsbeispiel konnten die Ist-Zeiten unter Verwendung der vorgeschlagenen Richtwerten für die Zustandserkennung erfasst werden (vgl. Abschnitt 3.4.3.1). Für die Zusammenfassung der Zustände musste jedoch die Grenzdistanz zur Bestimmung der Clustergrößen angepasst werden. Sie wurde von dem Richtwert 40 cm auf 20 cm abgesenkt, da die Arbeitsbereiche sehr nah beieinander liegen. Tabelle 6-3 stellt den so ermittelten Ablauf mit Distanzen und Ist-Zeiten dar. Der Mitarbeiter benötigt für einen Ablauf 32,9 Sekunden und legt dabei 6,14 m zurück.

Tabelle 6-3 Ergebnis der Ermittlung von Ist- und Plan-Zeiten (Anwendungsbeispiel 2)

Ablaufschritt	Bezeichnung der Zustandsgruppe $g$	Distanz $D_{g,m}$ [cm]	Ist-Zeit $Z_{g,m}$ [s]	Soll-Zeit $Z_{g,Soll}$ [s]
1	Stehen/Sitzen bei AB 1	-	4,0	3,5
2	Körper bewegen von AB 1 zu AB 2	82	1,5	1,6
3	Stehen/Sitzen bei AB 2	-	9,2	8,0
4	Körper bewegen von AB 2 zu AB 3	130	2,7	2,2
5	Stehen/Sitzen bei AB 3	-	4,5	4,5
6	Körper bewegen von AB 3 zu AB 4	79	1,7	1,6
7	Stehen/Sitzen bei AB 4	-	3,3	3,1
8	Körper bewegen von AB 4 zu AB 1	323	6,0	6,4
<b>Summe</b>		<b>614</b>	<b>32,9</b>	<b>30,9</b>

13520

Die Bestimmung der Soll-Zeiten erfolgte ebenso wie beim ersten Anwendungsbeispiel mit dem vereinfachten MTM-1-Verfahren für die Bewegungen und der Ableitung des Modalwertes für die Stillstände. Tabelle 6-3 führt die so ermittelten Soll-Zeiten ebenfalls auf. Die gesamte Soll-Dauer des Ablaufs beträgt 30,9 Sekunden und ist somit 2,0 Sekunden kürzer als die Ist-Dauer.

Die Tabelle zeigt auf, dass der Mitarbeiter viel Zeit bei Arbeitsbereich 2 verbringt. Zudem wird deutlich, dass insbesondere der Weg von Arbeitsbereich 4 zu 1 relativ lang ist und viel Zeit verbraucht.

#### Analyse der Produktivität (Aufwandsartenanalyse)

Anders als beim ersten Anwendungsbeispiel wurden die nicht-tertiären Zustandsgruppen hier manuell ausgewählt. Das liegt daran, dass der Mitarbeiter während seiner Tätigkeit teilweise zum vorherigen Arbeitsbereich zurückgehen musste, um weitere Einzelteile oder Verpackungsmaterialien zu holen. Um dies zu berücksichtigen, wurden nicht nur die Zustandsgruppen des erkannten Ablaufs als nicht-tertiär gekennzeichnet, sondern auch die Bewegungen entgegen des vorgesehenen Materialflusses. Die Mindestbewegungslänge wurde ebenfalls manuell festgelegt. Die Arbeitsbereiche sind zwar nicht so flexibel wie bei der Getriebemontage in der Laborumgebung, bis auf das Lager sind sie jedoch zumindest theoretisch beweglich. Es ist somit denkbar, alle Bewegungen auf die Länge der kürzeste Bewegung des Ablaufs (vgl. Tabelle 6-3, Ablaufschritt 6) zu reduzieren.

Die Analyse hat aufgezeigt, dass bei der Arbeitsaufgabe die folgenden Aufwände entstanden sind:

- Primäraufwand: 70,6 %
- Sekundäraufwand: 16,4 %
- Geschwindigkeitsverlust: 5,6 %
- Tertiäraufwand: 7,4 %

Im Vergleich zum ersten Anwendungsbeispiel fällt insbesondere auf, dass der Primäraufwand kleiner ist. Dafür sind Sekundäraufwand und Tertiäraufwand deutlich größer. Der Sekundäraufwand ist erhöht, weil die Arbeitsbereiche nicht optimal angeordnet sind. Eine Umstellung des Layouts zu einer wegoptimierten Anordnung wie bei Anwendungsbeispiel 1 (vgl. Abbildung 6-1) kann diesen Aufwand somit deutlich reduzieren. Der erhöhte Tertiäraufwand ist dadurch begründet, dass der Mitarbeiter während der Aufnahme nicht ohne Unterbrechungen arbeiten konnte. So hat ihn beispielsweise ein weiterer Mitarbeiter um Informationen gebeten. Ein möglicher Schritt zur Reduzierung des Tertiäraufwandes wäre demnach eine Untersuchung der Ursachen für die Unterbrechungen. Trotz der erhöhten Verlustarten ist auch hier der Primäraufwand die größte Aufwandsart. Eine Analyse von Armbewegungen bei den Tätigkeiten in den einzelnen Arbeitsbereichen könnte also auch hier größeres Potenzial aufdecken.

Um die Vorgänge detaillierter zu untersuchen, stellt Abbildung 6-6 den ermittelten Ablauf als Vektordiagramm dar. Sie offenbart, dass die Stillstände (Ablaufschritte 1, 3, 5, 7) den meisten Primäraufwand verursachen. Sie erzeugen zudem auch den größten Anteil am Geschwindigkeitsverlust. Somit ist eine Optimierung der Tätigkeiten in den Arbeitsbereichen wie beim ersten Anwendungsbeispiel ein großer Hebel zur Verbesserung des Gesamtablaufs. Die Bewegungen (Ablaufschritte 2, 4, 6, 8) verursachen hingegen kaum Geschwindigkeitsverlust. Dafür erzeugt insbesondere Ablaufschritt 8 besonders viel Sekundäraufwand. Diese Erkenntnis bestätigt das Potenzial im bestehenden Layout, da dieser Ablaufschritt die Bewegung von einem Ende des Arbeitsplatzes zum anderen Ende ist.

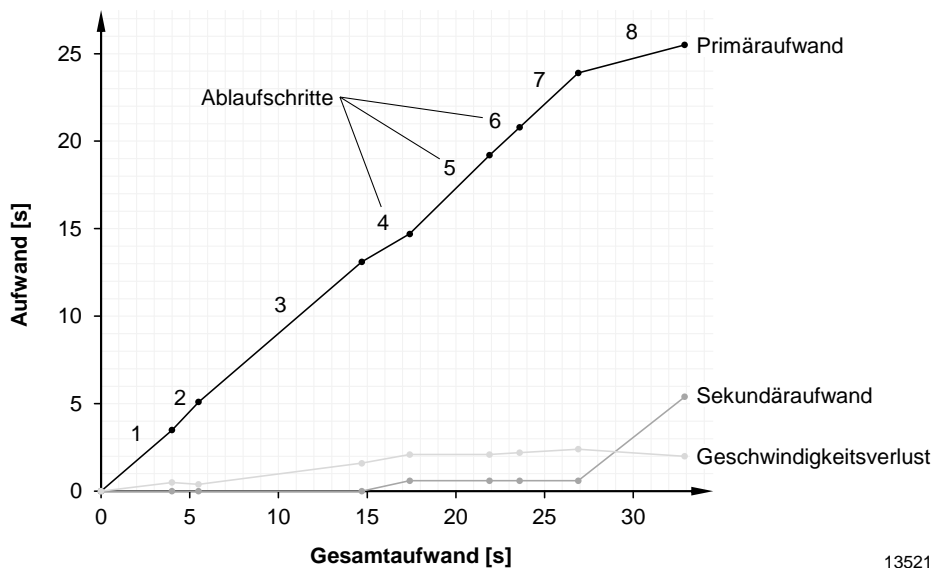
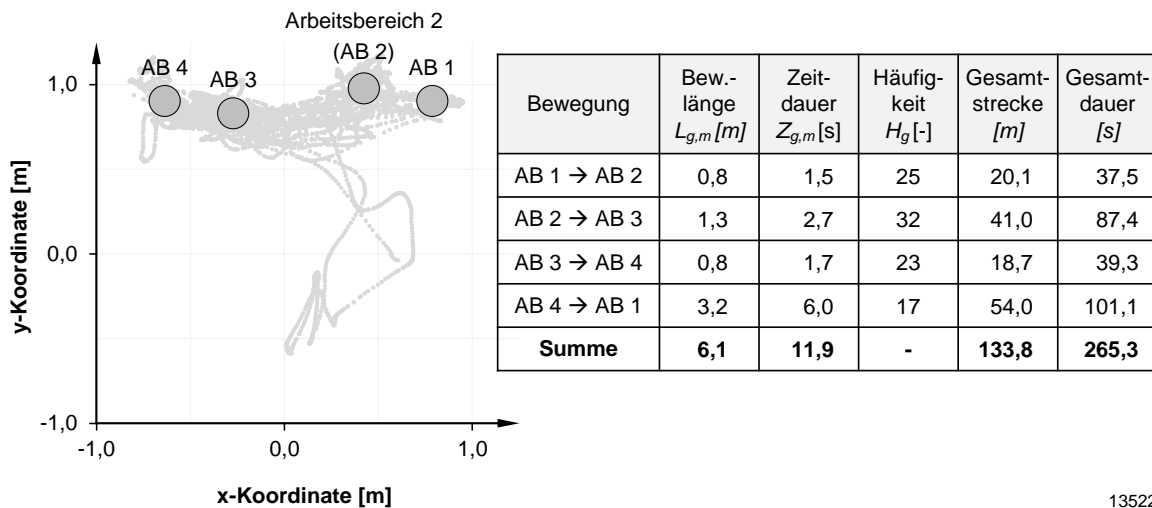


Abbildung 6-6 Vektordarstellung des ermittelten Ablaufs (Anwendungsbeispiel 2)

Wie beim ersten Anwendungsbeispiel bietet sich hier die getrennte Betrachtung der Strecken zwischen den Arbeitsstationen (vgl. Abbildung 6-7) beziehungsweise der Verweildauern (vgl. Abbildung 6-8) an.

Bei den Strecken (vgl. Abbildung 6-7) ist auffällig, dass der Weg zwischen Arbeitsbereich 4 und Arbeitsbereich 1 mit Abstand am längsten ist. Er hat dadurch ebenfalls die höchste Gesamtdauer, obwohl der Mitarbeiter ihn relativ selten geht. Für eine Optimierung der Anordnung wäre somit die Verkürzung dieser Wegstrecke ein geeigneter Ansatzpunkt.

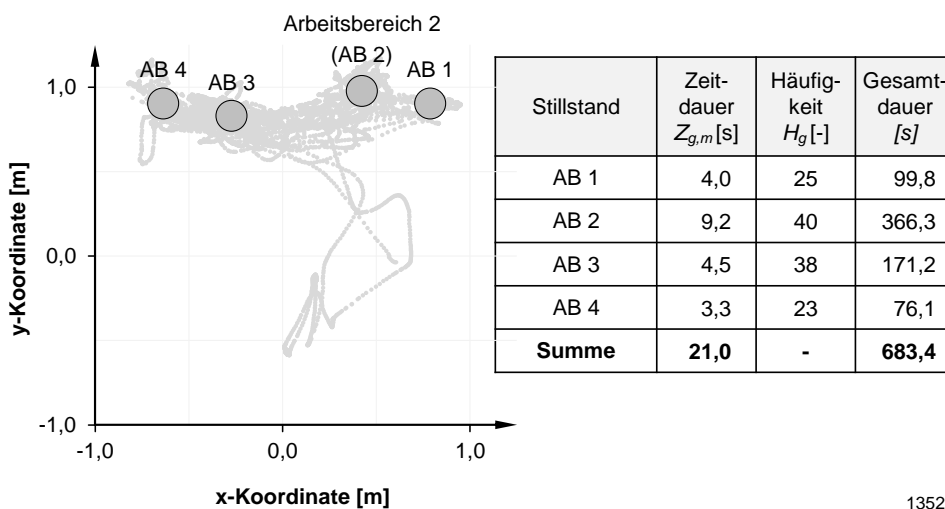
Der Weg zwischen Arbeitsbereich 2 und Arbeitsbereich 3 erzeugt ebenfalls relativ viel Aufwand. Das liegt hier insbesondere daran, dass der Mitarbeiter diesen Weg häufig zurücklegt. Zur weiteren Verbesserung der Abläufe kann man prüfen, ob man die Anzahl der Bewegungen zwischen den Arbeitsbereichen 2 und 3 reduzieren kann. Insgesamt legt der Mitarbeiter 6,1 m pro Durchgang und 133,8 m bei allen Durchgängen zurück. In der Abbildung erkennt man zudem die Bewegungen gut, bei denen der Mitarbeiter die Arbeitsbereiche verlässt und Tertiäraufwand verursacht.



13522

Abbildung 6-7 Strecken zwischen den Arbeitsbereichen (Anwendungsbeispiel 2)

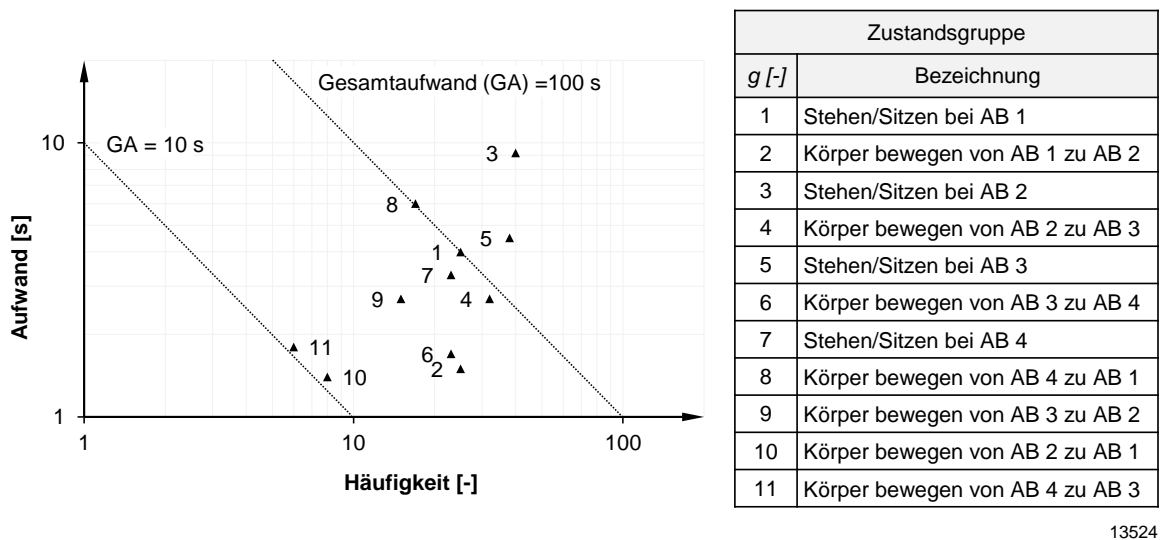
Abbildung 6-8 zeigt die Verweildauern in den einzelnen Arbeitsbereichen. Hier wird deutlich, dass sich der Mitarbeiter den größten Teil der Arbeitszeit in den Arbeitsbereichen 2 und 3 aufhält. Dies liegt vor allem daran, dass er dort am häufigsten Tätigkeiten durchführt. Die Tätigkeiten in Arbeitsbereich 3 dauern zudem deutlich länger als in den anderen Arbeitsbereichen, wodurch die Gesamtverweildauer dort mit Abstand am größten ist. Dieser Arbeitsbereich wäre somit bei der Durchführung von Detailanalysen und Verbesserungen zu priorisieren.



13523

Abbildung 6-8 Verweildauern in den Arbeitsbereichen (Anwendungsbeispiel 2)

Abbildung 6-7 hat gezeigt, dass der Mitarbeiter bei diesem Anwendungsbeispiel anders als beim ersten Beispiel die Strecken zwischen den einzelnen Arbeitsstationen nicht gleich häufig zurücklegt. Abbildung 6-8 zeigt dies analog für die Verweildauern. Bei solchen Anwendungsfällen eignet sich eine Häufigkeits-Aufwands-Matrix zur Darstellung der Häufigkeit und Dauer aller Zustandsgruppen (vgl. Abbildung 6-9). Sie stellt übersichtlich dar, dass die Zustandsgruppen mit dem höchsten Gesamtaufwand die Stillstände in den Arbeitsbereichen 2 und 3 sind. Darauf folgt der Stillstand in Arbeitsbereich 1 und die Bewegung von Arbeitsbereich 4 zu Arbeitsbereich 1. Damit stellt die Abbildung ein gutes Hilfsmittel zur Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen zur Verfügung. Sie zeigt zudem, dass ein nicht unbeachtlicher Anteil an Bewegung in entgegengesetzter Richtung zur vorgesehenen Arbeitsfolge besteht. Ein weiterer Ansatzpunkt für Optimierungen ist also die Untersuchung, ob solche Bewegungen vermeidbar sind.



13524

Abbildung 6-9 Häufigkeits-Aufwands-Matrix (Anwendungsbeispiel 2)

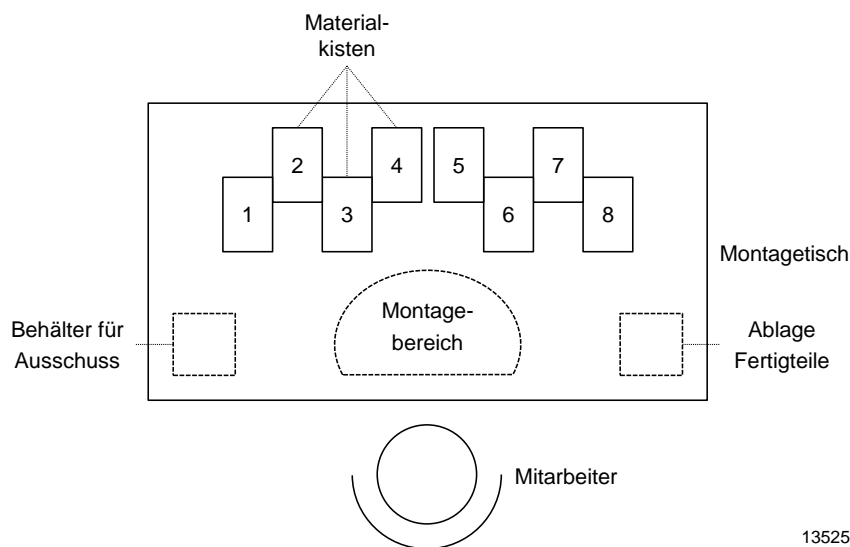
Fazit

Bei diesem Anwendungsbeispiel waren die Bedingungen nicht so gut wie in der Laborumgebung. Dadurch war die Erfassungsgüte geringer und lediglich eine einfache Analyse der Körperbewegungen möglich. Dennoch erlaubte die Methodik eine detaillierte und aufwandsarme Erfassung der Arbeitsvorgänge. Ein großes Potenzial bei diesem Szenario ist das suboptimale Arbeitsplatzlayout. Ein möglicher Ansatzpunkt ist somit die Neuordnung der Arbeitsbereiche. Zudem hat die Analyse aufgezeigt, dass der Mitarbeiter seine Tätigkeiten relativ häufig während der Aufnahme unterbrochen hat und dass er oft vom ermittelten Ablauf abweicht. Damit konnte die Analyse von Körperbewegungen auch bei diesem Anwendungsbeispiel die Grundlage für eine zielgerichtete Optimierung des Arbeitsplatzes schaffen.

### 6.2.3 Differenzierte Analyse von Armbewegungen (Laborumgebung)

#### Beschreibung der erfassten Arbeitsaufgabe

Das dritte Evaluationsbeispiel ist eine differenzierte Analyse von Armbewegungen. Dafür wurde eine Montage von Plastikautos in einer Laborumgebung aufgenommen. Die Plastikautos bestehen dabei aus sechs unterschiedlichen Einzelteilen, von denen zwei jeweils doppelt verbaut werden. In Summe verbaut der Mitarbeiter somit 8 Teile zu einem Auto. Abbildung 6-10 zeigt den Aufbau des Arbeitsplatzes. Sie zeigt, dass für jedes Teil eines Autos eine gesonderte Materialkiste zur Verfügung steht. So kann der Mitarbeiter die doppelten Einzelteile gleichzeitig montieren. Die Aufnahme dieser Arbeitsaufgabe dauerte 10 Minuten und 56 Sekunden. Der Mitarbeiter hat in dieser Zeit 40 Autos zusammgebaut.



13525

**Abbildung 6-10 Aufbau des Arbeitsplatzes (Anwendungsbeispiel 3)**

#### Ermittlung von Ist- und Plan-Zeiten

Bei der Zustandserkennung (vgl. Abschnitt 3.4.3.4) und bei der Zusammenfassung der Zustände wurden bei diesem Szenario die vorgeschlagenen Richtwerte verwendet. Das Ergebnis der Ist-Zeiterfassung sind die in Tabelle 6-4 und in Tabelle 6-5 dargestellten Abläufe. Tabelle 6-4 zeigt die Ablaufschritte des linken Armes und Tabelle 6-5 die Ablaufschritte des rechten Armes. Die gesamte mittlere Dauer eines Ablaufs beträgt 14,9 (links) beziehungsweise 15,0 (rechts) Sekunden. Dabei legt der linke Arm 253 cm und der rechte Arm 600 cm zurück.

**Tabelle 6-4 Ergebnis der Ermittlung von Ist- und Plan-Zeiten, linker Arm  
(Anwendungsbeispiel 3)**

Ablaufschritt	Bezeichnung der Zustandsgruppe <i>g</i>	Distanz $D_{g,m}$ [cm]	Ist-Zeit $Z_{g,m}$ [s]	Soll-Zeit $Z_{g,Soll}$ [s]
1	Arm vom Körper weg bewegen vom Fügeort zu Kiste 1	49	0,7	0,7
2	Arm fern vom Körper ruhen bei Kiste 1	-	0,2	0,2
3	Arm zum Körper bewegen von Kiste 1 zum Fügeort	48	0,8	0,6
4	Arm nah am Körper ruhen am Fügeort*	-	2,5	2,1
5	Arm vom Körper weg bewegen vom Fügeort zu Kiste 3	29	0,7	0,5
6	Arm fern vom Körper ruhen bei Kiste 3	-	0,3	0,2
7	Arm zum Körper bewegen von Kiste 3 zum Fügeort	33	0,7	0,5
8	Arm nah am Körper ruhen am Fügeort*	-	0,5	0,4
9	Arm vom Körper weg bewegen vom Fügeort zu Kiste 4	49	0,9	0,7
10	Arm fern vom Körper ruhen bei Kiste 4	-	0,4	0,2
11	Arm zum Körper bewegen von Kiste 4 zum Fügeort	45	0,9	0,6
12	Arm nah am Körper ruhen am Fügeort*	-	6,3	5,7
<b>Summe</b>		<b>253</b>	<b>14,9</b>	<b>12,4</b>

\* Die Zustandsgruppe „Arm nah am Körper ruhen am Fügeort“ umfasst mehrere Ablaufschritte, die sich stark voneinander unterscheiden. Daher sind hier für jeden Ablaufschritt die Zeiten separat aufgeführt.

13530

Die beiden Tabellen führen ebenso die ermittelten Soll-Zeiten auf. Diese wurden für die Bewegungen durch das vereinfachte MTM-Verfahren und für die Stillstände aus den Modal-Werten abgeleitet. Die Soll-Dauer des Arbeitsablaufs beträgt 12,4 Sekunden für den linken Arm und 11,7 Sekunden für den rechten Arm. Damit sind die Soll-Dauern um 2,5 beziehungsweise 3,3 Sekunden kürzer als die Ist-Dauern.

Bei Betrachtung der Tabellen fällt auf, dass der rechte Arm deutlich mehr Ablaufschritte durchführt als der linke Arm. Dafür gehören beim linken Arm zwei besonders lange Stillstände zum Ablauf (Schritte 4 und 12). Während dieser Schritte hat der linke Arm das Auto gehalten während der rechte Arm Teile gebracht und gefügt hat. Die Bewegungslängen sind bei allen Bewegungen in etwa gleich lang. Lediglich die Bewegungen des linken Armes zur Kiste 3 und zurück sind relativ kurz.

**Tabelle 6-5 Ergebnis der Ermittlung von Ist- und Plan-Zeiten, rechter Arm  
(Anwendungsbeispiel 3)**

Ablaufschritt	Bezeichnung der Zustandsgruppe <i>g</i>	Distanz $D_{g,m}$ [cm]	Ist-Zeit $Z_{g,m}$ [s]	Soll-Zeit $Z_{g,Soll}$ [s]
1	Arm nah am Körper ruhen am Fügeort*	-	1,7	1,5
2	Arm vom Körper weg bewegen vom Fügeort zu Kiste 8	51	0,8	0,7
3	Arm fern vom Körper ruhen bei Kiste 8	-	0,2	0,2
4	Arm zum Körper bewegen von Kiste 8 zum Fügeort	48	0,8	0,6
5	Arm nah am Körper ruhen am Fügeort*	-	0,2	0,2
6	Arm vom Körper weg bewegen vom Fügeort zu Kiste 6	41	0,8	0,6
7	Arm fern vom Körper ruhen bei Kiste 6	-	0,3	0,3
8	Arm zum Körper bewegen von Kiste 6 zum Fügeort	44	0,8	0,6
9	Arm nah am Körper ruhen am Fügeort*	-	0,1	0,1
10	Arm vom Körper weg bewegen vom Fügeort zu Kiste 5	56	1,0	0,8
11	Arm fern vom Körper ruhen bei Kiste 5	-	0,3	0,2
12	Arm zum Körper bewegen von Kiste 5 zum Fügeort	58	1,1	0,7
13	Arm nah am Körper ruhen am Fügeort*	-	0,2	0,2
14	Arm vom Körper weg bewegen vom Fügeort zu Kiste 2	53	1,1	0,7
15	Arm fern vom Körper ruhen bei Kiste 2	-	0,2	0,2
16	Arm zum Körper bewegen von Kiste 2 zum Fügeort	50	1,2	0,6
17	Arm nah am Körper ruhen am Fügeort*	-	0,2	0,2
18	Arm vom Körper weg bewegen vom Fügeort zu Kiste 7	47	0,8	0,7
19	Arm fern vom Körper ruhen bei Kiste 7	-	0,2	0,2
20	Arm zum Körper bewegen von Kiste 7 zum Fügeort	54	0,9	0,7
21	Arm nah am Körper ruhen am Fügeort*	-	0,3	0,3
22	Arm vom Körper weg bewegen vom Fügeort zur Ablage	49	0,9	0,6
23	Arm fern vom Körper ruhen bei Ablage	-	0,1	0,1
24	Arm zum Körper bewegen von Ablage zum Fügeort	48	0,8	0,7
<b>Summe</b>		<b>600</b>	<b>15,0</b>	<b>11,7</b>

\* Die Zustandsgruppe „Arm nah am Körper ruhen am Fügeort“ umfasst mehrere Ablaufschritte, die sich stark voneinander unterscheiden. Daher sind hier für jeden Ablaufschritt die Zeiten separat aufgeführt.

13531

### Analyse der Produktivität (Aufwandsartenanalyse)

Bei diesem Szenario erfolgte die Auswahl der nicht-tertiären Zustandsgruppen wie beim ersten Anwendungsbeispiel über den ermittelten Ablauf. Alle nicht zu diesem Ablauf gehörenden Zustandsgruppen stellen somit Tertiäraufwand dar. Die Mindestbewegungslänge zur Ermittlung von Primär- und Sekundäraufwand wurde in Anlehnung an die klassische PSA ermittelt. Die verwendeten Materialkisten sind nicht starr verbaut und können leicht neu angeordnet werden. Somit ist eine Anpassung der Bewegungslängen auf die die kürzeste Bewegung (vgl. Tabelle 6-4, Ablaufschritt 5) des Ablaufs denkbar.

Die Analyse hat für die Aufwandsarten die folgenden Ergebnisse geliefert:

	linker Arm	rechter Arm
- Primäraufwand:	70,6 %	59,1 %
- Sekundäraufwand:	16,4 %	12,2 %
- Geschwindigkeitsverlust:	5,6 %	20,1 %
- Tertiäraufwand:	7,4 %	8,5 %

Abbildung 6-11 visualisiert die Ergebnisse der Produktivitätsanalyse.

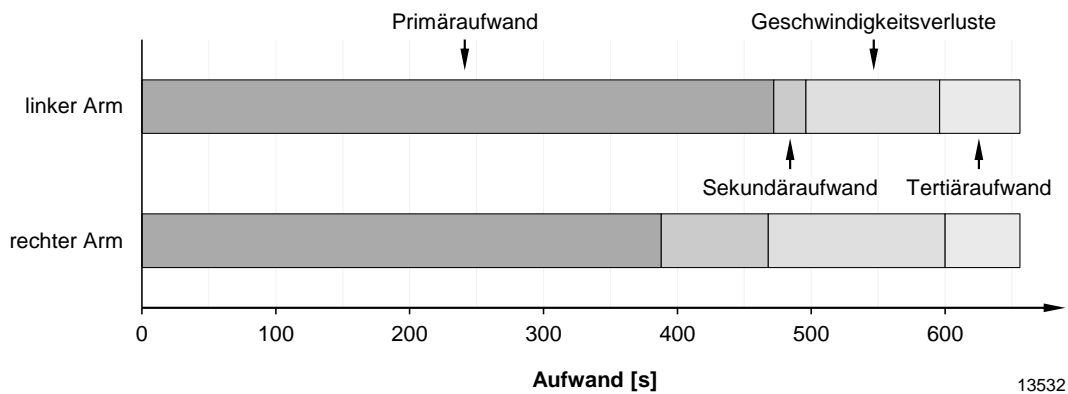


Abbildung 6-11 Verteilung der Aufwandsarten (Anwendungsbeispiel 3)

Bei Betrachtung der Aufwände fällt auf, dass sich die Werte der beiden Arme voneinander unterscheiden. Lediglich der Tertiäraufwand ist bei beiden Armen in etwa gleich. Das liegt daran, dass der Mitarbeiter tertiäre Tätigkeiten mit beiden Armen durchführt. Dazu gehört beispielsweise die Korrektur von Fehlern oder das Ablegen von fehlerhaft montierten Teilen. Dieser Tertiäraufwand ist relativ hoch, da die Demontage inkorrekt verbauter Teile deutlich länger dauert als die Montage. Der Geschwindigkeitsverlust ist bei dem rechten Arm höher als beim linken. Dies ist vermutlich dadurch begründet, dass der Mitarbeiter die komplizierteren Arbeitsschritte mit dem rechten Arm durchgeführt hat. Insgesamt ist der Geschwindigkeitsverlust jedoch bei beiden Armen recht hoch. Mögliche Ursachen dafür sind der mangelnde Übungsgrad des Mitarbeiters sowie die Tatsache, dass er teilweise mit beiden Händen gleichzeitig arbeitet. Der Sekundäraufwand ist beim rechten Arm ebenfalls höher als beim linken Arm. Dies liegt vor allem daran, dass der Mitarbeiter mehr und längere Bewegungen mit dem rechten Arm durchführt während er die linke Hand vorrangig zum Festhalten des Autos nutzt. Durch die unterschiedlichen Verlustanteile der beiden Arme ist der Primäraufwand des rechten Armes deutlich geringer. Zur detaillierteren Betrachtung der Aufwandsarten zeigen Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13 die Vektordiagramme der beiden Arme.

Abbildung 6-12 visualisiert den Ablauf des linken Armes. Hier fällt auf, dass zwei Stillstände (Ablaufschritte 4 und 12) enorm viel Primäraufwand verursachen. Diese beiden Ablaufschritte beschreiben das Festhalten des Autos während der rechte Arm weiter montiert. An dieser Stelle wird deutlich, dass ein hoher Primäraufwand nicht zwangsläufig bedeutet, dass keine Verbesserungsmaßnahmen möglich oder notwendig sind. So könnte man hier beispielsweise prüfen, ob eine Montagevorrichtung für das Auto das Festhalten ersetzen kann. Der Gesamtaufwand für den linken Arm könnte damit stark reduziert werden.

Die restlichen Stillstände (Ablaufschritte 2, 6, 8, 10) erzeugen weniger Primäraufwand als die Bewegungen und zeigen keine Auffälligkeiten. Die Abbildung zeigt ebenfalls, dass alle Ablaufschritte Geschwindigkeitsverlust erzeugen. Ein höherer Übungsgrad des Mitarbeiters könnte somit zu einer Beschleunigung des gesamten Ablaufs führen.

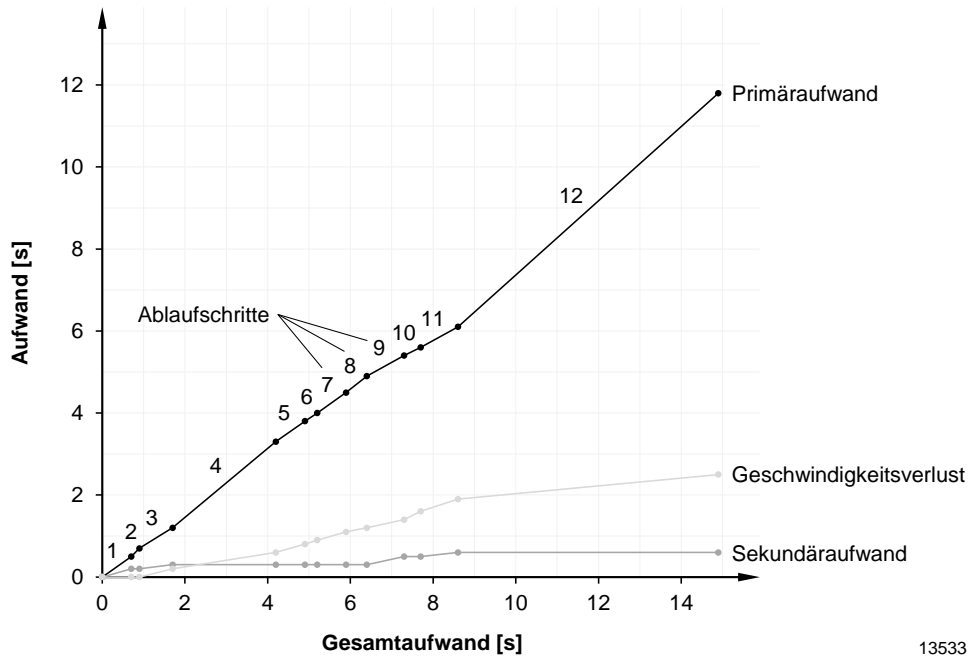
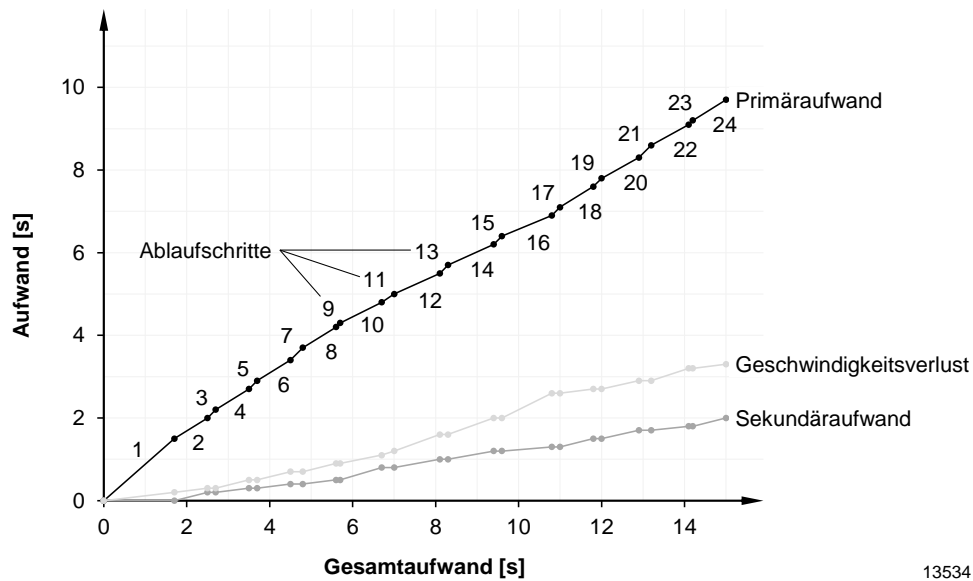


Abbildung 6-12 Vektordarstellung der Aufwände, linker Arm (Anwendungsbeispiel 3)

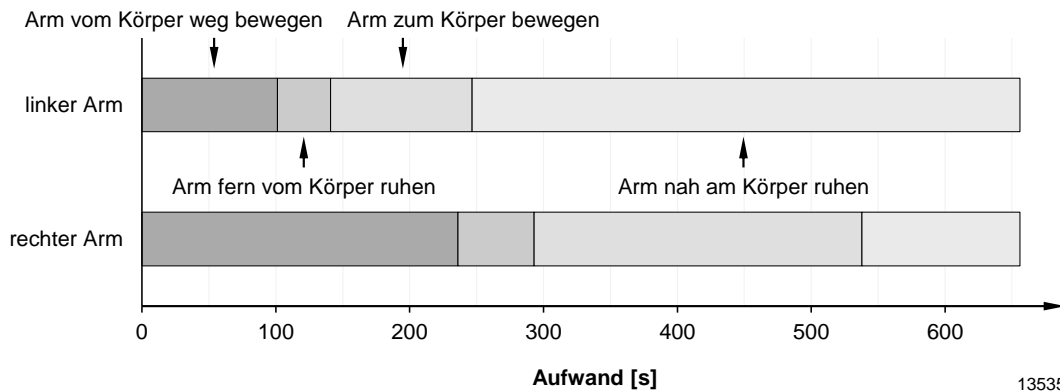
Abbildung 6-13 stellt die Ablaufschritte des rechten Armes als Vektordiagramm dar. Die Abbildung zeigt, dass Ablaufschritt 1 überdurchschnittlich viel Aufwand erzeugt. Bei diesem Schritt wartet die rechte Hand darauf, dass die linke das erste Bauteil des Autos in den Fügebereich gebracht hat. Hier ist somit wiederum trotz des hohen Primäraufwandes zu prüfen, ob man diesen Schritt verbessern kann. Des Weiteren fällt an dieser Stelle auf, dass insbesondere die Bewegungen (Ablaufschritte 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24) relativ viel Geschwindigkeitsverlust erzeugen. Die Stillstände hingegen sind in etwa in Soll-Geschwindigkeit. Darüber hinaus verdeutlicht insbesondere der Vergleich zwischen Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13, dass der rechte Arm deutlich mehr Bewegungen durchführt. Eine weitere Maßnahme könnte somit eine angepasste Verteilung der Arbeitsinhalte auf die beiden Arme sein.



13534

Abbildung 6-13 Vektordarstellung der Aufwände, rechter Arm (Anwendungsbeispiel 3)

Die Produktivitätsanalyse hat gezeigt, dass die Aufwandsarten der beiden Arme unterschiedlich sind. Eine Ursache dafür ist die Ungleichverteilung der Bewegungen auf die beiden Arme. Abbildung 6-14 vergleicht die Verteilungen der Zustandsarten der Arme und bestätigt dieses Ergebnis. Die Abbildung zeigt, dass der linke Arm nah am Körper ruht, während sich der rechte Arm vor allem vom und zum Körper bewegt. An einem Arbeitsplatz, bei dem der Mitarbeiter beide Arme gleichmäßig nutzt, wären die Verteilungen in etwa identisch. Die Abbildung weist somit erneut auf eine mögliche Optimierung durch Verschiebung von Arbeitsinhalte vom rechten zum linken Arm hin.



13535

Abbildung 6-14 Verteilung der Zustandsarten (Anwendungsbeispiel 3)

### Fazit

Die entwickelte Methodik hat in diesem Szenario aufwandsarm detaillierte Ergebnisse für die Armbewegungen geliefert. Grundlage dafür war wie beim ersten Anwendungsbeispiel die relativ hohe Erfassungsgüte. Die Analyse hat aufgezeigt, dass einzelne Stillstände einen großen Teil des Aufwands erzeugen. Ein möglicher Ansatz für die Optimierung dieser Stillstände ist die Umgestaltung der Arbeitsaufgabe. Insbesondere sollte man hier eine gleichzeitige Nutzung der Arme anstreben. Die Untersuchung hat zudem aufgedeckt, dass der Mitarbeiter noch ungeübt ist. Das Arbeitsplatzlayout bietet ebenso Potenzial für mögliche Verbesserungen.

Dieses Anwendungsbeispiel zeigt, dass die Methodik für eine Analyse der Armbewegungen geeignet ist. Die allgemeingültige Anwendbarkeit konnte jedoch noch nicht endgültig bewiesen werden. Dies liegt vor allem daran, dass die Kinect als Technologie der Bewegungserfassung nur bei Laborbedingungen eine ausreichend hohe Erfassungsgüte für die Analyse der Armbewegungen liefern konnte. Für die Umsetzung in der Industrie müsste man demnach eine andere Technologie verwenden. Dies würde dann eventuell eine Anpassung von Teilschritten der Methodik erfordern.

### **6.3 Bewertung der Methode**

Dieser Abschnitt prüft, ob die einzelnen Teile der Methode die an sie gestellten Anforderungen (vgl. Abschnitt 2.6.2) erfüllen. Diese Anforderungen sind:

- 1) Hohe Detaillierung bei der Erfassung von Ist-Abläufen
- 2) Integrierte Ermittlung des Plan-Ablaufs
- 3) Verbesserungsorientierte Ergebnisse
- 4) Geringer Anwendungsaufwand

Besonderes Augenmerk liegt auf dem Aufwand, da er ein entscheidendes Kriterium für die praktische Anwendbarkeit der Methodik darstellt. Die Bewertung erfolgt an dieser Stelle unter der Bedingung, dass man die Kinect zur Bewegungserfassung verwendet. Sie trifft aber auch Aussagen darüber, ob die Methodik die Anforderungen besser erfüllen kann, wenn andere Technologien der Bewegungserfassung verwendet werden. Das abschließende Fazit fasst die Erkenntnisse zusammen und trifft eine Aussage über die Industrietauglichkeit der vorgestellten Methodik.

#### Bewertung der Erfassung von Ist-Zeiten

Die Ableitung von Ist-Zeiten aus Bewegungsdaten ist ein zentraler Bestandteil der Methode, auf dem die weiteren Schritte aufbauen. Die für sie relevanten Anforderungen sind eine hohe Detaillierung bei der Erfassung (Anforderung 1) und ein geringer Anwendungsaufwand (Anforderung 4).

### *Hohe Detaillierung bei der Erfassung von Ist-Abläufen*

Die Erkennung von Mitarbeiterzuständen mit den erfassten Bewegungsdaten erlaubt die detaillierte Unterteilung der Beobachtungszeit. Für jeden der erkannten Zustände ermittelt die Methode zudem die Zeitdauer und die Bewegungslänge. Sie fasst die erkannten Zustände anschließend zu Zustandsarten und -gruppen zusammen. Dadurch ist es möglich, die Ist-Abläufe ausführlich und systematisch zu beschreiben. Zudem schafft die Methodik so eine konkrete Grundlage für die Identifizierung von Verbesserungspotenzialen. Damit ist die erste Anforderung erfüllt.

### *Geringer Anwendungsaufwand*

Zur Bewertung des Durchführungsaufwands der Ist-Zeiterfassung werden die Aufwände der einzelnen Schritte betrachtet. Ein wesentlicher Teil des Gesamtaufwands entsteht dabei im ersten Schritt durch die *Datenaufnahme und -vorbereitung*. Sie beginnt mit der Auswahl einer geeigneten Positionierung der Kinect am Erfassungsort. Je nach Anwendungsszenario kann dies zwischen 5 und 30 Minuten in Anspruch nehmen. Insbesondere bei räumlich begrenzten Arbeitsplätzen ist es häufig nicht einfach, einen geeigneten Ort zu finden. Der Aufbau der Kinect sowie der Start der Aufnahme dauern dann etwa fünf Minuten. Während der Aufnahme entsteht kein zusätzlicher Aufwand für den Anwender, da sie automatisiert erfolgt. Im Anschluss folgen die Datenaufbereitung und -bereinigung. Der entwickelte Software-Demonstrator (vgl. Abschnitt 3.3) unterstützt diese Schritte. Der Anwender kann die Daten innerhalb weniger Minuten aufbereiten und in eine leicht verständliche Form bringen. Die manuelle Datenbereinigung hingegen kann je nach Anwendungsfall (vgl. Abschnitt 6.1) unterschiedlich hohen Aufwand erfordern. Dieser Aufwand entsteht, wenn der Anwender die Daten manuell bereinigen muss. Bei einer schlechten Erfassungsgüte kann dieser Schritt pro Minute Aufnahmezeit bis zu fünf Minuten dauern.

Die nachfolgenden Schritte der Erfassung können automatisiert erfolgen. Manueller Aufwand ist nur dann notwendig, wenn der Anwender die automatisierten Algorithmen an die Arbeitsaufgabe anpassen muss. Bei der *Zustandserkennung* kann er beispielsweise Grenzwerte anpassen und bei der *Zusammenfassung der Zustände* die Clustergröße variieren. In der Regel ist dies jedoch nicht notwendig. Auch die *Ermittlung von Abläufen* erfolgt größtenteils automatisiert. Hierbei muss der Anwender lediglich Anfangs- und Endzustand des Ablaufs auswählen. Dieser Schritt dauert nur wenige Minuten. Die *Berechnung und Aggregation von Zustandsdaten* erfolgt dann vollständig automatisiert.

Tabelle 6-6 fasst die notwendigen Aufwände für die Ist-Zeiterfassung sowie die weiteren Schritte der entwickelten Methodik zusammen. Bei Betrachtung der Aufwände der einzelnen Schritte zeigt sich, dass die Erfassungsgüte einen entscheidenden Einfluss auf den Aufwand der Ist-Zeiterfassung hat. Bei einer idealen Erfassung erfordert sie lediglich 25-50 Minuten manuellen Aufwand und erfüllt damit Anforderung 4. Bei einer schlechten Erfassungsgüte steigt der Aufwand insbesondere bei längeren Aufnahmen stark an. Man erkennt zudem, dass die zeitbestimmenden Schritte (Positionierung der Kinect, Datenaufbereitung und -bereinigung) im direkten Zusammenhang mit Verwendung der Kinect stehen. Andere Technologien zur Bewegungserfassung könnten den notwendigen Aufwand für diese Schritte somit stark reduzieren.

Tabelle 6-6 Aufwände der Teilschritte der Methodik

Schritt	Teilschritt	Aufwand	Anmerkung
Erfassung von Ist-Zeiten	Positionierung der Kinect	5-30 min	abhängig von Arbeitsplatzlayout
	Aufbau der Kinect	5 min	-
	Datenaufbereitung und -bereinigung	10 min	bei schlechter Erfassungsgüte bis zu 2 Std. Aufwand pro 30 Min. Aufnahme
	Zustandsableitung	-	automatisiert durchführbar
	Zusammenfassung der Zustände	-	automatisiert durchführbar
	Ermittlung von Abläufen	<5 min	-
	Berechnung und Aggregation von Zustandsdaten	-	automatisiert durchführbar
Bestimmung von Plan-Zeiten	-	-	automatisiert durchführbar
Analyse der Produktivität	Bestimmung der Zeitanteile	<5 min	-
	Auswertung der Ergebnisse	-	automatisiert durchführbar
	Ableitung von Verbesserungsvorschlägen	-	automatisiert durchführbar
<b>Summe</b>		<b>30-55 min</b>	bei guter Erfassungsgüte

13536

### Bewertung der Bestimmung von Plan-Zeiten

Für die Bestimmung der Plan-Zeiten sind eine integrierte Bestimmung der Plan-Zeiten (Anforderung 2) und ein geringer Aufwand (Anforderung 4) die relevanten Anforderungen.

#### *Integrierte Ermittlung des Plan-Ablaufs*

Eine wichtige Anforderung ist es, Plan- und Ist-Zeiten nicht isoliert voneinander zu ermitteln. Die Methode soll sie stattdessen mit einem durchgängigen Verfahren detailliert bestimmen. Dies ist mit den vorgestellten Varianten der Plan-Zeitbestimmung sehr gut möglich. Sie ermöglichen es zum einen, verlässliche Zeiten für die Planung abzuleiten. Zum anderen liefern sie geeignete Werte für einen Soll-Ist-Vergleich. Damit ist diese Anforderung erfüllt.

#### *Geringer Anwendungsaufwand*

Die Plan-Zeitbestimmung verwendet verschiedene Varianten, um belastbare Zeiten zu ermitteln. Durch Nutzung der Bewegungsdaten ist es möglich, diese Varianten vollständig zu automatisieren. Sie erfordern somit keinen zusätzlichen manuellen Aufwand. Lediglich die *Teilautomatisierung des MTM-1-Verfahrens* benötigt weiterhin manuellen Input durch einen MTM-1-Experten. Jedoch ist der Aufwand geringer als bei der klassischen Durchführung des MTM-1-Verfahrens. Da die Methodik diese Variante im Regelfall nicht verwendet, entsteht kein manueller Aufwand bei der Plan-Zeitbestimmung. Die Anforderung ist somit vollständig erfüllt.

### Bewertung der Analyse der Produktivität

Ein weiteres Ziel der Methodik ist die Bewertung der Produktivität unter Verwendung der ermittelten Ist- und Plan-Zeiten. Die Produktivitätsanalyse soll dabei verbesserungsorientierte Ergebnisse (Anforderung 3) mit geringem Aufwand (Anforderung 4) erzeugen. Da die entwickelte Analyse auf der Primär-Sekundär-Analyse nach Lotter aufbaut, liegt besonderes Augenmerk auf Unterschieden zwischen der entwickelten Methode und der PSA [vgl. Lott12, S. 49ff.].

#### *Verbesserungsorientierte Ergebnisse*

Die entwickelte Methodik unterscheidet zwischen drei verschiedenen Verlustarten: Sekundäraufwand, Geschwindigkeitsverlust und Tertiäraufwand. Die klassische PSA erfasst lediglich eine Verlustart, den Sekundäraufwand. Somit ist der Mehrwert der entwickelten Methodik zum einen die Erfassung von Abweichungen zwischen Ist- und Soll-Zeiten (Geschwindigkeitsverlust). Dadurch kann sie besonders langsame Bewegungen oder Schwankungen in den Zustandszeiten aufdecken. Zum anderen nimmt sie alle auftretenden (tertiäre und nicht-tertiäre) Zustände auf und wertet diese aus. Die klassische PSA betrachtet an dieser Stelle nur die geplanten Ablaufschritte.

Neben der Bestimmung der Verlustanteile stellt die Methodik weitere Auswertungsmöglichkeiten zur Verfügung, die die Ergebnisse übersichtlich darstellen. So ist es möglich, einzelne Zustände gezielt zu untersuchen, einen Ablauf und seine Verluste übersichtlich zu visualisieren und die größten Potenziale in der Beobachtungszeit zu bestimmen. Die klassische PSA beschränkt sich an dieser Stelle auf die Darstellung des geplanten Ablaufs. Durch die detaillierten Ergebnisse und vielfältigen Auswertungsmöglichkeiten kann der Methoden-anwender gezielt Verbesserungsvorschläge ableiten. Damit ist Anforderung 3 erfüllt.

Die Anwendungsbeispiele haben zudem aufgezeigt, dass die alleinige Fokussierung auf die Verlustarten nicht ausreicht. Auch wenn kaum Verluste auftreten und der Primäraufwand somit den größten Anteil der Beobachtungszeit ausmacht, existieren in der Regel Verbesserungspotenziale in den erfassten Abläufen. Der Methoden-anwender sollte bei einem sehr hohen Anteil an Primäraufwand nicht davon ausgehen, dass der Ist-Ablauf ideal ist. So kann er beispielsweise überflüssige Arbeitsschritte enthalten oder die Mindestbewegungslänge ist unnötig lang. Die Methode sieht eine detailliertere Untersuchung des Primäraufwandes zwar nicht vor, es ist jedoch denkbar, sie an dieser Stelle weiterzuentwickeln.

#### *Geringer Anwendungsaufwand*

Erster Schritt der Produktivitätsbewertung ist die *Bestimmung der Zeitanteile*. Bei der vorgeschlagenen Bestimmung des Tertiäraufwandes unter Verwendung des erkannten Ablaufs (vgl. Abschnitt 5.2.1) erfolgt dieser Schritt automatisiert und erfordert keinen Aufwand. Bei manueller Auswahl der Zustandsgruppen ist nur wenig Zeit für diesen Schritt notwendig. Lediglich die manuelle Auswahl einzelner Zustände wäre sehr aufwändig. Diese Variante ist jedoch im Normalfall nicht bei Anwendung der Methode vorgesehen. Die Geschwindigkeitsverluste kann man anschließend vollständig automatisiert ermitteln. Die Bestimmung des Sekundäraufwandes kann bei den Analysen von Armbewegungen ebenfalls automatisiert erfolgen, wenn eine klassische Montageaufgabe vorliegt. Bei anderen Arbeitsaufgaben und bei den Analysen von Körperbewegungen hingegen ist die Auswahl einer Mindestbewegungslänge notwendig. Dies kann der Anwender jedoch in wenigen Minuten durchführen.

Die klassische PSA bestimmt keine Tertiäraufwände oder Geschwindigkeitsverluste. Daher entfällt dort die Bestimmung dieser Zeitanteile. Die Bestimmung des Sekundäraufwands über die Mindestbewegungslänge erfolgt stets manuell und ist dadurch zeitintensiver als bei dem entwickelten Vorgehen. Der Aufwand für die Bestimmung der Zeitanteile ist somit bei beiden Methoden vergleichbar.

Die *Auswertung der Ergebnisse* kann bei beiden Methoden automatisiert erfolgen und erfordert keinen Aufwand. Die anschließende *Ableitung von Verbesserungsvorschlägen* hängt stark von der beobachteten Aufgabe ab und weniger von der verwendeten Analysemethode. Sie wird daher an dieser Stelle nicht betrachtet.

Tabelle 6-6 fasst die Aufwände aller Schritte der entwickelten Methodik zusammen.

### Fazit der Bewertung

Die entwickelte Gesamtmethodik erfüllt die an sie gestellten Anforderungen zum größten Teil. Sie erfasst die Ist-Abläufe detailliert und ermöglicht die integrierte Bestimmung von Plan-Zeiten. Sie wertet die ermittelten Zeiten aus und ermittelt so differenzierte Verlustarten. Die Ergebnisse stellt sie übersichtlich dar und bietet somit Ansatzpunkte für Verbesserungsmaßnahmen.

Bei idealer Erfassungsgüte ist zudem der Methodenaufwand auch bei der Aufnahme längerer Zeiträume sehr gering. Er kann jedoch stark ansteigen, wenn diese Güte abnimmt. Dann sinkt zudem die Zuverlässigkeit der erfassten Daten. Bei der Evaluation der Methode war dies insbesondere in den zwei untersuchten Industrieszenarien für Armbewegungen der Fall. Es ist damit zu rechnen, dass diese Problematik häufiger bei den Analysen von Armbewegungen auftritt. Unter vorteilhaften Bedingungen (gute Beleuchtung, kleine Werkstücke, gute Kamerapositionierung) ist der Einsatz in der Industrie möglich.

Da man diese vorteilhaften Bedingungen nicht immer gewährleisten kann, ist die Methode – zumindest mit der Kinect als Mittel der Bewegungserfassung – nicht bedingungslos industrietauglich. Die Methode ist jedoch problemlos auf andere Technologien übertragbar, da sie keine kinectspezifischen Daten erfordert. Sie verwendet allgemeingültige Bewegungsdaten, die andere Systeme ebenfalls erfassen können. Ein Beispiel für eine solche Technologie sind Anzüge, die elektromechanisches oder elektromagnetisches Tracking nutzen (z. B. der ‚Xsens MVN Motion Capture Suit‘ [XSen17]).

Die Evaluation hat gezeigt, dass die Methodik grundsätzlich für den Einsatz in der industriellen Praxis geeignet ist. Es gibt dennoch Möglichkeiten, sie weiterzuentwickeln und die Industrietauglichkeit weiter zu erhöhen. Insbesondere der Einsatz alternativer oder ergänzender Technologien zur Bewegungserfassung ist hier zu nennen.

## 7 Schlussbetrachtung

Die Schlussbetrachtung fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen (Abschnitt 7.1) und zeigt anschließend Potenziale für Weiterentwicklungen auf (Abschnitt 7.2).

### 7.1 Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt eine Methodik zur Analyse der Produktivität unter Verwendung von Bewegungsdaten vor. Zentrale Voraussetzung für diese Methode ist dabei die Erfassung von Gelenkpunkten über die Zeit. Als Erfassungstechnologie verwendet die Arbeit mit der Microsoft Kinect 2.0 ein optisches System. Die entwickelten Algorithmen sind jedoch so ausgelegt, dass eine Anwendung anderer Technologien ebenso denkbar ist. Ein Beispiel für eine solche alternative Technologie sind Anzüge zur Bewegungserfassung, die auf elektro-mechanischem Tracking basieren.

Die entwickelte Methodik ist in der Lage, die Ist-Zeiten von beobachteten Arbeitsvorgängen detailliert und aufwandsarm zu erfassen. Sie leitet aus den erfassten Bewegungsdaten Zustände ab und ermittelt für sie relevante Zustandsdaten. Anschließend fasst sie die Zustände zu Zustandsgruppen und Abläufen zusammen. Dadurch ist es möglich, die Ergebnisse übersichtlich und leicht verständlich abzubilden.

Im nächsten Schritt bestimmt die Methodik Plan-Zeiten für die relevanten Ablaufschritte der erfassten Abläufe. Sie ermittelt dabei zum einen Soll-Zeiten für einen Vergleich mit den Ist-Zeiten. Zum anderen bestimmt sie für die Produktionsplanung geeignete Zeiten. Die Bestimmung dieser Zeiten erfolgt mit der gleichen Detaillierung wie die Ist-Zeiterfassung und verursacht ebenso geringen manuellen Aufwand.

Die Methodik verwendet die ermittelten Ist- und Soll-Zeiten, um die Produktivität der beobachteten Abläufe zu bewerten. Dazu teilt sie die Beobachtungszeit in vier verschiedene Aufwandsarten ein. Diese Aufwandsarten werden dabei sowohl für die gesamte Beobachtungszeit als auch für die einzelnen Zustände und Zustandsgruppen bestimmt. So ist es möglich, die größten Potenziale im Ablauf zu identifizieren und gezielt Verbesserungsansätze abzuleiten.

Die praktische Anwendbarkeit der Methodik wurde in mehreren Einsatzszenarien getestet. Dabei hat sich gezeigt, dass die Methodik in der Lage ist, aus Bewegungsdaten detaillierte Ergebnisse abzuleiten. Bei einer hohen Erfassungsgüte ist es möglich, aufwandsarm aussagekräftige Ergebnisse zu liefern und konkrete Verbesserungspotenziale abzuleiten. Bei schlechten Umgebungsbedingungen kann eine unzureichende Qualität der erfassten Bewegungsdaten jedoch den erfolgreichen Einsatz der Methodik einschränken. Damit ist die Methodik bei Verwendung der Kinect nur bedingt praxistauglich.

### 7.2 Ausblick

Die Methode kann durch die folgenden Ansatzpunkte verbessert werden:

#### Übertragung der Methodik auf andere Technologien der Bewegungserfassung

Die Kinect bietet diverse Vorteile bei der Erfassung im industriellen Umfeld (niedriger Preis, keine Behinderung der Arbeitsabläufe). Sie kann jedoch insbesondere bei der Analyse von Armbewegungen keine ausreichend hohe Erfassungsgüte gewährleisten. Eine Möglichkeit, diesem Punkt zu begegnen, ist der Einsatz anderer Technologien zur Bewegungserfassung. Je nach Technologie ist dann eventuell eine Anpassung der Zustandserkennung erforderlich.

#### Weiterentwicklung der Zustandserkennung

Die Zustandserkennung ermittelt zuverlässig Zustände im Beobachtungszeitraum, solange diese nicht sehr stark von der Normgeschwindigkeit abweichen. Sehr langsame oder schnelle Bewegungen erkennt sie unter Umständen nicht. Bei einer stabil hohen Erfassungsgüte könnte man dies durch besser angepasste Grenzwerte korrigieren. Zum anderen ist eine Optimierung durch Weiterentwicklung der Algorithmen denkbar. Man könnte weitere Berechnungsgrößen prüfen oder mehrstufige Erkennungen durchführen.

#### Detaillierte Untersuchung der Primäraufwände

Die Auswertung der Versuche hat aufgezeigt, dass Stillstände oft viel Primäraufwand erzeugen, obwohl sie nicht zwangsläufig wertschöpfend sind. Somit könnte eine Weiterentwicklung der Methodik darin bestehen, den Primäraufwand noch detaillierter zu betrachten. Ein denkbarer Ansatz dafür ist die Orientierung an den Einflussgrößen des MTM-1-Verfahrens.

#### Kombination der Analysearten

In der jetzigen Form unterscheidet die entwickelte Methodik zwischen der Analyse von Körperbewegungen und der Analyse von Armbewegungen. Sollen beide Bewegungen für einen Arbeitsplatz durchgeführt werden, erfolgen die beiden Analysen momentan nacheinander. Eine mögliche Weiterentwicklung ist deshalb die Zusammenführung der Analysen. Dazu muss zum einen wiederum eine durchgängig hohe Erfassungsgüte für alle relevanten Gelenkpunkte gewährleistet sein. Zum anderen muss eine Logik entwickelt werden, die gleichzeitig auftretende Bewegungen differenzieren oder kombinieren kann. Dies könnte beispielsweise wie bei der differenzierten Analyse von Körperbewegungen erfolgen.

#### Entwicklung einer integralen Software

Die entwickelte Methodik stützt sich auf die Verwendung eines Software-Prototypen, um die einzelnen Schritte aufwandsarm durchführen zu können. Damit sich die Methode auch für ungeübte Anwender eignet, muss die Software so weiterentwickelt werden, dass sie den Anwender durch den Erfassungsprozess und die Auswertung führt und die Ergebnisse übersichtlich visualisiert.

- Anti69 Antis, W.; Honeycutt, J. M.; Koch, E. N.: Die MTM-Grundbewegungen. Maynard, Düsseldorf, 1969.
- Back11 Backhaus, K. et al.: Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer, Berlin [u.a.], 2011.
- Bent15 Benter, M.: Analyse von Arbeitsabläufen mit 3D-Kameras. In (Meier, H. Hrsg.): Lehren und Lernen für die moderne Arbeitswelt. GITO, Berlin, 2015; S. 313.
- Bokr06 Bokranz, R.; Landau, K.: Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen. MTM-Handbuch. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2006.
- Bosc05 Bosch, K.: Elementare Einführung in die angewandte Statistik. Mit Aufgaben und Lösungen. Vieweg, Wiesbaden, 2005.
- Clar12 Clark, R. A.: Validity of the Microsoft Kinect for assessment of postural control. In Gait & Posture, 2012; S. 372–377.
- Czum13 Czumanski, T.: Handlungsorientierte Analyse der Arbeitsproduktivität in der Serienproduktion. Dissertation. TUHH, Institut für Produktionsmanagement und -technik, Hamburg, 2013.
- Deut14 MTM-1. Lehrgangsunterlage; A/AB. Deutsche MTM-Vereinigung e.V, Hamburg, 2014.
- Dieg14 Diego-Mas, J. A.; Alcaide-Marzal, J.: Using Kinect sensor in observational methods for assessing postures at work. In Applied Ergonomics, 2014, 45; S. 976–985.
- Eppl06 Eppler, M. J.: Managing Information Quality. Increasing the Value of Information in Knowledge-intensive Products and Processes. Springer Berlin · Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006.
- Esco12 Escorcia, V., Dávila, M.A.; Golparvar-Fard, M.; Niebles, J. C.: Automated Vision-based Recognition of Construction Worker Actions for Building Interior Construction Operations Using RGBD Cameras. In Proceedings of the Construction Research Congress, Lafayette, USA, 2012; S. 879–888.
- Fahr96 Fahrmeir, L.: Multivariate statistische Verfahren. De Gruyter, Berlin, 1996.
- Geek13 Geeky Gadgets: Xbox One Kinect Teardown. <https://www.geeky-gadgets.com/xbox-one-kinect-teardown-video-22-11-2013/>, 28.11.2017.
- Hagg13 Haggag, H. et al.: Real Time Ergonomic Assessment for Assembly Operations Using Kinect. In UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, 2013; S. 495–500.
- Hall69 Haller-Wedel, E.: Das Multimoment-Verfahren in Theorie und Praxis. Ein statistisches Verfahren zur Untersuchung von Vorgängen in Industrie, Wirtschaft und Verwaltung. Carl Hanser, München, 1969.
- Han14 Han, W. et al.: Analysis of Manual Manufacturing Processes Using Motion Sensing Technologies. In Systems and Information Engineering Design Symposium, 2014; S. 244–249.
- Hira95 Hirano, H.: 5 pillars of the visual workplace. The sourcebook for 5S implementation. Productivity Press, Portland, 1995.
- Ishi85 Ishikawa, K.: What is total quality control? The Japanese way. Prentice Hall; Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1985.
- Jack06 Jackèl, D.; Nenreither, S.; Wagner, F.: Methoden der Computeranimation. Springer, Berlin, 2006.
- Khos14 Khosrowpour, A.; Niebles, J. C.; Golparvar-Fard, M.: Vision-based workplace assessment using depth images for activity analysis of interior construction operations. In Automation in Construction, 2014; S. 74–87.

- Kim13 Kim, J. Y.; Caldas, C. H.: Vision-based Recognition in the Internal Construction Site Using Interactions between Worker Actions and Construction Objects. In International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining, 2013; S. 661–668.
- Kita08 Kitagawa, M.; Windsor, B.: MoCap for artists. Workflow and techniques for motion capture. Elsevier/Focal Press, Amsterdam, 2008.
- Klet11 Kletti, J.; Schumacher, J.: Die perfekte Produktion. Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT). Springer, Berlin, 2011.
- Lach15 Lachat, E. et al.: First Experiences with Kinect V2 Sensor for Close Range 3D Modelling. In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015; S. 93–100.
- Land07 Landau, K. Hrsg.: Lexikon Arbeitsgestaltung. Best practice im Arbeitsprozess. Gentner, Stuttgart, 2007.
- Like13 Liker, J. K.; Braun, A.: Der Toyota Weg. 14 Managementprinzipien des weltweit erfolgreichsten Automobilkonzerns. FBV, München, 2013.
- Lott02 Lotter, B.; Baumgartner, P.; Spath, D.: Primär-Sekundär-Analyse. Kundennutzenmessung und Kundennutzenorientierung im Unternehmen. Mit zahlreichen Tabellen und Formblättern. expert, Renningen, 2002.
- Lott12 Lotter, B.: Die Primär-Sekundär-Analyse. In (Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. Springer, Berlin, 2012a; S. 49–78.
- Lucz97 Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. Analyse und Gestaltung der Arbeit. Springer, Berlin, 1997.
- Lüer16 Lüer, M.: Identifikation von Trackingfehlern der Microsoft Kinect. Bachelorarbeit (Betreuer: Benter, M.), Hamburg, 2016.
- Mart15 Martin, C.C. et al.: A real-time ergonomic monitoring system using the Microsoft Kinect. In 2012 IEEE Systems and Information Design Symposium (SIEDS), 2015; S. 50–55.
- Mayn48 Maynard, H. B.; Stegemerten, G. J.; Schwab, J. L.: Methods-Time Measurement. McGraw Hill, New York, 1948.
- Mese04 Mesenhöller, E.: Zeitdatenermittlung in indirekten Bereichen bei Einsatz von Workflow-Management-Systemen. Shaker, Aachen, 2004.
- Micr14 Microsoft: Kinect for Windows Product Blog. Pre-order your Kinect for Windows v2 sensor starting today. <https://blogs.msdn.microsoft.com/kinectforwindows/2014/06/05/pre-order-your-kinect-for-windows-v2-sensor-starting-today/>, 28.11.2017.
- Mitt12 Mittag, H.-J.: Statistik. Eine interaktive Einführung. Springer, Berlin, 2012.
- Naka95 Nakajima, S.: Management der Produktionseinrichtungen. Total productive maintenance. Campus, Frankfurt/Main, 1995.
- Naum07 Naumann, F.: Datenqualität. In Informatik-Spektrum, 2007, 30; S. 27–31.
- Nguy16 Nguyen, D.: Einflussfaktoren auf die Datenqualität der Bewegungserfassung mit der Microsoft Kinect. Bachelorarbeit (Betreuer: Benter, M.), Hamburg, 2016.
- Nieb03 Niebel, B. W.; Freivalds, A.: Methods, standards, and work design. McGraw-Hill Boston, MA, 2003.
- Orth16 Orth, R.: Analyse von Körperbewegungen mit der Microsoft Kinect. Masterarbeit (Betreuer: Benter, M.), Hamburg, 2016.
- Quic60 Quick, J. H.: Das Work-Factor-System. Beuth, Berlin, 1960.
- Ray12 Ray, S. J.; Teizer, J.: Real-time construction worker posture analysis for ergonomics training. In Advanced Engineering Informatics, 2012; S. 439–455.

- REFA97 REFA: Datenermittlung. Carl Hanser, München, 1997.
- Rohm83 Rohmert, W.: Formen menschlicher Arbeit. In (Rohmert, W.; Rutenfranz, J. Hrsg.): Praktische Arbeitsphysiologie. Georg Thieme, Stuttgart, 1983; S. 5–29.
- Roth06 Rother, M.; Harris, R.; Womack, J.: Kontinuierliche Fließfertigung organisieren. Praxisleitfaden zur Einzelstück-Fließfertigung für Manager, Ingenieure und Meister in der Produktion. Lean Management Institut, Aachen, 2006.
- Rupp12 Ruppert, G.C.S. et al.: Touchless gesture user interface for 3D visualization using the Kinect platform and open-source frameworks.: Bártolo, Soares de Lemos, A. C. (Hg.) 2012 – Innovative Developments in in Virtual and Physical Prototyping; S. 215–220.
- Schl10 Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. Springer, Berlin, 2010.
- Schr16 Schrage, L.: MTM-Analyse mit der Microsoft Kinect. Masterarbeit (Betreuer: Benter, M.), Hamburg, 2016.
- Simo87 Simons, B.: Das Multimoment-Zeitmeßverfahren. Grundlagen und Anwendung. Verl. TÜV Rheinland, Köln, 1987.
- Ste177 Steinhausen, D.; Langer, K.: Clusteranalyse. Einführung in Methoden und Verfahren der automatischen Klassifikation. De Gruyter, Berlin, 1977.
- Stew15 Steward, J. et al.: Performance Assessment and Calibration of the Kinect 2.0 Time-of-Flight Range Camera for Use in Motion Capture Applications. In Conference Papers of FIG Working Week, Sofia, Bulgarien, 2015; S. 1–14.
- Suma84 Sumanth, D. J.: Productivity Engineering and Management. Productivity Measurement, Evaluation, Planning and Improvement in Manufacturing and Service Organizations. McGraw-Hill, Miami, 1984.
- Tiet16 Tietze, F.: Analyse und Verbesserung der Arbeitsproduktivität in der Unikatproduktion. Dissertation. TUHH, Institut für Produktionsmanagement und -technik, Hamburg, 2016.
- VDI80 Handbuch der Arbeitsgestaltung und Arbeitsorganisation. VDI, Düsseldorf, 1980.
- Webe98 Weber, H. K.: Rentabilität, Produktivität und Liquidität. Größen zur Beurteilung und Steuerung von Unternehmen. Gabler, Wiesbaden, 1998.
- West06 Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Springer, Berlin, 2006.
- Woma04 Womack, J. P.; Jones, D. T.: Lean thinking. Ballast abwerfen, Unternehmensgewinne steigern. Campus, Frankfurt am Main, 2004.
- XSen17 XSens: Xsens MVN. <https://www.xsens.com/products/xsens-mvn-analyze/>, 01.03.2018.
- Zhan12 Zhang, Z.: Microsoft Kinect Sensor and Its Effect. In IEEE MultiMedia, 2012, 19; S. 4–10.



<b>Name</b>	Benter
<b>Vorname</b>	Martin
<b>Geburtsdatum</b>	19.02.1986
<b>Geburtsort, -land</b>	Bad Saarow, Deutschland
<b>08.1992 - 07.1998</b>	Grundschule in Spreenhagen
<b>08.1998 - 06.2005</b>	Carl-Friedrich-Gauß-Gymnasium in Frankfurt (Oder)
<b>07.2005 - 03.2006</b>	Grundwehrdienst in Gera
<b>05.2006 - 09.2006</b>	Werkstattmitarbeiter bei der Schöneicher-Rüdersdorfer Straßenbahn GmbH
<b>10.2006 - 11.2011</b>	Studium des Wirtschaftsingenieurwesens Technische Universität Hamburg-Harburg Abschluss: Dipl.-Ing. oec.
<b>01.2012 - 07.2012</b>	Praktikant bei der P.T. E-T-A Indonesia
<b>09.2012 – 12.2016</b>	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik Technische Universität Hamburg-Harburg
<b>08.2017 – heute</b>	Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Deutschen MTM-Vereinigung e. V.



**Band 1**

Koch, Jens Bodo: Unterstützung der schiffbaulichen Projektierung durch Repräsentation von Erfahrungswissen, 2004.

**Band 2**

Meyer, Sven: Flexible Gruppenarbeit in der Auftragsfertigung, 2004.

**Band 3**

Joswig, Dirk: Untersuchungen zum Zerspanverhalten weicher Elastomerwerkstoffe, 2005.

**Band 4**

Kerse, Nils: Unterstützung der schiffbaulichen Produktentstehung durch Einsatz von Virtual Reality (VR)-Technologien, 2007.

**Band 5**

Kurzewitz, Mathias: Kompetenzentwicklung als Element erfolgreicher Strategieumsetzung – dargestellt am Beispiel des Schiffbaus, 2007.

**Band 6**

Davids, Niko: Workflow-Management in Produktentwicklungsprojekten der Investitionsgüterindustrie, 2008.

**Band 7**

Möller, Carsten: Untersuchungen zum Drehen von gesinterten WC-Co-Hartmetallwalzringen, 2009.

**Band 8**

Gotsch, Falko: Untersuchungen zum Zerspanverhalten von Elastomerschäumen mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Fertigung von Feder-Dämpfer-Bauteilen, 2009.

**Band 9**

Neumann, Lutz: Risikomanagement bei der Gestaltung von Unternehmenskooperationen – untersucht am Beispiel der Investitionsgüterindustrie, 2009.

**Band 10**

Sellmer, Dirk: Untersuchungen zur Verbesserung des Arbeitsergebnisses beim Vollbohren unter besonderer Berücksichtigung der Prozesskräfte und der Spanbildung, 2010.

**Band 11**

Eggers, Daniel: Entwicklung von Dienstleistungsportfolios bei Investitionsgüterherstellern – dargestellt am Beispiel der maritimen Industrie, 2009.

**Band 12**

Kindler, Jörg: Werkstückqualität und Standzeitoptimierung von Zerspanwerkzeugen bei der Umrissbearbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen, 2010.

**Band 13**

Frömming, Hanno: Zerspanung von WC-Co-Hartmetall im unterbrochenen Schnitt, 2011.

**Band 14**

Schweitzer, Thomas: Nutzungsgradsteigerung verketteter Produktionslinien, 2011.

**Band 15**

Wagner, Lars Arne: Szenariobasierte Planung und Steuerung mit Simulation im Schiffbau, 2011.

**Band 16**

Schäfer, Christoph: Einsatzmodell zur systematischen Nutzung von Virtueller Realität in der Unikatproduktion, 2012.

**Band 17**

Hartmann, Dirk: Delamination an Bauteilkanten beim Umrissfräsen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe, 2012.

**Band 18**

Kuyumcu, Arif: Modellierung der Termintreue in der Produktion, 2013.

**Band 19**

Czumanski, Thomas: Handlungsorientierte Analyse der Arbeitsproduktivität in der Serienproduktion, 2013.

**Band 20**

Schütte, Christoph: Bohren und Hobeln von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen unter besonderer Berücksichtigung der Schneide-Faser-Lage, 2014.

**Band 21**

Wandt, Robert: Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung am Beispiel des Schiffbaus, 2014.

**Band 22**

Eichenseer, Christiane: Beschichtung, thermomechanische Charakterisierung und Spannungsanalyse von Schneidkeramik, 2014.

**Band 23**

Heinig, Martin: Nutzung von Virtuellen Technologien für die Montageplanung von Unikaten, 2015.

**Band 24**

Körkel, Gregor K.: Zerspanbarkeitsbewertung von Faserverbundkunststoffen bei der Fräsbearbeitung dünnwandiger Bauteile in der Großserie, 2015.

**Band 25**

Ramirez Martinez, Juan A.: Flexible Automated Assembly Systems for Large CFRP-Structures using Geometrical and Force Information, 2015.

**Band 26**

Dose, Frank: Methode zur wissensbasierten Prozessentwicklung - Ein Ansatz für die Berücksichtigung sich wandelnder Teilsysteme beim Bohren von Schichtverbunden, 2015.

**Band 27**

Trzyna, Daniel: Modellierung und Steuerung von Eilaufträgen in der Produktion, 2015.

**Band 28**

Griefahn, Dominik M.: Geometrieprüfung innerer Strukturen von Faserverbund-Sandwichbauteilen, 2015.

**Band 29**

Borrmann, Christof: Adaptive Montageprozesse für CFK-Großstrukturen mittels Offline-Programmierung von Industrierobotern, 2016.

**Band 30**

Klingelhöller, Christian: Trennschleifen von CFK-Schalenbauteilen mit räumlich gekrümmten Konturen, 2016.

**Band 31**

Titov, Fedor: Technologiegestützte Angebotserstellung für den Umbau komplexer Investitionsgüter, 2016.

**Band 32**

Tietze, Florian: Analyse und Verbesserung der Arbeitsproduktivität in der Unikatproduktion, 2017.

**Band 33**

Geis, Tobias: Bearbeitungsstrategien zur Zerspanung von Faser-Verbund-Honeycomb-Sandwich, 2017.

**Band 34**

Koppold, Nico: Kapazitätsplanung und -steuerung in der Instandhaltungsproduktion von Investitionsgütern, 2017.

**Band 35**

Halata, Philipp S.: Augmented-Reality-gestützte Informationsbereitstellung für die Unikatproduktion, 2018.

**Band 36**

Brüggemann, Felix: Bauteilqualität und Werkzeugverschleiß beim Fräsen von CFK-Gelege unter räumlichen Eingriffsbedingungen, 2018.

**Band 37**

Benter, Martin: Analyse von Arbeitsabläufen mit 3D-Kameras, 2018.