

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Tracking von Bewegungsabläufen zur automatisierten Produktivitätsanalyse mit modernen Low-Cost-Technologien (ProTrack)

der Forschungsstelle(n)

Institut für Produktionsmanagement und -technik (IPMT),

Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH)

Das IGF-Vorhaben 17695 N der Forschungsvereinigung Logistik wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Hamburg, 14.10.2016

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding

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

1. Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines kostengünstigen Verfahrens zur automatisierten Erfassung und Analyse von Arbeitsabläufen bei Kommissionier- und Montagevorgängen. Die Automatisierung des Verfahrens zielte auf die Reduzierung des Aufwandes im Vergleich zu bestehenden Verfahren ab. Zudem sollte das Expertenwissen, das für solche Methoden notwendig ist, gesenkt werden. In Kombination mit der verwendeten kostengünstigen Technologie sollte so ein Verfahren entstehen, das es erlaubt, die Produktivität von Arbeitsabläufen systematisch aufwandsarm zu analysieren und zu verbessern. Ziel war die Umsetzung von vier verschiedenen Produktivitätsanalysen.

Zentrale Technologie für die Umsetzung ist die 3D-Kamera Microsoft Kinect. Die Kinect erfasst mit Hilfe ihrer Infrarotprojektoren und -kamera (vgl. Abbildung 1) Tiefeninformationen im Sichtbereich und sie identifiziert Personen im Aufnahmebereich. Unter Verwendung des zur Kinect gehörenden Software Development Kits (SDK) wurde ein Softwareprototyp entwickelt, der diese Funktionen nutzt, um manuelle Arbeitsvorgänge aufnimmt.

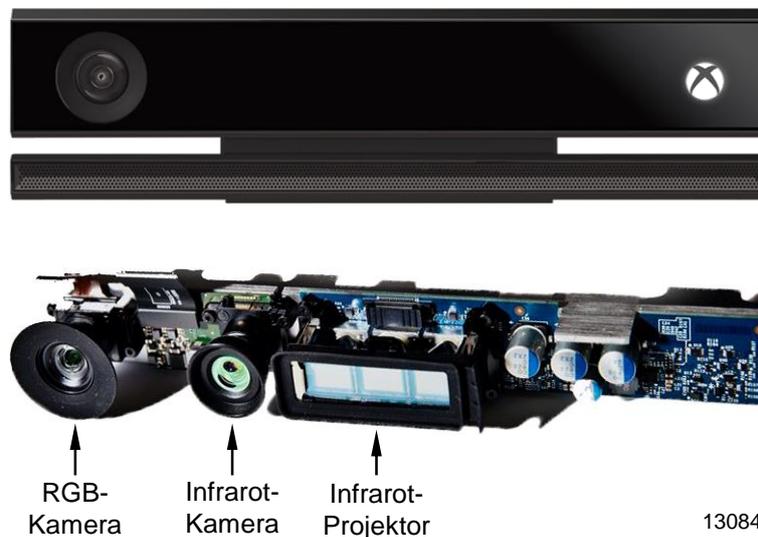


Abbildung 1 Frontansicht und relevante Bauteile der Microsoft Kinect 2.0

Aufbauend auf dieser Form der Datenerfassung wurde ein Vorgehen zur Analyse der aufgenommenen Vorgänge entwickelt. Die entwickelte Methode kann verwendet werden, um Körperbewegungen und Armbewegungen zu untersuchen. Verschiedene etablierte Produktivitätsanalysen (Primär-Sekundär-Analyse, Spaghetti-Diagramm, MTM-Analyse, Griffweiten- und -häufigkeitsanalyse) wurden hierfür umgesetzt und zu einer vollständigen Analyse der Bewegungsabläufe zusammengefasst.

Die Methode wurde in mehreren Evaluationen erprobt und weiterentwickelt. Detaillierungsstufen wurden abgeleitet, um der Datenqualität der Aufnahme sowie den Ansprüchen des Anwenders gerecht zu werden. Für die Teilschritte der Methode wurden Algorithmen und Softwareprototypen entwickelt, um den Methodenanwender zu unterstützen und so den Methodenaufwand zu reduzieren.

Das Ergebnis ist ein Vorgehen zur teilautomatisierten Analyse der Produktivität, das aufwandsarm und ohne spezifisches Methodenwissen auskommt. Das Vorgehen eignet sich zudem auch für andere Technologien zur Bewegungserfassung.

Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden erreicht.

2. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU

2.1. Innovativer Beitrag

Das Ergebnis des Forschungsvorhabens, die entwickelte Methodik zur automatisierten Analyse der Produktivität, ist ein neues Verfahren zur Untersuchung von manuellen Tätigkeiten der Montage und Logistik. Insbesondere zwei Aspekte heben es von bestehenden Verfahren ab:

1. Das Verfahren kombiniert bestehende Produktivitätsanalysen. Diese waren entweder zu aufwändig, um den Einsatz in kleineren und mittleren Unternehmen zu erlauben oder sie waren nicht aussagekräftig genug, um sinnvolle Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten. Die entwickelte Methode ist leicht verständlich und ermöglicht eine aufwandsarme Untersuchung mit aussagekräftigen Ergebnisse, z. B. welche Arbeitsschritte im realen Arbeitsablauf besonders viel Zeit in Anspruch nehmen oder besonders lange Bewegungen erfordern.
2. Das Verfahren verbindet Produktivitätsanalysen mit einer Technologie, die bisher vorrangig für die Analyse der Ergonomie im industriellen Einsatz genutzt wurde. Die Datenerfassung bei klassischen Produktivitätsanalysen wird in der Regel manuell durchgeführt und verursacht so hohe personelle Kosten. Die Verbindung mit einem Verfahren zur Bewegungserkennung reduziert diesen Zeitbedarf. So rentieren sich anschließende Verbesserungsmaßnahmen schneller und die Analyse ist auch dort wirtschaftlich einsetzbar, wo vorher der Methodenaufwand den Nutzen überwogen hätte.

2.2. Industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Der vorgesehene Einsatzzweck des Verfahrens ist die Untersuchung der Produktivität bei Kommissionier- oder Montagetätigkeiten. Die Anwendung kann jedoch potenziell überall dort erfolgen, wo Mitarbeiter manuelle Tätigkeiten durchführen. Dies ist insbesondere der Fall, wenn die Bewegungserfassung durch die Kinect verbessert oder durch andere Technologien unterstützt wird.

Das Verfahren kann in drei verschiedenen Szenarien eingesetzt werden:

- Verbesserungsworkshops in Kooperation mit den Mitarbeitern:
Die Methode kann eingesetzt werden, um bestehende Arbeitsplätze zu verbessern, indem sie für einen zuvor abgestimmten Zeitraum untersucht werden. Anschließend wertet der Anwender die Ergebnisse mit den betroffenen Werkern aus und leitet Verbesserungsmaßnahmen ein.
- Unterstützung der Gestaltung von Arbeitsplätzen vor der Nutzung:
Die Methode kann eingesetzt werden, um vor dem produktiven Betrieb eines Arbeitsplatzes das geplante Layout zu untersuchen und Verbesserungsmöglichkeiten zu identifizieren. Zudem können so realistische Planzeiten definiert werden.
- Kontinuierliche Ist-Zeiterfassung während der Nutzung:
Die Methode kann eingesetzt werden, um im laufenden Betrieb die Ist-Zeiten zu erfassen und so Schwankungen und Probleme im Betrieb festzustellen. Von diesem Einsatzzweck wird aber aus zwei Gründen abgeraten: Zum einen ist die permanente Überwachung von Mitarbeitern rechtlich und ethisch problematisch und zum anderen entsteht trotz der Teilautomatisierung Mehraufwand durch die dauerhafte Anwendung.

2.3. Weiterentwicklung

Die Evaluationen bei den Industriepartnern des Forschungsprojektes haben gezeigt, dass die Anwendung der Methode möglich ist und vielversprechende Ergebnisse liefert. Insbesondere die aufwandsarme Erfassung sowie die detaillierten Ergebnisse machen den Einsatz der Methode attraktiv. Allerdings hat sich auch gezeigt, dass eine großflächige Anwendung in der Industrie noch technologische Weiterentwicklung der Kinect erfordert (Reduzierung von Trackingfehlern).

Ein Problempunkt ist die Bewegungserfassung. Zum einen lassen sich nicht an allen Arbeitsplätzen günstige Positionen für die Kinect finden. Zum anderen werden bei vielen Arbeitsabläufen Teile des Körpers durch andere Objekte verdeckt, wodurch die Bewegungserfassung eingeschränkt wird. Außerdem ist selbst bei günstigen Bedingungen die Kinect technologisch nicht ausgereift genug, um eine vollständige Erfassung mit sehr guter Datenqualität zu gewährleisten. Hier müsste untersucht werden, wie sich die Bewegungserfassung verbessern lässt. Ein möglicher Ansatzpunkt sind zusätzliche unterstützende Technologien.

Für den industriellen Einsatz müssen zudem die entwickelten Softwareprototypen zu einer anwendungsfreundlichen und leistungsfähigen Software weiterentwickelt werden.

Als Weiterführung des Forschungsvorhabens sind weitere Vorhaben geplant, die den Einsatz der Technologie an anderen Arbeitsplätzen (Maschinenbedienung) und in Kombination mit ergonomischen Analysen untersuchen sollen.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Ziel des Projektes war es, ein kostengünstiges Verfahren zur automatisierten Erfassung von Bewegungs- und Arbeitsabläufen von Kommissionier- und Montagetätigkeiten zu entwickeln. Dazu wurde die Technologie *Microsoft Kinect* verwendet.

Dieses Kapitel erläutert zunächst, welche Arbeiten im Zeitraum des Vorhabens in den einzelnen Arbeitspaketen durchgeführt wurden und zu welchen Ergebnissen sie geführt haben. Anschließend wird in Kapitel 5 die entwickelte Methodik als Gesamtergebnis der Arbeitspakete vorgestellt.

3.1. AP 1 Anforderungsdefinition und Auswahl von Analysemethoden

Zusammenfassung

Im ersten Arbeitspaket wurde aufgezeigt, dass der Einsatz der Microsoft Kinect an Arbeitsplätzen in der Industrie möglich. Zudem wurden die Wünsche der Industrie an die zu entwickelnde Methodik aufgenommen und realisierbare Ziele abgeleitet.

Ziel

Ziel des ersten Arbeitspaketes war die Ermittlung der Anforderungen der Industrie an das Verfahren. Das umfasst zum einen die untersuchten Abläufe sowie die verwendeten Analyseverfahren sowie deren Ergebnisse. Damit soll es die Grundlage schaffen für die zielführende Entwicklung des Verfahrens.

Durchgeführte Arbeiten

In diesem Arbeitspaket wurden zwei Arten von Anforderungen erfasst, um die gestellten Ziele zu erreichen:

Anforderungen und Möglichkeiten der Microsoft Kinect

Im ersten Teil wurde untersucht, ob sich die Kinect zur Aufnahme von manuellen Vorgängen bei Kommissionier- und Montagetätigkeiten im industriellen Umfeld eignet. Dazu wurde geprüft, welche Positionen der Kinect in Relation zum beobachteten Mitarbeiter zu einer hohen Datenqualität bei der Aufnahme führen. Dies wurde zunächst für einen Montagearbeitsplatz in der IPMT-Modellfabrik untersucht.

Anschließend wurde in Kooperation mit den Industriepartnern ermittelt, welche Kommissionier- und Montagearbeitsplätze bei ihnen eine günstige Positionierung der Kinect erlauben und somit für die Aufnahme geeignet sind. Bei diesen Arbeiten wurde zudem geprüft, welche weiteren Rahmenbedingungen bei diesen Arbeitsplätzen vorliegen. Dies umfasst die Art der durchgeführten Tätigkeiten, das bearbeitete Produkt sowie die Umweltbedingungen am Arbeitsplatz.

Anforderungen an die Analysemethoden

Die technologische Realisierbarkeit der Analyse mit der Kinect ist ein wichtiger Punkt für die Entwicklung der Methodik. Neben dieser Durchführbarkeit ist zudem wichtig, welche bestehenden Analyseverfahren und -ergebnisse für die zu untersuchenden Arbeitsplätze geeignet sind und ob sie mit der Kinect realisierbar sind.

Dazu wurde zunächst erarbeitet, welche Erwartungen neben den wissenschaftlichen Ansprüchen die Industriepartner an die Methode haben. Anschließend wurde geprüft, welche nutzbaren Daten die Kinect für eine Auswertung liefert. Der Abgleich zwischen den gewünschten Analyseergebnissen und den technologischen Möglichkeiten der Kinect liefert die realisierbaren Anforderungen an das entwickelte Verfahren. Aufgenommene weitergehende Erfahrungen wurden als Ansatzpunkte für die Planung anschließender Projekte verwendet.

Erzielte Ergebnisse

Anforderungen und Möglichkeiten der Microsoft Kinect

Die durchgeführten Arbeiten haben gezeigt, dass die Positionierung der Kinect ein wichtiger Einflussfaktor für die Datenqualität der Aufnahme ist. Für die Erfassung der Armbewegung ist eine Positionierung auf Schulterhöhe und in Blickrichtung des Mitarbeiters ideal für die Aufnahme. Für die Aufnahme von Körperbewegungen ist die Positionierung weniger kritisch. Wichtig ist bei beiden Aufnahmearten, dass keine Objekte während der Aufnahme den Körper verdecken. Die Entfernung von Mitarbeiter zu Kinect sollte dabei mindestens einen Meter betragen.

Die Untersuchung in der IPMT-Modellfabrik und bei den definierten Arbeitsplätzen der Industriepartner hat gezeigt, dass eine gute Positionierung für die Aufnahme von Körperbewegungen in der Regel möglich ist. Für die Aufnahme von Armbewegungen ist eine geeignete Positionierung nur teilweise realisierbar gewesen. Vor den Mitarbeitern befinden sich häufig Material, Werkzeuge oder Regale, sodass die Kinect kein freies Sichtfeld auf den Mitarbeiter hat.

Anforderungen an die Analysemethoden

Nach der ersten Demonstration der Funktionsweise der Kinect haben die Industriepartner in einem Workshop Erwartungen an das zu entwickelnde Verfahren formuliert. Es zeigte sich, dass die geplanten Anwendungen auch aus Industriesicht relevant sind. Zusätzlich wurden neue Ideen generiert, die sich in drei Bereiche einteilen lassen:

1. Anforderungen zur Analyse der Arbeitsproduktivität:

Das Verfahren soll automatisiert manuelle Tätigkeiten untersuchen und eine Bewertung der Produktivität der Tätigkeiten erlauben. Zudem sollen die aufgenommenen Daten so ausgewertet werden, dass ein Vergleich zwischen Soll- und Ist-Abläufen möglich ist.

2. Anforderungen zur Verbesserung der Arbeitsproduktivität:

Das Verfahren soll Verschwendungen im Arbeitsablauf identifizieren und so Produktivitätspotenziale aufzeigen (z. B. Positionierung von Material). Zusätzlich sollen durch den Soll-Ist-Abgleich Störungen im Montageprozess erkannt werden.

3. Anforderungen zur Handhabung des Verfahrens:

Das Verfahren und der zugehörige Prototyp sollen einfach zu handhaben und schnell im Unternehmen einführbar sein. Dazu gehört beispielsweise eine benutzerfreundliche Oberfläche der Software.

Abgleich der Anforderungen und Möglichkeiten

Die Erwartungen der Industriepartner wurden anschließend mit den Möglichkeiten der Microsoft Kinect sowie den bisher existierenden Produktivitätsanalysen abgeglichen.

Die Microsoft Kinect erfasst die Koordinaten der Körpergelenke des beobachteten Mitarbeiters. Aus diesen Daten lassen sich Informationen über die durchgeführten Bewegungen ableiten sowie Abläufe ermitteln und vergleichen. Dies erfordert jedoch die Entwicklung von Algorithmen und Methoden, die die Daten aufbereiten und auswerten.

Bei der Untersuchung der existierenden Produktivitätsanalysen hat sich gezeigt, dass mit den Informationen über die Bewegungen mehrere Produktivitätsanalysen möglich sind, jedoch eine Anpassung der Analysen notwendig ist.

Zusammenfassend ergaben sich die folgenden Anforderungen für die Entwicklung des Verfahrens:

- Die Datenaufnahme soll die Koordinaten aller relevanten Gelenke vollständig erfassen.
- Diese Informationen sollen so aufbereitet werden, dass die ausgewählten Produktivitätsanalysen möglichst automatisiert durchführbar sind.
- Durch die Verwendung der Kinect werden viele Informationen aufgenommen, die eine Verbesserung der existierenden Methoden ermöglichen. Das Verfahren soll deshalb die bestehenden Methoden weiterentwickeln, um dieses Potenzial zu nutzen.
- Die Anwendungsoberfläche des Prototyps soll leicht handhabbar sein und die Auswertung soll die Ergebnisse gut visualisieren.

3.2. AP 2 Aufbau des Tracking-Systems

Zusammenfassung

Im zweiten Arbeitspaket wurde eine Software zu Aufnahme von Arbeitsabläufen entwickelt. Die Software erfasst und speichert die Gelenkkoordinaten über die Zeit und bietet die Möglichkeit, ein Farbvideo aufzunehmen. Zudem wurde die Praxistauglichkeit der Software geprüft.

Ziel

Arbeitspaket 2 hatte das Ziel, einen Software-Demonstrator zu entwickeln, der die Erfassungstechnologie der Kinect nutzt und alle relevanten Informationen übersichtlich ausgibt. Dieser Demonstrator soll entsprechend den Anforderungen aus AP1 anwenderfreundlich sein und die für die Analysen notwendigen Gelenke aufnehmen. Zudem sollen die relevanten Informationen aufbereitet werden für die Auswertung.

Durchgeführte Arbeiten

Die Arbeiten an dem Software-Demonstrator gliedern sich in drei Punkte.

Aufnahme und Speicherung der Kinect-Informationen

Erster Schritt des entwickelten Analyseverfahrens ist die Erfassung der Gelenke und ihrer Koordinaten. Dazu wurde das Tracking-Verfahren der Kinect so angepasst, dass die relevanten Daten zusammengefasst ausgegeben werden. Zusätzlich wurde eine Benutzeroberfläche entwickelt, die den Aufnahmeprozess begleitet und unterstützt, sodass eine anwenderfreundliche Nutzung möglich ist.

Verwertung der Informationen

Anschließendes Schritt des Verfahrens ist die Überprüfung der Datenqualität und eventuelle Aussortierung von Fehltaufnahmen. In diesem Schritt wurden Algorithmen entworfen, um die Aussortierung nach Möglichkeit automatisiert durchzuführen und der Demonstrator wurde ergänzt um eine Visualisierung der erfassten und aussortierten Daten.

Evaluation der Erfassungssoftware

In diesem Schritt wurde die Aufnahmesoftware auf Einsatzfähigkeit getestet. Dies erfolgte in drei Szenarien. Zunächst bei einer einfachen Montageaufgabe an einem Büroarbeitsplatz unter idealen Bedingungen. Die zweite Anwendung war in der IPMT-Modellfabrik. Hier wurden Getriebe in praxisnaher Umgebung montiert. Die dritte Anwendung fand bei einem Industriepartner im produktiven Betrieb statt. Die Ergebnisse dieser Evaluation wurden bei der Weiterentwicklung der Software berücksichtigt.

Untersuchung der Erfassungsqualität mit der Microsoft Kinect

Abschließender Schritt dieses Arbeitspaketes war die Untersuchung der Erfassungsqualität. In den vorherigen Schritten hatte sich gezeigt, dass in Abhängigkeit von der Aufnahmesituation Trackingfehler auftreten können. In diesem Schritt wurde deshalb untersucht, welche Faktoren die Qualität des Trackings beeinflussen und wie stark der Einfluss ist. Zudem wurden Algorithmen entworfen, um die Trackingfehler automatisiert zu erkennen. Geprüft wurde hierbei die fehlerfreie Aufnahme der Armgelenke.

Erzielte Ergebnisse

Aufnahme und Speicherung der Kinect-Informationen

Zur Erfassung der Daten wurde ein Prototyp entwickelt, der die Koordinaten des beobachteten Mitarbeiters speichert. Der Prototyp bietet zusätzlich die Möglichkeit, ein Farbvideo aufzuzeichnen, um bei der späteren Interpretation der Daten zu unterstützen. Für die Erfassung wurde eine einfache Benutzeroberfläche entwickelt. Abbildung 2 zeigt die Oberfläche des Prototyps für die Datenerfassung.

Verwertung der Informationen

Der entwickelte Prototyp enthält neben der Aufnahmefunktion eine Funktion zur Wiedergabe des aufgenommenen Videos und der erfassten Daten. Damit können nun zwei Schritte durchgeführt werden, die zur Aufbereitung der Daten dienen.

Zum einen enthält der Prototyp Algorithmen zur Aussortierung von fehlerhaft erfassten Gelenkkoordinaten. Diese Aussortierung prüft die Daten auf ungewöhnliche Schwankungen bestimmter Werte (z. B. der Abstand zwischen zwei Gelenken oder die Geschwindigkeit der Gelenke). Dadurch werden fehlerhafte Daten entfernt. Da die Algorithmen noch nicht in der Lage sind, alle fehlerhaften Daten zu entfernen, enthält der Prototyp zudem die Funktionalitäten, um die Daten manuell zu überprüfen. Abbildung 3 zeigt die Oberfläche zur manuellen Aussortierung der Daten

Zum anderen kann der Prototyp genutzt werden, um die aufgenommenen Koordinaten zu transformieren, sodass eine für den Anwender verständliche Übersicht über die aufgenommenen Daten entsteht. Abbildung 4 zeigt die Oberfläche für die Koordinatentransformation.

Evaluation der Erfassungssoftware

Die Anwendung der Aufnahmesoftware in den Beispielszenarien hat aufgezeigt, dass der Software-Demonstrator seine Funktion erfüllt. Die Daten werden zuverlässig aufgenommen und auch die Wiedergabefunktion erfüllt ihren Zweck.

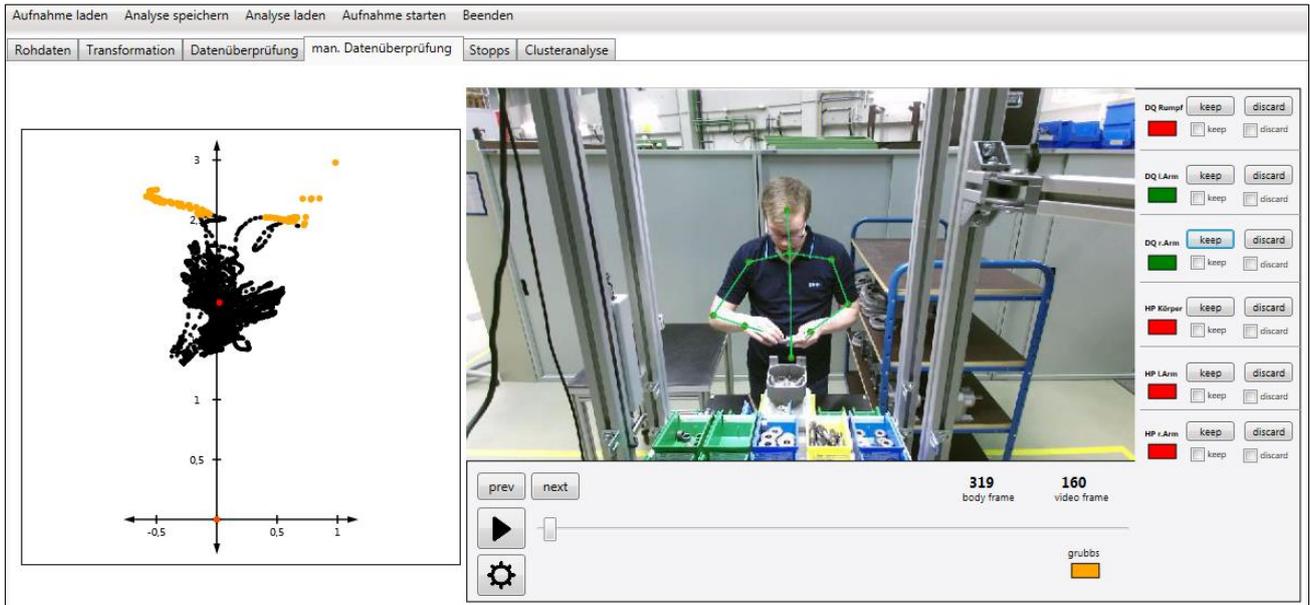
Bei der Evaluation hat sich gezeigt, dass die Qualität der Bewegungserfassung mit der Kinect für die Analyse von Armbewegungen sinkt, wenn sie ungünstig positioniert ist. Die erforderte Datenqualität für die Analyse der Körperbewegungen war in allen Beispielen ausreichend.

Untersuchung der Erfassungsqualität mit der Microsoft Kinect

Die Untersuchung der Trackingqualität hat bestätigt, dass die Positionierung der Kinect ein wichtiger Einflussfaktor ist. Zudem wurden andere relevante Faktoren ermittelt, die die Qualität bestimmen. Dazu gehören die Kleidung der erfassten Person, die Größe der benutzten Arbeitsobjekte und die Verdeckung von Körperteilen. Die Höhe des Einflusses hängt dabei stark vom Einflussfaktor ab. Bei der isolierten Betrachtung der Arbeitskleidung wurde eine Qualitätsrate von 92% im günstigsten Fall erreicht und im ungünstigsten ein Wert von 83%. Einflussfaktoren wie die Verdeckung von Körperteilen können die Qualitätsrate deutlich stärker absenken. So wurde bei einer ungünstigen Ausrichtung des Körpers zur Kinect (seitlich, sitzend) nur eine Qualitätsrate von 39% erreicht.

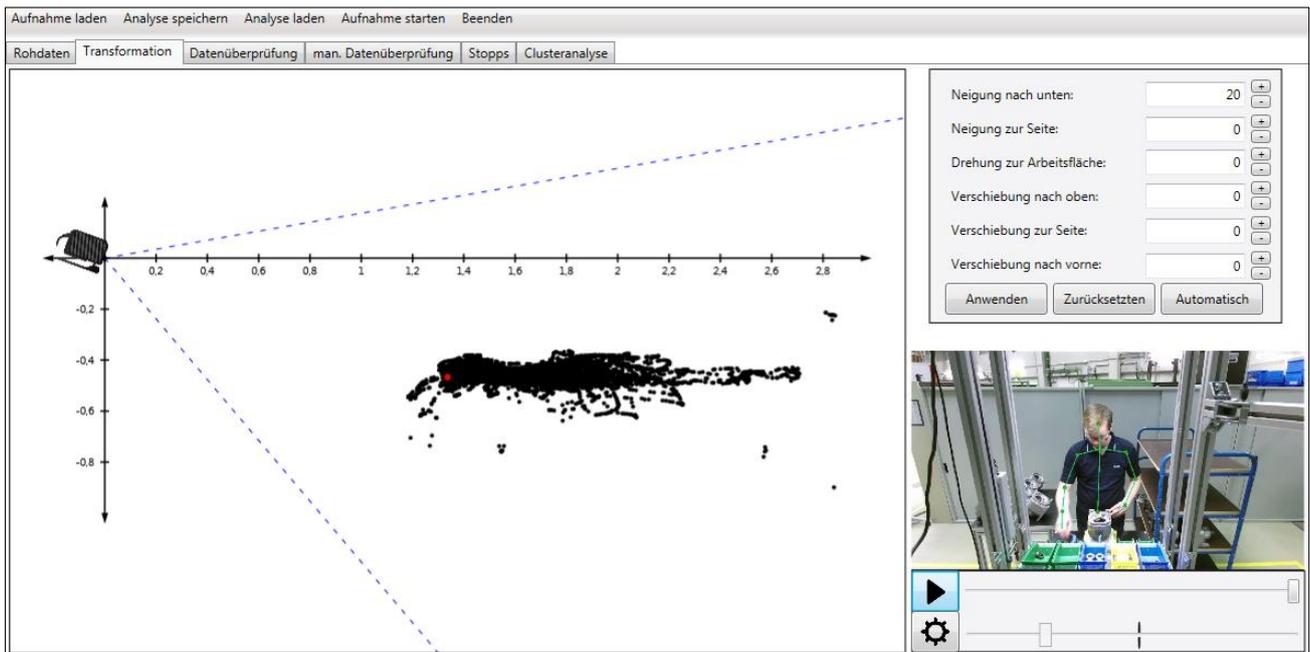


Abbildung 2 Benutzeroberfläche des Software-Demonstrators für die Datenaufnahme



13086

Abbildung 3 Benutzeroberfläche des Software-Demonstrators für die Datensortierung



13087

Abbildung 4 Benutzeroberfläche des Software-Demonstrators für die Koordinatentransformation

3.3. AP 3 Entwicklung / Anpassung von Analysemethoden

Zusammenfassung

In Arbeitspaket 3 ist es gelungen, existierende Produktivitätsanalysen so zu adaptieren, dass sie automatisiert mit den Kinectdaten durchgeführt werden können. Basierend darauf wurde eine neue Analysemethodik zur Untersuchung von Arbeitsabläufen entwickelt.

Ziel

Ziel von Arbeitspaket drei war die Entwicklung von Analysemethoden, die die Anforderungen aus AP 1 erfüllen. Dies umfasst die Anpassung existierender Analysemethoden sowie die Entwicklung einer neuen Methode zur Produktivitätsanalyse.

Durchgeführte Arbeiten

Adaption bestehender Analysemethoden

In diesem Schritt wurden vier verschiedene Produktivitätsanalysen auf ihre Durchführbarkeit basierend auf den Kinectdaten geprüft. Die vier untersuchten Methoden sind:

- die Primär-Sekundär-Analyse für die Analyse der Armbewegungen,
- die Griffreichweiten- und -häufigkeitenanalyse für die Analyse der Armbewegungen,
- das Spaghetti-Diagramm für die Analyse der Körperbewegungen und
- die MTM-1-Analyse für die Analyse der Arm- und Körperbewegungen.

Zu diesem Schritt gehört ebenfalls die Untersuchung, ob sich die Methoden mit den aufgenommenen Daten erweitern lassen und die Entwicklung von Algorithmen zur Datenaufbereitung und -auswertung.

Entwicklung einer neuen Analyse

Die Ergebnisse der Untersuchung der bestehenden Methoden wurden anschließend genutzt, um eine neue Methode abzuleiten, die auf den Kinectdaten basiert, schnell und automatisiert durchführbar ist und die Auswertungsmöglichkeiten der anderen Methoden vereint und erweitert.

Evaluation der entwickelten Methodik

Die entwickelte Methodik wurde in verschiedenen Szenarien (Modellfabrik und Industriepartner) durchgeführt und überprüft. Hierbei wurde vorrangig untersucht, ob die Methodik mit den aufgenommenen Daten Ergebnisse erzielt, die eine Aussage über die Produktivität des Prozesses sowie über mögliche Verbesserungsmaßnahmen ermöglichen.

Erzielte Ergebnisse

Adaption bestehender Analysemethoden

Die vier bestehenden Produktivitätsanalysen sind in folgendem Maße mit den aufgenommenen Kinectdaten durchführbar:

- Die Untersuchungen der Primär-Sekundär-Analyse haben gezeigt, dass sie sich mit den Daten realisieren lässt, wenn durch den Benutzer die primäre Reichweite bei der Arbeitsaufgabe vorgegeben wird. Es hat sich zudem gezeigt, dass sich die Methode durch die Kinectdaten sinnvoll erweitern lässt. So können beispielsweise nicht nur die Soll-Bewegungen an einem Arbeitsplatz untersucht werden, sondern alle tatsächlichen Bewegungen.
- Die Untersuchungen der Griffreichweiten- und -häufigkeitenanalyse haben ergeben, dass diese Methode problemlos durch die Kinectdaten automatisiert werden kann.
- Die Untersuchungen des Spaghetti-Diagramms haben gezeigt, dass diese Methode problemlos durch die Kinectdaten automatisiert werden kann.
- Die Untersuchungen der MTM-1-Analyse haben ergeben, dass sich diese Methode sehr gut unterstützen lässt, sie aber zusätzliche Informationen vom Nutzer und eine Anpassung der Methode erfordert.

Entwicklung einer neuen Analyse

Die untersuchten Methoden wurden angepasst an die neue Datengrundlage und zusammengefasst zu einer neuen Analyse, die Elemente aus den vier bestehenden Produktivitätsanalysen vereint. Sie ist detailliert in Kapitel 5 beschrieben.

Evaluation der entwickelten Methodik

Bei der Evaluation der entwickelten Analyse hat sich gezeigt, dass die Methode gute Ergebnisse zur Bewertung der Produktivität liefert und dass sich Vorschläge für die Verbesserung der Produktivität ableiten lassen. Es hat sich ebenfalls gezeigt, dass die Methode aufgrund der hohen zu verarbeitenden Datenmenge ohne Automatisierungsalgorithmen sehr zeitintensiv ist. Dieses Problem wurde in AP 5 bearbeitet.

3.4. AP 4 Datenaufbereitung / -kopplung für die Analysen

Zusammenfassung

In Arbeitspaket 4 wurden Algorithmen zur Automatisierung der Methodik entwickelt. Damit konnte der benötigte Methodenaufwand deutlich reduziert werden.

Ziel

Ziel des vierten Arbeitspaketes war die Entwicklung von Auswertungsalgorithmen, um das Gesamtverfahren zu unterstützen. Das umfasst zum einen die Vorbereitung der erfassten Daten für die neu entwickelte Analyse. Zum anderen umfasst es die Automatisierung der Durchführung und die Visualisierung der Analyseergebnisse.

Durchgeführte Arbeiten

Entwicklung von Auswertungsalgorithmen zur Datenaufbereitung

Für die entwickelte Analyse sind mehrere Algorithmen notwendig, um den Durchführungsaufwand gering zu halten. Dazu gehören zum einen Algorithmen zur Identifizierung von Bewegungsarten während der Aufnahme. Unterschiedliche Algorithmen wurden entwickelt für die Identifizierung von Armbewegungen und Körperbewegungen. Zum anderen gehören dazu Algorithmen zur Clusterung von Koordinaten und zur Zusammenfassung von Bewegungen.

Entwicklung von Auswertungsalgorithmen zur automatisierten Analyse und Visualisierung

In diesem Schritt wurden Algorithmen entworfen, um den Anwender bei der Bewertung der erfassten Bewegungen zu unterstützen sowie die Visualisierung zu automatisieren und so den Aufwand für die Analyseaufwand zu reduzieren.

Evaluation der Auswertungsalgorithmen

In diesem Schritt wurden die entworfenen Algorithmen anhand mehrerer aufgenommener Datensätze getestet und wenn nötig angepasst.

Erzielte Ergebnisse

Entwicklung von Auswertungsalgorithmen zur Datenaufbereitung

Es wurden Algorithmen für die Identifizierung der Bewegungen entworfen. Die Identifizierung der Armbewegungen erfolgt hauptsächlich über die Geschwindigkeit des Handgelenks sowie den Abstand zwischen Schulter und Handgelenk. Damit lassen sich beispielsweise Aussagen darüber treffen, ob zu einem Material oder Werkzeug gereicht wird. Bei guter Datenqualität lassen sich zusätzlich auch Greifbewegungen der Hand identifizieren über den Abstand zwischen Daumen und den restlichen Fingern.

Die Identifizierung der Körperbewegungen erfolgt unter anderem über die Geschwindigkeit des Kopfes, den Winkel der Schulterachse zu den Koordinatenachsen und den Winkel der Wirbelsäule zu den Koordinatenachsen. So lassen sich beispielsweise Hinsetzbewegungen, Drehbewegungen oder Neigungsbewegungen ermitteln. Bei guter Datenqualität lassen sich zudem auch detaillierte Informationen zu den Bewegungsarten bestimmen, wie etwa die Anzahl der Schritte beim Laufen oder ob sich beim Neigen gebückt oder gekniet wird.

Da sehr viele Bewegungen in den aufgenommenen Arbeitsabläufen auftreten können, werden diese durch Algorithmen zusammengefasst. Hierbei werden zunächst die Haltepunkte zwischen den einzelnen Bewegungen über ein klassisches Clusterverfahren zusammengefasst. Anschließend werden gleiche Bewegungsarten mit identischen Anfangs- und Endcluster zusammengefasst. Damit ist eine aufwandsarme Bewertung der Bewegungen durch den Anwender möglich.

Entwicklung von Auswertungsalgorithmen zur automatisierten Analyse und Visualisierung

Die in diesem Schritt entwickelten Algorithmen leiten nun aus den erhobenen Daten Informationen über die Bewegungsarten ab, um Einflussgrößen auf die Normzeit in Anlehnung an die MTM-1-Systematik zu bestimmen. Damit werden Vorschläge für die Normzeit abgeleitet, die der Anwender mit entsprechendem Methodenwissen korrigieren oder durch Zusatzinformationen oder Planzeiten ergänzen kann.

Zusätzlich wurden Algorithmen entworfen, um die Daten der einzelnen Bewegungen einer Bewegungsart zusammenzufassen und grafisch darzustellen.

Evaluation der Auswertungsalgorithmen

Die Evaluation der Auswertungsalgorithmen hat gezeigt, dass sich der ursprünglich sehr hohe Aufwand zur Durchführung der Analysemethoden deutlich reduzieren lässt. Die Algorithmen können die aufgenommenen Daten jedoch nicht ohne den Anwender interpretieren und die einzelnen Schritte müssen immer noch kontrolliert werden.

3.5. AP 5 Evaluation am Praxisbeispiel

Zusammenfassung

Die Evaluation der Arbeitsergebnisse in Arbeitspaket 5 hat gezeigt, dass sich die entwickelte Methodik mit ihren Automatisierungsalgorithmen in der Praxis anwenden lässt und sehr gute Ergebnisse liefert.

Ziel

Ziel des fünften Arbeitspaketes war die Evaluation der Praxistauglichkeit des entstehenden Prototypen sowie der Anwendbarkeit der Analyseverfahren. Dazu sollte der Prototyp zum einen in der IPMT-Modellfabrik angewendet werden und zum anderen in einem Praxis-Beispiel bei einem Industriepartner.

Durchgeführte Arbeiten

Dieses Arbeitspaketes umfassen neben Evaluationstätigkeiten in den anderen Arbeitspaketen die Erprobung des finalen Software-Prototypen zur Datenerfassung sowie der neu entwickelten Analyse.

Evaluation der Erfassungsssoftware

Die Evaluation der Erfassungsssoftware umfasst die Eignung des Prototyps zur Datenerfassung, zur Speicherung der Daten sowie zur Durchführung der Datenüberprüfung und Koordinatentransformation. Die Software wurde hierfür in der IPMT-Modellfabrik und bei den Industriepartnern erfolgreich getestet.

Evaluation der Analyse- und Auswertungsmethoden

Die Evaluation der entwickelten Analyse umfasst die Eignung der entwickelten Algorithmen zur Aufbereitung und Auswertung der Daten sowie die Eignung der Ergebnisse zur Identifikation von Produktivitätspotenzialen und Ableitung von Verbesserungsvorschlägen. Die Analyse wurde ebenfalls in der IPMT-Modellfabrik sowie bei den Industriepartnern angewendet.

Erzielte Ergebnisse

Evaluation der Erfassungsssoftware

Die Evaluation der Erfassung hat folgende Ergebnisse geliefert:

- Die Datenerfassung mit der Kinect eignet sich mit trackingbedingten Einschränkungen zur Analyse der Armbewegungen. Für die Analyse der Körperbewegungen ist die Datenerfassung sehr gut geeignet.
- Die Speicherung der Daten funktioniert problemlos.
- Die Funktion zur Datenkorrektur funktioniert ebenfalls problemlos. Eine Weiterentwicklung der automatisierten Datensortierung könnte den manuellen Anteil weiter reduzieren.
- Die Koordinatentransformation funktioniert problemlos und unterstützt die Verständlichkeit der Ergebnisse in großem Maße.

Bei allen Schritten hat sich im Einsatz im industriellen Umfeld gezeigt, dass die Aufnahme und die Wiedergabe des Videos die Durchführung der einzelnen Schritte durch den Anwender unterstützt.

Evaluation der Analyse- und Auswertungsmethoden

Die Evaluation der Analyse hat folgende Ergebnisse geliefert:

- Die Algorithmen eignen sich für die Durchführung der Auswertung. Eine weitere Verbesserung der Algorithmen und die Implementierung in die Erfassungssoftware würden die Auswertung direkt am Aufnahmeort ermöglichen und so die Praxistauglichkeit weiter erhöhen.
- Die Analyse zeigt besonders lange und häufig auftretende Bewegungen auf sowie Tätigkeiten, die einen großen Teil der Aufnahmezeit bilden. Damit erfüllt sie die Anforderungen, Ansätze für die Verbesserung der Produktivität zu identifizieren.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass die entwickelte Methodik gut funktioniert und verwertbare Erkenntnisse liefert. Für den Einsatz in der Industrie wäre eine Weiterentwicklung der entstandenen Software notwendig.

4. Zuwendungsverwendung und Angemessenheit

4.1. Verwendung der Zuwendung

Wissenschaftlich-technisches Personal

Für das Forschungsvorhaben wurden Zuwendungen für einen wissenschaftlicher Mitarbeiter für die Laufzeit von 30 Monaten geplant. Laut Bewilligung beginnt dieser Zeitraum am 01. Januar 2014 und endet am 20. Juni 2016.

Die tatsächlichen verwendeten Zuwendungen widersprechen dem Plan in folgenden Punkten:

- Es wurden erst zum 01. November 2014 Personalmittel für das Vorhaben verbraucht.
- Es wurden insbesondere zu Beginn der Laufzeit des Vorhabens Zuwendungen für mehr als einen wissenschaftlichen Mitarbeiter verbraucht.

Nach Eingang der Bewilligung des Vorhabens konnte zum einen die TU-Verwaltung die Personalmittel erst ab November 2014 bewirtschaften. Zum anderen musste ab Beginn des möglichen Bearbeitungstermins fällige Arbeit nachgeholt werden.

Dazu haben von November 2014 bis Januar 2015 mehrere am Institut vorhandene Mitarbeiter das Projekt temporär bearbeitet, um Arbeit aufzuholen. Ab Januar 2015 wurde ein Mitarbeiter dem Projekt dauerhaft zugeordnet, der das Projekt für die verbleibende Zeit bearbeitete.

Geräte und Leistungen Dritter

Für das Forschungsvorhaben wurden keine Zuwendungen für Geräte und Leistungen Dritter geplant oder verwendet.

4.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Einschätzungen des Arbeitsplans über den Arbeitsaufwand haben sich als realistisch erwiesen. Das Vorgehen hat sich als sinnvoll und notwendig zur Erreichung der Ziele herausgestellt.

Für die Anforderungsdefinition und Auswahl von Analysen (Arbeitspaket 1) waren 3,5 Monate eingeplant. Die durchgeführten Arbeiten in diesem Arbeitspaket waren notwendig, um sicherzustellen, dass die entwickelte Methodik durch die Kinect realisierbar ist und in der Industrie eingesetzt werden kann. Die Arbeiten waren angemessen, da sie eine gute Grundlage für die Entwicklung der Methodik gebildet haben.

Für den Aufbau des Tracking-Systems (Arbeitspaket 2) waren 6 Monate eingeplant. Die durchgeführten Arbeiten in diesem Arbeitspaket waren notwendig, um die Daten für die Analyse sowie das Video zu erfassen. Die Arbeiten waren angemessen, da ein funktionierender Prototyp entstanden ist. Ohne dessen Funktionalitäten wären die Arbeitspakete 4 und 5 nicht durchführbar gewesen.

Für die Entwicklung / Anpassung von Analysemethoden (Arbeitspaket 3) waren 8 Monate eingeplant. Die durchgeführten Arbeiten in diesem Arbeitspaket waren notwendig, um eine Analyse auf Grundlage der Kinect zu entwickeln, die den Anforderungen der Industrie gerecht wird. Die Arbeiten waren angemessen, da eine Methode entwickelt wurde, die den zuvor gestellten Anforderungen entspricht.

Für die Datenaufbereitung / -kopplung für die Analysen (Arbeitspaket 4) waren 7,5 Monate geplant. Die durchgeführten Arbeiten in diesem Arbeitspaket waren notwendig, um die entwickelte Methode zu automatisieren und so durch den reduzierten Durchführungsaufwand anwendbar zu machen. Die Arbeiten waren angemessen, da Algorithmen entwickelt wurden, die die Analyse stark beschleunigen.

Für die Evaluation am Praxisbeispiel (Arbeitspaket 5) waren 5 Monate eingeplant. Die durchgeführten Arbeiten in diesem Arbeitspaket waren notwendig, um sicherzustellen, dass die entwickelten Analysen und Algorithmen die zuvor gestellten Anforderungen erfüllen und so der Zielstellung des Forschungsvorhabens gerecht werden. Die Arbeiten waren angemessen, da die Tauglichkeit überprüft werden konnte und Weiterentwicklungspotenziale identifiziert werden konnten.

5. Vorstellung der Analysemethode

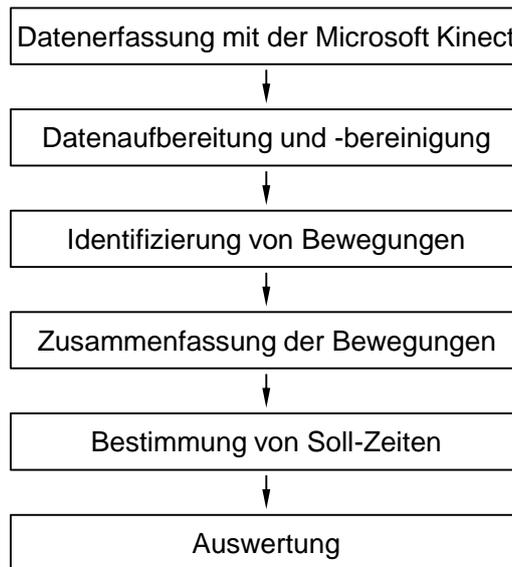
5.1. Ziele

Die entwickelten Methoden haben folgende Ziele:

- Das Motion-Tracking-System der Kinect erfasst 25 Gelenkpunkte der beobachteten Mitarbeiter. Damit diese Daten sinnvoll ausgewertet werden können, müssen sie aufbereitet werden. Das beinhaltet zum einen die Behandlung von Trackingfehlern aber auch die Auswahl relevanter Gelenkpunkte. Zudem sollen Automatisierungsmechanismen hierfür bereitgestellt werden.
- Die aufbereiteten Daten sollen anschließend analysiert werden, um Bewegungsabläufe zu erkennen. Dies soll wiederum automatisiert durch Algorithmen erreicht werden. Mit den erkannten Bewegungen können Abläufe visualisiert und bewertet werden.
- Die Auswertung der erkannten Bewegungen ermöglicht eine Aussage über die Produktivität des erfassten Ablaufs. Die Auswertungen sollen wiederum durch Automatisierungsmechanismen unterstützt werden.

5.2. Vorgehen

Ergebnis des Forschungsprojektes sind zwei verschiedene Analysearten (Armbewegungen und Körperbewegungen) mit mehreren Detaillierungsstufen und diversen Auswertungsmöglichkeiten. Beide Analysearten folgen dabei demselben allgemeinen Vorgehen:



13088

Abbildung 5 Vorgehen der Analyse

Die Datenerfassung umfasst die Vorbereitung und Durchführung der Aufnahme am Untersuchungs-ort. Bei der Datenaufbereitung und -auswahl werden die erfassten Daten daraufhin untersucht, ob die Abläufe der Mitarbeiter richtig aufgenommen wurden, also die Datenqualität ausreichend ist. Zudem ist die Datenqualität relevant für die Auswahl der Detaillierungsstufe. Je besser das Tracking funktioniert, desto detailliertere automatische Auswertungen sind möglich. Anschließend untersuchen Algorithmen die Daten und ermitteln, wann Bewegungen auftreten. Gleichartige Bewegungen werden im folgenden Schritt zusammengefasst und es wird ein Standardablauf an Bewegungen ermittelt, falls vorhanden. Für die zusammengefassten Bewegungen werden nun Soll-Zeiten bestimmt. Zudem können Planzeiten als Vergleich ausgewählt werden. Die so ermittelten Bewegungen können nun ausgewertet werden und Produktivitätspotenziale identifiziert werden.

5.3. Datenerfassung mit der Microsoft Kinect

Vorbereitung der Aufnahme

Zur Vorbereitung der Erfassung von Abläufen mit der Microsoft Kinect gehört zunächst die Auswahl des untersuchten Arbeitsplatzes. Für die entwickelte Methodik eignen sich Arbeitsplätze, an denen manuelle Tätigkeiten mit Seriencharakter durchgeführt werden. Das heißt, dass beispielsweise die Bedienung von Maschinen nicht durch die aktuelle Methode abgedeckt wird. Zudem sollten sich die Tätigkeiten wiederholen, da sonst die Zusammenfassung der Bewegungen nicht zielführend durchgeführt werden kann und der manuelle Aufwand in den letzten Schritten stark ansteigt.

Ein weiterer Punkt bei der Auswahl des Arbeitsplatzes ist die Möglichkeit, die Kinect an einem geeigneten Aufnahmeort zu positionieren. Diese Positionierung der Kinect ist der zweite Teil der Vorbereitung und hat entscheidenden Einfluss auf die Datenqualität der Aufnahme und somit auf die Gesamtmethodik. Hierbei hat sich gezeigt, dass insbesondere für die Analyse der Armbewegungen eine gute Positionierung enorm wichtig ist. Die Kinect sollte hier so positioniert werden, dass kein Teil des Oberkörpers durch Objekte am Arbeitsort oder durch andere Körperteile bei der Durchführung der Arbeitsaufgabe verdeckt wird. Bei der Analyse von Körperbewegungen ist eine gute Positionierung ebenfalls relevant, jedoch sind Verdeckungen durch andere Körperteile aufgrund des abweichenden Anwendungsfalles nicht zu vermeiden und sie beeinträchtigen die Analyse nicht so stark wie bei der Analyse der Armbewegungen.

Ebenfalls wichtig für die erfolgreiche Analyse der Arbeitsabläufe ist die Information der Mitarbeiter.

Durchführung der Aufnahme

Für die Durchführung der Aufnahme wurde basierend auf dem Microsoft SDK (Software Development Kit) eine Software entwickelt, die die Aufnahme unterstützt. Abbildung 2 (Abschnitt 3.2) stellt diese Oberfläche dar. Nach der Positionierung der Kinect müssen in der Software noch Angaben zur Positionierung der Kinect gemacht werden (Neigungswinkel), dann wird die Aufnahme gestartet.

Bewertung der Datenerfassung und -bereinigung und Ausblick

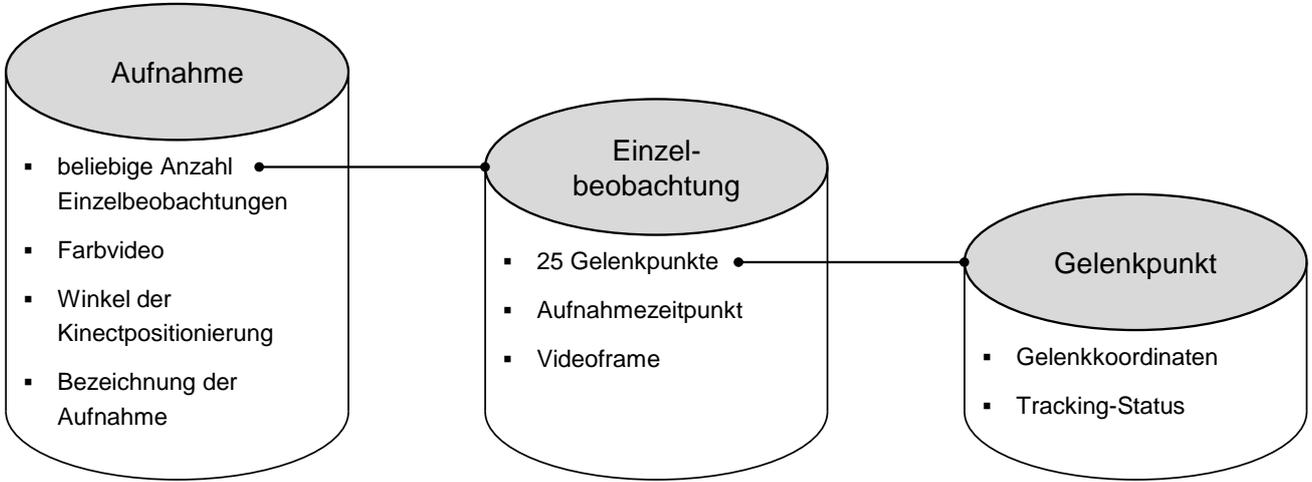
Die Anwendung in der Praxis hat aufgezeigt, dass sich die entwickelte Methodik gut anwenden lässt. Es existieren allerdings noch Punkte, die verbessert werden könnten. Die Hauptpunkte sind:

- Die aktuellen Einschränkungen der Technologie engen die Anzahl der geeigneten Arbeitsplätze ein. Zum Teil sind die Einflussfaktoren auf die Datenqualität in den Industrieszenarien ungünstig und nicht beeinflussbar. Dadurch ist insbesondere die Analyse von Armbewegungen nur für einen Teil der Arbeitsplätze geeignet. Für die Analyse der Körperbewegungen sind deutlich mehr Arbeitsplätze geeignet.
- Aktuell ist die Methode für die Analyse von Einzelarbeitsplätzen ausgelegt. In der Praxis sind aber oftmals andere Mitarbeiter in der Nähe. Dies muss entweder manuell aussortiert werden oder (eigentlicher Einsatz der Methode) die Methodik wird im Workshop-Charakter angewendet und so werden nur einzelne Leute zugelassen.
- Die vorgestellte Analysemethodik verwendet die Kinect 2 und ist vor allem für Montageplätze geeignet, bei denen der Monteur vorrangig an einem Ort arbeitet und die eine direkte Sicht zwischen Kinect und Monteur erlauben.
- Die aufgenommenen Videos sind momentan sehr groß.
- Bei der Information der Mitarbeiter wurde deutlich, dass ein Einsatz im Dauerbetrieb auf deutliche Gegenwehr stoßen würde.

5.4. Datenaufbereitung und -auswahl

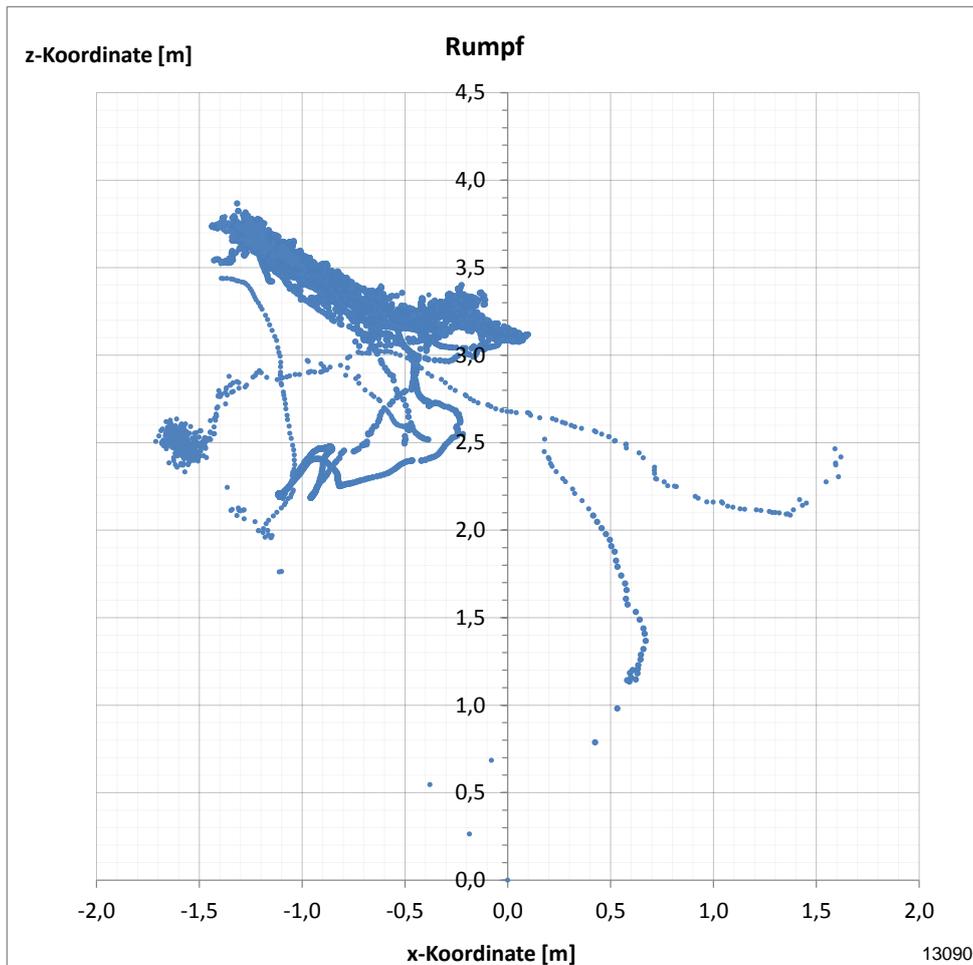
Bewertung der Datenqualität mit den Kinectdaten

Ergebnis der Datenerfassung sind ein Farbvideo und eine Datei, die die erfassten Gelenkpunkte (Joints) zusammenfasst. Abbildung 6 zeigt eine Übersicht über die Datenstruktur. Das Motion Tracking der Kinect erfolgt fortlaufend. Abbildung 7 zeigt beispielhaft aufgenommene Daten.



13089

Abbildung 6 Datenstruktur



13090

Abbildung 7 Aufgenommene Daten für einen Montageablauf

Wie zu sehen ist, wird bereits durch die Software der Kinect ein Trackingstatus erfasst. Drei verschiedene Trackingstati existieren für jeden Joint:

- Tracked: Der Joint wurde durch das Motion Tracking erfasst.
- Inferred: Der Joint wurde nicht erfasst, aber seine Position wurde interpoliert.
- NotTracked: Der Joint wurde weder erfasst noch interpoliert.

Damit lässt sich bereits eine Aussage über die Datenqualität der Aufnahme treffen. In den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass dieser Trackingstatus nicht ausreicht, um fehlerhafte Daten auszuschließen. Beim Auftreten von Trackingfehlern werden Gliedmaßen oder auch der ganze Körper nicht richtig erkannt, aber der Trackingstatus gibt dennoch „Tracked“ an.

Automatische Datenbereinigung

Um dem entgegen zu wirken, wurden Algorithmen entworfen, die die ermittelten Daten untersuchen. Diese Algorithmen betrachten beispielsweise den Abstand zwischen zwei Joints und die Geschwindigkeit der Joints. Weichen diese Werte von üblichen Werten ab, werden die damit verbundenen Aufnahmen aussortiert. Nach dieser automatischen Datenbereinigung lässt sich für jeden Joint des betrachteten Mitarbeiters ein Anteil an erfolgreichen Aufnahmen an den Gesamtaufnahmen bilden. Mit dieser Information lässt sich dann eine Aussage darüber treffen, für welche Analysedetailstufe sich die Aufnahme eignet.

Auswahl der Detaillierungsstufe

Die Aufnahmen mit der Kinect haben gezeigt, dass der Rumpf in der Regel gut erkannt wird und die Datenqualität abnimmt nach außen.

Da nicht in jedem Fall eine sehr gute Datenqualität gewährleistet werden kann, wurden unterschiedliche Detaillierungsstufen der zwei Analyseverfahren entwickelt, damit auch bei schlechterer Datenqualität eine Aussage getroffen werden kann. Abbildung 8 zeigt beispielsweise auf, für welche Körperteile gute Datenqualitäten (>75%) vorhanden sein müssen, um die verschiedenen Methoden durchzuführen.

		Analyseart				
		Körperbewegungen			Armbewegungen	
		Einfache Analyse	Bewegungs-analyse	Bewegungs-analyse mit Einflussgrößen	Bewegungs-analyse	Bewegungs-analyse mit Einflussgrößen
für Analyse erforderliche Körperteile	Kopf + Schultern	X	X	X	X	X
	Rumpf		X	X		
	Arm Links				X	X
	Hand Links					X
	Arm Rechts				X	X
	Hand Rechts					X
	Bein Links			X		
	Fuß Links					
	Bein Rechts			X		
	Fuß Rechts					

13091

Abbildung 8 Detaillierungsstufen der Analyse und benötigte Körperteildaten

Manuelle Datensortierung

Wenn die entsprechende Methode ausgewählt wurde, kann eine manuelle Aussortierung von Trackingfehlern erfolgen. Dies ist dann notwendig, wenn trotz der Kinect-Aussortierung und der automatischen Nachsortierung noch Trackingfehler bestehen. Dafür wurde ein Softwareprototyp entwickelt, mit dem man die Daten überprüfen und korrigieren kann.

Das Ergebnis der Datenaufbereitung und Sortierung sind dann die Koordinaten der für die Analyse benötigten Joints. Wenn diese beispielsweise dargestellt werden, ergibt sich ein Bild wie in Abbildung 9.

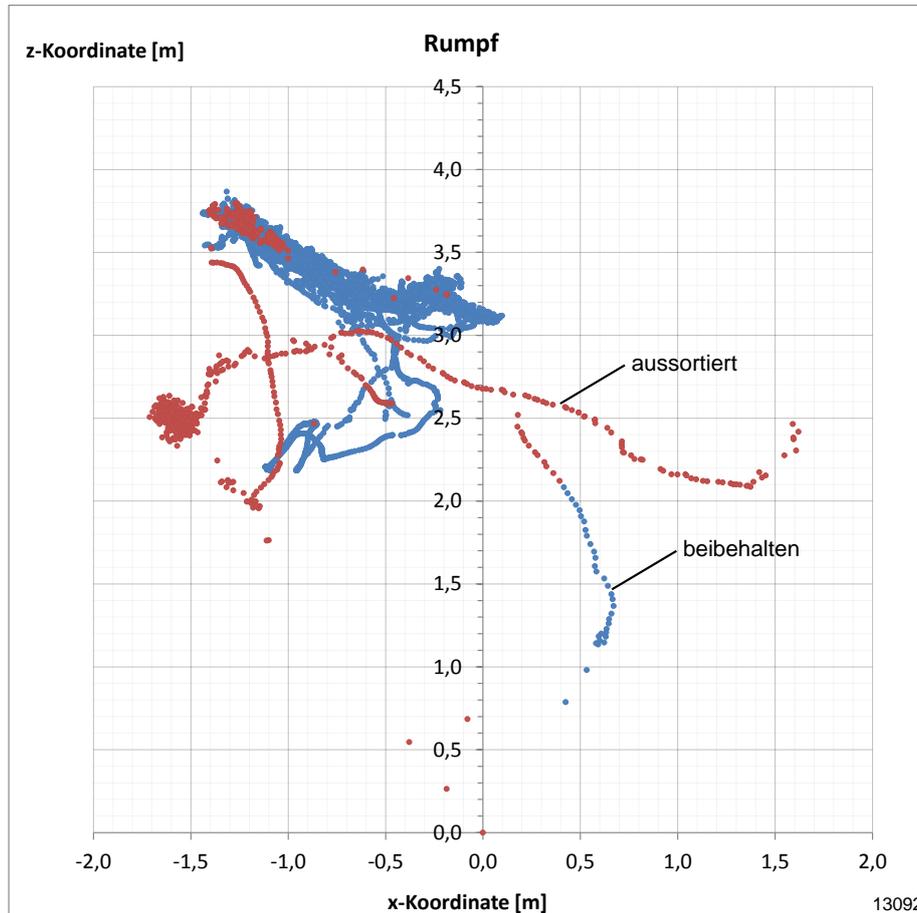


Abbildung 9 Aufgenommene Daten der Kinect nach der Datenbereinigung

Bewertung der Datenaufbereitung und -bereinigung und Ausblick

Die Anwendung der Methode hat aufgezeigt, dass die Aussortierung durch die Kinect nicht ausreicht, um eine zielführende Analyse anzuschließen. Die entwickelten Algorithmen sind in der Lage einen Teil der fehlerhaften Daten auszusortieren. Allerdings verbleibt bei schlechten Aufnahmen ein Anteil an fehlerhaften Daten, der manuell aussortiert werden muss.

Die entwickelten Methoden und Prototypen sind also in der Lage, die Grundlagen für die folgenden Schritte zu schaffen. Allerdings ist die Technologie der Microsoft Kinect noch nicht ausreichend ausgereift, um in allen Anwendungsfällen ein gutes Tracking und so eine gute Datengrundlage zu gewährleisten. Ein möglicher Ansatz zur Verbesserung der Gesamtmethode ist die Erweiterung des Kinect-Trackings um andere Tracking-Methoden wie beispielsweise Beschleunigungssensoren.

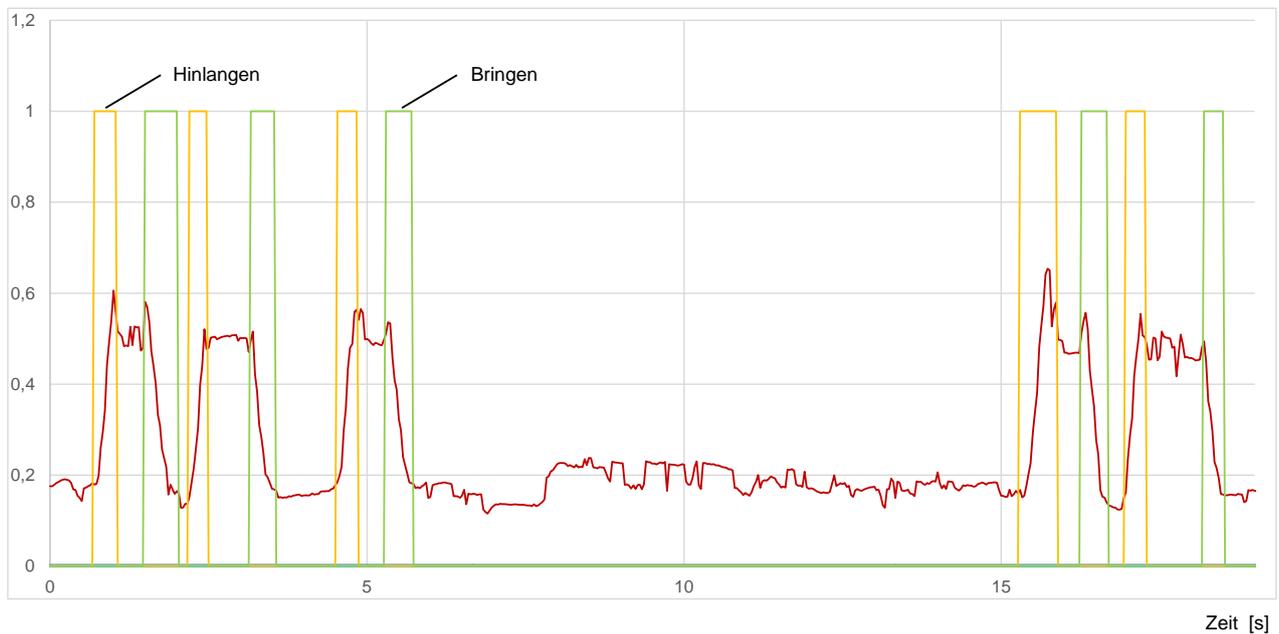
5.5. Identifizierung von Bewegungen

Je nachdem, ob die Armbewegungen oder die Körperbewegungen analysiert werden, sind unterschiedliche Kriterien und Algorithmen zur Identifizierung relevant.

Identifizierung von Armbewegungen

Im Projekt ist es gelungen, Bewegungsarten wie Hinlangen und Bringen automatisch zu identifizieren. Grundidee ist es, aus Gelenkgeschwindigkeiten und Entfernungen zwischen Gelenken auf die Bewegungsart zu schließen. Zum Beispiel ist die typische Hinlangbewegung gekennzeichnet durch eine hohe Handgelenksgeschwindigkeit und eine zunehmende Entfernung zwischen Schulter- und Handgelenk, während die Bringbewegung ebenso durch eine hohe Handgelenksgeschwindigkeit gekennzeichnet ist, der Abstand zwischen Schulter- und Handgelenk jedoch abnimmt. Abbildung 10 zeigt den Abstand zwischen Handgelenk und Schulter bei einer Beispielaufnahme und die erkannten Bewegungen. Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse in Draufsicht.

Entfernung zwischen Hand
und Körpermitte [m]



Zeit [s]
13093

Abbildung 10 Identifizierung von Armbewegungen anhand der Gelenkdaten

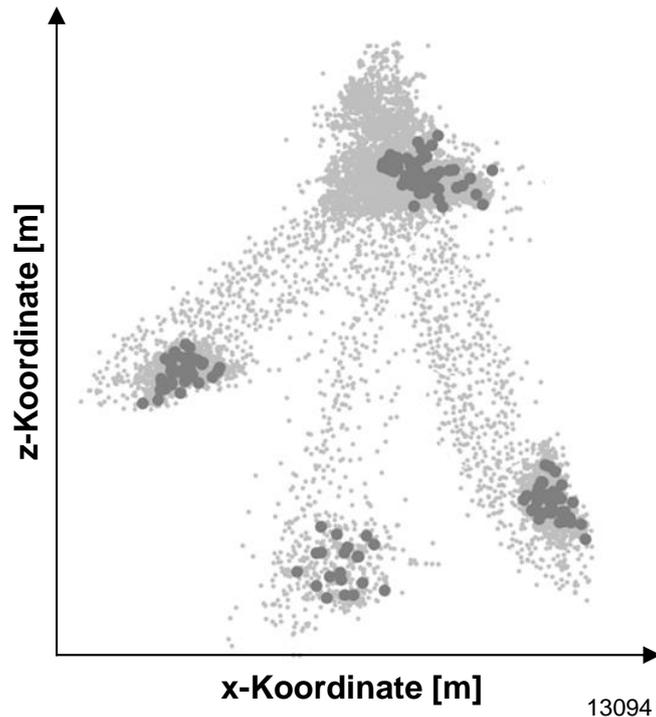


Abbildung 11: Ermittelte Haltepunkte

Identifizierung von Körperbewegungen

Die Identifizierung von Körperbewegungen erfolgt für die einfache Analyse auf ähnliche Art wie die Identifizierung von Armbewegungen. Der relevante Gelenkpunkt für die Identifizierung ist die Schultermitte. Analog kann hier nun die Geschwindigkeit dieses Gelenks berechnet werden und mit festgelegten Grenzwerten verglichen werden. Anders als bei den Armbewegungen wird allerdings nur die Geschwindigkeit in Horizontalrichtung untersucht. Bei der einfachen Analyse wird nur zwischen Gehen und Stehen bzw. Sitzen unterschieden.

Bei der erweiterten Analyse werden zusätzlich noch folgende Gelenkpunkte betrachtet

- Schultern (Links/Rechts)
- Wirbelsäule
- Hüfte (Links/Rechts)
- Knie und Fußgelenke (Links/Rechts)

Auch hier werden Geschwindigkeiten der Gelenke untersucht, aber auch die Winkel zwischen verschiedenen Körperteilen und deren Veränderung sowie die Winkel zu der vertikalen Koordinatenachse. Das Ergebnis dieser Analyse ist eine Identifizierung der folgenden Bewegungen:

- Neigungsbewegungen
- Drehbewegungen
- Laufbewegungen
- Stehen
- Sitzen

Nach der Identifizierung der Bewegungen steht für jeden Zeitpunkt der Aufnahme fest, welche Art von Bewegung stattfindet oder ob der Arm beziehungsweise Körper ruht.

Bewertung der Identifizierung von Bewegungen und Ausblick

Die Anwendung der Erkennungsalgorithmen hat gezeigt, dass Bewegungen erkannt werden und so die Grundlage für die nächsten Schritte geschaffen ist. Die Anwendung der Algorithmen ist aufwandsarm und leicht verständlich.

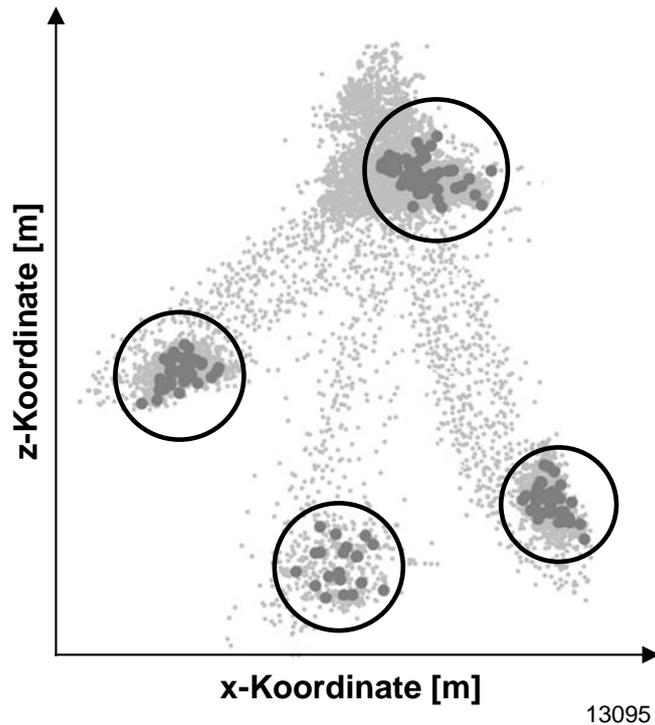
Im aktuellen Status der Analyse müssen die Grenzwerte zur Bewegungsidentifizierung insbesondere bei den Armbewegungen an die Arbeitsaufgabe angepasst werden, da die mittleren Bewegungsgeschwindigkeiten dort stark schwanken können. Dies erfordert ein gewisses Wissen über die verwendeten Methoden. Zur weiteren Vereinfachung der Analyse wäre hier denkbar, weitere Tests durchzuführen, um die Grenzwerte beziehungsweise Algorithmen allgemeingültiger zu machen.

5.6. Zusammenfassung der Bewegungen

Bei typischen Vorgängen in der Montage oder bei der Kommissionierung treten schon bei kurzen Aufnahmen sehr viele Bewegungen und Bewegungsunterbrechungen (Haltepunkte) auf. Damit die Daten im Anschluss sinnvoll ausgewertet werden können, erfolgt im nächsten Schritt eine Zusammenfassung der Bewegungen und Haltepunkte.

Zusammenfassung der Haltepunkte

Zunächst werden die Haltepunkte der Aufnahme zusammengefasst. Dies geschieht durch ein automatisiertes Clusterverfahren. Hier wurde ein hierarchisches Clusterverfahren gewählt, das räumlich beieinanderliegende Haltepunkte zusammenfasst. Der Anwender kann hier die Grenzdistanz variieren, ab der Haltepunkte nicht mehr zu einem Cluster zugeordnet werden. Damit ist auch hier wieder eine Anpassung an unterschiedliche Arbeitsaufgaben möglich. Ergebnis der durchgeführten Clusteranalyse sind Haltebereiche, wie sie in Abbildung 12 zu sehen sind.



13095

Abbildung 12: Cluster von Haltepunkten

Zusammenfassung der Bewegungen

Im Anschluss werden jeweils alle Bewegungen einer Bewegungsart zusammengefasst, die dieselben Start- und Endpunkte haben. Damit ist eine Bewegung nun gekennzeichnet durch eine Bewegungsart sowie ihren Start- und Endhaltecluster. Für eine typische Montageaufgabe bedeutet dies etwa, dass alle Bewegungen vom Montageplatz zu einer Materialkiste zusammengefasst werden. Abbildung 13 zeigt die zusammengefassten Bewegungen. Die Cluster CL1, CL2, CL3 und CL4 in der Abbildung sind die zuvor identifizierten Haltebereiche. Die anderen Cluster sind die zusammengefassten Bewegungen. Cluster CL12 umfasst beispielsweise alle Bewegungen, die in Cluster CL1 begonnen haben und in Cluster CL2 geendet haben. Da in diesem Beispiel Cluster CL1 der Fügeort war und die anderen Orte die Materialisten, stellen die Cluster CL12, 13 und 14 Hinlangbewegungen dar, während die Cluster CL21, CL31 und CL41 Bringbewegungen darstellen.

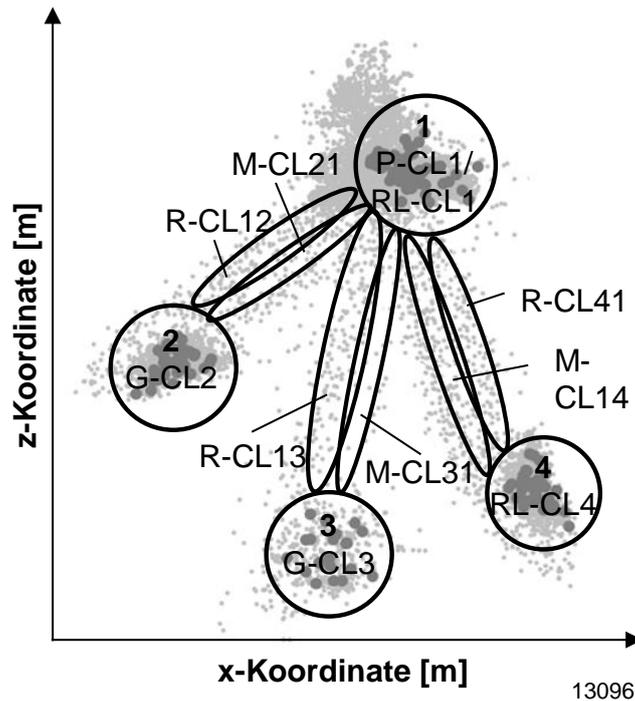


Abbildung 13 Zusammengefasste Bewegungen

Nun können diese zusammengefassten Bewegungen ausgewertet werden.

Ermittlung des Standardablaufs

Im nächsten Schritt können nun alle Bewegungen identifiziert werden, die zur eigentlichen Arbeitsaufgabe gehören. Alle anderen Bewegungen werden als nicht wertschöpfend betrachtet. Dafür gibt es zwei Vorgehensweisen, zum einen die Auswahl dieser Bewegungen über die automatisierte Ermittlung des Standardablaufs oder eine manuelle Auswahl, wenn diese automatisierte Ermittlung nicht funktioniert. Dies ist dann der Fall, wenn kein Standardablauf existiert.

Für die Ermittlung des Standardablaufs werden zunächst die Bewegungen ermittelt, die besonders häufig auftreten. Unter diesen Bewegungen muss der Anwender dann die Anfangsbewegung des üblichen Ablaufs auswählen. Für die anderen häufigen Bewegungen wird dann ermittelt, an welcher Position sie im Ablauf nach der Anfangsbewegung am häufigsten Auftreten. Daraus wird dann der Ablauf angeleitet.

Bewertung der Zusammenfassung der Bewegungen und Ausblick

Die Anwendung der Methodik hat aufgezeigt, dass die Zusammenfassung der Bewegungen ein wichtiger Teil der Analysemethodik ist, da sie den Aufwand der nachfolgenden Schritte erheblich reduziert. Die Zusammenfassung der Haltepunkte hat problemlos funktioniert. Jedoch könnten andere Clusterverfahren getestet werden, um den manuellen Anteil weiter zu reduzieren.

Die Zusammenfassung der Bewegungen ist einfach durchführbar, ebenso wie die Ermittlung des Standardablaufs. Diese Methode zur Ablauffermittlung ist in einigen Anwendungen noch fehleranfällig, beispielsweise wenn die Bewegungsanzahl in den Zyklen variiert.

5.7. Bestimmung von Soll-Zeiten

Im nächsten Schritt der Analysemethode werden den zusammengefassten Bewegungen Soll-Zeiten zugeordnet, um besonders hohe Potenziale im Ablauf zu ermitteln. Dieser Schritt erfolgt nur für die Bewegungen des Standardablaufs, da die übrigen Bewegungen bereits als mögliche Verschwendungen identifiziert wurden. Die Automatisierung der Bestimmung der Soll-Zeiten ist möglich in Abhängigkeit von der Analysedetaillierung. Sie basiert auf der Soll-Zeit-Zuordnung nach MTM-1.

Soll-Zeit-Bestimmung für die Armbewegungen

Für eine Soll-Zeitbestimmung nach MTM-1 ist zunächst die Ermittlung der vorliegenden Bewegungsart relevant. Dies kann für einfache Montageaufgaben, die hauptsächlich aus Fügevorgängen besteht, zuverlässig erfolgen. Zudem ist die Ermittlung diverser Einflussgrößen notwendig. Die automatische Ermittlung dieser Einflussgrößen wurde geprüft und umgesetzt. Einige Einflussgrößen wie die Bewegungslänge lassen sich einfach berechnen, während andere schwieriger aus den Daten ablesbar sind. Hier unterscheiden sich auch die beiden Detaillierungsstufen der Analyse der Armbewegungen. Wenn die Handspitzen und Daumen erkannt werden, lässt sich beispielsweise ermitteln, ob ein Greifen oder ein Loslassen durchgeführt wird.

Bei beiden Detaillierungsstufen ist es jedoch notwendig, gewisse Informationen im Nachhinein zu ergänzen, wenn man sich vollständig an MTM-1 halten will und das Vorwissen dafür besitzt. Wenn dies nicht der Fall ist, stellt die Analyse vereinfachte Werte bereit, die als Orientierung für Auswertung dienen. So wird dann für eine Gruppe von Einflussgrößen die geringste Normzeit vorgeschlagen, um das Potenzial von Verbesserungen zu verdeutlichen.

Soll-Zeit-Bestimmung für die Körperbewegungen

In der einfachen Variante der Analyse von Körperbewegungen ist keine automatisierte Bestimmung von Soll-Zeiten auf Grundlage von MTM-1 vorgesehen. Die Bestimmung der Soll-Zeiten bei den anderen beiden Detaillierungsstufen hingegen erfolgt analog zu den Armbewegungen. Die genauere Detaillierung erlaubt unter anderem die Erfassung von Einflussgrößen wie der Anzahl an durchgeführten Schritten bei einer Laufbewegung.

In der Analyse von Arm- und Körperbewegungen ist alternativ zu der Verwendung von MTM-1 die Eingabe von individuellen Plan-Zeiten durch den Anwender möglich. Dies ermöglicht den Abgleich mit den Ist-Zeiten und kann so auch Fehler in den Plan-Zeiten aufdecken.

Ergebnis dieses Schrittes sind demnach Vergleichswerte für die aufgenommenen Zeiten.

Bewertung der Bestimmung von Soll-Zeiten und Ausblick

Die Anwendung der Methodik hat aufgezeigt, dass sich die entwickelten Algorithmen zur Erkennung der ausgewählten Einflussgrößen eignen. Damit die bestimmten Werte verlässlich sind, muss jedoch eine hohe Datenqualität vorliegen. Der volle Umfang der MTM-1-Analyse kann nicht erreicht werden, ohne durch einen in der Methodik geschulten Anwender ergänzt zu werden. Jedoch bietet sie eine Unterstützung und minimiert somit den Aufwand für den Anwender.

5.8. Auswertung

Mit den bis hierhin erfassten Informationen lässt sich die Aufnahme auswerten. Sie erlaubt die Auswertung entsprechend den klassischen integrierten Produktivitätsanalysen sowie zusätzliche Auswertungen

Spaghetti-Diagramm

Das klassische Spaghetti-Diagramm stellt Mitarbeiterbewegungen an einem Arbeitsplatz in Draufsicht dar. Dies lässt sich in der Methode für die Analyse der Körperbewegungen einfach umsetzen. Ein Beispiel ist in Abbildung 14 dargestellt. Zudem lassen sich solche Abbildungen auch für die Bewegungen der Arme darstellen (vgl. Abbildung 9). Insbesondere der Anwendungsfall für die Arme ist ohne die Kinect nicht realisierbar, da normale Armbewegungen viel zu schnell für eine manuelle Aufnahme erfolgen.

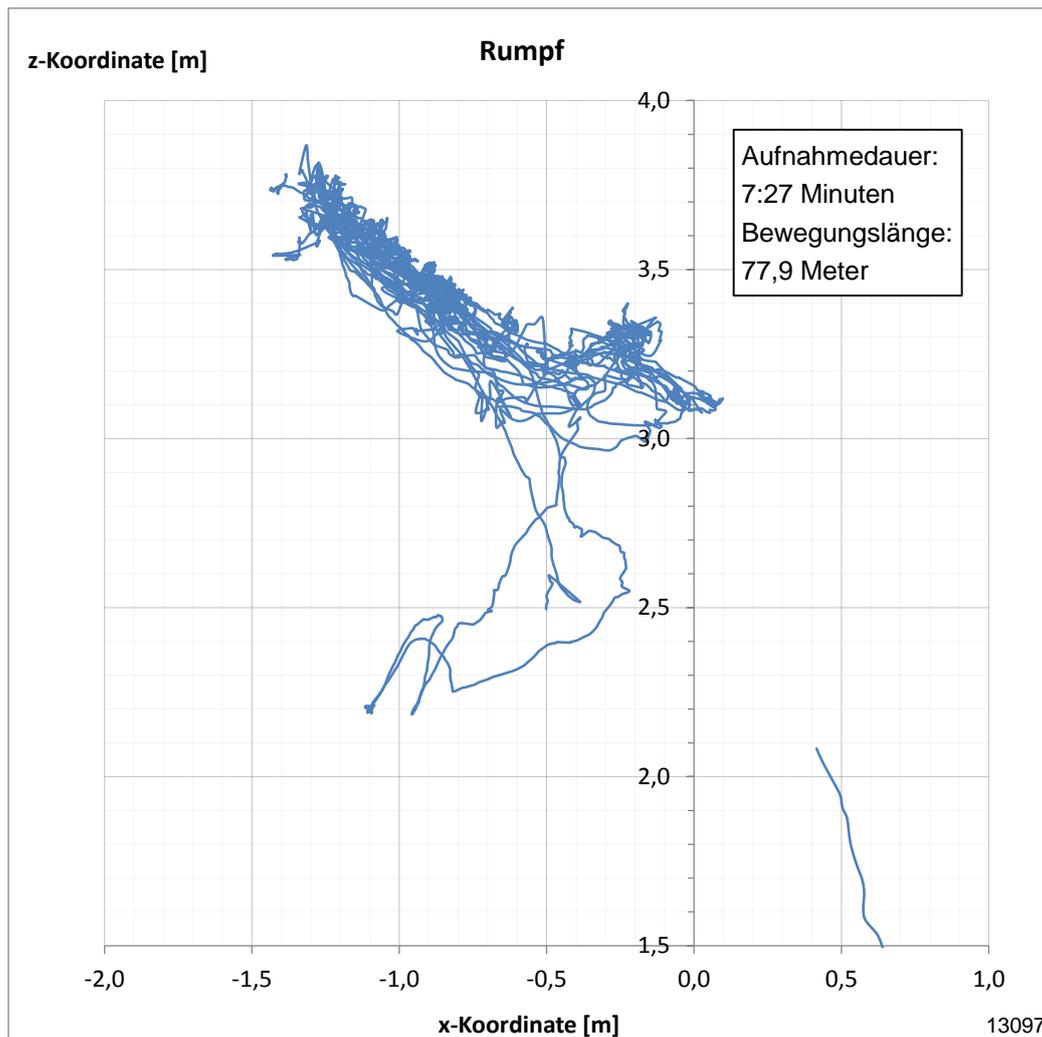


Abbildung 14: Spaghetti-Diagramm

Griffreichweiten- und -häufigkeitsanalyse

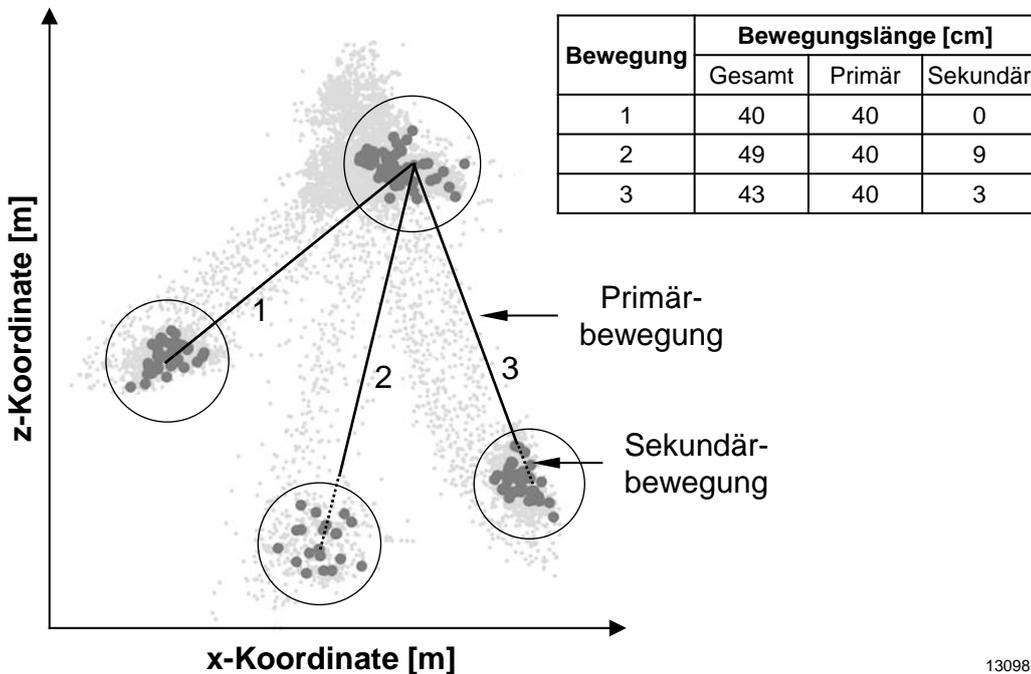
Die Informationen, die durch die Identifizierung der Bewegungen und deren Zusammenfassung kann nun genutzt werden, um die Häufigkeit der einzelnen Bewegungen sowie deren Bewegungslängen zu bestimmen. Die kontinuierliche Aufnahme von Ist-Daten erlaubt hier ebenso wie bei dem Spaghetti-Diagramm eine Erfassung aller Bewegungen mit hoher Genauigkeit.

MTMT-1-Analyse

Die automatisierte Erfassung von Einflussgrößen erlaubt eine vereinfachte MTM-1-Analyse, ohne umfassende Methodenkenntnisse beim Anwender zu erfordern. Die vollständige MTM-1-Analyse bei entsprechenden Kenntnissen kann beschleunigt erfolgen, da ein Teil der Einflussgrößen erfasst ist. Nicht erfasst werden beispielsweise Einflussgrößen wie der Bewegungsfall bei der Bewegung Hinlängen. Diese müssen dann manuell ergänzt werden. Für die Einflussgröße Bewegungslänge verfügt die automatisierte Analyse mit der Kinect über eine höhere Genauigkeit als die manuelle Durchführung.

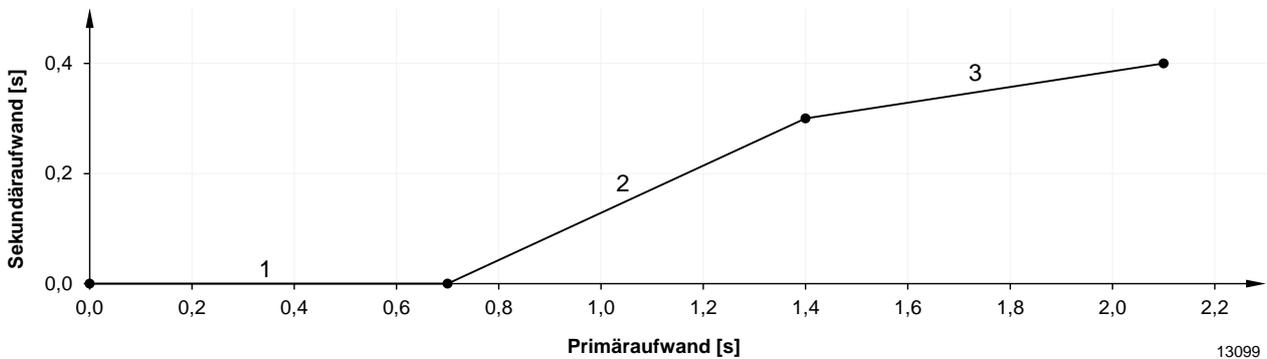
Primär-Sekundär-Analyse

Die ermittelten Bewegungslängen und -dauern erlauben es, den Primäraufwand automatisiert zu bestimmen und so den Anteil an wertschöpfenden Bewegungen am Planarbeitsablauf zu berechnen. Die Durchführung dieser Methode kann bei einfachen Montageaufgaben nahezu vollständig automatisiert werden. Lediglich der Bestimmung des Montageortes muss vom Anwender überprüft werden. Das Ergebnis einer solchen Analyse ist in Abbildung 15 verdeutlicht. Abbildung 16 zeigt die Aufwände für die Bewegungen in einem Vektordiagramm.



13098

Abbildung 15: Identifizierte primäre und sekundäre Bewegungen



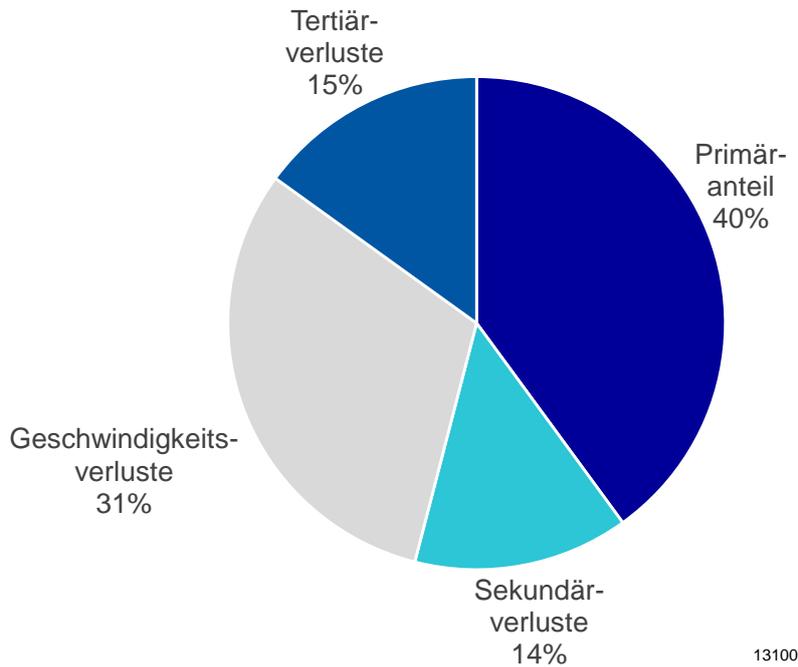
13099

Abbildung 16 Vektordiagramm der Primär-Sekundär-Analyse

Weiterentwicklung der Methoden und Zusammenfassung

Die Anpassung der Methoden an die Kinectdaten hat weitere Auswertungsmöglichkeiten eröffnet.

Neben den primären und sekundären Bewegungen lassen sich Bewegungen (tertiäre Bewegungen) ermitteln, die nicht zum Plan-Ablauf gehören und so Verbesserungspotenzial bergen. Ebenso werden für alle Bewegungen reale Zeiten gemessen, die mit den Soll-Werten verglichen werden können. Dadurch lassen sich Geschwindigkeitsverluste bei den Bewegungen ermitteln. Damit lässt sich die Primär-Sekundär-Analyse um zusätzliche Informationen erweitern, die die realen Abläufe genauer darstellen. Abbildung 17 zeigt beispielhaft die Verteilung der Arbeitszeit bei einer Aufnahme. Hier sind 15% Tertiärverluste, also Unterbrechungen des Arbeitsablaufs, die vermieden werden sollten. 31% sind Geschwindigkeitsverluste, die durch Training, bessere ergonomische Bedingungen und Motivation reduziert werden können. 14% sind Sekundärverluste, die auf Potenzial zur Layoutoptimierung hinweisen und nur 40% der Arbeitszeit sind tatsächlich wertschöpfend.



13100

Abbildung 17 Zeitanteile

Zudem lassen sich die einzelnen Bewegungen nun im Detail darstellen. So können beispielsweise die Bewegungslängen und -dauern visualisiert werden, um Schwankungen zu verdeutlichen (vgl. Abbildung 18) und so z. B. auf Prozessunsicherheiten hinweisen.

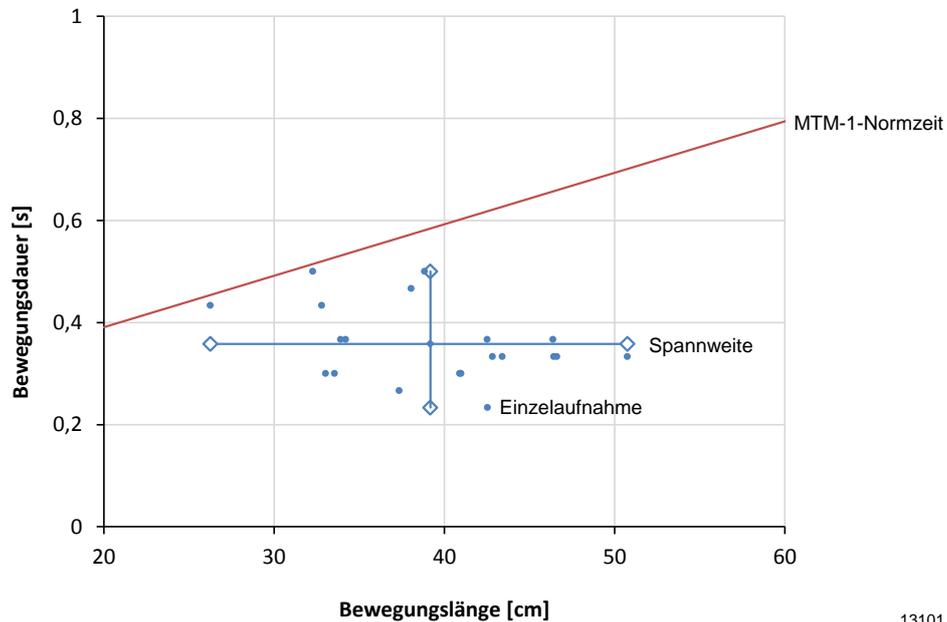


Abbildung 18: Bewegungslänge und -dauer einer Bewegung

Die neu entwickelte Analyse kombiniert also die Auswertungen bewährter Methoden und macht diese durch die kontinuierliche Ist-Zeitaufnahme genauer. Zudem kann sie die Auswertungen durch zusätzliche Information erweitern.

Basierend auf den Analyseergebnissen können anschließend gezielt Verbesserungen durchgeführt werden, indem beispielsweise das Layout angepasst wird, die Arbeitsbedingungen an die Arbeitsaufgabe angepasst werden oder die Mitarbeiter besser geschult werden und so durch Lerneffekte die Arbeitsgeschwindigkeit steigt.

6. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Tabelle 1 stellt die durchgeführten Transfermaßnahmen dar.

Tabelle 1 Durchgeführte spezifische Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Weiterbildung / Transfer in die Industrie	Weiterbildung von Mitarbeitern kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten	Hausinterne / externe Schulungen	2016
		Erstellung von Anwenderrichtlinien / Handlungsleitfaden	Mai 2016
Fachkonferenzen	Wissenstransfer durch Vorträge / Vorstellungen auf Fachkonferenzen und Tagungen	HAB-Seminar	Oktober 2015
		Int. Fachkonferenz (IFIP)	September 2015
Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse durch Fachbeiträge in Fachzeitschriften	Industrie 4.0 Management	April 2016
		Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb	2016
Online-Veröffentlichung	Schnelle und umfassende Informationsverbreitung im Internet	Informationsdienst Wissenschaft	2016
		IPMT-Internetseite	Februar 2015
Projektbegleitender Ausschuss	Fortlaufende Diskussion der Forschungsergebnisse	Projektbegleitender Ausschuss	April 2015 Februar 2015 Februar 2016 September 2016 2015 Februar 2015 Februar 2016 September 2016
Ausbildung	Ausbildung und Qualifizierung von Studenten	Anwendung und Weiterentwicklung der Forschungsergebnisse in studentischen Arbeiten (sieben Arbeiten)	Oktober 2014 - September 2016
Bau eines Demonstrators	Ständige Möglichkeit zur Vorstellung der Ergebnisse	Verbleib eines Demonstrators in der IPMT-Modellfabrik	Dezember 2015
Sonstige Transfermaßnahmen	Einbeziehung eines Multiplikators	Einbindung von Technologie-Beratungen (BeOne; Media Analyzer)	November 2014

Tabelle 2 stellt die geplanten Transfermaßnahmen dar.

Tabelle 2 Geplante spezifische Transfermaßnahmen

	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Ausbildung	Ausbildung und Qualifizierung von Studenten	Vorlesung „Produktivitätsmanagement“ an der Technischen Universität Hamburg-Harburg	1x im Jahr
		Ausbildung WiMi/HiWi	nach Bedarf
Weiterbildung / Transfer in die Industrie	Weiterbildung von Mitarbeitern kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten	Hausinterne / externe Schulungen	2016/2017
		Fachkraftausbildung im Rahmen eines Produktivitätsseminars	nach Bedarf
Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse durch Fachbeiträge in Fachzeitschriften	eine weitere Fachzeitschrift	2016
Online-Veröffentlichung	Veröffentlichung der Ergebnisse durch Bereitstellung im Internet	Informationsdienst Wissenschaft	2016
Beratung von Unternehmen	Transfer des Methodenwissen in die Industrie	Beratungsprojekte	nach Bedarf
Sonstige Transfermaßnahmen	Wissenschaftliche Arbeit	Verwendung der Ergebnisse im Rahmen einer Dissertation	2017
	Vorstellung der Ergebnisse	Posterdruck	2016

Für einen den erfolgreichen Transfer ist nach den Erfahrungen aus dem Forschungsvorhaben die Weiterentwicklung der Software-Prototypen und der verwendeten Algorithmen notwendig.

7. Zusammenstellung aller veröffentlichten Arbeiten

Benter, M. (2015a): Analyse von Arbeitsabläufen mit 3D-Kameras. In: Horst Meier (Hg.): Lehren und Lernen für die moderne Arbeitswelt. Berlin: GITO (Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB)), S. 313-339.

Benter, M. (2015b): Analysis of manual work with 3D cameras. In: Advances in Production Management Systems. Value Networks: Innovation, Technologies, and Management. IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2015, Tokyo, Japan. Heidelberg: Springer.

Benter, M.; Lödding, H. (2016): Analyse von Arbeitsabläufen mit 3D-Kameras. Ein teilautomatisierter Ansatz zur Analyse von Montagetätigkeiten. In: Industrie 4.0 Management (3), S. 70–73.

8. Angaben über gewerbliche Schutzrechte

Im Rahmen des Projekts wurden durch das IPMT keine gewerblichen Schutzrechte angemeldet.

9. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 17695 N der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V., Schlachte 31, 28195 Bremen wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.