

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20267 N

Thema

Kombinierte sensor- und trackinggestützte Produktivitätsanalysen für die Maschinenbedienung in der Kleinserienfertigung

Berichtszeitraum

01.11.2019 bis 31.07.2022

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1:

Technische Universität Hamburg

Institut für Produktionsmanagement und -technik (IPMT)

Denickestraße 17, 21073 Hamburg

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	3
2. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU.....	3
2.1. Innovativer Beitrag	3
2.2. Industrielle Anwendungsmöglichkeiten.....	4
2.3. Weiterentwicklung	4
3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse.....	5
3.1. AP 1 Zustandsdefinition und -erkennung.....	5
3.2. AP 2 Datenerfassung	7
3.3. AP 3 Datenaufbereitung	10
3.4. AP 4 Datenauswertung	11
3.5. AP 5 Evaluation.....	13
4. Zuwendungsverwendung und Angemessenheit	14
4.1. Verwendung der Zuwendung	14
4.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	15
5. Vorstellung der Analysemethode.....	15
5.1. Ziele	15
5.2. Hardware und Software.....	15
5.3. Vorgehen	16
6. Literaturverzeichnis	17
7. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	17
8. Zusammenstellung aller veröffentlichten Arbeiten	19
9. Angaben über gewerbliche Schutzrechte	19
10. Förderhinweis	19

1. Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens war es, eine weitgehend automatisierte Produktivitätsanalyse auf Basis von Tracking- und Sensordaten für die Maschinenbedienung in der Kleinserienfertigung zu entwickeln, die sowohl die Mitarbeiter als auch die Maschine umfasst. Der zentrale Lösungsansatz des Forschungsvorhabens war es, Maschinen- und Mitarbeiterzustände zu erfassen und sinnvoll zu kategorisieren. Dazu wurden zunächst generische Zustände und Abläufe für Mitarbeiter (normaler Arbeitszyklus, Rüsten, Störungsbehebung) und Maschine (normaler Bearbeitungszyklus, Rüsten, Störungsbehebung) definiert, um Zustände anhand ihrer typischen Abfolge erkennen zu können.

Ergebnis des Forschungsvorhabens ist eine Gesamtlösung, die es erstmals ermöglicht, die Mitarbeiter- und Maschinenzustände industrieller Arbeitsplätze detailliert zu erfassen und zu analysieren. Die Datenerfassung erfolgt dabei weitgehend automatisiert und kann durch die Auswahl geeigneter Low-Cost-Sensoren individuell auf unterschiedliche Arbeitsplätze angepasst werden. Eine Web-Applikation unterstützt die Konfiguration und Anwendung der Analyse und ermöglicht eine komfortable unternehmensspezifische Konfiguration der Sensoren, Zustände, Zustandsabfolgen, Ereignisse und Ereigniskombinationen. Eine Echtzeit-Visualisierung der erfassten Sensor-Signale unterstützt den Anwender bei der Einrichtung und Kalibrierung der Sensoren. Ein Dashboard wertet schließlich die gesammelten Daten auf Grundlage einer standardisierten Logik aus, visualisiert die Ergebnisse übersichtlich und wertet aufgetretene Wartezeiten aus. Das Vorgehen ist in der Lage, auch Arbeitsplätze mit mehreren Maschinen und mehreren Mitarbeitern zu analysieren. Somit ist das Vorgehen geeignet, um aufwandsarm unterschiedliche Arbeitsplätze in der Produktion im Hinblick auf die Mitarbeiter- und Maschinenproduktivität zu analysieren und Verbesserungspotentiale aufzudecken.

Eine besonders wichtige Information für die Erkennung der Mitarbeiterzustände ist die Position des Mitarbeiters in der Produktion. Für die Positionserkennung sollte ursprünglich aufbauend auf den Ergebnissen aus dem Projekt ProTrack [Bent18] ein Motion-Tracking-Ansatz mit Tiefenbildkameras als zentrale Technologie eingesetzt werden. Zu Beginn des Forschungsprojektes hat sich allerdings herausgestellt, dass die Verwendung von Tiefenbildkameras wesentliche Nachteile für die Positionserkennung mit sich bringt. Zum einen erfordert die fehlerfreie Erfassung von Personen ein dauerhaft freies Sichtfeld der Kameras. Zum anderen gestaltet sich die Abdeckung größerer Flächen als schwierig, da mehrere Kameras verwendet werden müssen. Dies führt zu hohen Aufwänden in der Konfiguration, bei der Datenverarbeitung sowie bei den Investitionskosten der Analyse. Als flexiblere und kostengünstigere Alternative hat sich die Verwendung von BLE-Beacons herausgestellt. Mit diesen wurde ein System entwickelt, das den Aufenthaltsort einer Person auf Grundlage der gemessenen Signalstärke von am Körper getragenen BLE-Beacons an verschiedenen Arbeitsstationen bestimmt.

Das Vorgehen wurde in mehreren Evaluationen erprobt und lieferte valide Ergebnisse. Die Anwender konnten die Analyse individuell an verschiedene Arbeitsplätze anpassen und über die Dauer der Analyse Mitarbeiter- und Maschinenzustände erfassen. Die Auswertung lieferte Erkenntnisse über Wartezeiten sowie über die Zusammensetzung der Zustände, die zeitgleich aufgetreten sind.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde daher vollständig erreicht.

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

2.1. Innovativer Beitrag

Ergebnis des Forschungsvorhabens ist ein neues Analyseverfahren, um die Produktivität an Maschinenarbeitsplätzen zu bewerten und Potentiale für Verbesserungsmaßnahmen zu identifizieren. Das neue Vorgehen hebt sich von bestehenden Verfahren darin ab, dass es gleichzeitig Daten zur Bewertung der Mitarbeiterproduktivität und Daten zur Bewertung der Maschinenproduktivität erfasst und auswertet. Dadurch ist das Verfahren in der Lage, die wesentlichen Wech-

selwirkungen zwischen Maschinenbediener und Maschine in die Produktivitätsanalyse einzubeziehen und für die Analyse der Prozessabläufe zu nutzen. Darüber hinaus weist das Verfahren durch die Integration verschiedenster Sensoren eine sehr hohe Anpassungsfähigkeit an individuelle Arbeitsplätze auf. Auch der sehr geringe Umsetzungsaufwand durch die weitgehend automatisierte Datenerfassung und -auswertung grenzt das Verfahren von den bestehenden Ansätzen ab.

Im Bereich der Maschinendatenerfassung existieren zwar bereits viele Systeme, die Maschinenzustände erfassen und auswerten können. Insbesondere bei sehr heterogenen Maschinenparks, wie sie häufig bei KMU's vorhanden sind, besteht jedoch das Problem, dass die Daten verschiedener Systeme nicht kompatibel sind oder nicht alle Maschine über eine eigene Maschinendatenerfassung verfügen. Gleichzeitig werden die Zustände der Maschinenbediener häufig nur sehr grob erfasst, beispielsweise über das Buchen einzelner Tätigkeiten. So fehlte bisher eine geeignete Datengrundlage, um die Abläufe an Maschinenarbeitsplätzen und damit das wichtige Zusammenwirken von Mensch und Maschine im Hinblick auf die Produktivität zu beschreiben und zu bewerten. Das entwickelte Verfahren nutzt verschiedenste Low-Cost-Technologien, um wichtige Zustandereignisse im Bereich der Maschinenbedienung zu erfassen und daraus Mitarbeiter- und Maschinenzustände abzuleiten. Die erhobenen Daten schließen somit die Lücke zur Beschreibung und Analyse der Mitarbeiter- und Maschinenproduktivität im Bereich der Maschinenbedienung.

2.2. Industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Der vorgesehene Einsatzzweck des Verfahrens ist die Analyse der Mitarbeiter- und Maschinenproduktivität an Maschinenarbeitsplätzen in der Produktion. Die Ergebnisse der Analyse sollen Potentiale für Produktivitätsverbesserungen aufzeigen und die Grundlage für die Auswahl geeigneter Verbesserungsmaßnahmen liefern. Typische Anwendungsfälle in der Industrie sind daher Arbeitsplätze, an denen Menschen eine oder mehrere Maschinen bedienen, d.h. an denen es relevante Interaktionen zwischen Mensch und Maschine gibt. Je geringer der Automatisierungsgrad der Maschine, desto relevanter sind diese Interaktionen in der Regel.

Da für das Verfahren verschiedenste Sensoren und Technologien zur Ereigniserfassung verwendet werden können, lässt sich die Datenerfassung individuell an verschiedenste Anwendungsfälle anpassen. Daher eignet sich das Vorgehen generell für alle Arbeitsplätze mit einer Maschinenbedienung. Das Verfahren kann dabei neben einer Mehrmaschinenbedienung durch einen Mitarbeiter auch jede andere Kombination mehrerer Mitarbeiter und Maschinen analysieren.

2.3. Weiterentwicklung

Die Evaluationen bei den Industriepartnern des Forschungsprojektes haben gezeigt, dass die Methode funktioniert und valide Ergebnisse liefert. Mithilfe der Analyseergebnisse konnten sowohl wichtige Maschinenzustände als auch wichtige Mitarbeiterzustände in der Produktion erfasst und für die Analyse von Wartezeiten verwendet werden. Allerdings zeigten die Ergebnisse der einzelnen Evaluationen auch, dass die Positionserkennung vereinzelt kurzzeitige Fehler aufweist. Die Genauigkeit der Positionserkennung könnte daher durch eine Weiterentwicklung der Systematik noch weiter gesteigert werden. Für den breiten industriellen Einsatz sollte der entwickelte Softwareprototyp zu einer anwendungsfreundlichen und robusten Software weiterentwickelt werden.

Darüber hinaus sind insbesondere für die Positionserfassung weitere Anwendungsmöglichkeiten denkbar. Dazu zählt insbesondere die Analyse von Laufwegen in der Produktion. So können prinzipiell alle notwendigen Daten für die Erstellung eines Spagetti-Diagramms erfasst werden. Die Datenverarbeitung und -auswertung müsste allerdings noch entwickelt werden, um die Analyseergebnisse sinnvoll zu visualisieren und nutzbar zu machen. Außerdem könnten die Positionsdaten der Mitarbeiter neben der Maschinenbedienung auch in anderen Bereichen der Produktion genutzt werden. So besteht beispielsweise die Möglichkeit, Ist-Zeiten für die Bearbeitung einzelner Aufträge an einer Arbeitsstation zu erfassen.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Ziel des Forschungsvorhabens war es, eine weitgehend automatisierte Produktivitätsanalyse auf Basis von Tracking- und Sensordaten für die Maschinenbedienung in der Kleinserienfertigung zu entwickeln, die sowohl die Mitarbeiter als auch die Maschine umfasst.

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 Zustandsdefinition und -erkennung

Zusammenfassung

Im ersten Arbeitspaket wurden die wesentlichen Mitarbeiter- und Maschinenzustände im Bereich der Maschinenbedienung herausgearbeitet sowie typische Arbeitszyklen und Ereignisse beschrieben, mit denen Zustände erkannt werden können. Darüber hinaus wurde eine Logik entwickelt, die eine automatisierte Zustandsbestimmung auf Grundlage von Ereignissen und Zustandsabfolgen ermöglicht.

Ziel

Ziel des ersten Arbeitspakets war es, die Grundlagen für eine eindeutige Zustandserkennung zu entwickeln. Hierzu zählte die Entwicklung einer abgestimmten Zustandshierarchie für Mitarbeiter- und Maschinenzustände, die Verknüpfung relevanter Ereignisse und Zustände, die Entwicklung einer Logik zur Zustandserkennung sowie die Erstellung einer Übersicht über den erforderlichen Datenbedarf.

Durchgeführte Arbeiten

Die in Arbeitspaket 1 durchgeführten Arbeiten gliedern sich in fünf Punkte:

Zustandshierarchie für Mitarbeiter und Maschine

Zu Beginn des Projektes wurden basierend auf einer Literaturrecherche wesentliche Maschinen- und Mitarbeiterzustände herausgearbeitet. Zudem wurden mehrere Arbeitsplätze bei verschiedenen Industriepartnern vor Ort besichtigt. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde außerdem eine abgestimmte Zustandshierarchie erstellt, die es ermöglichen soll, beliebige Kombinationen aus Mitarbeiter- und Maschinenzuständen zu beschreiben.

Verknüpfungen zwischen Ereignissen und Zuständen

Die Verknüpfung von Ereignissen und Zuständen wurde in einem ersten Schritt auf Grundlage der Prozesse an zwei Arbeitsplätzen exemplarisch durchgeführt. Um bereits zu Beginn eine möglichst große Allgemeingültigkeit der Ereignisse zu gewährleisten, wurden hierzu zwei heterogene Arbeitsplätze ausgewählt: zum einen ein Arbeitsplatz mit einer CNC-Drehmaschine zur mechanischen Bearbeitung von metallischen Bauteilen und zum anderen eine verkettete Anlage zur Bestückung von Platinen.

Logik zur Zustandserkennung

Im Rahmen des ersten Arbeitspakets wurde eine Logik entwickelt, die auf Grundlage von Daten aus unterschiedlichen Informationsquellen den Start bzw. das Ende eines Zustandes erkennen soll. Die Grundlage, um sowohl Maschinen- als auch Mitarbeiterzustände zu erkennen, bilden die erfassten Ereignisse.

Übersicht Datenbedarf

Auf Grundlage der identifizierten Ereignisse und der Logik zur Zustandserkennung wurde der wesentliche Datenbedarf herausgearbeitet. Dazu wurde sowohl für Mitarbeiter- als auch für Maschinenzustände der minimale Informationsbedarf bestimmt, der für die Erkennung der Start- und Endereignisse notwendig ist.

Evaluierung der Ergebnisse

Die Evaluation des Konzepts konnte aufgrund der Regularien zur Eindämmung der Corona-Pandemie erst mit Verzögerung in der Modellfabrik des Instituts erfolgen. Darüber hinaus ist es aber gelungen, im Rahmen einer Masterarbeit die Zustandshierarchien im Praxisumfeld eines Industriepartners zu evaluieren. Die Erfassung der Maschinen- und Mitarbeiterzustände erfolgte dabei durch Beobachtung und auf Grundlage der entwickelten Zustandshierarchien und mithilfe einer Web-Applikation.

Erzielte Ergebnisse

Zustandshierarchie für Mitarbeiter und Maschine

Wesentliches Ergebnis sind zwei abgestimmte Arbeitszyklen für die Phasen Produktion und Rüsten. Diese beinhalten die typischen Zustände im Zusammenspiel von Mitarbeiter und Maschine und ermöglichen es, die Zustände in ihrer logischen Reihenfolge zu beschreiben. Darüber hinaus wurde jeweils für den Mitarbeiter und die Maschine eine Zustandshierarchie entwickelt, die es ermöglichen soll, den Mitarbeiter- bzw. Maschinenzustand zu jedem Zeitpunkt zu beschreiben und Abhängigkeiten zwischen einzelnen Zuständen abzubilden (Abbildung 1).

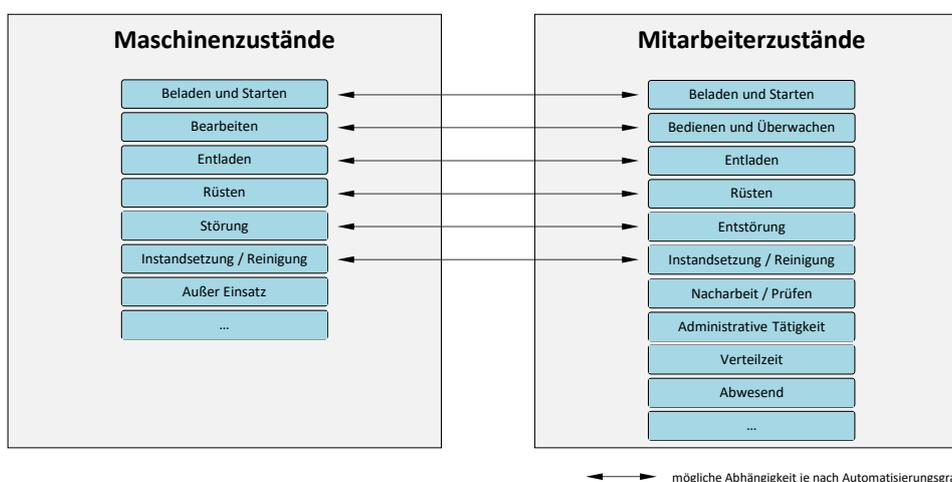


Abbildung 1: Generische Maschinen- und Mitarbeiterzustände

Verknüpfungen zwischen Ereignissen und Zuständen

Sowohl für die Maschinenzustände als auch für die Mitarbeiterzustände wurden wesentliche Ereignisse definiert, die den Start bzw. das Ende eines Zustandes beschreiben. Einige der Ereignisse weisen eine Überschneidung auf. Dabei hat sich allerdings ebenfalls herausgestellt, dass der Großteil der Ereignisse individuell für jeden Anwendungsfall bestimmt werden muss, da diese stark von den räumlichen, organisatorischen und technischen Rahmenbedingungen eines Arbeitsplatzes abhängen.

Logik zur Zustandserkennung

Die entwickelte Logik zur Zustandserkennung ist in der Lage, aus einer chronologisch sortierten Liste an erfassten Ereignissen Zustände sowohl für die Maschine als auch für den Menschen abzuleiten. Die Logik ist in vereinfachter Form in Abbildung 2 dargestellt. Die Logik basiert auf drei Prinzipien: Erstens dienen eindeutige Ereignisse dazu, direkt auf den Start oder das Ende eines Zustands zu schließen. Zweitens können allgemeine Ereignisse durch Kombination mit weiteren Ereignissen genutzt werden, um den Start oder das Ende eines Zustandes zu bestimmen. Drittens nutzt die Logik Arbeitszyklen für die Bestimmung von Zuständen, wenn weitere Informationen fehlen. Zeiträume, für die keine ausreichende Informationsgrundlage vorhabenden ist, werden als unbekannt gekennzeichnet.

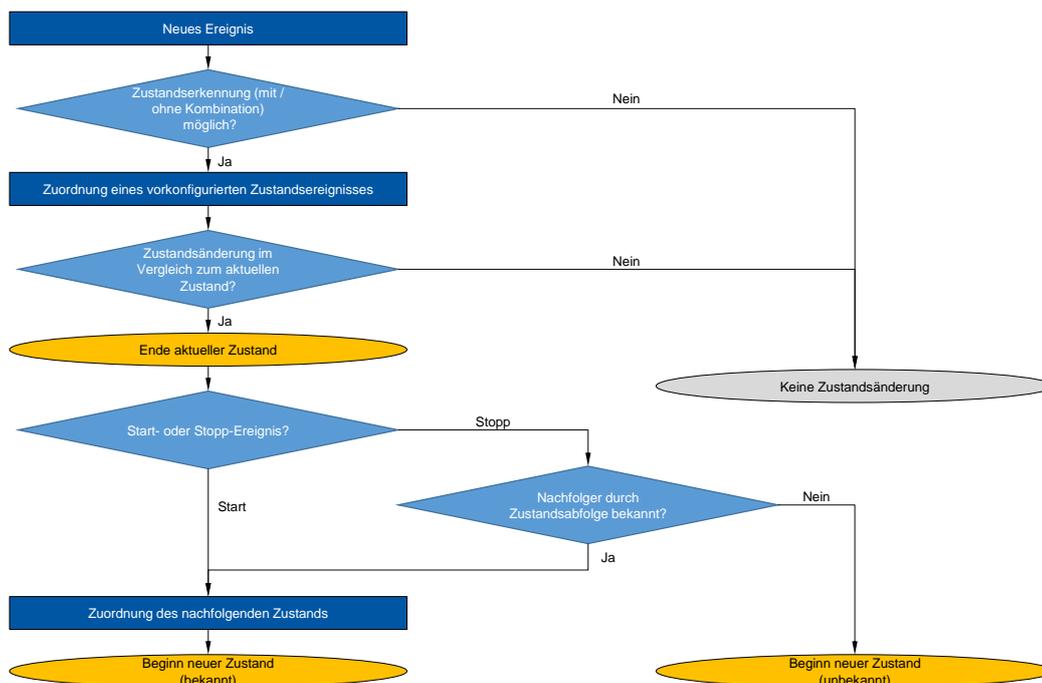


Abbildung 2: Vereinfachte Logik zur Zustandsbestimmung

Übersicht Datenbedarf

Im Laufe des Projektvorhabens hat sich herausgestellt, dass nur wenige Informationen für die Erfassung eines Ereignisses notwendig sind. In der Regel ist es ausreichend, wenn jeder Datensatz Informationen über die Sensorbezeichnung und den Zeitpunkt des Signals enthält. Diese Informationen können bei Bedarf durch einen Messwert bzw. ein Signal ergänzt werden (bspw. bei einer Distanzmessung oder einer Signalstärke). Über die Verknüpfung jedes Ereignisses mit einem Sensor (Konfiguration der Analyse) können dem Sensorsignal dann später alle weiteren Ereignisinformationen zugeordnet werden. Es hat sich allerdings auch herausgestellt, dass nicht für alle Zustände entsprechende Ereignisse gefunden oder diese mit vertretbarem Aufwand automatisiert erfasst werden können. Für diesen Fall wurde eine Lösung erarbeitet, die die Eingabe von vorkonfigurierten Ereignissen über eine Web-App durch den Werker ermöglicht. Hierfür wurde eine institutseigenen Web-Applikation (CheckIT) [Grab17] genutzt, mit der die verbleibenden Zustände mithilfe eines Smartphones erfasst werden können.

Evaluierung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Prozessbeobachtungen zeigen, dass die entwickelten Hierarchien in der Lage sind, die Zustände von Mitarbeiter und Maschine zu jedem Zeitpunkt zu beschreiben. Darüber hinaus konnten einzelne Ereignisse identifiziert werden, die sich für die Erkennung bestimmter Zustände eignen. Auch typische Arbeitsabfolgen, wie die des generischen Maschinenzyklus konnten in der Praxis beobachtet werden. Ein Abgleich der Maschinendaten einer Maschine bei einem Projektpartner mit der Zustandshierarchie zeigt außerdem eine hohe Übereinstimmung.

3.2. AP 2 Datenerfassung

Zusammenfassung

Im zweiten Arbeitspaket wurden die Grundlagen für die Erfassung der notwendigen Informationen zur Bestimmung von Mitarbeiter- und Maschinenzuständen erarbeitet. Dazu wurden mögliche Datenquellen recherchiert und für die Anwendungsfälle ausgewählt. Darüber hinaus wurde ein Softwaredemonstrator entwickelt, der es ermöglicht, die Datenerfassung zu konfigurieren sowie zu starten und zu stoppen.

Ziel

Ziel des zweiten Arbeitspakets war es, Transparenz über mögliche Datenquellen für eine effiziente Zustandserfassung zu schaffen. Außerdem sollte ein Vorgehen entwickelt werden, das eine aufwandsarme Datenerfassung und -aufbereitung ermöglicht.

Durchgeführte Arbeiten

Die in Arbeitspaket 2 durchgeführten Arbeiten gliedern sich in fünf Punkte:

Übersicht möglicher Datenquellen und Datentypen

Auf Grundlage einer Literaturrecherche wurden relevante Datenquellen für die Erfassung der Start- und Endereignisse für die einzelnen Maschinen- und Mitarbeiterzuständen zusammengetragen. Das Vorhaben, Tiefenkameras als Technologie zur Positionserkennung von Mitarbeitern zu verwenden, wurde dabei aufgrund verschiedener praxisrelevanter Nachteile verworfen. Es wurde ein Technologievergleich durchgeführt, um eine alternative Lösung für die Positionserfassung zu identifizieren.

Auswahl der Datenquellen für Anwendungsfälle

Aufgrund der Möglichkeit, vielfältige und meist kostengünstige Sensoren zu kombinieren, stellen Einplatinencomputer der Firma Raspberry Pi eine sehr gut geeignete Grundlage für das Projektvorhaben dar. Das sehr breite Angebot an Sensoren und Erweiterungen ermöglicht es, die Datenerfassung kostengünstig auf den individuellen Anwendungsfall anzupassen. Innerhalb des Projektvorhabens wurde eine Auswahl an verschiedenen Sensoren getroffen, mit denen wesentliche Ereignisse in den Anwendungsfällen erfasst werden können.

Softwareentwurf Plattform für Datenerfassung

Es wurde ein Softwareentwurf entwickelt, der es ermöglicht, sowohl die Positionsdaten des Werkers als auch alle weiteren Sensorsignale zu erfassen und strukturiert in einer Datenbank abzuliegen.

Demonstrator

Es wurde ein Softwaredemonstrator entwickelt, der die Konfiguration und Durchführung der Datenerfassung ermöglicht. Dafür wurde eine Web-App entwickelt, über die Zustände, Zustandsabfolgen, Ereignisse, Ereigniskombinationen, Sensoren und Werker-Maschinen-Zuordnungen individuell konfiguriert werden können.

Evaluierung der Datenerfassung

Nachdem die Datenerfassung unter Laborbedingungen in der Modellfabrik des IPMT erfolgreich getestet wurde, erfolgte eine erste Evaluation in der Industrie. Dabei wurden Ereignisse an zwei unterschiedlichen Arbeitsplätzen erfasst. Insbesondere die Positionserfassung wies dabei unter bestimmten Bedingungen noch unregelmäßige Ungenauigkeiten auf. Daher wurden im Anschluss Verbesserungsideen für die Positionserfassung entwickelt, umgesetzt und erneut unter Laborbedingungen getestet. Darüber hinaus wurden Teile der Datenerfassung im Rahmen von zwei studentischen Arbeiten in der Modellfabrik und bei einem Industrieunternehmen evaluiert.

Erzielte Ergebnisse

Übersicht möglicher Datenquellen und Datentypen

Aufgrund des Low-Cost-Ansatzes im Projektvorhaben hat sich die Verwendung eines Raspberry Pi als vielversprechende Plattform für die Integration verschiedenster Sensoren herausgestellt. Die für dieses System verfügbaren Sensoren sind sehr vielfältig und zumeist kostengünstig. Der durchgeführte Technologievergleich hat ergeben, dass die Erfassung der Mitarbeiterposition mithilfe von BLE-Beacons eine ausreichend genaue, aufwandsarme und kostengünstige Alternative

zu der geplanten kamerabasierten Erfassung verspricht. Die Ergebnisse erster Tests in der Modellfabrik konnten die Eignung der Methode bestätigen. Für die Erfassung der Mitarbeiterposition wurde daher ein System entwickelt, das die Nähe eines Bluetooth-Beacons zu verschiedenen Einplatinencomputer anhand der Signalstärke ermittelt. Das System hat den großen Vorteil, dass es einfach und flexibel in der Produktion installiert werden kann und den Mitarbeiter kaum in seiner Tätigkeit beeinflusst. Darüber hinaus bietet es die Möglichkeit, verschiedenste Orte in der Produktion einfach in die Positionserfassung einzubinden.

Auswahl der Datenquellen für Anwendungsfälle

Auch wenn sich schnell herausgestellt hat, dass die Auswahl relevanter Datenquellen individuell für den Einzelfall erfolgen muss, haben sich einige Sensoren als sehr universell einsetzbar herausgestellt. Hierzu zählen unter anderem:

- Ultraschallsensoren zur Abstandsmessung,
- Helligkeitssensoren zur Erfassung der Signale der Statusampeln,
- Bluetooth-Buttons zur manuellen Eingabe von Ereignisinformationen,
- Bluetooth-Beacons zur Erfassung der Mitarbeiterposition,
- Vibrations-, Lage- und Kontaktsensoren zur Bestimmung von Bewegungen

Bis auf die letzte Kategorie wurden alle genannten Sensoren innerhalb der Evaluationen erfolgreich angewendet. Da es aber nicht immer möglich sein wird, alle Ereignisse automatisiert zu erfassen, wurde eine Aufnahme-logik für die institutseigene Web-App CheckIT entwickelt und implementiert. Diese ermöglicht es, individuell konfigurierte Ereignisse während der Analyse zu erfassen. Die Informationen werden dabei durch den Werker über ein mobiles Endgerät eingegeben. Dies ermöglicht es, mögliche Informationslücken flexibel zu schließen.

Softwareentwurf Plattform für Datenerfassung

Die Erfassung verschiedener Sensordaten wurde unter Laborbedingungen getestet. Für die Verarbeitung verschiedenster Sensorsignale auf den Einplatinencomputern wurde die Software Node-Red ausgewählt. Diese ist modular aufgebaut und bietet eine gute Voraussetzung für eine einfache und anwendungsfreundliche Verarbeitung von Sensorsignalen. So können alle eingehenden Signale in ein einheitliches Datenformat umgewandelt und abgespeichert werden (Abbildung 3). Dabei sollen für jedes Ereignis mindestens ein Zeitstempel, eine Beschreibung sowie ein Wert festgehalten werden. Die einheitliche Erfassung der Daten soll es ermöglichen, mit wenig Aufwand weitere Datenquellen in die Analyse zu integrieren.

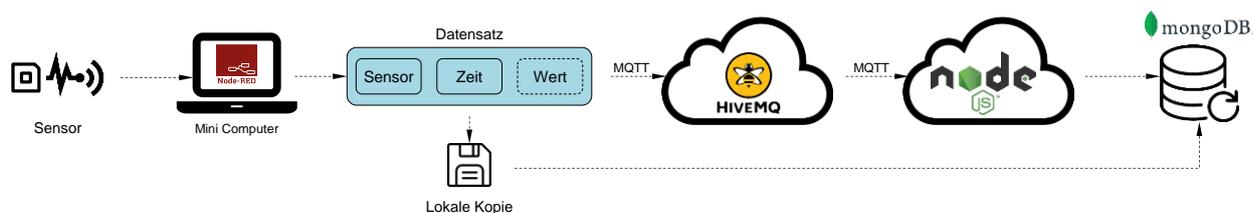


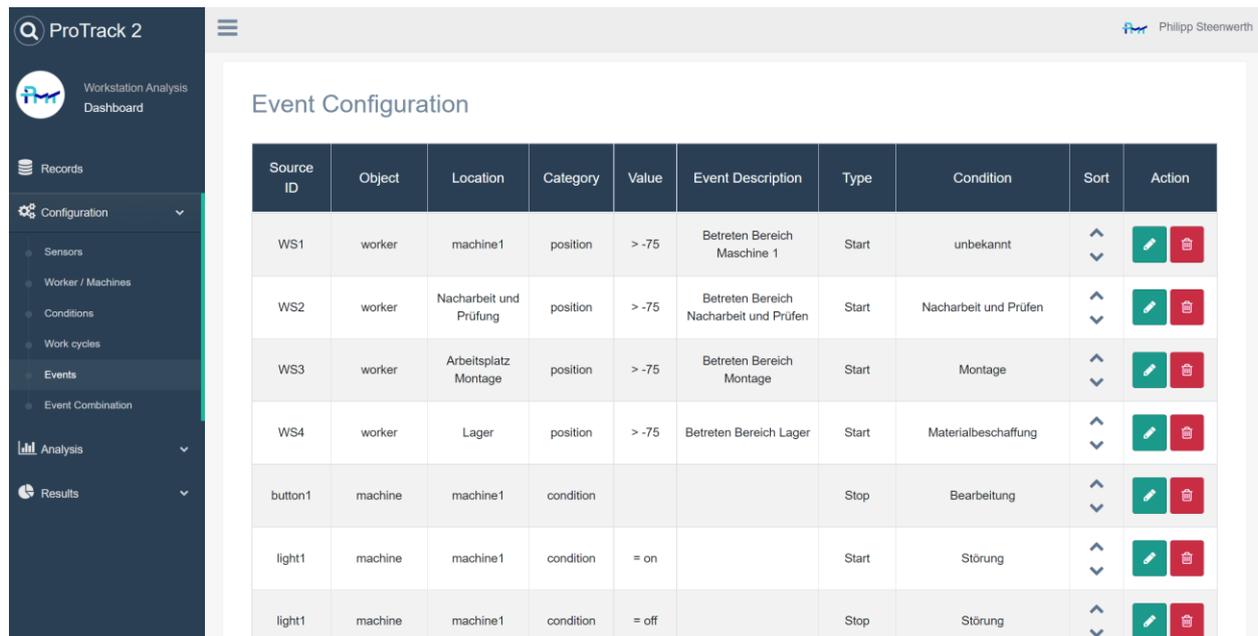
Abbildung 3: Konzept zur Datenerfassung

Der entwickelte Softwareentwurf zur Erfassung der Mitarbeiterposition ermöglicht es, kontinuierlich die Signalstärke des Beacons an jedem Einplatinencomputer zu messen, in ein einheitliches Datenformat umzuwandeln und während der Aufnahme in einer Datenbank abzuspeichern.

Demonstrator

Mit Hilfe des entwickelten Softwaredemonstrators (Abbildung 4) ist ein Anwender in der Lage, Zustände, Ereignisse, Ereigniskombinationen und Zustandsabfolgen individuell zu konfigurieren. Dies ist für das Vorgehen von besonderer Bedeutung, da auf diese Weise die Auswahl der Sensoren sowie die verwendeten Begrifflichkeiten individuell auf jeden Arbeitsplatz abgestimmt werden können. Durch die Gestaltung der Analyse als Plug & Play-Lösung ist die Installation der Hardware ohne großen Aufwand vor Ort möglich. Nachdem die Datenerfassung gestartet wurde,

werden alle eingehenden Sensorinformationen strukturiert in einer Datenbank abgelegt. Ein integriertes Live-Monitoring ermöglicht es darüber hinaus, die eingehenden Sensorsignale in Echtzeit zu visualisieren und für die Konfiguration sowie zur Überwachung der Analyse zu nutzen.



Source ID	Object	Location	Category	Value	Event Description	Type	Condition	Sort	Action
WS1	worker	machine1	position	> -75	Betreten Bereich Maschine 1	Start	unbekannt	↑ ↓	✎ 🗑️
WS2	worker	Nacharbeit und Prüfung	position	> -75	Betreten Bereich Nacharbeit und Prüfen	Start	Nacharbeit und Prüfen	↑ ↓	✎ 🗑️
WS3	worker	Arbeitsplatz Montage	position	> -75	Betreten Bereich Montage	Start	Montage	↑ ↓	✎ 🗑️
WS4	worker	Lager	position	> -75	Betreten Bereich Lager	Start	Materialbeschaffung	↑ ↓	✎ 🗑️
button1	machine	machine1	condition			Stop	Bearbeitung	↑ ↓	✎ 🗑️
light1	machine	machine1	condition	= on		Start	Störung	↑ ↓	✎ 🗑️
light1	machine	machine1	condition	= off		Stop	Störung	↑ ↓	✎ 🗑️

Abbildung 4: Ausschnitt aus der Konfigurationsoberfläche

Evaluierung der Datenerfassung

Die Evaluierungen haben gezeigt, dass das Konzept zur Datenerfassung grundsätzlich gut funktioniert. Eine Untersuchung der unregelmäßig auftretenden Ungenauigkeiten bei der Erfassung der Mitarbeiterposition hat gezeigt, dass insbesondere eine ungünstige Platzierung der Einplatinencomputer sowie unsystematischen Schwankungen der Signalstärke des Beacons wesentliche Ursachen für diese Ungenauigkeiten sind. In einer weiteren Evaluation konnte die Genauigkeit der Positionserfassung durch zwei Verbesserungen auf über 94% gesteigert werden. Wesentliche Verbesserungen waren die optimierte Platzierung der Einplatinencomputer (direktes Sichtfeld zu Beacon) sowie die Verwendung von 3 Beacons zur Glättung der Signalstärke.

3.3. AP 3 Datenaufbereitung

Zusammenfassung

Im dritten Arbeitspaket wurden die notwendigen Algorithmen entwickelt, die aus den erfassten Sensorsignalen Zustände ableiten. Auf dieser Grundlage wurde ein Softwaredemonstrator entwickelt, der eine automatisierte Datenerfassung und -aufbereitung ermöglicht.

Ziel

Ziel des dritten Arbeitstakts war es, ein Konzept zu entwickeln, das eine aufwandsarme Datenerfassung und Datenaufbereitung ermöglicht.

Durchgeführte Arbeiten

Die in Arbeitspaket 3 durchgeführten Arbeiten gliedern sich in vier Punkte:

Algorithmen zur Datenaufbereitung

Es wurde ein Algorithmus entwickelt, der es ermöglicht, auf Grundlage der erfassten Sensordaten Ereignisse zu identifizieren und aus diesen in einem weiteren Schritt Zustände abzuleiten.

Softwareentwurf Datenaufbereitung

Es wurde ein Softwareentwurf entwickelt, der die Sensorsignale in zwei Schritten zu eindeutigen Zuständen umwandelt.

Demonstrator

Es wurde ein Softwaredemonstrator entwickelt, der die automatisierte Datenaufbereitung ermöglicht.

Evaluierung der Datenaufbereitung

Nachdem die Datenaufbereitung unter Laborbedingungen in der Modellfabrik des IPMT erfolgreich getestet wurde, sind Evaluationen in der Industrie erfolgt. Diese wurden an unterschiedlichen Arbeitsplätzen durchgeführt. Zwischen den Evaluationen wurden die gewonnenen Verbesserungsideen umgesetzt und erneut unter Laborbedingungen getestet.

Erzielte Ergebnisse

Algorithmen zur Datenaufbereitung

Der entwickelte Algorithmus verknüpft die vorkonfigurierten Ereignisse mit den einzelnen Sensorsignalen. Für die Positionserkennung erfolgt zuvor eine Auswertung der gemessenen Signalstärken, um ein Maximum zu identifizieren und daraus ein Positionereignis abzuleiten. Die Ereignisse werden daraufhin genutzt, um auf Grundlage der konfigurierten Ereigniskombinationen und Zustandsabfolgen Zustände mit eindeutigen Start- und Endzeitpunkten zu ermitteln.

Softwareentwurf Datenaufbereitung

Der Softwareentwurf zur Datenaufbereitung ermöglicht es, die erfassten Sensordaten vollständig automatisiert in Ereignisse zu überführen. Im Anschluss werden aus den Ereignissen eindeutige Zustände mit Start- und Endzeitpunkt abgeleitet. Zeiträume, in denen kein Zustand erkannt wird, werden als unbekannt gekennzeichnet. Sowohl die Ereignisse als auch die Zustände werden in der Datenbank gespeichert.

Demonstrator

Der entwickelte Softwaredemonstrator gliedert sich in die entwickelte Web-App ein und ermöglicht es, die Daten per Knopfdruck aufzubereiten.

Evaluierung der Datenaufbereitung

Die Evaluationen haben gezeigt, dass die Datenaufbereitung prinzipiell gut funktioniert. Sie haben dazu beigetragen, dass die Verarbeitung der Positionsdaten zeitlich optimiert werden konnte. Darüber hinaus konnten verschiedene Fehler in der Logik der Datenaufbereitung entdeckt und im Anschluss behoben werden.

3.4. AP 4 Datenauswertung

Zusammenfassung

Im vierten Arbeitspaket wurde die Visualisierung der Analyseergebnisse in Form eines Dashboards erarbeitet und in die Web-App integriert.

Ziel

Ziel des vierten Arbeitspakets war es, ein Konzept zur Auswertung und Visualisierung der aufbereiteten Daten zu entwickeln.

Durchgeführte Arbeiten

Die in Arbeitspaket 4 durchgeführten Arbeiten gliedern sich in vier Punkte:

Konzept für die Visualisierung von Zuständen und Optimierungspotenzialen

Es wurde ein Konzept zur Visualisierung der Zustandsdaten entwickelt, indem verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten gegenübergestellt und im Hinblick auf ihre Eignung zur Ableitung von Verbesserungspotenzialen bewertet wurden.

Softwareentwurf Datenauswertung

Es wurde ein Softwareentwurf entwickelt, der die Visualisierung von Zustandsabfolgen, Zustandsanteilen und Wartezeiten ermöglicht.

Demonstrator

Es wurde ein Softwaredemonstrator entwickelt, der die Analyseergebnisse automatisiert auswertet und visualisiert.

Evaluierung der Datenauswertung

In einem ersten Schritt wurde die Datenauswertung unter Laborbedingungen in der Modellfabrik des IPMT erfolgreich getestet. Darüber hinaus konnte die Datenauswertung und -visualisierung auf Grundlage der gesammelten Daten einer ersten Evaluation an zwei Arbeitsplätzen eines Industriepartners getestet werden. Weitere Evaluationen bei anderen Industriepartnern sollen folgen, um die Ergebnisse zu bestätigen.

Erzielte Ergebnisse

Konzept für die Visualisierung von Zuständen und Optimierungspotenzialen

Das auf Grundlage der Anforderungen der Anwendungspartner entwickelte Konzept sieht vor, in einer Übersicht alle Maschinen- und Mitarbeiterzustände im Zeitraum der Analyse mithilfe eines Gantt-Charts darzustellen (Abbildung 5). So können parallel auftretende Zustände identifiziert werden. Darüber hinaus sollen die Zeitanteile der einzelnen Zustände für Maschine und Mensch in Kreisdiagrammen zusammengefasst werden. So kann ein Überblick über die kumulierte Verteilung einzelner Zustände gewonnen werden. Schließlich sieht das Konzept vor, Wartezeiten innerhalb der Gantt-Charts zu visualisieren. Dies ermöglicht es, Verbesserungspotentiale direkt zu erkennen und zu priorisieren.

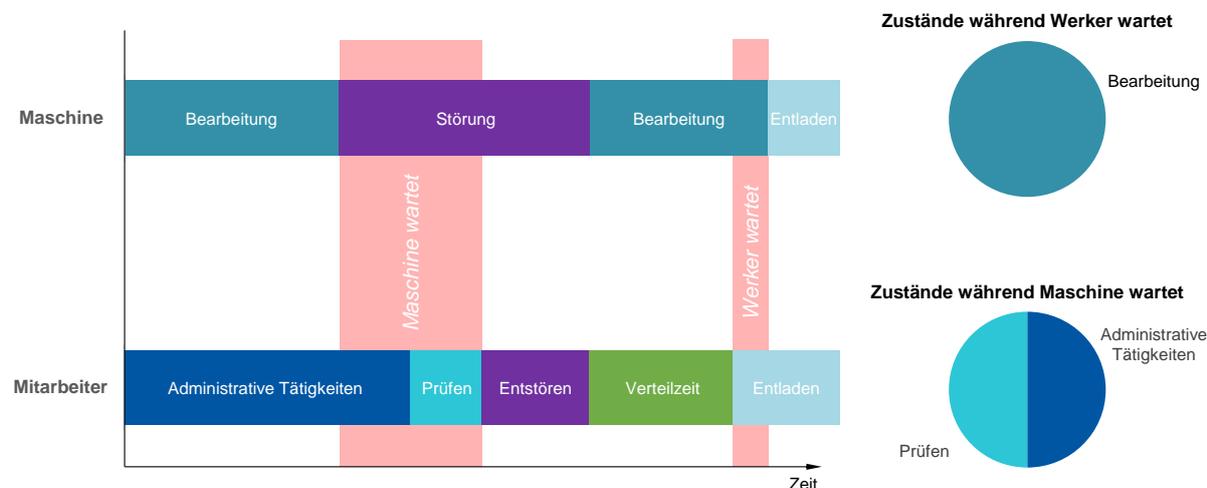


Abbildung 5: Visualisierung der Ergebnisse

Softwareentwurf Datenauswertung

Der entwickelte Softwareentwurf nutzt die Zustandsdaten und bereitet diese so auf, dass die einzelnen Visualisierungsarten ermöglicht werden. Um die Detailtiefe der Analyse individuell anzupassen, wurde eine Funktionalität integriert, die es ermöglicht, die Datenauswertung auf individuelle Zeiträume der Analyse zu beschränken. So können Ausschnitte, wie bspw. eine einzelne Störung oder ein Rüstvorgang, im Detail betrachtet werden.

Demonstrator

Der entwickelte Demonstrator gliedert sich in die entwickelte Web-App ein und visualisiert die Analyseergebnisse in Form eines Dashboards. Die Auswahl spezifischer Teilabschnitte der Analyse erfolgt durch die Anpassung der Zeitachse durch Vergrößern und Ziehen der Zustände in der Gesamtübersicht. Die Auswertung der Zustandsanteile sowie die Darstellung der Wartezeiten passen sich dabei automatisch auf den ausgewählten Bereich an.

Evaluierung der Datenauswertung

Die Evaluationen haben gezeigt, dass die Datenvisualisierung grundsätzlich gut funktioniert und für die Anwendungspartner einen großen Mehrwert bietet. So ermöglicht sie, auf einen Blick zu erkennen, welche Zustände gleichzeitig auftreten und zu welchen Zeitpunkten das Zusammenwirken zwischen Mensch und Maschine verbessert werden kann, bzw. wo Produktivitätsverluste auftreten.

3.5. AP 5 Evaluation

Zusammenfassung

Im fünften Arbeitspaket wurde das Gesamtverfahren in mehreren Evaluationen an verschiedenen Arbeitsplätzen der Industriepartner durchgeführt.

Ziel

Ziel des fünften Arbeitspakets war es, das entwickelte Gesamtverfahren in der Praxis zu evaluieren.

Durchgeführte Arbeiten

Die in Arbeitspaket 5 durchgeführten Arbeiten gliedern sich in vier Punkte:

Evaluiertes Gesamtsystem

Das Gesamtverfahren wurde in mehreren Evaluationen an verschiedenen Arbeitsplätzen durchgeführt. Dazu wurden zwei unterschiedliche Arbeitsplätze analysiert, die dadurch gekennzeichnet waren, dass ein Mitarbeiter eine Maschine bedient. Ein weiterer Arbeitsplatz mit einer Mehrmaschinenbedienung wurde ebenfalls analysiert.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Um die Wirtschaftlichkeit des Vorgehens zu bewerten wurde der Aufwand für die Vorbereitung, Durchführung und Umsetzung des Verfahrens im Rahmen der Evaluationen beschrieben und möglichen Produktivitätsverbesserungen gegenübergestellt.

Auswertung des Nutzerfeedbacks nach praktischer Erfahrung mit dem Demonstrator

Das Gesamtverfahren wurde zusätzlich zu den Evaluationen im Rahmen des letzten Projektbegleitenden Ausschusses gemeinsam mit den Industriepartnern an einem Beispielprozess in der Modellfabrik des Instituts durchgeführt.

Dokumentation

Zum Abschluss des Forschungsprojekts wurde ein Leitfaden erstellt, der die Anwendung des Gesamtverfahrens erläutert und es Dritten ermöglichen soll, das Verfahren eigenständig umzusetzen.

Erzielte Ergebnisse

Evaluiertes Gesamtsystem

Die Evaluation des Gesamtverfahrens hat gezeigt, dass sowohl die Konfiguration, die Datenerfassung, die Datenaufbereitung sowie die Datenauswertung funktioniert haben und die Analysen valide Ergebnisse produziert haben. So konnten die wesentlichen Zustände der Maschine und des Mitarbeiters größtenteils richtig erkannt werden. Vereinzelt sind Messfehler bei der Positionserkennung aufgetreten, aber insgesamt lag die Genauigkeit zwischen 90 und 94%. Dies wurde

über Zeitaufnahmen ermittelt, die während der Analysen verschiedener Arbeitsplätze durchgeführt wurden und den erfassten Positionen gegenübergestellt wurden. Zwei der Arbeitsplätze, an denen das Gesamtverfahren evaluiert wurde, sind in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 6: Evaluationsumgebungen

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Der Aufwand für die Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung des Vorgehens belief sich bei den einzelnen Evaluationen auf insgesamt etwa 1,5 Stunden. Dabei entsteht der größte Aufwand bei der Vorbereitung und der Konfiguration der Analyse. Die Durchführung und Nachbereitung der Analyse können vollständig automatisiert ablaufen. Darüber hinaus entstehen bei der Analyse eines Arbeitsplatzes mit mehreren Maschinen und Mitarbeitern in der Regel keine Mehraufwände im Vergleich zur Analyse eines Arbeitsplatzes mit einer Maschine und einem Maschinenbediener. Aufgrund des für Produktivitätsanalysen geringen Aufwands kann das Vorgehen daher selbst durch kleinere Produktivitätsverbesserungen eine positive Wirtschaftlichkeit aufweisen. Je größer allerdings der Anteil manuell erfasster Ereignisse ist (CheckIT), desto höher ist der Aufwand für die Durchführung der Analyse.

Auswertung des Nutzerfeedbacks nach praktischer Erfahrung mit dem Demonstrator

Die Rückmeldung der Teilnehmer des Projektbegleitenden Ausschusses zu der Nutzerfreundlichkeit war sehr positiv. So liefern die Analyseergebnisse wichtige Informationen für die Verbesserung der Produktivität, auch weil sie im Vergleich zu vorhandenen Analysen Informationen darüber bereitstellen können, welche Tätigkeiten die Maschine bzw. der Mitarbeiter während auftretender Wartezeiten durchführt. Ebenso können die Daten als Grundlage für die Ermittlung von Ist-Zeiten bestimmter Prozesse verwendet werden. Die Nutzerfreundlichkeit des Dashboards wurde, bis auf einzelne Aspekte, für gut befunden.

Dokumentation

Der entwickelte Leitfaden führt Schritt für Schritt durch das Vorgehen und unterstützt den Anwender durch die Beschreibung von Best Practices.

4. Zuwendungsverwendung und Angemessenheit

4.1. Verwendung der Zuwendung

Wissenschaftlich-technisches Personal

Für das Forschungsvorhaben wurden Zuwendungen für einen wissenschaftlichen Mitarbeiter für die Laufzeit von 27 Monaten geplant. Im Zeitraum vom 01.11.2019 bis zum 31.01.2022 wurden die vorgesehenen 27 MM eingesetzt.

Aufgrund der kostenneutralen Verlängerung wurde die Laufzeit des Projekts um sechs Monate (Projektende 31. Juli 2022) verlängert. Die Aufwendungen des Instituts im Jahr 2022 wurden mittels Eigenmittel beglichen.

Somit wurden wie geplant Zuwendungen von 27 Personenmonaten verwendet.

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 Zustandsdefinition und -erkennung (Arbeitspaket 1) waren 7,5 Monate eingeplant. Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um eine geeignete Grundlage für ein standardisiertes Analyseverfahren zu schaffen und die Übertragbarkeit der Analyse auf unterschiedliche Produktionsumgebungen zu ermöglichen. Die entwickelte Logik ermöglicht es, Zustände aus generischen Ereignissen abzuleiten und damit die Daten automatisiert zu erfassen.

Für die Datenerfassung (Arbeitspaket 2) waren 5,5 Monate eingeplant. Aufgrund des Technologiewechsels für die Erfassung der Mitarbeiterposition wurden für dieses Arbeitspaket 7 Monate benötigt. Die Arbeiten waren notwendig, um unterschiedliche Sensoren und Technologien in die Analyse integrieren zu können. Dies soll eine breite Anwendbarkeit durch die anwendungsspezifische Auswahl geeigneter Sensoren ermöglichen.

Für die Datenaufbereitung (Arbeitspaket 3) waren 5,5 Monate eingeplant. Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um unterschiedliche Informationsquellen für die Analyse nutzbar zu machen. So ermöglicht die einheitliche Datenstruktur eine standardisierte Verarbeitung relevanter Informationen aus unterschiedlichen Informationsquellen. Darüber hinaus wurde ein umfangreicher Konfigurator in die Analyse integriert, der die Anwendbarkeit durch Dritte stark vereinfacht.

Für die Datenauswertung (Arbeitspaket 4) waren 5,5 Monate eingeplant. Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um die Analyseergebnisse systematisch auszuwerten und vorhandene Verbesserungspotentiale verständlich aufzuzeigen.

Für die Evaluation (Arbeitspaket 3) waren 3 Monate eingeplant. Aufgrund der Beschränkungen zur Eindämmung der Corona-Pandemie war die Praxisevaluation zeitweise bei keinem der Partner möglich, wodurch sich die Termine zeitlich nach hinten verschoben haben.

5. Vorstellung der Analysemethode

5.1. Ziele

Ziel des Forschungsvorhabens war es ein Vorgehen zur Analyse der Mitarbeiter- und Maschinenproduktivität zu entwickeln, das die folgenden Grundanforderungen erfüllt:

- *Breite Anwendbarkeit:* Das Vorgehen soll möglichst einfach an individuelle Anwendungsfälle angepasst werden können. Dazu ist es notwendig, unterschiedliche Sensoren einfach in die Analyse zu integrieren und alle Zustände und Ereignisse auf den Anwendungsfall abzustimmen.
- *Vollständigkeit:* Das Vorgehen soll in der Lage sein, möglichst alle Mitarbeiter- und Maschinenzustände erfassen zu können.
- *Geringer Umsetzungsaufwand:* Das Vorgehen soll mit geringem Aufwand umgesetzt werden können. Dazu zählt der Aufwand sowohl für die Konfiguration und Durchführung als auch für die Auswertung.

5.2. Hardware und Software

Um eine möglichst breite Anwendbarkeit zu gewährleisten, ergibt sich die Auswahl geeigneter Sensoren immer aus dem Anwendungsfall. Im Rahmen des Projekts wurden beispielsweise folgende Sensoren und Technologien für die Erfassung unterschiedlicher Ereignisse verwendet:

- Ultraschall-Sensoren
- Kontaktsensoren
- Lichtsensoren
- Bluetooth-Buttons
- Vibrations-/Lage-Sensoren
- RFID-Lesegeräte

Für die Positionserkennung der Mitarbeiter wurden mehrere Einplatinencomputer der Firma Raspberry Pi sowie Bluetooth-Beacons der Firma aconno verwendet. Sofern kein Netzstecker verfügbar war waren für die Stromversorgung der Computer zusätzlich Power Banks notwendig. Die Einplatinencomputer wurden außerdem mit einem Zeitmodul ausgestattet, um auch ohne Internetverbindung die internen Uhren zu synchronisieren. Dies ist notwendig, um alle gesammelten Daten aggregieren und sinnvoll auswerten zu können.

5.3. Vorgehen

Die Anwendung des Vorgehens gliedert sich in vier Schritte:

1. Konfiguration
2. Datenerfassung
3. Datenaufbereitung
4. Datenauswertung

Zu Beginn ist es notwendig, alle relevanten Zustandsereignisse, Ereigniskombinationen, Zustände und Zustandsabfolgen gemeinsam mit den Prozessbeteiligten zu konfigurieren. Grundlage der Konfiguration bilden die generischen Mitarbeiter- und Maschinenzustände (Abbildung 1). Diese können für jeden Anwendungsfall übernommen, erweitert und angepasst werden. Je nach Automatisierungsgrad des Arbeitsplatzes sind außerdem die Abhängigkeiten der Zustände zu definieren. So muss eine Maschine mit einem sehr geringen Automatisierungsgrad beispielsweise im Zustand *Beladen und Starten* so lange warten, bis ein Mitarbeiter denselben Zustand annimmt. Das Zeitintervall, in dem sich die Maschine und ein Werker im selben Zustand befinden, beschreibt damit die Durchführung der Arbeitsaufgabe.

Daraufhin sind Ereignisse zu definieren, die genutzt werden können, um Informationen über die einzelnen Zustände zu erkennen. Dabei sind zwei Typen von Ereignissen denkbar. Zum einen eindeutige Ereignisse, die direkt einem Zustand zugeordnet werden können und den Start oder das Ende eines Zustandes definieren. Zum anderen allgemeine Ereignisse, die keinen eindeutigen Schluss auf den Start oder das Ende eines Zustands zulassen, aber in Kombination mit anderen Informationen (Ereigniskombination) für die Zustandserkennung genutzt werden können (vgl. Abschnitt 3.1). Jedem Ereignis ist ein entsprechender Sensor und ggf. ein Messwert zuzuordnen, durch den das Ereignis erfasst werden kann. Die Sensoren müssen daraufhin mit einem Einplatinencomputer verbunden und mithilfe der Software Node Red so eingerichtet werden, dass ihnen die entsprechende Sensor ID zugeordnet ist und das eingehende Signal in die notwendige Datenstruktur überführt wird. Die Definition von Ereigniskombinationen ermöglicht es darüber hinaus, Informationen aus unterschiedlichen Erfassungsquellen zu kombinieren und dadurch die Erfassungsqualität weiter zu steigern. So kann ein Anwender typische Zustandsabfolgen festlegen, die es ermöglichen, Zustände zu erkennen, sofern keine anderen Informationen vorliegen. Eine typische Zustandsabfolge einer manuell bedienten Maschine besteht aus den Zuständen *Beladen und Starten*, *Bearbeitung* und *Entladen*. Kennt man beispielsweise das Ende des Zustandes *Bearbeitung*, ist es wahrscheinlich, sofern keine weiteren Informationen vorliegen, dass darauf der Zustand *Entladen* folgt.

An die Konfiguration schließt sich die Datenerfassung an. In diesem Schritt erfolgt die Prozessaufnahme über einen definierten Zeitraum. Dabei werden die Daten über die Mitarbeiterposition

sowie alle Sensordaten automatisch erfasst und abgespeichert. Über die Web-App CheckIT können weitere Informationen gesammelt werden, die der Analyse nach der Datenaufnahme zusammen mit weiteren Informationsquellen zur Verfügung gestellt werden.

Die gesammelten Daten werden daraufhin im dritten Schritt, der Datenaufbereitung, genutzt, um Ereignisse zu bestimmen und aus diesen Zustände abzuleiten. Hierfür wurde eine Logik entwickelt, die es ermöglicht, auf Grundlage der erfassten Daten Mitarbeiter- und Maschinenzustände zu bestimmen.

Wie in Abbildung 2 dargestellt, leitet die Logik aus den einzelnen Ereignissen das Ende des vorherigen Zustands sowie den Beginn eines neuen Zustands ab. Hierzu werden die konfigurierten Ereigniskombinationen sowie die Zustandsabfolgen genutzt. Ereignisse, die nicht eindeutig sind und die zu keiner aktiven Ereigniskombination führen, verändern die Zustände nicht.

Im vierten Schritt werden dann die aufbereiteten Daten ausgewertet und visualisiert. Hierzu wurde ein Dashboard entwickelt, das die erfassten Mitarbeiter- und Maschinenzustände gegenüberstellt und Wartezeiten hervorhebt. Darüber hinaus wird die Zusammensetzung der Wartezeiten ausgewertet und visualisiert (Abbildung 5).

Die Darstellung ermöglicht es, Wartezeiten einfach zu erkennen und ihre Zusammensetzung zu verstehen. So hat die Maschine im gegebenen Beispiel gewartet, weil sich der Mitarbeiter mit administrativen Tätigkeiten und einer Prüfung beschäftigt hat, anstatt die Maschine zu entstören. Auf der anderen Seite hat der Mitarbeiter auf die Maschine gewartet, weil sich diese noch im Zustand Bearbeitung befand, als der Mitarbeiter sie bereits entladen wollte.

6. Literaturverzeichnis

[Bent18] Benter, M.: Analyse von Arbeitsabläufen mit 3D-Kameras. TUHH Universitätsbibliothek, 2018.

[Grab17] Grabner, C. et al.: Ein digitales Universalwerkzeug für die Produktionsanalyse. Entwicklung einer Web-App zur methodenübergreifenden Analyse von Produktionsprozessen. In Industrie Management, 2017; S. 7–10.

7. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

- Durchgeführte Transfermaßnahmen

Tabelle 1 Durchgeführte spezifische Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Rahmen		Zeitraum
Maßnahme A: Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse durch Fachbeiträge in Fachzeitschriften	A2	Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb	2022 (Beitrag wurde am 23.09.22 eingereicht und befindet sich aktuell noch im Review-Prozess)
Maßnahme C: Online-Veröffentlichung	Schnelle und umfassende Informationsverbreitung im Internet	C1 C2	Informationsdienst Wissenschaft IPMT-Internetseite	2022
Maßnahme D: Projektbegleitender Ausschuss	Fortlaufende Diskussion der Forschungsergebnisse	D1 D1 D1 D1	Projektbegleitender Ausschuss Projektbegleitender Ausschuss Projektbegleitender Ausschuss Projektbegleitender Ausschuss	03.06.2020 in HH 19.05.2021 in HH 22.02.2022 In HH 07.07.2022 In HH

Maßnahme F: Studentische Ausbildung	Projektbezogene Ausbildung und Qualifizierung von Studenten	F1	Einstellung von wissenschaftlichen Hilfskräften	2020/2021/2022
		F2	Masterarbeit: „Eine Systematik zur Bestimmung von abgestimmten Mitarbeiter- und Maschinenzuständen am Beispiel der Garz & Fricke GmbH“	03/2021
		F2	Masterarbeit: „Entwicklung und Umsetzung eines Konzepts zur automatisierten Erfassung von Maschinenzuständen und Materialflüssen mit Hilfe von Low-Cost-Sensoren“	04/2021
		F2	Masterarbeit: „Entwicklung und Umsetzung eines Konzepts zur automatisierten Erfassung von Mitarbeiterzuständen mit Hilfe von Low-Cost-Sensoren“	05/2021
		F2	Bachelorarbeit: „Erfassung und Auswertung von Mitarbeiter- und Maschinenzuständen in der Maschinenbedienung“	09/2022

- Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Tabelle 2 Geplante spezifische Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Rahmen		Zeitraum
Maßnahme A: Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse durch Fachbeiträge in Fachzeitschriften	A1	Industrie Management	2022
Maßnahme F: Studentische Ausbildung	Projektbezogene Ausbildung und Qualifizierung von Studenten	F3	Integration von Teilergebnissen in die Lehrtätigkeiten	1x im Jahr
Maßnahme H: Studentische Ausbildung	Ausbildung und Qualifizierung von Studenten	H1	Erarbeitung von Vorlesungseinheiten "Produktivitätsmanagement" an der TUHH	1x im Jahr
Maßnahme I: Weiterbildung / Transfer in die Industrie	Weiterbildung von Mitarbeitern kleiner und mittlerer Unternehmen	I1	Hausinterne / externe Schulungen	2023
		I2	Fachkraftausbildung im Rahmen von Fortbildungsmaßnahmen in der IPMT-Modellfabrik	2023
Maßnahme L: Online-Veröffentlichung	Veröffentlichung der Ergebnisse durch Bereitstellung im Internet	L1	Informationsdienst Wissenschaft	2022
		L2	IPMT-Internetseite	2022
Maßnahme M: Bau eines Demonstrators	Ständige Möglichkeit zur Vorstellung der Ergebnisse	M1	Verbleib eines Demonstrators in der IPMT-Modellfabrik	2022
		M2		2023

			Demonstrator bei der PA-Mitglied	
Maßnahme N: Beratung von Unternehmen	Transfer des Methodewissen in die Industrie	N1 N2	1. Beratungsprojekt 2. Beratungsprojekt	2023 2024
Maßnahme O: Sonstige Transfermaßnahmen	Einbeziehung eines Multiplikators Wissenschaftliche Arbeit Workshops und Industriearbeitskreise	O1 O2 O3	Weiterführende branchenübergreifende Evaluierung der Ergebnisse gemeinsam mit PA-Mitgliedern Verwendung der Ergebnisse im Rahmen von Dissertationen Ergebnistransfer in KMUs außerhalb des PA.	2022 2022/2023 2022

Für einen erfolgreichen Transfer ist nach den Erfahrungen aus dem Forschungsvorhaben die Weiterentwicklung der Software-Prototypen und der verwendeten Algorithmen notwendig. Demnach ist die Realisierbarkeit des Transferkonzepts als hoch einzuschätzen.

8. Zusammenstellung aller veröffentlichten Arbeiten

9. Angaben über gewerbliche Schutzrechte

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

10. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 20267 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.

Hamburg, 26.10.2022

Ort, Datum



Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding

Name und Unterschrift des Projektleiters an der Forschungsstelle 1