



Leitfaden zur Anwendung der  
adaptiven Bewertungsmethodik des  
Innovationsverbundes Synus zur  
individuellen Bewertung,  
Auswirkungsanalyse und Auswahl von  
Industrie 4.0 Lösungen



## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Vorwort .....	1
1.2	Danksagung .....	1
1.3	Hintergrund und Motivation .....	1
2	Anwendungsleitfaden .....	3
2.1	Phase 1: Hotspot- und Potentialanalyse .....	3
2.1.1	Schritt 1: Subjektive Einschätzung des IST-Zustandes anhand der Bewertungskriterien	4
2.1.2	Schritt 2: Identifikation von Zielkriterien und I4.0-Matching.....	5
2.1.3	Schritt 3: Auswirkungsprognose und Auswahl einer I4.0 Lösung .....	6
2.2	Phase 2: Prozess- und Datenakquise in der Produktion.....	7
2.3	Phase 3: Produktions- und I4.0 Variantenmodellierung .....	8
2.4	Phase 4: Produktionssimulation.....	9
2.5	Phase 5: Ergebnisaufbereitung und Bewertung der I4.0-Lösungen.....	10
3	Publikationen & Demonstratoren.....	11
3.1	FTF-Use-Case: Realisierung des autonomen Gütertransportes durch fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF). Integration der FTFs in ein Produktionssystem.....	11
3.2	I4.0 gestützt Montage eines variantenreichen Batteriegehäuses .....	14
3.3	Wissenschaftliche Publikationen.....	15

# 1 Einleitung

## 1.1 Vorwort

Die Begriff „Industrie 4.0“ (I4.0) wird seit nunmehr einem Jahrzehnt weitreichend diskutiert. Doch unanfechtbar verbleibt die Beobachtung einer sich stark verändernden globalen Wirtschaft hinsichtlich dem vermehrten Einsatz intelligenter und autonomer Systeme, aber auch im Hinblick auf eine steigende Produktkomplexität in Kombination mit der Forderung nach kürzeren Produktentstehungszyklen. Zur zukünftigen Aufrechterhaltung der wirtschaftlichen Stärke und Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen versprechen Industrie 4.0 Technologien großes Unterstützungspotential. Doch trotz der weitreichenden und vielseitigen Potentiale innovativer I4.0 Technologien verhält sich die Industrie im Allgemeinen zurückhaltend, was deren Einführung und Erforschung betrifft. Diese Beobachtung wird speziell in klein- und mittelständische Unternehmen (KMU) gemacht. Der Innovationsverbund Synus adressiert mit seinen Forschungsarbeiten die unternehmerischen und wirtschaftlichen Hürden, die zu diesem industriellen Verhalten führen. Die im Verbund erarbeiteten Ergebnisse in Form von Tools und Methoden werden in diesem Leitfaden näher beschrieben und funktionell miteinander verknüpft. Zum einen dient dies der Gewährleistung eines Projektüberblickes und zum anderen der Orientierung bei der Gesamtanwendung von Synus im Unternehmen.

## 1.2 Danksagung

An dieser Stelle möchte sich das Institut für Konstruktionstechnik als Projektkoordinator bei allen Forschungspartnern für ihre ausgesprochen gute und zielstrebige Erarbeitung der Teil- und Gesamtergebnisse bedanken. Unser Dank gilt auch den Industriepartnern, im Besonderen der EWE GmbH, sowie der KIM e.V., für ihre weitreichende Unterstützung bei der Validierung und Weiterentwicklung unserer Werkzeuge und Methoden. Wir danken allen wissenschaftlichen Mitarbeitern und studentischen Hilfskräften für Ihren Einsatz im Innovationsverbund Synus.

## 1.3 Hintergrund und Motivation

Auch nach einer Dekade der Erforschung und Thematisierung der „Vierten industriellen Revolution“, kurz „Industrie 4.0“, ist der Begriff Teil globaler Diskussionen und gleichermaßen umstritten wie akzeptiert. Einigkeit besteht in der weltweiten Beobachtung eines stetig wachsenden wirtschaftlichen Anspruchs an die Unternehmen hinsichtlich der Individualisierung von Produkten, einer steigenden Flexibilität und Effektivität der Produktion, einer verbesserten Integration der Kunden in die Produktentwicklung und der Vernetzung disziplinübergreifender Unternehmensprozesse. Zur Abhilfe der vielfältigen Anforderungen und Hürden, die aus dieser wirtschaftlichen Entwicklung resultieren, wird Industrie 4.0 (I4.0) Lösungen ein hohes Potential zugeschrieben. Doch neben den ökonomischen Herausforderungen, sehen sich gerade klein- und mittelständische Unternehmen (KMU) zusätzlich bei der Einführung von I4.0 Lösungen an sich mit weiteren Hindernissen konfrontiert und finden sich in einer gewissen Patt-Situation wieder. Langfristig ist die Einführung von I4.0 in das eigene Unternehmen aus ökonomischer Sicht unabdingbar, doch die Einführungshürden entpuppen sich als nahezu unüberwindbar. Die folgenden drei Hindernisse sind von zentraler Bedeutung und verstärken ihre Wirkung dadurch, dass sie meist miteinander verknüpft sind:

- Orientierungslosigkeit in Thematik „Industrie 4.0“
- Hohe Erstinvestitionen bei der Einführung von I4.0 Lösungen
- Unzureichende Abschätzbarkeit der tatsächlichen Auswirkungen bestimmter I4.0 Lösungen

Der Innovationsverbund Synus adressiert diese maßgeblichen Hürden bei der Einführung von I4.0 Lösungen in KMU und hat sich die Entwicklung von Methoden und Tools zu deren Überwindung zur Aufgabe gemacht. Unter der Prämisse KMU eine möglichst kosten- und zeitgünstige Hilfestellung bei der Einführung von I4.0 Lösungen zu gewährleisten, wurde die in diesem Leitfaden vorgestellte

Bewertungsmethodik und deren Teilelemente entwickelt. Dabei wurde nicht - wie in der Forschung rund um I4.0 beinahe üblich – nur die Produktion in den Mittelpunkt des Forschungsrahmens gestellt, sondern domänenübergreifend geforscht und gearbeitet.

## 2 Anwendungslaufplan

Im Folgenden wird ein Laufplan zur Bewertung und Auswahl von Industrie 4.0 Lösungen beschrieben. Dieser verknüpft die im Innovationsverbund Synus entwickelten Tools und Methoden miteinander und soll die integrierte Anwendung der Hilfsmittel ermöglichen. Die fünf Hauptphasen des Anwendungsprozesses bilden dabei die Grundlage für die Aufgliederung des Laufplans und sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

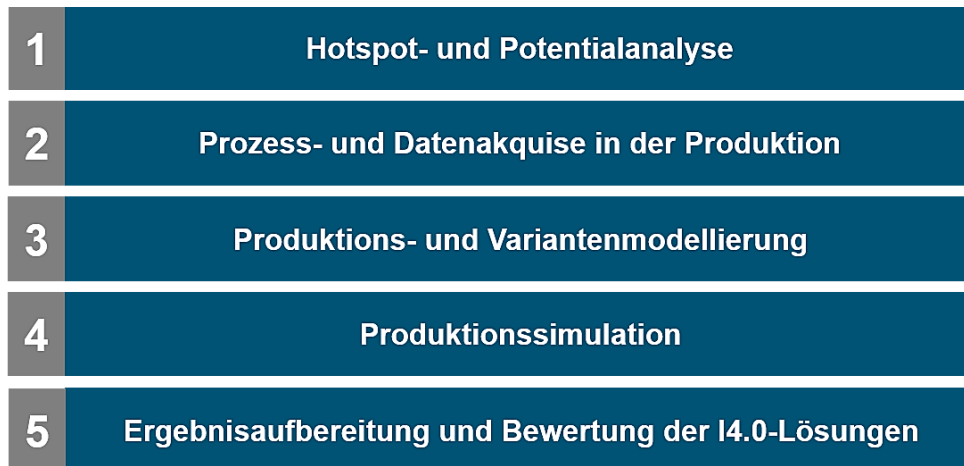


Abbildung 2.1 - Die fünf Hauptphasen der Synus-Anwendung

Im Sinne einer ersten Annäherung an die Industrie 4.0 soll durch eine Hotspot- und Potentialanalyse Orientierung geschaffen werden. Dabei wird der IST-Zustand eines Unternehmens, sowie die Unternehmensphilosophie und -strategie aufgenommen. In Abhängigkeit wissenschaftlich ermittelter und relevanter Kriterien bei der Einführung von Industrie 4.0 (I4.0) Lösungen können Brennpunkte (Hotspots) auf grob quantitativer Ebene identifiziert und entsprechend effektive I4.0 Lösungen empfohlen werden. In einem nächsten Schritt werden die unternehmensspezifischen Prozesse und Daten der Produktion durch einen Vorortbesuch der Synus-Wissenschaftler erfasst. Auf Grundlage dieser Daten wird im darauffolgenden Schritt die Produktion modelliert. Mit Hilfe der in Synus entwickelten softwarebasierten „Variantenmodellierung“ (ISSE) werden Einsatzvarianten einer bestimmten I4.0 Lösung in Bezug auf das unternehmensspezifische Produktionsmodell ermittelt. Auf diesen Schritt folgt die Simulation der Produktion mit dem Ziel eine Prognose über die Auswirkungen der I4.0 Lösung bereitzustellen. In einem finalen Schritt werden alle Teilergebnisse der vorangegangenen Synus-Phasen nochmals zusammengefasst, aufbereitet und in Form einer Bewertung von I4.0 Lösungen präsentiert.

Im Folgenden werden die einzelnen Phasen der Synus-Methodik nochmals im Detail beschrieben, wobei ein näherer Bezug zu den angewandten Methoden und Tools hergestellt wird.

### 2.1 Phase 1: Hotspot- und Potentialanalyse

Wie bereits beschrieben, bildet die Hotspot- und Potentialanalyse den initialen Schritt in der individuellen Bewertung und Auswahl von I4.0 Lösungen. Sie hat die Schaffung einer Orientierung in der Industrie 4.0 und bei der Ergreifung gezielter I4.0 Maßnahmen zum primären Ziel. Im Mittelpunkt der Hotspot- und Potentialanalyse steht das in Synus entwickelte, sogenannte „Potentialmodell“. Dieses Modell ist in Abbildung 2.2 dargestellt und führt Bewertungskriterien auf, die bei der Einführung von Industrie 4.0 Lösungen und der Entwicklung einer I4.0 Strategie von Bedeutung sind. Da es sich bei der Hotspot- und Potentialanalyse um eine grob quantitative Bewertungsmethodik handelt, sind die Bewertungskriterien den vier Sichten der allgemein anerkannten „Balanced Score Card“ zugeordnet. Dies dient dem Zweck einer ganzheitlichen Unternehmensbetrachtung und der Vermeidung der

Fokussierung bestimmter Domänen (z.B. ausschließlich der Produktion). Der in Abbildung 2.2 ersichtliche graue Bereich stellt die Bewertungsebene dar, in der die Einschätzungen der IST-Zustände der Bewertungskriterien eingetragen werden.



Abbildung 2.2: Das Potentialmodell

### 2.1.1 Schritt 1: Subjektive Einschätzung des IST-Zustandes anhand der Bewertungskriterien

Die Hotspot- und Potentialanalyse kann sowohl vollumfänglich digital durchgeführt werden, als auch im Rahmen eines Workshops im Unternehmen. In der digitalen Variante werden die subjektiven Einschätzungen der Bewertungskriterien des Potentialmodells mittels einer Umfrage erfasst. Im Workshop erfolgt dies per Direktanwendung des ausgedruckten Potentialmodells. Die Zielgruppe bei der Durchführung der Hotspot- und Potentialanalyse ist Personal, das über Führungsverantwortung verfügt und die Unternehmensstrategie, sowie das Produkt und die Unternehmensstruktur kennt. Im idealen Fall stammt das Personal dabei aus unterschiedlichen Domänen des Unternehmens, sodass der Gefahr einer einseitigen Sicht und Beurteilung der Sachlage vorgebeugt werden kann. In Abbildung 2.3 ist beispielhaft eine Bewertung des IST-Zustandes erfolgt. Die Teilnehmer in diesem Beispiel sind Mitglieder einer Leitungsebene eines Unternehmens. Für jedes Bewertungskriterium gibt jeder Teilnehmer der Umfrage oder des Workshops seine subjektive Einschätzung des aktuellen Zustandes des Unternehmens ab. Sobald die Abschätzung für jedes Kriterium erfolgt ist, gilt es noch grundsätzliche Fragen zur Einführung von I4.0 und der Unternehmensstrategie zu klären, bevor die subjektiven IST-Zustandsabschätzungen gemittelt und interpoliert werden. Es entsteht eine Kurve

(siehe Abbildung 2.3) deren Täler die Hotspots eines Unternehmens aufzeigen und deren Berge darauf hinweisen, dass im Unternehmen ein Kriterium bereits sehr gut abgedeckt ist und adressiert wird.

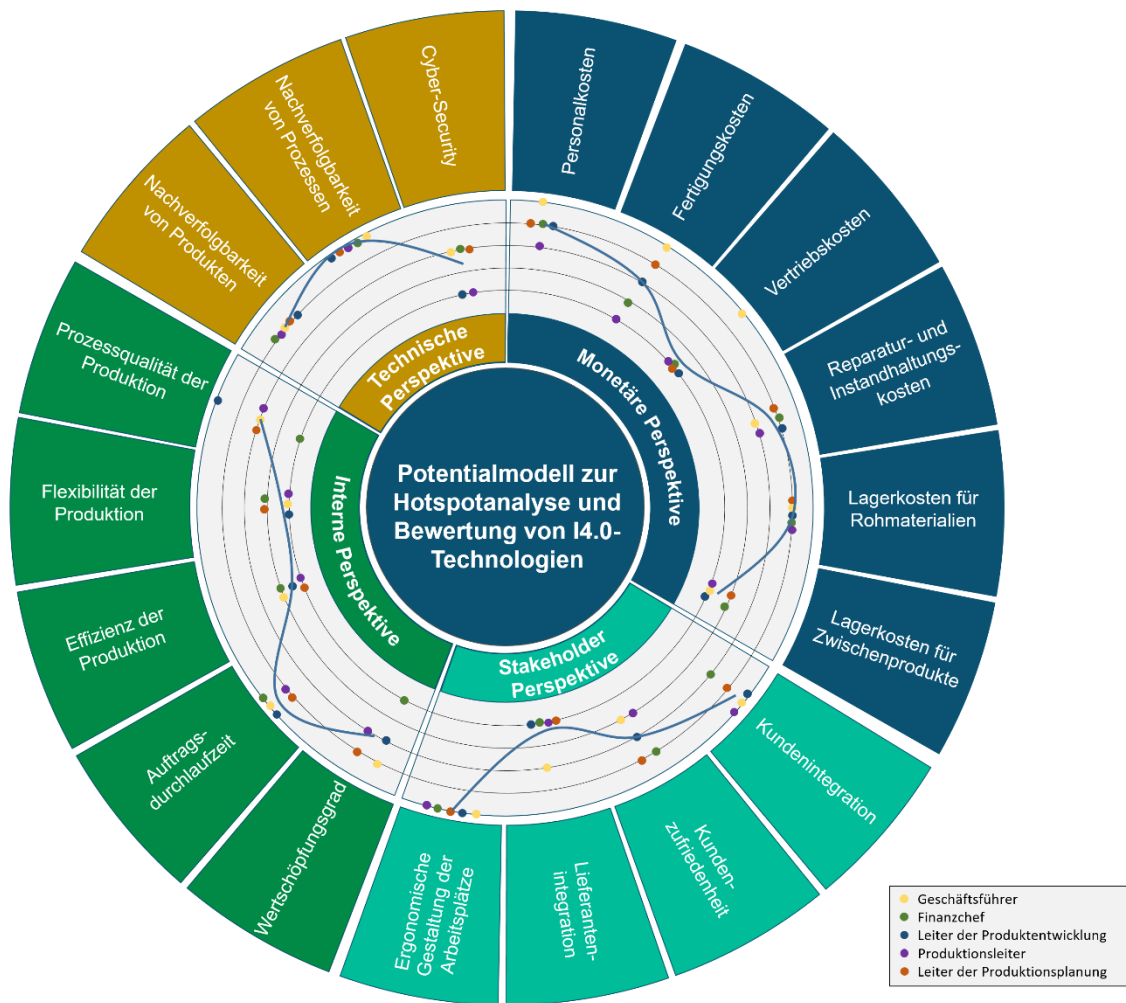


Abbildung 2.3: Potentialmodell mit IST-Zustandseinschätzungen

### 2.1.2 Schritt 2: Identifikation von Zielkriterien und I4.0-Matching

Der nächste Schritt hin zur Orientierung in der Industrie 4.0 erfolgt durch die Identifikation von „Zielkriterien“. Dazu werden den Teilnehmern bzw. Anwendern des Potentialmodells die zuvor identifizierten Hotspot-Kriterien (Täler der Kurve) vorgestellt. Nun folgt die Befragung der Teilnehmer zur Klärung der Fragestellung, welche der Bewertungskriterien, besonders aber der identifizierten Hotspot-Kriterien, durch die Einführung von Industrie 4.0 Lösungen möglichst adressiert und verbessert werden sollen. Diese Kriterien werden daraufhin und im weiteren Vorgehen als „Zielkriterien“ deklariert.

Nun kann das Zusammenführen des IST-Zustandes des Unternehmens mit potentiell hilfreichen I4.0 Lösungen erfolgen – das sog. „I4.0 Matching“. Dabei wird auf die in Synus erarbeitete I4.0 Lösungssammlung zurückgegriffen. Wie die Bezeichnung schon verrät, enthält diese Sammlung I4.0 Lösungen und beschreibt diese auf einer stark übergeordneten funktionalen Ebene. Es wird dabei kein Bezug auf spezifische Lösungsansätze durch oder von Drittanbietern genommen, sondern lediglich das Lösungsprinzip bzw. -konzept aufgeführt. Für jede in der Sammlung enthaltene I4.0 Lösung sind die Auswirkungen auf die im Potentialmodell aufgeführten Bewertungskriterien festgehalten und beruhen auf dem Expertenwissen der Synus-Wissenschaftler, sowie auf umfangreichen Literatur- und

Onlinerecherchen. In Abbildung 2.4 ist ein Ausschnitt der Einflussprognose der I4.0 Lösungssammlung für die monetäre Perspektive dargestellt. Den potentiellen Auswirkungen der I4.0 Lösungen auf die Bewertungskriterien des Potentialmodells entsprechend, können nun I4.0 Lösungen identifiziert werden, die die identifizierten Zielkriterien des Unternehmens adressieren und verbessern.

I4.0 Lösungen	Monteäre Perspektive					
	Personalkosten	Fertigungskosten	Vertriebskosten	Reparatur- und Instandhaltungskosten	Lagerkosten für Rohmaterial	Lagerkosten für Zwischenprodukte
	Beispiel	3	-1	0	0	2

Abbildung 2.4: Ausschnitt aus der Einflussprognose des I4.0 Lösungskataloges

Mit Hilfe eines dritten Elementes der Hotspot- und Potentialanalyse, den „I4.0 Steckbriefen“, können dem Konsortium I4.0 Lösungen, deren Einführung anhand der Daten des Potentialmodells und der Lösungssammlung zielführend sind, ohne Umstände vorgestellt werden. Die I4.0 Steckbriefe führen dazu die wichtigsten Daten und relevantes Wissen über die Eigenschaften und Funktionsweise einer I4.0 Lösung auf. Die aufgeführten Informationen sind ebenfalls in der I4.0 Lösungssammlung hinterlegt.

### 2.1.3 Schritt 3: Auswirkungsprognose und Auswahl einer I4.0 Lösung

Die potentiellen Auswirkungen, die in der I4.0 Lösungssammlung hinterlegt sind (siehe Abbildung 2.4), werden für die I4.0 Lösungen im Potentialmodell visualisiert, deren Einführung sich anhand der Zielkriterien als sinnvoll erweisen könnte. Beispielhaft ist dies in Abbildung 2.5 dargestellt. Die farblich rot hinterlegten Zellen markieren eine potentielle Verschlechterung des IST-Zustandes des Unternehmens in diesem Kriterium durch die Einführung der I4.0 Lösung. Grau hinterlegte Zellen stellen eine Neutralität der I4.0 Lösung dar und markieren Zielkriterien des Unternehmens, die weder verschlechtert, noch verbessert werden. Die hell grün hinterlegten Zellen markieren alle positiven Einflüsse einer I4.0 Lösung sowohl auf Bewertungs-, als auch auf Zielkriterien und heben die Potentiale der I4.0 Lösung visuell hervor. Die im Bewertungsbereich entsprechend rot oder grün dargestellten Kurvenverläufe stellen qualitativ die Einflüsse der jeweils untersuchten I4.0 Lösung dar.

Auf Basis dieser Darstellung des Potentialmodells, des Technologiecataloges und der Steckbriefe kann dem Unternehmen eine zielgerichtete Orientierung in der Industrie 4.0 und über potentiell zielführende I4.0 Maßnahmen und -Strategien geboten werden. Zur detaillierteren und qualitativeren Untersuchung der Auswirkungen einer speziellen Technologie im Unternehmen wird an dieser Stelle entschieden, welche der I4.0 Lösungen in der Produktionssimulation weiter untersucht werden sollen.





Abbildung 2.5: I4.0 Auswirkungsprognose anhand des Potentialmodells

## 2.2 Phase 2: Prozess- und Datenakquise in der Produktion

Auf die Hotspot- und Potentialanalyse folgt in Phase 2 die Prozess- und Datenakquise der Produktion im Unternehmen. Ein Team des Innovationsverbunds Synus vereinbart mit dem Unternehmen einen Termin, in dem für die Produktionsmodellierung relevante Prozessdaten wie Maschinenanzahl, -anordnung und -art erfasst werden. Die Datenaufnahme erfolgt anhand einer erweiterten Wertstromanalyse, die auf der unter KMU weitreichend bekannten Wertstrommethode basiert und durch das Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) dahingehend weiterentwickelt wurde, dass sich Prozesse bestimmen lassen, die für die Einführung von Industrie 4.0 Technologien geeignet sind. Des Weiteren können passende Industrie 4.0 Maßnahmen ableiten und bewerten lassen. Dabei wird in vier Prozesshauptgruppen unterschieden – manuelle Arbeit, Maschinenprozesse, Lager- und Logistikprozesse. Mit Hilfe der Ostfalia werden Logistikzeiten unterschiedliche Evolutionsgrade über den Grundriss einer Produktionshalle ermittelt.

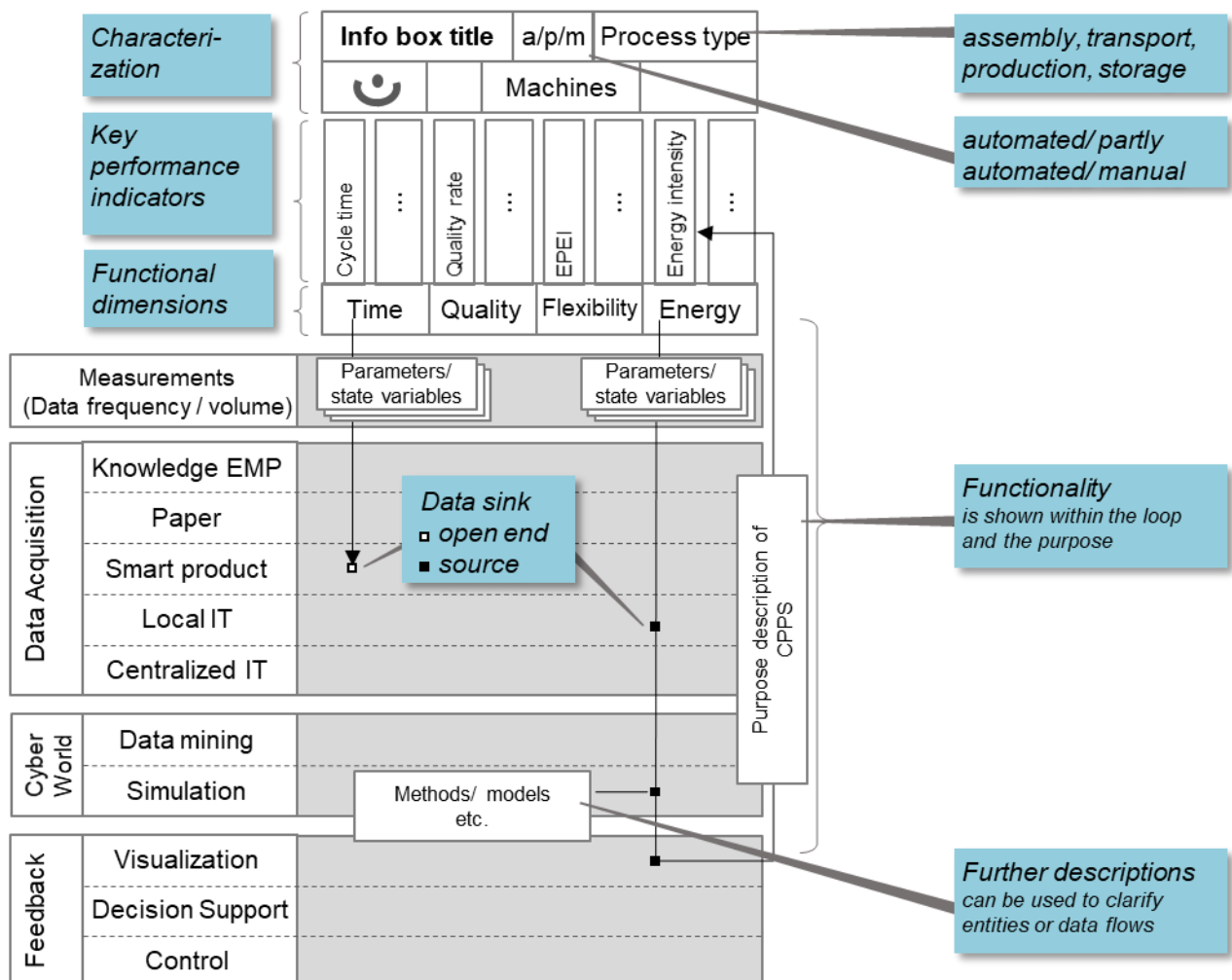


Abbildung 2.6: Übersicht über die entwickelte erweiterte Wertstromanalyse (Martin et al., 2020)

### 2.3 Phase 3: Produktions- und I4.0 Variantenmodellierung

Voraussetzung für die Modellierung der Kernprozesse der Produktion und Logistik ist, aufgrund ihrer Komplexität und starken Variation von KMU zu KMU, der Aufbau generischer Kernprozessmodelle. Die in Phase 2 erhobenen Daten der Produktion und Logistik werden in diese generischen Modelle übertragen. Auf diese Weise wird das individuelle Produktionssystem modellbasiert abgebildet. Das so entstandene Produktionsmodell bildet die Grundlage für die softwarebasierte I4.0-Variantenmodellierung. Wie in Abbildung 2.7 dargestellt, werden das Produktionsmodell und die in Phase 1 für weitere Untersuchungen ausgewählte I4.0 Lösung in einem softwarebasierten Graphenmodell zusammengeführt. Die Zusammenführung wird durch eine Datenstrukturierung ermöglicht, die die Informationen des Produktionsmodells und der einzelnen I4.0 Lösungen aus dem Technologiekatalog miteinander verknüpft. Unter Anwendung des, durch das Institut für Software und System Engineering (ISSE, TU Clausthal) entwickelte, Graphenmodell können so Einsatz- bzw. Implementierungsvarianten einer spezifischen I4.0 Lösung in das Produktionssystem des KMU ermittelt werden. Als „Einsatz“- oder „Implementierungsvariante“ wird dabei eine Variation der Einsatzart und -weise einer I4.0 Lösung, sowie des physischen Einsatzortes selbiger in der Produktion bezeichnet. So kann eine I4.0 Lösung beispielsweise auf mehrere Produktionsanlagen angewandt werden, jedoch macht die Implementierung bei Anlage 1 aus gegebenen Gründen mehr Sinn, als die Implementierung bei Anlage 5. Achtung: An dieser Stelle wird lediglich der Einsatzort, sowie die Einsatzart einer I4.0 in Bezug auf ein vorliegendes Produktionssystem (KMU-spezifisch) bestimmt. Es findet keine finale Empfehlung, Simulation oder Bewertung einer I4.0 Lösung an sich statt. Jedoch ist

für das weitere Vorgehen – die Simulation des I4.0 Einsatzes in der Produktion - die Kenntnis bzw. Auswahl des Einsatzortes einer I4.0 Lösung unerlässlich.

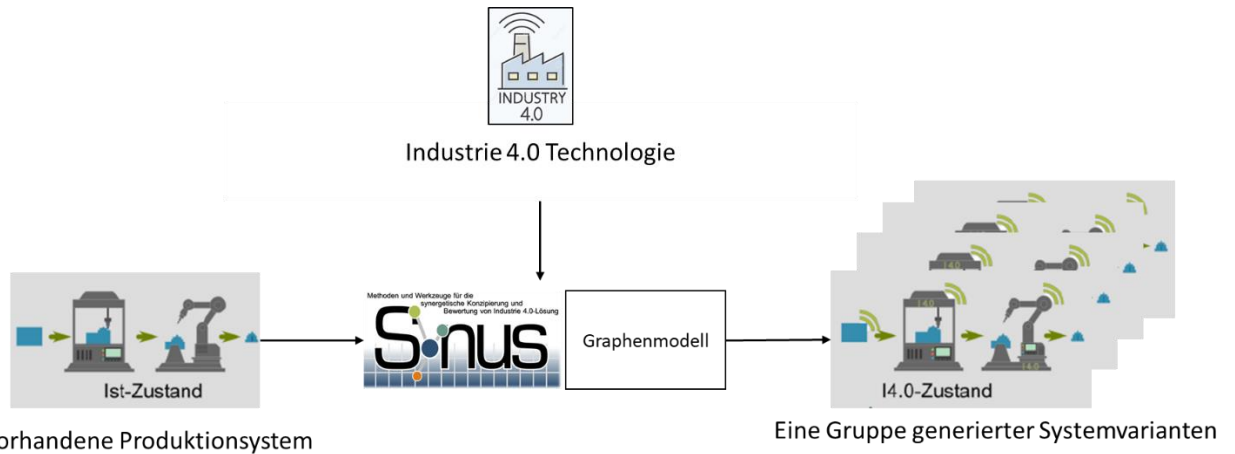


Abbildung 2.7: Generierung der Produktionssystemvarianten durch das Graphenmodell

## 2.4 Phase 4: Produktionssimulation

Nach der Bestimmung und Auswahl des (optimalen) Soll-Produktionssystemmodells in Phase 3, erfolgt in Phase 4 die Simulation der Einflüsse der I4.0 Lösung auf das Produktionssystem des KMU durch das IWF. Hierfür werden generische Simulationsagenten erstellt, die beispielhaft für eine Maschine in Abbildung 2.8 dargestellt sind.

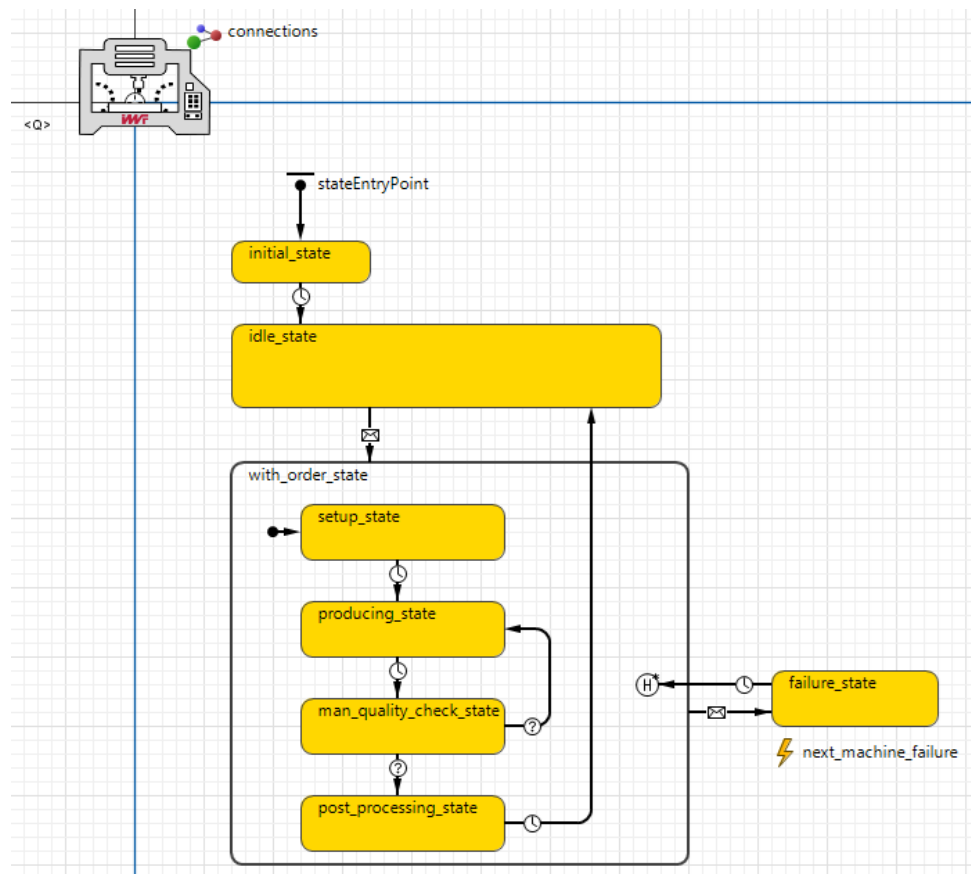


Abbildung 2.8: Generische Agenten der Produktionssimulation

Diese Simulationsagenten werden in einem Modell so kombiniert, dass das Produktionsmodell abgebildet werden kann und Industrie 4.0 Maßnahmen Einflüsse auf die Agenten ausüben können. Die

Einflüsse werden in Form von Kennzahlen (Key Performance Indicator, KPI) dokumentiert, wobei sich die prognostizierten bzw. simulierten Auswirkungen der spezifischen I4.0 Lösung durch den Vergleich von Ist- und Soll-Produktionssystemmodell ergeben. Die Daten der I4.0 Simulation werden anschließend für eine Enddiagnose an das Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion (AIP) weitergereicht.

## 2.5 Phase 5: Ergebnisaufbereitung und Bewertung der I4.0-Lösungen

Die finale Phase der Anwendung der Synus-Tools bildet die Zusammenfassung aller Teilergebnisse in Form einer Endbewertung der untersuchten I4.0 Lösung(en) durch das AIP.

Aus den vorangegangenen Phasen erhält das AIP dabei folgenden Input:

- **Phase 1:** Die Hotspots des KMU und Auswahl an Bewertungskriterien, die durch die Einführung einer I4.0 Lösung adressiert und verbessert werden sollen (sog. „Zielkriterien“). Des Weiteren die Auswahl an I4.0 Lösungen, die in den Folgephasen 2-4 weitergehend untersucht bzw. simuliert werden sollen. In Phase 5 werden somit nur vielversprechende und für das individuelle KMU relevante I4.0 Lösungen bewertet. Die Auswirkungen der I4.0 Lösungen werden zurück in das Potentialmodell der Phase 1 gespiegelt und dort visualisiert.
- **Phase 2:** Aktuelle und KMU-spezifische Produktions- und Logistikdaten mit allen relevanten Kennzahlen. Mit den Ist-Zustandsdaten können die Ergebnisse des Potentialmodells (Phase 1) im besten Fall konsolidiert werden.
- **Phase 3:** Die optimale Platzierung einer spezifischen I4.0 Lösung im vorliegenden, individuellen Produktionssystem des KMU.
- **Phase 4:** Die Kennzahlen des simulierten Soll-Produktionssystems mit integrierter I4.0 Lösung.

In Phase 5 werden die Kennzahlen des Ist-Produktionssystems des KMU jeweils paarweise mit den aus der Simulation (Phase 4) erhaltenen Kennzahlen des Soll-Produktionssystems verglichen. Dabei wird untersucht, ob für die Zielkriterien (Phase 1) des KMU eine Verbesserung oder Verschlechterung durch die Einführung einer spezifischen I4.0 Lösung eintritt. Auf dieser Basis können mehrere I4.0 Lösungen miteinander in ihrer Auswirkung verglichen und deren individuelle Eignung für das KMU und dessen Strategie bestimmt werden.

Nach Beendigung von Phase 5 ist das Unternehmen dazu befähigt die Auswirkungen diverser I4.0 Lösungen abzuschätzen und eine Implementierung im Unternehmen oder den Aufbau einer Strategie zur Einführung einer bestimmten I4.0 Lösungen anzustoßen.

### 3 Publikationen & Demonstratoren

Um InteressentInnen die Potentiale und Grundlagen der Industrie 4.0 zu vermitteln, werden im Innovationsverbund Synus zwei Use-Cases bzw. Demonstratoren entwickelt. Das Institut für Mechanik (IMEC) der Ostfalia HaW macht sich dabei den Aufbau eines **Fahrerlosen Transportsystems (FTS)** zur Aufgabe, in dem mehrere Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) autonom gesteuert werden sollen. Das Institut für Konstruktionstechnik (IK) und das Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) erarbeiten parallel einen Use-Case anhand der **I4.0-gestützte Montage eines variantenreichen Batteriegehäuses**. Beide Demonstrationsanwendungen werden in diesem Kapitel näher beschrieben.

Neben der Validierung der Forschungsbemühungen vom Synus-Verbund in der Industrie wurden elementare Projektergebnisse und Forschungserkenntnisse bereits auf internationalen Konferenzen publiziert. Diese sind in Kapitel 3.3 aufgeführt.

#### 3.1 FTF-Use-Case: Realisierung des autonomen Gütertransportes durch fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF). Integration der FTFs in ein Produktionssystem

Für die Produktion von morgen, die eine absolute Flexibilität und Autonomie der Produktionsmaschinen und Transportfahrzeuge erfordert, sind bestehende Transportsysteme nicht einsetzbar, da sie nicht eigenständig agieren, nicht kommunizieren und keine intelligenten Entscheidungen treffen können. Unter Berücksichtigung des Begriffs der Industrie 4.0 (I4.0) und des Standes heutiger Produktionsanlagen ist eine autonome Produktionsanlage somit insbesondere in der Lage:

- individuelle Produkte zu fertigen (Losgröße 1), da FTFs und autonome Produktionsmaschinen keine immer gleiche Fertigungsroutine erfordern.
- auch bei Wartungen (FTF fällt aus, Streckenabschnitt gesperrt), Störungen (Umfall, Stau, etc.) oder Hindernissen (Arbeiter, umgekippte Ware, etc.) die Produktion fortzuführen, da FTFs nicht spurgebunden sind und Ausweichmanöver oder Re-Routing ermöglichen.
- bei Ausfall der zentralen Leitsteuerung die Produktion fortzuführen, da die Entscheidungsfindung und Auftragsvergabe dezentral erfolgt.

In Abbildung 3.1 wird schematisch eine autonome Produktionsanlage vorgestellt. Die bestehenden Produktionsmaschinen und FTFs werden um Smart Sensors, Smart Actuators und künstliche Intelligenz erweitert, um verschiedene Sensorsignale zu verarbeiten und darauf basierend selbstständig Entscheidung treffen zu können. Ausgehend vom Produkt als zentralem Element der Produktion werden zuerst Produkteigenschaften definiert, die zur Auftragsbearbeitung benötigt werden. Im Hinblick auf die individualisierte Massenproduktion (Mass Customization) als eines der Teilziele von I4.0, ist die Verwendung von Sensor- und Produkt-IDs unabdingbar. Dabei ist die Sensor-ID eine eindeutige Ziffernkombination, die eine Zuordnung zu einer Produkt-ID, welche den Produkttyp beschreibt, ermöglicht. Mittels Informationstechnik z.B. RFID und IoT können alle notwendigen Informationen der zu bearbeitenden Produkte gespeichert und die aktuellen Zustände der einzelnen Maschinen untereinander ausgetauscht werden, um die selbstständige Organisation der Produktionstätigkeiten zu gewährleisten. Der Smart Sensor liest den RFID-Tag der Produkte aus und leitet die Produktionsinformationen durch ein Kommunikationsmodul mittels WLAN an die entsprechenden Produktionsmaschinen weiter. Anschließend erfassen Produktionsmaschinen aus dem RFID-Tag die entsprechenden Bearbeitungsschritte und passen frühzeitig die Soft- und Hardware an das zu bearbeitende Produkt an. Somit wird die Kopplung des Informations- und Materialflusses in der autonomen Produktionsanlage aufgelöst. Diese Trennung eröffnet zahlreiche Möglichkeiten zur

Optimierung der Produktion, sowie die Verkürzung der Durchlaufzeiten durch intelligente Maschinenalgorithmen. Darüber hinaus bestehen Verbesserungspotentiale in weiteren Bereichen wie der verbrauchsgesteuerten Ersatzteilbestellung oder dem prädiktiven Instandhaltungsmanagement durch Fernüberwachung.

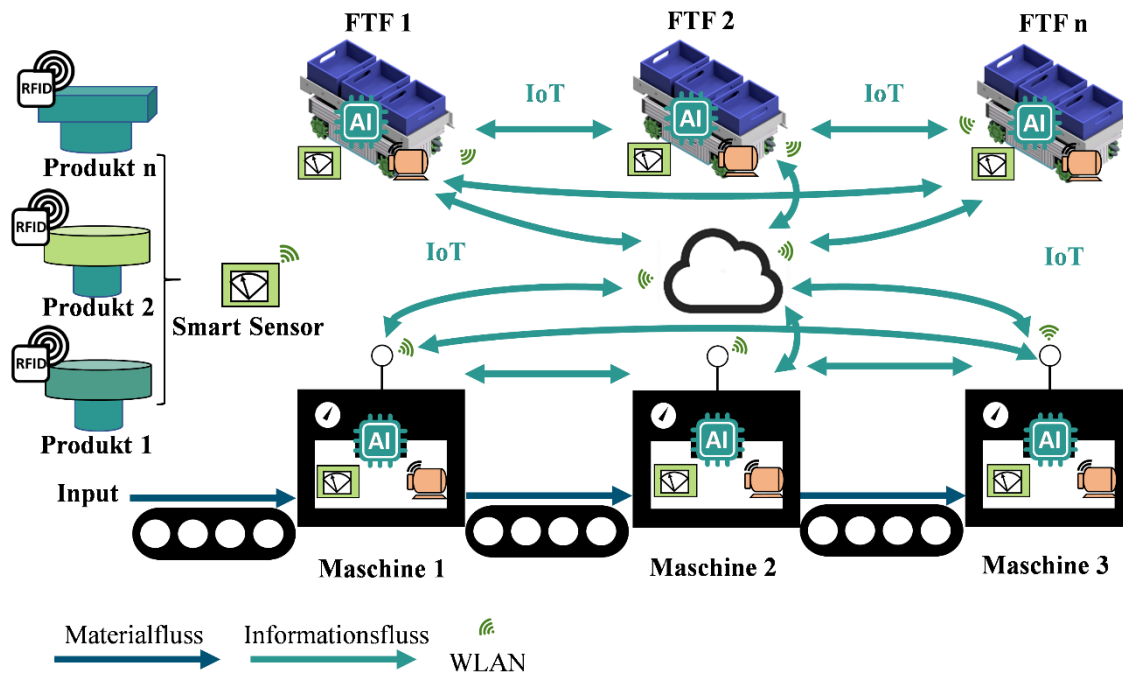


Abbildung 3.1: Produktionslinie, basierend auf dem Internet der Dinge (IoT)

Eine wesentliche Aufgabe des autonomen Gütertransports durch fahrerlosen Transportfahrzeugsysteme (FTS) ist die Verwaltung, Verteilung und Durchführung der Produktionsaufträge. Aufgrund der Entkopplung des Informations- und Materialflusses in der autonomen Produktionsanlage kann die Transportauftragsabwicklung des FTS dezentral durchgeführt werden. Um den Mehrwert intelligenter und hochgradig vernetzter Fahrzeuge im Produktionsumfeld durch Simulationen quantitativ zu bewerten, entwickelt das Institut für Mechatronik (IMEC) der Ostfalia HaW zwei Pilotanwendungen im Sinne eines FTS-Demonstrators.

**Pilotanwendung A** adressiert das Testen der Funktionalitäten des autonomen Fahrens im Testfeld. Anhand des Transportauftrages soll das FTF durch die eigene Navigationsfunktion die kürzeste Route von der Eigenposition zum Ziel selbständig finden. Unter Berücksichtigung von Restriktionen wie z.B. Geschwindigkeitsbegrenzungen, soll daraufhin die optimale Trajektorie ermittelt werden. Mit Hilfe der integrierten Fahrdynamikregelung soll das FTF in der Lage sein der ermittelten (Soll-) Trajektorie so genau und schnell wie möglich zu folgen und die Zielposition innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls erreichen. Während der Fahrt soll das FTF mithilfe der integrierten Funktionen und Sensoren die Umgebung erkennen und selbstständig auf die detektierten Umgebungsinformationen reagieren. Mögliche Verkehrskonflikte sollen so vermieden und die Sicherheit der Produktionsmitarbeiter garantiert werden.

**Pilotanwendung B** adressiert die Vernetzung der im Rahmen des FTS verwendeten FTF, sowie die Integration der FTFs in die Produktion auf Basis eines Kommunikationssystems. Dabei soll mithilfe einer dezentralen Auftragsplanung eine optimale Auftragserfüllung hinsichtlich Energieverbrauch und Transportzeiten konzipiert und ermöglicht werden. Transportaufträge sollen von Produktionsmaschinen generiert und anschließend per WLAN-basierter Kommunikation an die FTFs vermittelt werden. So soll das (Zwischen-) Produkt zur nächsten Maschine oder einem Lagertort

mithilfe der FTF transportiert werden. Die FTFs planen anhand der gegebenen Zielposition des Auftrags mithilfe ihrer Navigationsfunktion die optimale Verfahrensrouten und berechnen den zu erwartenden individuellen Energieverbrauch und Zeitaufwand. Auf Basis der digitalen Vernetzung der FTFs miteinander und einer künstlichen Intelligenz erfolgt die Entscheidungsfindung welches FTF den Auftrag optimaler Weise ausführen sollte. Das gewählte FTF übernimmt daraufhin den Transportauftrag und führt diesen aus.

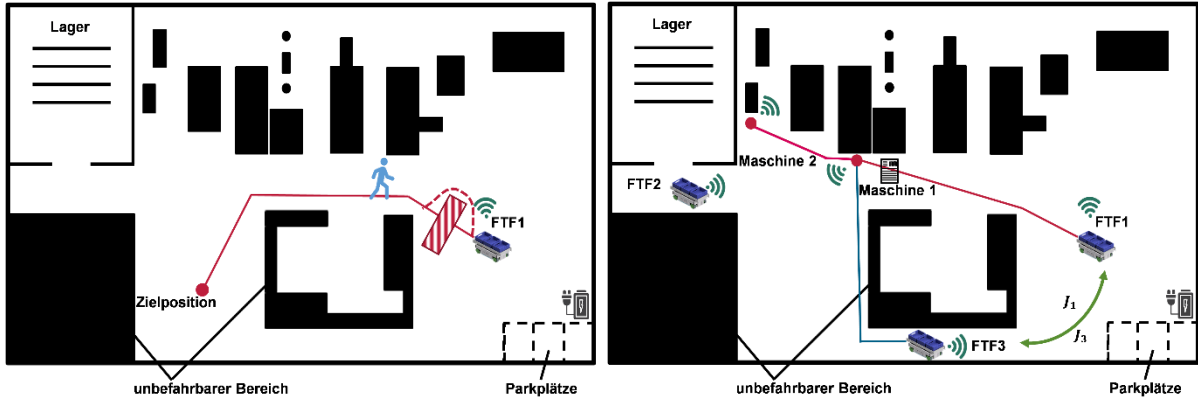


Abbildung 3.2: Pilotanwendungen A (links) und B (rechts)

In Abbildung 3.3 werden alle wesentlichen Funktionen der Informationsverarbeitung eines FTF zur Realisierung der dezentralen Entscheidungsfindung und Auftragsplanung dargestellt. Nachfolgend werden die einzelnen Funktionen und deren Schnittstellen beschrieben.

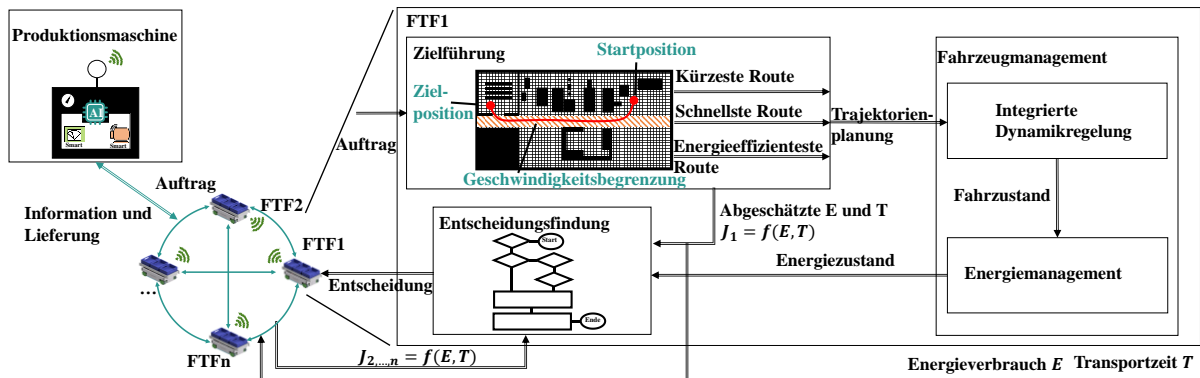


Abbildung 3.3: FTF - Funktionsmodularisierung

### Zielführung

Die effektivste Route des FTF wird ausgehend von seiner aktuellen Position mittels einer Umgebungskarte der Produktionshalle zu einer Zielposition ermittelt. Dabei bedeutet effektiv, unter Berücksichtigung der eigenen Ziele des FTF und auch der gemeinsamen Ziele der gesamten Produktionsstraße, eine Minimierung der zur Auftragsdurchführung benötigten Zeit und Energie. Das Funktionsmodul „Zielführung“ basiert auf der Graphentheorie, wobei das gesamte Streckennetz durch eine Vielzahl an Knoten und gerichteten Kanten beschrieben wird. Die Fahrtkosten können je nach Ziel anhand der Routenlänge, der Fahrdauer oder des Energiebedarfs beschrieben werden, sodass die Suche nach der kürzesten, zeit- oder energieeffizientesten Route durchgeführt werden kann.

### Energiemanagement

Im Energiemanagement ist die gesamte Überwachung des Energiehaushalts integriert (bspw. das Lademanagement der Batterie). Das Energiemanagement sorgt für eine bedarfsgerechte und prioritätsbasierte Verteilung der im FTF begrenzt verfügbaren elektrischen Leistung zur

Gewährleistung des Warentransports. Durch das unterlagerte Batteriemanagementsystem werden die aktuellen Zustände des Batteriepakets (bspw. Ladezustand und State of Health) erfasst. Somit kann das Energiemanagementsystem die Energie des FTF verteilen und diese Informationen der Auftragsentscheidung zur Verfügung stellen.

### **Integrierte Dynamikregelung**

Auf Basis der idealen Verfahrensrouten, die aus der Zielführung hervorgeht, wird die optimale Trajektorie generiert. Mithilfe der integrierten Dynamikregelung wird diese Trajektorie realisiert und die Erreichung der definierten Zielposition des FTF ermöglicht.

### **Auftragsplanung und -entscheidung**

Die autonome Auftragsplanung und -entscheidung ist eine der Kernfunktionen eines FTF und auch ein wesentliches Element der Unterstützung des Produktionsablaufes. Sie wird mit künstlicher Intelligenz und maschinellen Lernverfahren kombiniert. Anhand der durch die Zielführung bestimmte Route können die Transportdauer  $T$  und der Energieverbrauch  $E$  für einen Auftrag abgeschätzt werden. Das Energiemanagement stellt den aktuellen Energiezustand des FTF bereit, welcher bei der Entscheidungsfindung eines Transportauftrags ebenfalls berücksichtigt wird. Ist der Ladezustand eines FTF zu niedrig und für die Erfüllung eines Transportauftrages nicht ausreichend, meldet er dies dem FTS zurück und wird Zuteilungs- bzw. Planungsprozess ausgeschlossen. Ist der Ladezustand ausreichend, werden die Fahrtkosten  $J$  unter Berücksichtigung der Gewichtungsfaktoren ( $a$  und  $b$ ) zur Skalierung der Zielgrößen  $T$  und  $E$  berechnet. Über das (z. B. WLAN-basierte) Kommunikationsmodul können die FTFs die Fahrtkosten miteinander vergleichen und das FTF mit den kleinsten Fahrtkosten zur Annahme des Auftrags auswählen.

## **3.2 Wandlungsfähiges Produktionssystem am Beispiel Pharmaproduktion**



Abbildung 3.4: xCell des Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

Im Rückblick auf die vergangene Dekade kann eine Steigerung der Nachfrage nach immer komplexeren Produkten in immer kürzeren Zyklen beobachtet werden. Auch der Anspruch an Kundenindividualität in der Herstellung von Produkten ist gestiegen. Um diesen Ansprüchen entgegenzutreten zu können, bedarf es grundlegend angepasster Produktionssysteme. Derartige Produktionssysteme müssen eine hohe Wandlungsfähigkeit aufweisen. Das Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF)

entwickelt einen Demonstrator, dessen Einsatzszenario im Gebiet der Pharmaproduktion fußt. Dabei werden die I4.0-Potentiale wie die Mensch-Roboter-Kollaboration veranschaulicht werden. Grundlage des Demonstrators bildet dabei die flexible, modulare Produktionszelle für individualisierte Produktion, genannt xCell. Diese besteht aus einem doppelarmigen Robotersystem sowie unterschiedlichsten Prozessmodulen und ist in Abbildung 3.4 dargestellt.



### 3.3 Wissenschaftliche Publikationen

Schneider, D.; Huth, T.; Vietor, T.; Schumacher, P.; Weckenborg, C.; Spengler, T. S. (2020): Development of a potential model to support the assessment and introduction of industry 4.0 technologies. In: Proceedings of the Design 2020 16<sup>th</sup> International Design Conference. Accepted for publication. 2020.

Schneider, D.; Huth, T.; Vietor, T. (2020): Design for flexibility – Evaluation interactions between product properties and production processes. In: Procedia Cirp 2020, Elsevier, Amsterdam, 2020.

Martin et al. (2020): Assessment of Smart Manufacturing Solutions based on extended Value Stream Mapping (noch nicht vollständig veröffentlicht!)

Inkermann, D.; Schneider, D.; Martin, N.; Lembeck, H.; Zhang, J.; Thiede, S. (2019): A framework to classify Industry 4.0 technologies across production and product development. In: Procedia CIRP, Elsevier B.V., Amsterdam, 2019, Ausgabe 84, Seite 973-978, DOI 10.1016/j.procir.2019.04.218. 2019.

Lembeck, H.; Schneider, D.; Essakly, A.; Inkermann, D.; Spengler, T.; Vietor, T. (2019): Bewertungsmethodik für die Prozessintegration von Industrie 4.0-Lösungen in die Produktentwicklung, In: Binz, H., Bertsche, B., Bauer, W., Spath, D. and Roth, D. (Eds.), Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2019 Stuttgart, Wissenschaftliche Konferenz, Stuttgart, DE, Stuttgart Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, pp. 83–92., 16. Mai, 2019.

Thiede, S.; Filz, M.; Thiede, B.; Martin, N.; Zietsch, J.; Herrmann, C.: Integrative simulation of information flows in manufacturing systems, In: Procedia CIRP, Elsevier B.V., Amsterdam, 2019, Ausgabe Volume 81, Seite 647-652, DOI 10.1016/j.procir.2019.03.170. 2019.

Liu-Henke, X.; Scherler, S.; Yarom, O. A.; Zhang, J. (2019): Modellbildung und Simulation vernetzter mechatronischer Komponenten einer Fertigungsstraße im Kontext der Industrie 4.0. Workshop der ASIM/GI-Fachgruppen, Braunschweig, Germany, February 21 - 22, 2019.

Liu-Henke X.; Scherler S.; Göllner M.; Maisik J.; Fritsch M. (2018): Simulationsgestützte Konzeption der Antriebstopologie eines fahrerlosen Transportsystems, ASIM/GI STS/GMMS Workshop 2018, Heilbronn, Germany, March 08 - 09, 2018

Liu-Henke X.; Yarom, O.A.; Göllner, M. (2019): Concept for the simulation-based description of intelligent mechatronic components and their networking in an I4.0 production line, ICEIME Conference, Prague, Czech, August 15-16, 2019.

Wang, D.; Knieke, C.; Rausch, A. (2019): Data-driven Component Configuration in Production Systems, Proceedings of the ADAPTIVE 2019 Inc. The Eleventh International Conference on Adaptive and Self-Adaptive Systems and Applications, ISBN: 978-1-61208-706-1, Venice, Italy, Page(s): 44-47, May 5-9, 2019.

Wang, D.; Knieke, C.; Lawrenz, S.; Rausch, A. (2019): Semantisches Matching für die Konfiguration von Komponenten in Cyber-physischen Systemen, ASIM Workshop 2019 Inc. Simulation Technischer Systeme Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation, Braunschweig, Germany, Page(s): 203-209, Februar 21-22, 2019.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 - Die fünf Hauptphasen der Synus-Anwendung.....	3
Abbildung 2.2: Das Potentialmodell.....	4
Abbildung 2.3: Potentialmodell mit IST-Zustandseinschätzungen.....	5
Abbildung 2.4: Ausschnitt aus der Einflussprognose des I4.0 Lösungskataloges.....	6
Abbildung 2.5: I4.0 Auswirkungsprognose anhand des Potentialmodells.....	7
Abbildung 2.6 - Übersicht über die entwickelte erweiterte Wertstromanalyse (Martin et al., 2020) ...	8
Abbildung 2.7: Generierung der Produktionssystemvarianten durch das Graphenmodell.....	9
Abbildung 2.8: Generische Agenten der Produktionssimulation.....	9
Abbildung 3.1: Produktionslinie, basierend auf dem Internet der Dinge (IoT).....	12
Abbildung 3.2: Pilotanwendungen A (links) und B (rechts).....	13
Abbildung 3.3: FTF - Funktionsmodularisierung.....	13
Abbildung 3.4: xCell des Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik .....	14