

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19183 N / 1

Thema

Life Cycle Costing und Performancequantifizierung von Cyber-Physischen Systemen in der Intralogistik

Berichtszeitraum

01.12.2016 bis 31.05.2019

Forschungsvereinigung

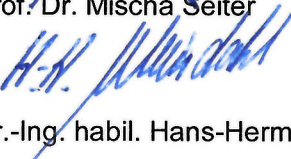
Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

Forschungsstelle(n)

- (1) International Performance Research Institute (IPRI)
- (2) Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)

Stuttgart, 02.09.2019


Prof. Dr. Mischa Seiter


Dr.-Ing. habil. Hans-Hermann Wiendahl

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
1. Zusammenfassung	7
2. Wissenschaftlich technische und wirtschaftliche Problemstellung	8
3. Gegenüberstellung angestrebter Ziele und erzielter Ergebnisse	10
4. Darstellung erzielter Ergebnisse	14
4.1 AP 1: Klassifizierung von CPS-Technologien in der Intralogistik	14
4.1.1 Cyber-Physische Systeme	14
4.1.2 Intralogistik	26
4.1.3 Referenzmodell	31
4.1.4 Morphologischer Kasten zur Klassifizierung der CPS-Technologien	38
4.2 AP 2: Quantifizierung der Performancesteigerung von CPS-Technologien.	40
4.2.1 Ziele und Motivation	40
4.2.2 Nutzenanalyse	43
4.2.3 Nutzwertanalyse	44
4.2.4 Zieldimensionen	47
4.2.5 Qualitative Bewertung der Nutzenpotentiale	51
4.2.6 Eignung der Nutzenbewertung für CPS-Technologien	53
4.3 AP 3: Kostenermittlung von CPS-Technologien durch weiterentwickeltes Life Cycle Costing	54
4.3.1 Life Cycle Costing	55
4.3.2 Life Cycle Costing für cyberphysische Systeme in der Intralogistik Rahmenbedingungen /Anpassung des LCC-Ansatzes an das Forschungsprojekt	66
4.3.3 Exemplarische Berechnung von Lebenszykluskosten / Anwendung der Checkliste	75
4.3.4 Eignung des LCC-Ansatzes für CPS und Fazit	79
4.4 AP 4: Zusammenführung/Validierung des entwickelten Verfahrens	81

4.4.1	Verfahren zur Profitabilitätsbewertung von CPS in der Intralogistik .	82
4.4.2	Validierung	83
4.4.3	Ergebnisse und Analyse	90
4.5	AP 5: Entwicklung eines Demonstrators und Schulungsvideos	93
4.5.1	Aufbau und Handhabung des Demonstrators	94
4.5.2	UML-Diagramm	95
4.5.3	Anwenderleitfaden	97
4.6	AP 6: Projektmanagement und Transfer	113
5.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit sowie Verwendung der Zuwendung	114
6.	Nutzen, Innovationsbeitrag und Anwendungsmöglichkeiten der erzielten Ergebnisse	116
6.1	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse	116
6.2	Innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten der erzielten Ergebnisse	117
7.	Plan zum Ergebnistransfer und Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzepts	119
8.	Forschungsstellen	123
1.	Forschungsstelle 1: IPRI – International Performance Research Institute gGmbH	123
2.	Forschungsstelle 2: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)	123
9.	Förderhinweis	125
10.	Quellenverzeichnis	126

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Steckbrief RFID-Armband	22
Abbildung 2: Kategorisierung von CPS im Rahmen der Intralogistik	23
Abbildung 3: Referenzprozess Intralogistik	27
Abbildung 4: Ablauflogik für Prozessmodule und Übergabeereignisse	33
Abbildung 6: Zeitliche Betrachtung der Ereignisse auf Material- und Informationsflussebene	33
Abbildung 7: Zeitliche Betrachtung der Prozesse auf Material- und Informationsflussebene	34
Abbildung 8: Generisches Prozessmodell	36
Abbildung 9: Prozessmodul Wareneingang	37
Abbildung 10: Morphologischer Kasten	39
Abbildung 10: Strukturierung der Nutzenpositionen	44
Abbildung 11: Zieldimensionen der Produktion (nach Erlach (2010), S. 14)	48
Abbildung 12: Übersicht erweiterte Zieldimensionen	49
Abbildung 13: Vorgehen des Life Cycle Costing	60
Abbildung 24: Bestimmen der Lebenszykluskosten per Diskontierung in einem Drei-Phasen-Modell	65
Abbildung 25: Inflationsbereinigung und Berücksichtigung der Zeitpräferenz	65
Abbildung 16: Vorgehen des Life Cycle Costing für CPS in der Intralogistik (1)	69
Abbildung 17: Anpassung der „klassischen“ Phasen des LCC an CPS in der Intralogistik	70
Abbildung 18: Vorgehen des Life Cycle Costing für CPS in der Intralogistik (2)	75
Abbildung 33: Detailliertes Prozessmodell Intralogistik (Ausschnitt)	88
Abbildung 34: Kombinationen von Prozessmodulen	88
Abbildung 21: Aktivitätsdiagramm als UML-Modell des Tools	96
Abbildung 22: Morphologischer Kasten	99
Abbildung 23: Erster Arbeitsschritt im Cockpit	100
Abbildung 24: Auswahl der Zieldimensionen im Cockpit	100
Abbildung 25: Auswahl der Zieldimensionen	100
Abbildung 26: Technologieauswahl im Cockpit	102
Abbildung 27: Weiterführende Informationen zur Datenbrille	103
Abbildung 28: Projektdaten eintragen	104
Abbildung 29: Kosten ohne CPS	105
Abbildung 30: Kosten mit CPS	105
Abbildung 31: Einlesen des Angebotsformulars	106
Abbildung 32: Formular zur Angebotserstellung	107
Abbildung 33: Blatt Finanzierung	108
Abbildung 34: Kostenermittlung ohne CPS	109
Abbildung 35: Verschiedene Kostenfaktoren	110
Abbildung 36: Auswertung	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Inhalte von AP 1	14
Tabelle 2: Inhalte AP 2	40
Tabelle 3: Überblick über gängige Instrumente zur Technologiebewertung	42
Tabelle 4: Nutzen CPS-Technologie	52
Tabelle 5: Inhalte von AP 3	54
Tabelle 6: Übersicht diverser Veröffentlichungen zu anwendungsspezifischen LCC-Modellen	57
Tabelle 7: Kategorisierungsoptionen für den Kostenstrukturplan	60
Tabelle 8: Exemplarischer Kostenstrukturplan für einige Kostenelemente	61
Tabelle 9: Exemplarisches Phasenmodell	62
Tabelle 10: Kosten des Prozesses der physischen Implementation einer neuen Anlage	63
Tabelle 11: Literaturübersicht: Strukturierung und Kontext der Kostenbetrachtung CPS-ähnlicher Betrachtungsobjekte	67
Tabelle 12: Checkliste: Kosten innerhalb der Lebenszyklusphasen von CPS-Technologien	72
Tabelle 13: Inhalte von AP 4	81
Tabelle 14: Als relevant identifizierte Kostenarten	83
Tabelle 15: Inhalte von AP 5	93
Tabelle 16: Inhalte von AP6	113
Tabelle 17: Einsatz des wissenschaftlich-technischen Personals in Personenmonaten (PM)	115
Tabelle 18: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit	119
Tabelle 19: Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit	122
Tabelle 20: IPRI – International Performance Research Institute gemeinnützige GmbH	123
Tabelle 21: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)	124

Abkürzungsverzeichnis

A
AP *Arbeitspaket*

B
bspw. *beispielsweise*
bzw. *beziehungsweise*

C
CPS *10, Cyber-Physical-Systems*

D
d.h. *das heißt*
DIN *Deutsches Institut für Normung*

E
ERP *Enterprise-Resource-Planning*
etc *et cetera*

F
f. *folgende*
ff. *fortfolgende*
FTF *Fahrerlose Transportfahrzeuge*

G
ggf. *gegebenfalls*

I
i.d.R. *in der Regel*
i.S.e. *im Sinne einer*
i.V.m. *in Verbindung mit*
ID *Identifikator*
insb. *insbesondere*
IoT *Internet of Things*
IT *Informationstechnologie*

K
KMU *Kleine und mittelständische Unternehmen*

L
LCC *Life Cycle Costing*

N
NFC *Near Field Communication*

P
PA *Projektbegleitender Ausschuss*

R
RFID *Radiofrequenzidentifikation*
RTLS *Echtzeitlokalisierungssystem*

S
s. *siehe*
S. *Seite*
SAE *Society of Automotive Engineers*
sog. *sogenannte*

U
u. a. *unter anderen*
u. U. *unter Umständen*
UML *Unified Modelling Language*

V
VBA *Visual Basic for Applications*
VDI *Verein Deutscher Ingenieure*
VDMA *Verband Deutscher Maschinen- und Anlagebau*
VDV *Verband Deutscher Verkehrsunternehmen*
Vgl. *vergleiche*

W
WA *Warenausgang*
WE *Wareneingang*
WLAN *Wireless Local Area Network*

1. Zusammenfassung

Industrie 4.0 lässt immense Performancesteigerungen erwarten. Während große Unternehmen bereits vereinzelt Investitionen in CPS-Technologien in der Intralogistik getätigt haben, ist eine Verbreitung bei kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) gering. KMU sind infolgedessen dem Risiko ausgesetzt, Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Konkurrenten sowie technologische Anschlussfähigkeit an Kunden und Zulieferer zu verlieren. Deshalb sind Investitionen in CPS-Technologien elementar. Dabei ist gerade für KMU eine Profitabilitätsbewertung zur Absicherung von Investitionsentscheidungen und Vermeidung existenzbedrohender Fehlinvestitionen bedeutend. Jedoch fehlt es an Methoden, die eine Profitabilitätsbewertung von CPS-Technologien ermöglichen. Die Aufklärung der wirtschaftlichen Folgen von CPS-Technologien stellt eine Hürde für die Umsetzung von Industrie 4.0 dar. Zur Beurteilung der durch Investitionen in CPS-Technologien in der Intralogistik verursachten Kosten eignet sich die Methode des Life Cycle Costings. Allerdings muss das Life Cycle Costing hierzu weiterentwickelt werden. Für die Quantifizierung der Performancepotenziale von Investitionen in CPS existieren bisher keine geeigneten Methoden. Methoden zur Quantifizierung von Performancesteigerungen stellen zusammen mit dem weiterentwickelnden Life Cycle Costing die Grundlage für eine Profitabilitätsbewertung von Investitionen in CPS-Technologien dar. Die immensen Unterschiede der Potenzialhebung auf Unternehmensbasis, haben es nicht zugelassen, dass eine allgemeine Methodik zur Quantifizierung von Performancesteigerungen für die Praxis entwickelt wurde. Die Potenziale wurden anhand von verschiedenen Dimensionen dargestellt und fließen als qualitative Merkmale in die Bewertung der CPS-Investitionsprojekte mit ein. Das validierte Verfahren wurde in einen Praxisleitfaden, bestehend aus Excel-Demonstrator, Bedienungsanleitung und Schulungsvideo, überführt. Dieser gewährleistet die Praxistauglichkeit und ermöglicht zudem einen erleichterten Zugriff auf den neuen Erkenntnisstand.

Industrie 4.0 Profitabel gibt KMU einen Praxisleitfaden an die Hand, welcher zum einen die Möglichkeiten von CPS-Technologien aufzeigt und zum anderen die Bewertung von Investitionen in CPS-Technologien erleichtert und somit eine Unterstützung für die Investitionsentscheidung darstellt.

Das Ziel des Projekts wurde somit erreicht.

2. Wissenschaftlich technische und wirtschaftliche Problemstellung

Eine leistungsfähige Intralogistik ist eine Grundvoraussetzung für das Gelingen von Industrie 4.0. Für die Flexibilisierung der Produktionsprozesse sind vollständig integrierte Versorgungsketten mit einem hohen Vernetzungsgrad erforderlich. Um dies zu erreichen müssen Unternehmen in neue CPS-Technologien in der Intralogistik investieren. Durch den Einsatz von CPS-Technologien in der Intralogistik werden umfassende Performancesteigerungen erwartet. Experten erwarten insbesondere

- eine schnellere Durchführung von Bearbeitungsschritten (z.B. automatisiertes Aufnehmen, Lesen und Ordnen der Kommissionierbelege) und Reduzierung der Intralogistikprozesszeiten,
- einen Wegfall manueller Bearbeitungsschritte (z.B. durch automatisierte Datenerfassung und -übertragung, fahrerlose Systeme),
- eine Reduzierung von Fehlern (z.B. durch automatisierte Informationsversorgung) und
- eine Erhöhung der Flexibilität der Intralogistikprozesse.

Der Einsatz von CPS-Technologien in der Intralogistik ist in der Praxis jedoch bisher gering. Durch eine Profitabilitätsbewertung von CPS-Technologien in der Intralogistik kann eine der wesentlichen Umsetzungshürden des Konzepts Industrie 4.0 beseitigt werden. Grundlage einer Profitabilitätsbewertung ist die Gegenüberstellung von erzielter Performancesteigerung und verursachten Kosten. Unternehmen stehen hierbei vor der Herausforderung die zumeist schwer identifizier- als auch quantifizierbaren Performancesteigerungen verlässlich zu ermitteln. Auch die Beurteilung der Kosten einer CPS-Technologie ist nicht trivial. Durch die Vernetzung der Logistiksysteme untereinander und mit anderen Bereichen (bspw. Produktion, Controlling) gestaltet sich insb. die Quantifizierung von Implementierungs- und Betriebskosten als schwierig. Häufig kann nur ein Teil der Kosten direkt identifiziert und monetär bewertet werden. Ein Großteil der Kosten fällt hingegen nicht direkt in der Intralogistik an, sondern resultiert in Form von Struktur- und Begleitkosten aus planenden, steuernden oder überwachenden Tätigkeiten. Darüber hinaus müssen die Kosten neuer CPS-Technologien im un-

ternehmensspezifischen Kontext unter Betrachtung bereits bestehender Systeme beurteilt werden. So sind ggf. auch Folge- bzw. Zusatzinvestitionen zu berücksichtigen, die eine Einbindung der CPS-Technologie in bestehende Systeme erst ermöglichen.

Die zentrale Forschungsfrage des Vorhabens lautete deshalb:

Wie kann die Profitabilität von Investitionen in CPS-Technologien für die Verbesserung der Intralogistik von Unternehmen mit konvergierender Fertigung bewertet werden?

Für die Beantwortung der Forschungsfrage mussten folgende Unterfragen aufgegriffen werden, die strukturgebend für die weitere Vorgehensweise waren:

- Welche CPS-Technologien eignen sich grundsätzlich für die Verbesserung der Intralogistik von KMU und wie können diese klassifiziert werden?
- Wie können die Performancesteigerungen der identifizierten CPS-Technologien qualitativ bewertet werden?
- Wie können die Kosten der identifizierten CPS-Technologien quantifiziert werden?
- Wie muss ein Verfahren konzipiert werden, damit KMU selbstständig Investitionen in CPS-Technologien bewerten können?

3. Gegenüberstellung angestrebter Ziele und erzielter Ergebnisse

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer Methodik, mit der Unternehmen in die Lage versetzt werden, die Wirtschaftlichkeit von Investitionen in CPS-Technologien zu bewerten, um diese frühzeitig abzusichern. Mit der entwickelten Methode können die Nutzenpotenziale (Performancesteigerungen) den Kosten von CPS-Technologien gegenübergestellt werden. Auf Basis dieser Gegenüberstellung wird – im Sinne einer Profitabilitätsanalyse – ersichtlich, ob Investitionen in CPS-Technologien wirtschaftlich sind. Mit diesem übergeordneten Ziel gehen vier Teilziele einher. Im Folgenden werden diese vier Teilziele (entnommen aus dem Forschungsantrag) den erreichten Ergebnissen der Arbeitspakete des Forschungsvorhabens gegenübergestellt.

Teilziel 1: Identifizierung praxisrelevanter CPS-Technologien für die Intralogistik und Entwicklung eines geeigneten Klassifizierungsschemas

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Das erste Teilziel bezieht sich auf die zu untersuchenden CPS-Technologien, welche im weiteren Verlauf hinsichtlich ihrer Profitabilität bewertet werden sollen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, welche CPS-Technologien aus Praxissicht grundsätzlich relevant sind und in welchen Intralogistikbereichen diese eingesetzt werden können. Bisher existiert keine systematische Aufbereitung praxisrelevanter CPS-Technologien im Allgemeinen und mit Bezug zur Intralogistik im Speziellen.

Korrespondierende Ergebnisse des Forschungsprojekts: Im Forschungsprojekt wurden zunächst verschiedenartige CPS im Rahmen eines Technologiereviews zusammengetragen und zu übergeordneten Kategorien zusammengefasst. Im Anschluss wurde die gesamte Intralogistik betrachtet und hierbei ein Referenzmodell abgeleitet, welches sämtliche intralogistische Prozesse umfasst. Dabei wurde zu jedem Intralogistikprozess der entsprechende Material- und Informationsfluss erhoben und dokumentiert. Auf Basis eines morphologischen Kastens wurden schließlich die klassifizierten CPS-Technologien zu deren Einsatzschwerpunkte innerhalb der Intralogistik zugeordnet (vgl. AP1).

Teilziel 2: Entwicklung von Instrumenten zur Bewertung der Performancepotenziale von Investitionen in CPS-Technologien, auf Basis des Klassifikationsschemas

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Neben der Kostenbetrachtung von Investitionen müssen die Nutzenpotenziale der einzuführenden CPS-Technologie erhoben werden. Gerade klein- und mittelständische Unternehmen scheuen derartige Investitionen in neuere Technologien. Zum gibt einen gibt es aktuell eine Fülle an unterschiedlichen CPS-Technologien mit der gleichen Zielsetzung. Unternehmen wissen nicht welche Technologie sich zukünftig durchsetzen wird und nehmen eine abwartende Haltung ein. Zum anderen ist der Nutzen der Implementierung nur schwer im Voraus ersichtlich. Beides birgt die Gefahr, dass Unternehmen den technologischen Anschluss verlieren und somit ihre Wettbewerbsfähigkeit gefährdet ist. Ziel dieses AP ist es, die Entwicklung eines Werkzeugs zur Bewertung von quantitativen und qualitativen Nutzenpotentialen von CPS-Technologien.

Korrespondierende Ergebnisse des Forschungsprojekts: Die Grundlage der Nutzenbewertung bilden, gemeinsam mit dem projektbegleitenden Ausschuss, entwickelt Potenziale von CPS-Technologien. Ziel war es, Verbesserungspotenziale aufzunehmen, die sich wünschenswerterweise durch den Einsatz von CPS-Technologien erzielen lassen. Die Nutzenbewertung gestaltete sich allerdings aufgrund unterschiedlicher Prozesse und Strukturen unternehmensübergreifend als schwierig. Darüber hinaus lassen sich Durchlaufzeit-Reduzierung sowie Transparenz-Erhöhung nur schwer monetär bewerten. Die Nutzenbewertung zielt daher ausschließlich auf qualitative Nutzenpotenziale ab. Zum einen lassen sich quantitative Nutzenpotenziale sich nur sehr schwer erheben und zum anderen ist die Aussagekraft aufgrund unzureichender Datenbasis und -qualität nicht aussagekräftig. Die in AP1 ermittelten CPS-Technologien wurden daraufhin den quantitativen Nutzenkriterien gegenübergestellt und mit Hilfe von Fachexperten aus Industrie und Wissenschaft bewertet. Die Nutzenbewertung kann vorangestellt an die Kostenbewertung erfolgen, so dass den Unternehmen nur jene CPS-Technologien vorgeschlagen werden die den gewünschten Nutzen erfüllen.

Teilziel 3: Weiterentwicklung des Life-Cycle-Costing zur Kostenbeurteilung von CPS-Technologien in der Intralogistik, auf Basis des Klassifikationsschemas

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Für eine Profitabilitätsbewertung muss die Performance den durch die Einführung und den Betrieb von CPS verursachten Kosten gegenübergestellt werden. Durch die Vernetzung von Systemen innerhalb der Unternehmen gestaltet sich insbesondere die adäquate Abbildung der Kosten als schwierig. Häufig besteht das Problem, dass sich viele Kosteneffekte nicht direkt erkennen und monetär bewerten lassen. Für die ganzheitliche Kostenermittlung von CPS eignet sich das Life Cycle Costing. Allerdings muss dieses in geeigneter Weise weiterentwickelt werden, um neben der Beurteilung der Anschaffungskosten auch die Implementierungs- und Betriebskosten vollumfänglich erfassen zu können.

Korrespondierende Ergebnisse des Forschungsprojekts: Als Grundlage für die Weiterentwicklung des Life Cycle Costing wurden im Forschungsprojekt zunächst relevante Life Cycle Costing-Ansätze zu verschiedenen Anwendungsfällen identifiziert. Anschließend wurden Gemeinsamkeiten im Vorgehen und wichtige Prinzipien bei der Analyse von Lebenszykluskosten herausgearbeitet. Abschließend wurde unter Berücksichtigung der Prinzipien eine Checkliste relevanter Kostenbestandteile als Grundlage für eine Profitabilitätsbewertung von CPS aufgestellt und exemplarisch aufgezeigt, wie diese verwendet werden kann (vgl. AP3).

Teilziel 4: Zusammenführung zu einem Verfahren zur Profitabilitätsbewertung von Investitionen in CPS-Technologien in der Intralogistik

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Die ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsbewertung von Investitionen in CPS-Technologien in der Intralogistik umfasst neben den zu realisierenden Potenzialen ebenfalls die entstehenden Kosten. Beginnend bei der Auswahl einer geeigneten CPS-Technologie für den jeweiligen Prozessschritt der Intralogistik (vgl. AP1), soll das Verfahren die Profitabilität einer mit CPS-Technologie unterstützten Intralogistik aufzeigen. Dazu sollen die identifizierten Potenziale (vgl. AP2) und die zum Zeitpunkt entstehenden Kosten (vgl. AP3) betrachtet werden. In Abstimmung mit KMU des projektbegleitenden Ausschusses soll so ein Verfahren entwickelt werden, welches die selbständige Bewertung von Investitionen in CPS-Technologien für die Intralogistik zulässt.

Korrespondierende Ergebnisse des Forschungsprojekts: Die Ergebnisse aus dem AP2 und AP3 wurden in ein praxistaugliches Verfahren überführt, welches die unternehmensspezifischen Charakteristiken von KMU berücksichtigt. Die aus AP1 zugrundeliegende Morphologie der CPS-Technologien, ermöglicht die Auswahl einer geeigneten Technologie für den jeweiligen Einsatzort im innerbetrieblichen Warentransport. Die Berechnung der Profitabilität ergibt sich durch die Betrachtung der bisherigen Kosten im Vergleich zu den entstehenden Kosten durch die Nutzung einer CPS-Technologie. Die Profitabilitätsbewertung wurde durch Fallstudien mit Unternehmen unterschiedlicher Größe validiert und angepasst. Das praxistaugliche Verfahren wurde in einen Softwaredemonstrator überführt und ist für die divergierenden Anforderungen von KMU anwendbar.

4. Darstellung erzielter Ergebnisse

Im Folgenden werden detailliert die Inhalte und Ergebnisse der einzelnen APs beschrieben, die für die Erarbeitung der in Kapitel 3 beschriebenen Ergebnisse des Forschungsvorhabens notwendig waren.

4.1 AP 1: Klassifizierung von CPS-Technologien in der Intralogistik

Im AP 1 werden CPS-Technologien für den Einsatz in der Intralogistik untersucht. Die Vorgehensweise hierzu ist dreistufig. Im Abschnitt 0 werden zunächst die CPS-Technologien definiert und anschließend im Rahmen eines Technologiereviews identifiziert. Abschnitt 4.1.2 beschreibt die Intralogistik und deren relevanten Teilbereiche. Das Referenzmodell (Abschnitt 4.1.3) beschreibt die einheitliche Vorgehensweise um intralogistische Prozesse unter Berücksichtigung von Material- und Informationsfluss abzubilden. Das AP schließt mit Abschnitt 4.1.4. Der morphologische Kasten klassifiziert die aktuell vorhandenen CPS-Technologien und deren Einsatzschwerpunkte innerhalb der Intralogistik.

Tabelle 1: Inhalte von AP 1

AP 1: Klassifizierung von CPS-Technologien in der Intralogistik	
Einsatz	<ul style="list-style-type: none"> • IPRI: 6 Personenmonate • IPA (AP-Federführung): 6 Personenmonate
Ergebnis	Klassifizierungsschema für identifizierte CPS-Technologien in der Intralogistik

Geplante Ergebnisse lt. Antrag	Erzielte Ergebnisse
Entwicklung eines Klassifizierungsschemas für CPS-Technologien in der Intralogistik	Morphologischer Kasten zur Klassifizierung der CPS-Technologien in der Intralogistik

4.1.1 Cyber-Physische Systeme

Im Mittelpunkt von Industrie 4.0 stehen intelligente Objekte bzw. Cyber-Physische Systeme (CPS). Der Begriff CPS entstand ursprünglich als Schlagwort in den USA.¹ Doch auch in Deutschland ist er inzwischen allgegenwärtig, so wird die Erforschung Cyberphysischer Systeme wesentlich durch die „Hightech-Strategie 2020“ der deutschen Bundesregierung vorangetrieben, die das Ziel verfolgt, die Wettbewerbsfähigkeit des

¹ Vgl. Bettenhausen und Kowalewski (2013), S.1

Standorts Deutschland in der Produktion und Anwendung von zukunftsweisenden internetbasierenden Technologien zu stärken².

In Wissenschaft und Praxis gibt es zahlreiche Definitionsversuche für CPS, die im Grad der Detaillierung und Ausgestaltung deutlich variieren. Hierbei handelt es sich jedoch um keine allgemein anerkannten Definitionen³. So definieren Bettenhausen und Kowalewski (2013) CPS eher allgemeinen als:

„eine Verknüpfung von realen (physischen) Objekten und Prozessen mit informationsverarbeitenden (virtuellen) Objekten und Prozessen über offene, teilweise globale und jederzeit miteinander verbundene Informationsnetze.“⁴

Sehr allgemein formuliert können CPS als Kombination eingebetteter Systeme – bestehend aus physikalischen Systemen (mechanischen, hydraulischen, elektrischen), Elektronik und Software – einerseits und globalen (Informations-)netzen wie dem Internet andererseits beschrieben werden⁵. Eingebettete Systeme, oder auch Embedded Systems, umfassen die Ausstattung von bislang „passiven“ Objekten mit Mikrocontrollern, Kommunikationssystemen, Identifikatoren (RFID, Barcode), Sensorik und Aktorik.⁶

Nach spezifischeren Definitionen, bspw. von Acatech, sind CPS intelligente Objekte, die

- *„über Sensoren unmittelbar physikalische Daten erfassen und durch Aktoren auf physikalische Vorgänge einwirken,*
- *erfasste Daten auswerten und speichern und aktiv oder reaktiv mit der physikalischen sowie der digitalen Welt interagieren,*
- *über digitale Kommunikationseinrichtungen untereinander sowie in globalen Netzen verbunden sind (drahtlos und/oder drahtgebunden, lokal und/oder global),*
- *weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen,*
- *über eine Reihe dedizierter, multimodaler Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen“.⁷*

² Vgl. acatech (2011), S.11; Kaufmann (2015), S. 4; Krüger und Lambrecht (2014), S.10

³ Vgl. Bettenhausen und Kowalewski (2013), S. 1

⁴ Bettenhausen und Kowalewski (2013), S. 2

⁵ Vgl. acatech (2011), S. 5, 10, 17

⁶ Vgl. BITKOM (2014), S. 19

⁷ acatech (2011), S. 13

Somit sind CPS smarte Objekte, die in der Lage sind, selbstständig Informationen auszutauschen, Tätigkeiten anzustoßen und sich gegenseitig über die gesamte Wertschöpfungskette zu steuern.

Alternativ kann ein Cyber-Physisches System als „intelligente Vernetzung von Menschen, Maschinen, Produkten, Objekten und IKT-Systemen“ verstanden werden. Die Kombination mehrerer CPS trägt zur Entstehung einer Smart Factory bei, einer vernetzten, flexiblen Produktionsumgebung, die mit Hilfe von CPS eigenständig, dynamisch dezentral und echtzeitnah gesteuert werden kann⁸.

In diesem Kontext ist anzumerken, dass die Verbindung von informationsverarbeitenden Systemen mit physischen Objekten bzw. Prozessen nicht neu ist, sondern schon seit den 1970er-Jahren in der Produktion und Automatisierung umgesetzt wird. Jedoch bestehen diese eingebetteten Systeme bisher primär als geschlossene Systeme, in Form von ortsfesten oder beweglichen Sensor-, Regelungs- oder Steuerungsdiensten. Von wesentlicher und neuartiger Bedeutung ist der Aspekt, dass die Vernetzung über offene und globale Informationsnetze, genauer über das Internet, erfolgt⁹.

Zur Umsetzung von CPS kommen folgende Standard-Technologien zum Einsatz: Radiofrequenzidentifikation (RFID) und Near Field Communication (NFC) zur automatischen Identifikation, jedoch NFC darüber hinaus auch zur Verarbeitung von Daten und Steuerung von Prozessen, drahtlose Sensornetze (WSN) zur Erfassung von (Umgebungs-)parametern und zur kommunikationstechnischen Vernetzung (der CPS untereinander), Echtzeitlokalisierungssysteme (RTLS) zur Positionsbestimmung und klassische Telematik-Module (Mikroelektronische Etiketten mit integrierten GPS-, GSM- und Sensormodulen) beispielsweise zur Überwachung von Lieferketten¹⁰.

Mittels der beschriebenen integrierten **Sensorik und Aktorik** sind CPS mit der Außenwelt beziehungsweise physischen Umgebung verbunden und über das Internet miteinander vernetzt. Dies führt gewissermaßen zu einer „Verschmelzung“ der physischen Welt mit der virtuellen Welt¹¹. Sensoren erfassen Daten aus der physikalischen Umwelt des Objekts, woraufhin diese umgewandelt und für netzbasierte Dienste zur Verfügung gestellt werden. Mittels Aktoren können CPS auf physikalische Vorgänge

⁸ Vgl. Kagermann u.a. (2013), S.5; BITKOM (2014), S. 19 f.

⁹ Vgl. Bettenhausen und Kowalewski (2013), S. 2; Geisberger und Broy (2012), S. 20

¹⁰ Vgl. bayme vbm (2014), S. 20 f.

¹¹ Vgl. acatech (2011), S. 5

einwirken und beispielsweise visuelle oder akustische Informationen an das Objekt bzw. den Anwender übermitteln¹².

Die aktuell rasanten Fortschritte in Richtung CPS resultieren wesentlich aus der hohen Entwicklungsgeschwindigkeit im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien, darunter wegweisend das exponentielle Wachstum der Rechenleistung, der Erfassungs-, Übertragungs- und Speicherkapazität sowie Entwicklungen in der Mikrosystemtechnik¹³. Schon heute ist die Informationstechnologie nahezu allgegenwärtig, im Sinne des „Ubiquitous Computing“, was den Trend in Richtung CPS weiter verstärkt¹⁴.

Wichtige Anwendungsfelder und Nutzenpotenziale

CPS weisen einen **disruptiven Charakter** auf. Sie werden als wesentliche Wachstumstreiber der deutschen Wirtschaft angesehen und ihnen wird die Fähigkeit zugesprochen, die Funktionalität und Wettbewerbsfähigkeit einer Vielzahl von Produkten zu verändern, sowie klassische Wirtschaftsbereiche zu transformieren. Gleichzeitig tragen sie zur Entstehung neuer Geschäftsmodelle bei und bringen neue Anbieter von Cyber-Physischen Systemen und verbundenen Technologien in die Märkte¹⁵. CPS können als sogenannte „enabling technologies“ beschrieben werden, die Anstöße zu weiteren innovativen Lösungen geben.¹⁶ Weiterhin charakteristisch für CPS ist, dass diese herkömmliche Unternehmens-, Systems-, und Bereichsgrenzen überschreiten¹⁷. Schon heute werden Cyber-Physische Systeme in einfacher Form genutzt, beispielsweise als vernetzte Navigationssoftware, die auf Basis von Mobilfunkdaten Stauinformationen aus aktuellen Bewegungsprofilen ableitet. Weitere Beispiele sind vermehrt in den Bereichen Automobil, Luftfahrt und Zugverkehr zu finden¹⁸.

Bekannte Forschungsbeispiele von CPS sind sogenannte Smart Grids, Energienetze bestehend aus Cyber-Physischen Systemen, welche die Koordination von zahlreichen Erzeugern regenerativer Energien über IT-Netze übernehmen, um optimale, bedarfsgesteuerte und beständige Energienetze sicherzustellen¹⁹. Alternativ hierzu sind

¹² Vgl. acatech (2011), S. 5; BITKOM (2014), S. 19

¹³ Vgl. acatech (2011), S. 11 ff.; Geisberger und Broy (2012), S. 9

¹⁴ Vgl. Geisberger und Broy (2012), S. 19

¹⁵ Vgl. acatech (2011), S. 5

¹⁶ Vgl. acatech (2011), S. 11

¹⁷ Vgl. Bettenhausen und Kowalewski (2013), S. 2

¹⁸ Vgl. acatech (2011), S. 5, 13

¹⁹ Vgl. acatech (2011), S. 5; Bettenhausen und Kowalewski (2013), S. 2

Smart-Health-Systeme zu nennen, welche Ärzte und Patienten mithilfe von körpernaher Sensorik, medizinischen Informationssystemen und des Internets vernetzen und somit Ferndiagnosen ermöglichen²⁰.

Wesentliche Vorteile versprechen CPS in den Bereichen Produktion, Transport und Logistik. Die Vision hinter CPS ist die Schaffung von autonomen Produktionssystemen, die sich selbständig organisieren, im Sinne einer Smart Factory²¹. Weitere Potenziale bestehen in der durchgehenden Verfügbarkeit von Daten und der Möglichkeit zum Austausch von Informationen zwischen allen Partnern der Wertschöpfungskette²². In der Nutzungsphase, dienen die erfassten (Zustands-)Daten beispielsweise zur eigenverantwortlichen und bedarfsgerechten Koordination der Wartung durch die CPS (Stichwort Predictive Maintenance)²³. Hinzu kommt, dass durch CPS die Voraussetzung für umfassende Datenanalysen durch neue Algorithmen und Dienste geschaffen wird (Stichwort Cloud Computing) und eine erhöhte Transparenz für den Anwender entsteht, beispielsweise über den Anlagenstatus. Dies erlaubt eine höhere Flexibilität in der Produktion und eine bessere Auslastung der Anlagen²⁴.

Weiterhin führt der Einsatz von CPS in der industriellen Produktion zu einer Steigerung der Kundenzufriedenheit, durch die Möglichkeit nahezu in Echtzeit auf Veränderungen der Marktbedingungen reagieren zu können. Gleichzeitig führen sie zu einer Optimierung der Produktionsprozesse²⁵.

Neben Effizienzsteigerungen in der Produktion und Logistik haben CPS Auswirkungen auf weitreichende Bereiche wie Sicherheit, Effizienz, Komfort und die Gesundheit der Menschen. Ihnen wird erhebliches Potenzial im Hinblick auf die gesellschaftlichen Herausforderungen der heutigen Zeit zugesprochen, wie beispielsweise in Bezug auf den demographischen Wandel, Ressourcenknappheit und Klimawandel, Globalisierung oder Mobilität²⁶.

²⁰ Vgl. acatech (2011), S. 5; Bettenhausen und Kowalewski (2013), S. 2

²¹ Vgl. acatech (2011), S. 5

²² Vgl. Bettenhausen und Kowalewski (2013), S. 5

²³ Vgl. acatech (2011), S. 5; BITKOM (2014), S. 19

²⁴ Vgl. Bettenhausen und Kowalewski (2013), S. 5

²⁵ Vgl. acatech (2011), S. 23

²⁶ Vgl. acatech (2011), S. 5, 11

Wesentliche Potenziale von CPS werden in der Automobilindustrie, darunter besonders in der Elektromobilität, gesehen sowie in Bereichen wie Medizintechnik, Energiewirtschaft, Maschinen- und Anlagenbau, Landwirtschaft und Mobilkommunikation²⁷. Insgesamt wird der Automationsgrad durch den Einsatz von CPS weiter zunehmen²⁸. Neben diesen Nutzenaspekten sind einige (technische) Umsetzungsvoraussetzungen zu erfüllen.

Die technischen Voraussetzungen für die Umsetzung von CPS umfassen den umfassenden mobilen Zugang zum Internet, Zugriffsmöglichkeiten auf die physikalische Infrastruktur durch entsprechende Sensorik und Aktorik sowie Algorithmen für die Verarbeitung und Analyse von Informationen. Zudem müssen Standards entwickelt werden, um die Interoperabilität sicherzustellen, um nur wenige Umsetzungsvoraussetzungen zu nennen²⁹.

Bezug zu Intralogistik - CPS weisen wesentliche Potenziale für die Intralogistik auf

Die Intralogistik, oder innerbetriebliche Logistik, umfasst die Steuerung der innerbetrieblichen Material- und Informationsflüsse eines Unternehmens (im weiteren Sinne umfasst betrieblich auch Flughäfen, Hafen, Distributionszentren etc.). Ziel ist die Optimierung und Effizienzsteigerung von innerbetrieblichen Logistikprozessen sowie damit verbundene Kostensenkungen³⁰. Im Hinblick auf die gesamte Wertschöpfungs- beziehungsweise Lieferkette, liegen die Verantwortlichkeiten der Intralogistik bei allen in oder an einem Standort stattfindenden Prozessen. Im Gegensatz dazu schließt die Transportlogistik, oder externe Logistik, den Transport bzw. das Handling der Güter zwischen Standorten beziehungsweise zwischen Standort und Endkunde ein³¹. Aufgabenbereiche betreffen die innerbetriebliche Beschaffungslogistik, Distributions- sowie Produktionslogistik. Zu den zentralen operativen Funktionen der Intralogistik gehören Lagern, Transportieren, Umschlagen, Kommissionieren und Verpacken. Konkretes Ziel ist hierbei „die Bereitstellung des richtigen Werkstückes und des richtigen Werkzeuges in der richtigen Menge und Qualität, zur richtigen Zeit und am richtigen Ort zu minimalen Kosten“³².

²⁷ Vgl. acatech (2011), S. 13 f.

²⁸ Vgl. Bettenhausen und Kowalewski (2013), S.7

²⁹ Vgl. acatech (2011), S. 6

³⁰ Vgl. Martin (2016), S. 4; Arnold (2006), S. 21

³¹ Vgl. Arnold (2006), S. 21

³² Martin (2016), S. 9

Klassifizierung von CPS und Verweis auf Technologiekompendium

Innerhalb des Projekts erfolgt die Recherche auf Grundlage einer „breiteren“ Definition von CPS³³. Dies resultiert zum einen daher, dass eine Vielzahl der „eng“ definierten CPS heutzutage noch in der Entwicklungsphase sind und KMU somit nicht konkret zur Anwendung vorgeschlagen werden können. Zudem muss berücksichtigt werden, dass kleine Unternehmen – deren Intralogistik oftmals noch durch viele manuelle Tätigkeiten geprägt ist und deren Ressourcen und Kapital begrenzt sind – mit weniger innovativen Lösungen gegebenenfalls Potenziale besser ausschöpfen können. Darin begründet sich die Absicht, eine umfassende Übersicht zu erstellen, um somit auch die Flexibilität von KMU zu bewahren.

Die Analyse von verfügbaren CPS-Technologien innerhalb der Intralogistik erfolgt mithilfe von Technologiereviews (Literatur- und Anbieterrecherche) sowie Prozessanalysen und Experteninterviews in den Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses. Als Schlagwörter für die Literatur- und Anbieterrecherche wurden folgende Begriffe herangezogen:

- Cyber-Physische Systeme/Cyber-Physical System
- Eingebettete Systeme/Embedded System
- Intelligente technische Systeme
- Smart Logistics
- Intelligente Objekte
- Assistenzsysteme
- Technologien für Industrie 4.0
- Digitale Technologien in der Intralogistik
- Smart Objects
- Smart Devices
- Kommissionierung 4.0

Die Ergebnisse der Technologiereviews und Prozessanalysen werden anschließend in einen morphologischen Kasten überführt, der die Grundlage des Klassifikationschemas bildet. Für jeden Teilprozess innerhalb des Referenzprozesses wird ein separater morphologischer Kasten erstellt. Der morphologische Kasten ist eine Kreativitätstechnik, die es ermöglicht, alle möglichen Lösungsmöglichkeiten zu einer zuvor

³³ Siehe Definition von Bettenhausen und Kowalewski (2013), S. 2

definierten Problematik in strukturierter Form als Totallösungssystem darzustellen³⁴. Zunächst muss daher eine genaue Definition und Analyse des Problems erfolgen. Das Ergebnis der Klassifizierung ist ein Technologie-Kompendium für CPS-Technologien in der Intralogistik, welches kleine und mittelständische Unternehmen adressieren soll, um ihnen eine Übersicht über gegenwärtige und zukünftige (CPS)-Technologien für die Intralogistik zu geben.

Das Technologiekompendium enthält zunächst einen Überblick der Technologien sowie deren potenzielle Anwendungsfelder innerhalb der Intralogistik (bezogen auf die theoretisch Ermittelten und im Rahmen der Kick-Off Veranstaltung sowie in Experteninterviews validierten Teilprozesse der Intralogistik). Daraufhin wird jede Technologie in einem Steckbrief vorgestellt. Dieser ist nach dem folgenden Schema aufgebaut:

Zunächst beinhaltet er die Bezeichnung und eine kurze **Beschreibung** der Technologie sowie **Nutzenpotenziale**, **Einsatzgebiete** und **spezifische Eigenschaften** der Technologie wie beispielsweise Robustheit, Gewichtsspanne, Akkulaufzeit, Verbindungsstandards. Außerdem wird festgehalten, ob ein (menschlicher) **Anwender** zur Nutzung der Technologie erforderlich ist oder ob sich die Technologie autonom steuern kann. Zudem wird die **Eingabeform** (akustisch, taktil, gestisch oder optisch) aufgezeigt und welche **Eingabegeräte** (Touchfeld, Kamera, Mikrofon, Tastknöpfe) hierfür verwendet werden. Sofern bereits verfügbar, werden konkrete **Anbieter** für Software und Hardware vorgestellt. Weiterhin wird ein **konkretes Anwendungsbeispiel** in der Logistik aufgezeigt.

Nachfolgend wird beispielhaft ein Steckbrief des Technologiekompendiums für das RFID-Armband dargestellt.

³⁴ Vgl. Trommsdorff und Steinhoff (2013), S. 291 f.

Cyberphysische Systeme

RFID Armband/ Handschuh



Anwendungsgebiet	Kommissionierung, Montage, Mensch- Maschine- Interaktion
Bedienung	Vollautomatisch, keine Bedienung des Anwenders nötig Armband enthält LED und Tweeter zur Statusausgabe
Funktion	Integriertes RFID-Lesegerät Bauteil- und Güteridentifikation im laufenden Prozess Verfolgung von Güterströmen in Echtzeit Dezentrale Datenerfassung zur Überprüfung von Handlingprozessen Ausgabe von Warnhinweisen bei Griff Fehlern Handschuh: Leseantenne an Handinnenfläche für gezieltere Identifikation
Vorteile	Vermeidung von zusätzlichen Prozessschritten wie Quittieren im Vergleich zur Verwendung von Handheld-Geräten Güteridentifikation „mit freien Händen“, keine Einschränkung im Arbeitsablauf Geringe bis keine Einarbeitungszeit Spezielle Software ermöglicht weitere Funktionen wie die Dokumentation von Umschlagsprozessen oder Überprüfung von Greifoperationen im Montageprozess
Voraussetzungen	Verwendung von RFID-Sendern Anbindung über ZigBee-Standard (Funkschnittstelle), auch WLAN oder Bluetooth möglich Übergeordnete Softwareinfrastruktur (ERP- System) Ideale Ergänzung durch Pick-by-Light-Systeme oder Pick-by-Voice-Systeme
Energieversorgung	Batterie
Anbieter/ Entwickler	Fraunhofer IPA, Treston GmbH

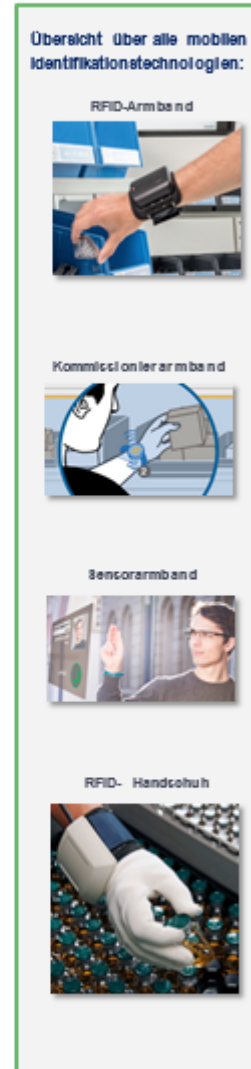


Abbildung 1: Steckbrief RFID-Armband

Auf Basis der Literatur- und Anbieterrecherche wurde im Rahmen des APs folgende Kategorisierung erarbeitet (s. Abbildung 1).



Abbildung 2: Kategorisierung von CPS im Rahmen der Intralogistik

Wearable Computing/ Smarte Endgeräte

Wearable Computing Systeme umfassen tragbare Computertechnologien, die an Körper, Kleidung oder Kopf angebracht werden und den Anwender im Prozess als "intelligente mobile Assistenz" unterstützen³⁵. Zur Abgrenzung der verschiedenen Technologien wird im Rahmen des Forschungsprojektes zwischen „passiven“ und „aktiven“ Wearable Computing Geräten differenziert.

„Passive“ Wearable Computing Systeme dienen der automatischen (passiven) Objektidentifikation und der Quittierung von Entnahmen und Abgaben zur Unterstützung des Anwenders bei Greifprozessen³⁶. Passive Wearable Computing Systeme können mithilfe von verschiedenen Technologien umgesetzt werden (RFID, Gestensteuerung durch Sensorik, induktive Nahfeldforschung etc.) und werden i.d.R. in Kombination mit anderen Technologien, beispielsweise einer Datenbrille eingesetzt, welche den Anwender aktiv anleiten.

„Aktive“ Wearable Computing Anwender leiten den Nutzer durchgehend und ortsungebunden durch den Prozess, indem dem Anwender alle relevanten Informationen angezeigt werden. Darunter fallen bekannte Beispiele wie Smartphones, Smartwatches

³⁵ Vgl. Rügge (2008), S. 35

³⁶ Vgl. Günthner u.a. (2017), S. 115

etc.³⁷. Eine fortgeschrittene Form von Mobile Computing ist die Augmented Reality Technologie, die nachfolgend näher erläutert wird.

Kameragestützte Assistenzsysteme

Unter kamerabasierte Assistenzsysteme versteht man Systeme, die in Kombination mit anderen CPS-Geräten den Werker in der manuellen Montage / Fertigung aber auch z. B. im Wareneingang unterstützen. Durch ein solches Assistenzsystem die Montage des korrekten Bauteils an der korrekten Einbaustelle gewährleistet werden.

Augmented Reality (Datenbrille)

Augmented Reality ermöglicht die Projektion von relevanten virtuellen Informationen direkt in das Sichtfeld des Anwenders, der weiterhin störungsfrei die Umgebung wahrnehmen kann (unter Einsatz einer Datenbrille). Zudem hat der Mitarbeiter freie Hände für seine Kernaufgabe zur Verfügung. Der Einsatz von Augmented Reality kann komplexe Aufgaben wesentlich vereinfachen, da aufgabenspezifische Informationen und Anleitungen direkt visuell eingeblendet werden. In der Kommissionierung wird der Anwender beispielsweise durch den aktuellen Auftrag geführt (Anzeige Lagerort, Anzahl und Art Artikel etc.). Durch integrierte Sensorik (bspw. durch eine integrierte Kamera) besteht außerdem die Möglichkeit, dass der einer automatischen Fehlerüberprüfung oder Quittierung. Neben der Datenbrille kann Augmented Reality auch mit anderen Endgeräten wie Smartphones, Smartwatches umgesetzt werden³⁸.

Pick-by-Technologien/ Assistenzsysteme

Pick-by-Technologien unterstützen den Kommissionierer im manuellen Kommissionierprozess mittels verschiedener Technologien, darunter die in der Praxis verbreitetsten: Pick-by-Voice- und Pick-by-Light-Systeme. Mittels Pick-by-Voice werden dem Anwender per Kopfhörer relevante Auftragsinformationen übermittelt (Nummer des Gangs, Regal und Lagerfach). Meist erfolgt die Umsetzung in Kombination mit Prüzfibern am Entnahmeplatz, die der Anwender über ein Mikrofon zurückmelden muss. Pick-by-Light folgt einem ähnlichen Prinzip, nach welchem visuelle Signale wie Signal-

³⁷ Vgl. **Fehler! Textmarke nicht definiert.** Rügge (2008), S. 35

³⁸ Vgl. Günthner u.a. (2014), S. 315 f.; BITKOM (2014), S. 19; Günthner u.a. (2017), S. 220

lampen am Lagerfach den Anwender anleiten, ohne dass dieser auf zusätzliche Hilfsmittel angewiesen ist³⁹. Gleichzeitig kann Augmented Reality als Pick-by-Vision auch in diese Kategorie eingeordnet werden.

Fahrerlose Transportfahrzeuge/ -systeme und -robotik

Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) sind dezentral gesteuerte, fahrerlose Transportmittel, die über verschiedene Technologien wie RFID, Sensorik, Magnet- oder Laserscanner etc. autonom Aufträge untereinander verwalten und durch die Lagerumgebung navigieren, um den innerbetrieblichen Transport zu unterstützen. Zudem können Daten mittels WLAN vom FTF an Informationssysteme übertragen werden. Fahrerlose Transportroboter verfügen über Zusatzfunktionen, die den Anwender zusätzlich bei der Kommissionierung, Bestandserfassung etc. unterstützen. Fahrerlose Transportsysteme sind dezentral gesteuerte, (vorübergehend) flurgebundene Fördersysteme⁴⁰.

Intelligenter Behälter

Intelligente Behälter sind mit Sensorik und Identifikationstechnologien ausgestattete Behälter, die zum einen eindeutig identifiziert werden können (beispielsweise durch RFID-Transponder) und zum anderen durch integrierte Sensoren - beispielsweise zur Erfassung der Füllstände – detaillierte Auskunft über ihren Inhalt geben können. Dadurch wird der intelligente Behälter zum automatischen Informationsträger, der in der Lage ist, selbständig Nachschubbestellungen auszulösen (Kanban), den Anwender bei Kommissioniervorgängen zu unterstützen oder zur Bestandserfassung beizutragen⁴¹.

Weiterhin beinhaltet das Technologiekompendium ergänzende CPS, die sich aktuell noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase („Leuchtturmprojekte“) befinden und noch nicht auf die Intralogistik angewendet werden können, die jedoch potenzielle Anwendungen für die Zukunft der Intralogistik darstellen.

³⁹ Vgl. Bichler u.a. (2010), S. 210

⁴⁰ Vgl. Ullrich (2014), S. 10, 37; Trenkle und Furmans (2017), S. 53 ff.

⁴¹ Vgl. BITKOM (2014), S. 19; Fraunhofer IIS (2014); Fraunhofer IML (2015)

4.1.2 Intralogistik

Die Intralogistik, oder innerbetriebliche Logistik, umfasst die Steuerung der innerbetrieblichen Material- und Informationsflüsse eines Unternehmens (im weiteren Sinne umfasst betrieblich auch Flughäfen, Hafen, Distributionszentren etc.). Ziel der Intralogistik ist die Optimierung und Effizienzsteigerung von innerbetrieblichen Logistikprozessen sowie damit verbundene Kostensenkungen⁴². Im Hinblick auf die gesamte Wertschöpfungs- bzw. Lieferkette, liegen die Verantwortlichkeiten der Intralogistik bei allen in oder an einem Standort stattfindenden Prozessen. Im Gegensatz dazu schließt die Transportlogistik, oder externe Logistik, den Transport bzw. das Handling der Güter zwischen Standorten bzw. zwischen Standort und Endkunde ein⁴³. Aufgabenbereiche betreffen die innerbetriebliche Beschaffungslogistik, Distributions- sowie Produktionslogistik. Zu den zentralen operativen Funktionen der Intralogistik gehören Lagern, Transportieren, Umschlagen, Kommissionieren und Verpacken. Konkretes Ziel ist hierbei „die Bereitstellung des richtigen Werkstückes und des richtigen Werkzeuges in der richtigen Menge und Qualität, zur richtigen Zeit und am richtigen Ort zu minimalen Kosten“⁴⁴.

Im Rahmen eines gemeinsamen Workshops, während des PA-Treffens zwischen den Forschungsstellen und den kooperierenden Unternehmen, wurde ein möglicher Referenzprozess der Intralogistik für die Umsetzung ausführlich diskutiert und validiert. Dabei stellte sich heraus, dass die vorgedachte funktionale Sicht des Intralogistikprozesses aus Sicht der Industriepartner nicht ausreichend detailliert war. In Folge dessen wurde das Modell auf die Prozesssicht (physische Sicht) angepasst. Dieses beinhaltet zusätzlich die Verfeinerung der Intralogistikprozesse und die Definition von Prozessbausteinen anhand der Aspekte Prozessschritte, Übergabeereignisse und intralogistische Objekte.

⁴² Vgl. Martin (2016), S. 4; Arnold (2006), S. 21

⁴³ Vgl. Arnold (2006), S. 21

⁴⁴ Martin (2016), S. 9

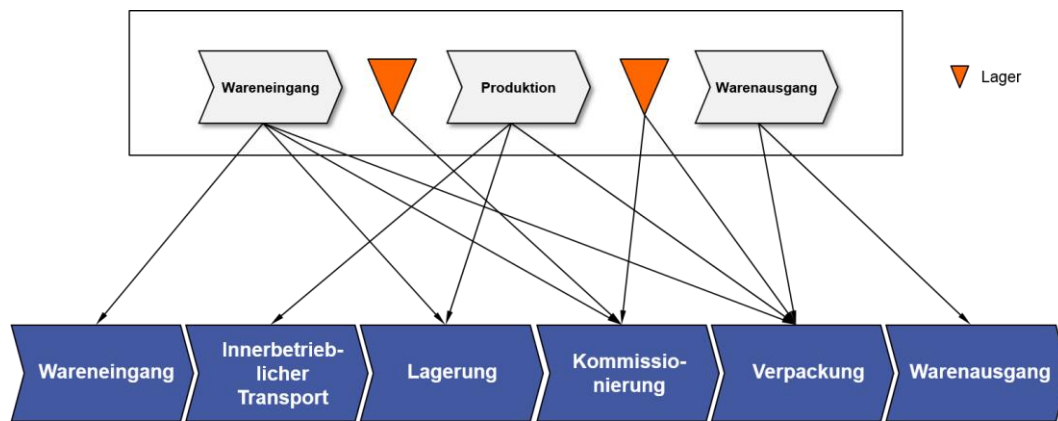


Abbildung 3: Referenzprozess Intralogistik

Die zu berücksichtigten Prozessmodule bleiben unverändert und werden im Folgenden näher erläutert.

Wareneingang

Der Wareneingang (WE) stellt die Schnittstelle des Unternehmens zum Beschaffungsmarkt dar und trennt damit den externen Güterfluss vom innerbetrieblichen Materialfluss⁴⁵. Im Wareneingang werden die Güter/Waren physisch angenommen und anschließend entsprechenden Ladehilfsmitteln und Lagerbereichen zugeordnet⁴⁶. Die Gestaltung der Wareneingangsfunktion hat einen wesentlichen Einfluss auf die Funktions- und Leistungsfähigkeit des Lagers bzw. der anschließenden Prozesse⁴⁷. Zu den Aufgaben im Wareneingang gehören die Prüfung der gelieferten Waren / Güter in Form eines Abgleichs des Lieferscheins mit der Lieferung und des Lieferscheins mit der vorangehenden Bestellung. Die Lieferscheinkontrolle beinhaltet die Prüfung, ob die richtigen Einheiten in der richtigen Menge und ohne sichtbare äußere Schäden geliefert wurden und die anschließende Dokumentation. Gegebenenfalls erfolgt an dieser Stelle eine gesamte oder stichprobenhafte Qualitätskontrolle nach technischen Merkmalen. Nach dieser physischen Warenaufnahme werden die Güter systemseitig gebucht und Lagerplätzen zugewiesen. Anschließend erfolgt die Bereitstellung der Waren für den nachgelagerten Prozess, typischerweise der Einlagerung⁴⁸.

Innerbetrieblicher Transport

⁴⁵ Vgl. Martin (2016), S. 308

⁴⁶ Vgl. Heidenblut und ten Hompel (2011), S. 340

⁴⁷ Vgl. Gudehus (2010), S. 595

⁴⁸ Vgl. Seeck (2010), S. 135

Der innerbetriebliche Transport findet zwischen Wareneingang, Lager, Produktionsstellen und dem Warenausgang statt und beinhaltet die Weitergabe der Güter/Teile⁴⁹. Die DIN 30781 setzt den Begriff innerbetrieblicher Transport mit „Fördern“ gleich. Die Hauptaufgabe des innerbetrieblichen Transports umfasst somit die „Raumüberwindung von Objekten innerhalb des Unternehmens bzw. innerhalb von Betriebstätten („Lager, Produktion, Hallen, Werksgelände, Fabrikanlagen [...]“)⁵⁰. Hierbei werden unterschiedliche Transportmittel, sogenannte Fördermittel, häufig in Kombination mit Förderhilfsmitteln (Palette, Gitterbox) eingesetzt⁵¹.

Im Rahmen des Workshops wurde ergänzend festgehalten, dass es sich hierbei um eine ungebrochene Beförderung von Gütern von einem Aufnahme- zu einem Abgabebereich innerhalb des Betriebes handelt, beispielsweise vom Wareneingang zum Lager, vom Lager in die Fertigungsanlagen oder von der Fertigung zum Versand.

Lagerung

Die Lagerung umfasst die Vorratshaltung bzw. Zeitüberbrückung von Gütern und ist zwischen der Beschaffungsseite und Fertigungsseite bzw. Absatzseite einzuordnen. Die Lagerung gilt als bewusste Unterbrechung des Materialflusses⁵². Gründe für Lagerhaltung beinhalten die Sicherstellung der Materialversorgung für anschließende Produktionsprozesse, die Sicherstellung der Lieferfähigkeit, den Ausgleich von zeitlichen und mengenmäßigen Bedarfsschwankungen zwischen Beschaffung, Produktion und Absatz, die Sortierung der Einheiten zur Vereinfachung nachfolgender Kommissionierprozesse oder die Reifung und Veredelung von Gütern etc.⁵³. Parallel zu den physischen Lagerprozessen findet die systemseitige Lagerverwaltung statt. Diese umfasst die Verwaltung der Lagerplätze (Belegung und Freigabe), die durchgehende Bestandsführung und in definierten Abständen einen Abgleich zwischen systemseitigen Bestandsinformationen und physischen Beständen (Inventur)⁵⁴.

Im Rahmen des Workshops wurde zwischen den folgenden drei Lagervarianten unterschieden:

⁴⁹ Vgl. Arnold u.a. (2008), S. 6

⁵⁰ Wannewetsch (2014), S. 605

⁵¹ Vgl. Wannewetsch (2014), S. 605

⁵² Vgl. Martin (2016), S. 344

⁵³ Vgl. Martin (2016), S. 344

⁵⁴ Vgl. Seeck (2010), S. 136

- (Standard-)Lagerung umfasst die Bevorratung von Gütern an einem definierten Ort, auf unbestimmte Zeit (kein Zeitbezug) und i.d.R. ohne Zweckbezug. Der Artikel kommt lagerungsfähig an, d.h. die Lagerung erfolgt qualitätsneutral (kein Reifeprozess etc.).
- Pufferung beinhaltet eine definierte Bereitstellfläche als Sonderform der Lagerfläche, die Lagerung erfolgt ungeplant (ohne Bedarfsbezug) und ist nur für eine bestimmte Dauer gültig (Zeitbezug inbegriffen).
- Bereitstellfläche umfasst eine definierte Fläche als Sonderform der Lagerfläche und ist im Gegensatz zur Pufferfläche auftrags- bzw. zweckgebunden (Bedarfsbezug).

Kommissionierung

Nach der VDI-Richtlinie 3590, Blatt 1 wird Kommissionieren als „das Zusammenstellen von bestimmten Teilmengen (Artikeln) aus einer bereitgestellten Gesamtmenge (Sortiment) aufgrund von Bedarfsinformationen (Aufträge)“ definiert. Hierbei werden die Güter aus einem lagerspezifischen in einen verbrauchsspezifischen Zustand überführt⁵⁵. Die Kommissionierung wird in der Literatur häufig als Kernelement der Intralogistik beschrieben und hat einen bedeutenden Einfluss auf den wirtschaftlichen Erfolg eines (logistischen) Unternehmens. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass die Kommissionierung den personal- und kostenintensivsten Bereich innerhalb der Logistik darstellt. Gleichzeitig stehen die Kommissioniervorgänge unmittelbar mit der Lieferqualität für den Kunden und damit der Kundenzufriedenheit in Verbindung⁵⁶. Kommissionieraufträge sind entweder produktionsorientiert und beziehen sich auf die Materialbereitstellung für eine Produktionsstelle oder absatzorientiert in der Form von Kundenaufträgen⁵⁷. Zu den Aufgaben innerhalb der Kommissionierung gehören die Annahme des Kommissionierauftrags, das Sortieren der Belege, die Abgabe der Einheiten in vorgesehene Kommissionierbehälter und die Weitergabe bzw. finale Belegbearbeitung⁵⁸. Es steht eine Vielzahl an Verfahren, Technologien und Automatisierungsgrade für die Gestaltung von Kommissioniersystemen zur Verfügung⁵⁹.

⁵⁵ Vgl. ten Hompel u.a. (2011), S. 4

⁵⁶ Vgl. ten Hompel u.a. (2011), S. 3

⁵⁷ Vgl. Arnold u.a. (2008), S. 7; Wannenwetsch (2014), S. 317

⁵⁸ Vgl. Heidenblut und ten Hompel (2011), S. 151

⁵⁹ Vgl. Gudehus (2010), S. 659

Verpackung

Unter Verpackung wird die Umhüllung eines Packgutes verstanden. Neben der Schutzfunktion vor Beschädigungen oder äußeren Einflüssen als wesentliche Verpackungsaufgabe, nehmen u. a. die folgenden Funktionen eine zentrale Rolle ein⁶⁰:

- Lagerfunktion hinsichtlich der Stapelbarkeit, Zusammenfassung von Einheiten und Ausnutzung von (Lager-)Flächen;
- Transportfunktion bezüglich der Sicherung von Ladeeinheiten, der besseren Transportauslastung und vereinfachtem Handling;
- Informations-/Verkaufsfunktion umfasst die Kennzeichnung (Menge, Art), Werbung und Informationsspeicherung (bspw. Empfangsort und Transportweg, teilweise auch in elektronischer Form).

Häufig wird der Verpackungsprozess in den Kommissionierungsprozess integriert. Die Verpackung stößt weitere logistische Aufgaben an, wie beispielsweise die Entsorgung von Packstoffen⁶¹.

Innerhalb des Workshops wurde festgehalten, dass die Artikel im Verpackungsprozess versandfertig oder ggf. lagerspezifisch für nachfolgende Prozesse vorbereitet werden und dass sich die spezifischen Anforderungen an die Verpackung aus dem physischen Produkt ableiten (Qualität, Material des Produktes).

Warenausgang

Gegensätzlich zum Wareneingang stellt der Warenausgang (WA) die Schnittstelle des Unternehmens zum Absatzmarkt dar und ist damit der letzte Teilprozess innerhalb der Intralogistik⁶². Zu den Warenausgangsfunktionen gehört die vorangehende Bildung von Warenausgangszonen mit Berücksichtigung der Auftragsvolumen. Nach der Bereitstellung kommissionierter Güter im Warenausgang erfolgen die Bildung von Transport- und Versandeinheiten und die Erstellung von Versanddokumenten. Wurde die Ware an den (internen oder externen) Spediteur übergeben, werden die Produkte systemseitig ausgebucht⁶³.

⁶⁰ Vgl. Wannewetsch (2014), S. 613 Martin (2016), S. 344

⁶¹ Vgl. Arnold u.a. (2008), S. 7

⁶² Vgl. Martin (2016), S. 308

⁶³ Vgl. Seeck (2010), S. 136

4.1.3 Referenzmodell

Oft werden die Begriffe Ziel und Zweck synonym benutzt. Ziele werden als Sachverhalt bezeichnet, dessen Eintreten durch Aktivitäten oder Handlungen hervorgerufen werden kann. Deshalb ist es eine ideelle Betrachtung der zukünftigen, eintretenden und wünschenswerten Zustände von Systemen.

Modelle sind Instrumente, welche eingesetzt werden können, um einen bestimmten Modellzweck zu erfüllen. Darüber hinaus hängt der Zweck dabei von der Existenz der eingesetzten Ressourcen ab. Der Zweck ist daran gebunden, dass der Mensch bestimmte Ressourcen einsetzt beziehungsweise bestimmte Handlungen ausführt, um die angestrebten Ziele zu erreichen. Modelle sind demnach Instrumente, die für einen bestimmten Modellzweck eingeführt werden. Modellziele können durch Modellzwecke realisiert werden, setzen aber das Vorhandensein von ausreichend Ressourcen voraus⁶⁴.

Die Modellerstellung muss bestimmte Kriterien erfüllen, um die Modellierung an den Zweck mit einer bestimmten Zielsetzung anzupassen. Dabei sind vorab die wesentlichen Annahmen und Vereinfachungen sowie der allgemeine Aufbau des Modells zu beschreiben und erklären.

Gegenstände logistischer Vorgänge können unter anderem Güter (Materialien, Produkte), Informationen und Material- und Informationsflussmittel sein⁶⁵. Abgeleitet daraus ergibt sich eine Gliederung auf horizontaler Ebene in Form von Material- und Informationsfluss. Auf Grundlage der von ⁶⁶ formulierten Prozessablauffolge eines Vorgangsmodell oder Handlungsmodell, welches im Wesentlichen der Abfolge Anfangen, Ablaufen und Enden folgt, knüpft das in dieser Arbeit vorliegende Modell an. Hierbei wird die Abfolge beibehalten und lediglich die Benennung in eine abgeänderte Form übertragen. Die neue Prozessablauflogik lautet Vorbereitung, Durchführung und Abschluss. Diese gilt Material- und Informationsflussübergreifend und verleiht dem Modell eine einheitliche Struktur.

Auf Material- und Informationsflussebene gibt es sogenannte Prozessoperationen. Diese beschreiben das jeweils vorliegende Prozessmodul in dem Handlungsmodell

⁶⁴ Thalheim und Nissen (2015), S. 29-33

⁶⁵ Hompel u.a. (2007), S. 2

⁶⁶ Ballmer und Brennenstuhl (1986)

der Vorbereitung, Durchführung und Abschluss. Diese Prozessoperationen werden durchgängig mit der gleichen Nomenklatur mit Subjekt und Verb beschrieben.

Der Modellierer beschreibt dadurch die einzelnen Prozessoperationen der jeweiligen Prozessmodule in sequenzieller Reihenfolge mit Tätigkeiten und Interaktionen mit Hilfe von Zuständen und Änderungen⁶⁷. Nach jedem Prozessmodul muss in Anlehnung an das Unified Modelling Language (UML) Aktivitätsdiagramm zwingend ein Ereignis stattfinden⁶⁸. Daraus ergibt sich die logische sequenzielle Abfolge aus Prozessoperation mit anschließendem Ereignis. Dies gilt sowohl für die Material- als auch die Informationsflussebene. Auf Informationsflussebene ist das zu betrachtende Leistungsobjekt immer der jeweilige Auftrag des vorliegenden Prozessmoduls.

Dieser kann folgende Attribute aufweisen⁶⁹:

- Auftrags ID
- Sender
- Empfänger
- Liefertermin
- Abholtermin
- Lieferzeit

Auf Materialflussebene werden Leistungsobjekte in Form von Logistikeinheiten betrachtet. Die Beschreibung der Ereignisse, welche auf Prozessoperationen folgen, ist gleich aufgebaut wie die Beschreibung der Prozessoperationen selbst. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Subjekt-Verb Beschreibung der Ereignisse in Präteritum angegeben wird, da die vorherige Prozessoperation das Ereignis hervorgerufen oder erzwungen hat. Des Weiteren dienen die Ereignisse auch dazu, um eine trennscharfe Abgrenzung der einzelnen Prozessmodule zu erreichen. Um die Systematik der Abgrenzungen innerhalb der einzelnen Prozessmodule zu erläutern, dient Abbildung 4 dafür als Grundlage.

⁶⁷ Schmidt u.a. (2009), S. 55

⁶⁸ van Randen u.a. (2016), S. 37–38

⁶⁹ Pfohl (2010), S. 71; Bauernhansl u.a. (2014)

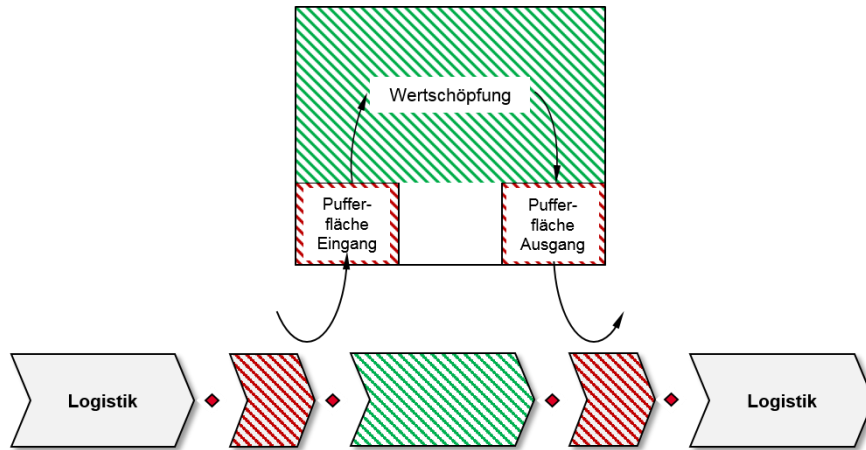


Abbildung 4: Ablauflogik für Prozessmodule und Übergabeereignisse

Bei jedem Prozessmodul wird ein Ein- und Ausgang der Pufferflächen am Anfang und Ende des jeweiligen Prozessmoduls festgelegt. Dadurch kommt es zu klaren Übergabebereichen und klar geregelten Verantwortlichkeiten aller teilnehmenden Parteien. Nachdem das jeweilige zu betrachtende Leistungsobjekt auf Materialflussebene auf dem Eingang der Pufferfläche liegt, kann der eigentliche Prozess des jeweiligen Prozessmoduls beginnen. Dafür muss jedoch zwingend der Informationsfluss betrachtet werden. Hierbei ergeben sich drei Fälle aus der zeitlichen Betrachtung.

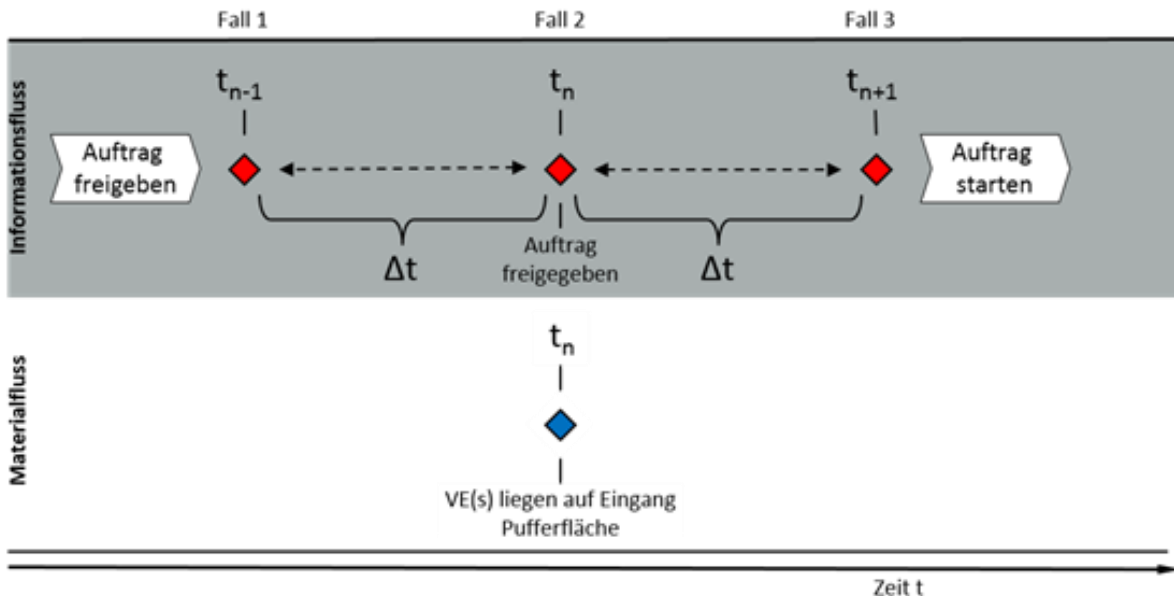


Abbildung 5: Zeitliche Betrachtung der Ereignisse auf Material- und Informationsflussebene

Im ersten Fall (Abbildung 5) liegen die Auftragsinformationen und die Freigabe dessen vor dem physischen Eintreten des Leistungsobjektes auf Materialflussebene vor. Im

zweiten Fall sind Informationen und Leistungsobjekt zur gleichen Zeit vorliegend auf Materialflussebene und freigegeben auf Informationsflussebene vorliegend. Der dritte Fall beschreibt das vorherige, zeitliche Eintreffen des Leistungsobjektes auf Materialflussebene, bevor der Auftrag auf Informationsflussebene freigegeben wird. In Fall eins und drei liegen folgerichtig asynchrone Eintrittszeitpunkte vor. Um ein noch klareres Verständnis davon zu bekommen, sind in Abbildung 6 die Zusammenhänge aus Prozesssicht nochmals dargestellt. Der Sachverhalt und die Bedingung bleibt die gleiche.

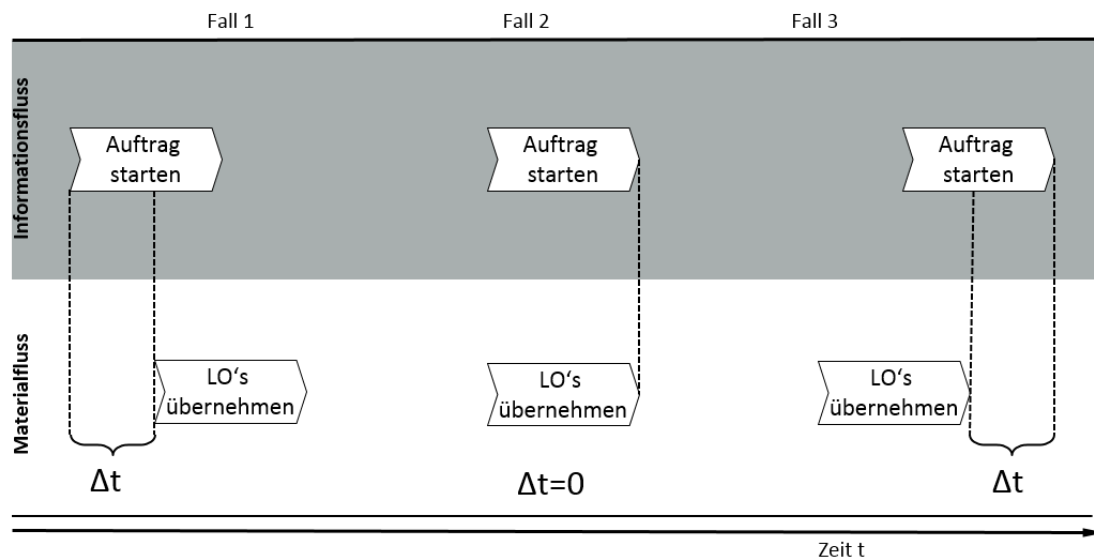


Abbildung 6: Zeitliche Betrachtung der Prozesse auf Material- und Informationsflussebene

Diese drei Fälle sind die notwendige Bedingung, damit die *Durchführung* auf Informations- und Materialflussebene erfolgen kann. Erst wenn der Auftrag auf Informationsebene freigegeben wird und das Leistungsobjekt auf Materialflussebene auf dem Eingang der Pufferfläche des zu betrachtenden Prozessmoduls steht, beginnt die in dem Handlungsmodell beschriebene Systematik der *Durchführung* parallel auf beiden Ebenen. Dies lässt sich durch den Triggerpfeil, welcher von der Materialflussebene in Richtung der Informationsflussebene gerichtet ist, erkennen. Die Richtung des Triggerpfeils wird von Materialflussebene in Richtung der Informationsflussebene gerichtet, da die Durchführung primär von dem physischen Vorhandensein des Leistungsobjektes auf Materialflussebene abhängig ist. Es ist nicht möglich, mit einer logistischen Aufgabe zu beginnen, wenn das physische Leistungsobjekt nicht am richtigen Ort zur richtigen Zeit liegt. Die genaue Betrachtung der einzelnen Prozessoperationen der zwei Ebenen erfolgt im späteren Verlauf der Arbeit anhand der Beschreibung des generischen Modellablaufs.

Um Annahmen und Vereinfachungen zu dem Modell zu nennen, ist es zwingend notwendig, Systemgrenzen von dem zu betrachtenden Modell zu ziehen. Betrachtungsgegenstand sind die intralogistischen Vorgänge eines KMUs und den damit verbundenen Schnittstellen zur Extralogistik mit Wareneingang und Wareneingang.

Folgende Annahmen und Vereinfachungen gelten bei der Betrachtung des Modells:

Informationsflussebene

- Bedarfsgenerierung wird vorausgesetzt. Daher ist auf Informationsflussebene das Ereignis Bedarf gemeldet Grundlage jedes Prozessmoduls und wird bei allen sechs Prozessmodulen unterstellt.
- Prozessbeschreibung erfolgt durch Substantiv + Verb.
- Der Auftrag während eines Prozessmoduls wird nicht in einen anderen Auftrag transformiert.

Materialflussebene

- Innerhalb der sechs einzelnen Prozessmodule wird der Transport vernachlässigt. Dazu zählt beispielsweise das Handhaben oder Umpacken.
- Intralogistische Objekte auf Materialflussebene sind beim Durchlaufen des jeweiligen Prozessmoduls teilbar. Das heißt im engeren Sinne, dass diese in eine andere Form transformiert werden können.
- Prozessbeschreibung der Prozessmodule erfolgt durch Substantiv+ Verb.
- Pufferflächeneingang und -ausgang sind klar definierte Übergabepunkte für den vorherigen und nachfolgenden Prozess.

Die Ablauflogik sowie die Beschreibung der Informations- und Materialflussebene sind auf alle Prozessmodule anzuwenden. Die Informationsflussebene unterteilt sich, wie bereits vorab erwähnt, in die Schritte Vorbereitung, Durchführung und Abschluss. Die einzelnen Ereignisse lassen sich im ERP-System systemtechnisch abbilden. Mit Hilfe der Rückmeldung der Ereignisse erhöht sich die Transparenz über den Auftragsabwicklungsprozess. Die Vorbereitung beginnt mit dem Ereignis ‚Bedarf gemeldet‘ und

beinhaltet die Prozessschritte Auftrag erzeugen, Auftrag annehmen und Auftrag freigeben. Der Abschluss der Vorbereitung spiegelt das Ereignis ‚Auftrag freigeben‘. Die Durchführung und damit auch die Schnittstelle (Trigger) zum Materialfluss ist der Prozessschritt des ‚Auftrags starten‘. Auf Informationsflussebene wird der Auftrag gestartet sowie überwacht. Systemtechnische Teilrückmeldungen sind möglich und zur Überwachung des Fortschritts erwünscht. Auf der Materialflussebene wird hingegen das Leistungsobjekt von der Pufferfläche übernommen, die notwendigen prozessmodulspezifischen Schritte durchgeführt, wieder auf die Ausgangs-Pufferfläche für das nächste Prozessmodul übergeben und liegt diesem nun physisch vor. Das generische Modell schließt auf der Informationsflussebene mit dem Prozessschritt ‚Auftrag abschließen‘. Die folgende Abbildung verdeutlicht die vorher beschriebene Ablauflogik auf Informations- und Materialflussebene.

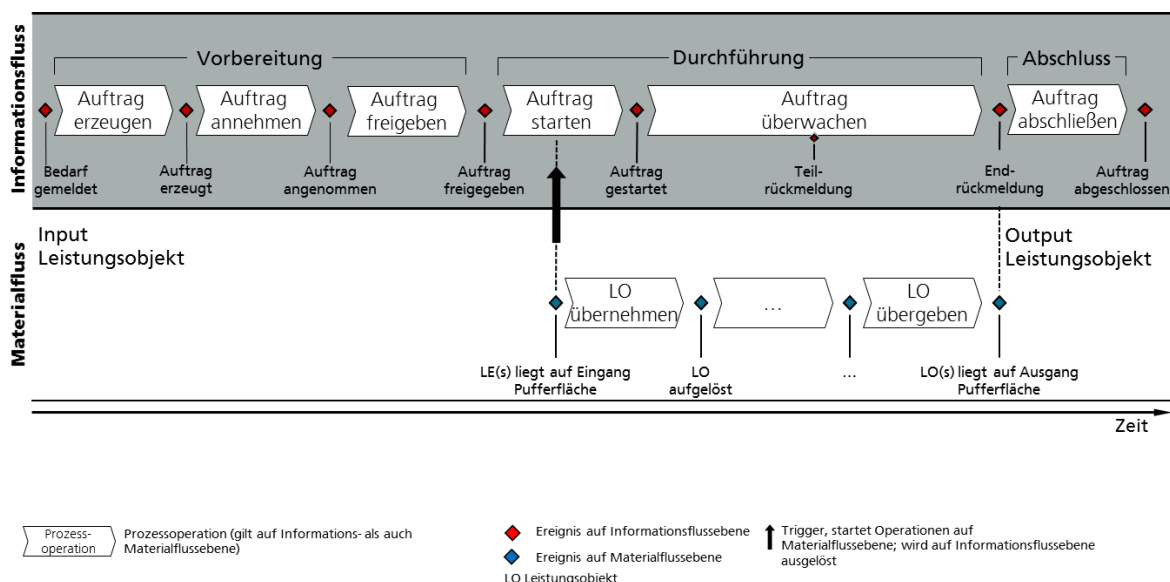


Abbildung 7: Generisches Prozessmodell

Das generische Modell sowie die Prozessmodule wurde durch Fachexperten des Fraunhofer Instituts sowie durch Vertreter der Industrie validiert. Anmerkungen sowie Verbesserungsvorschläge der Experten an das Modell wurden überprüft und eingearbeitet, sodass die Anwendung in Wissenschaft und Praxis gewährleistet werden kann. Im Anschluss an die Beschreibung des generischen Modells wird exemplarisch der Wareneingangsprozess beschrieben. Abbildung 8 zeigt den Wareneingangsprozess.

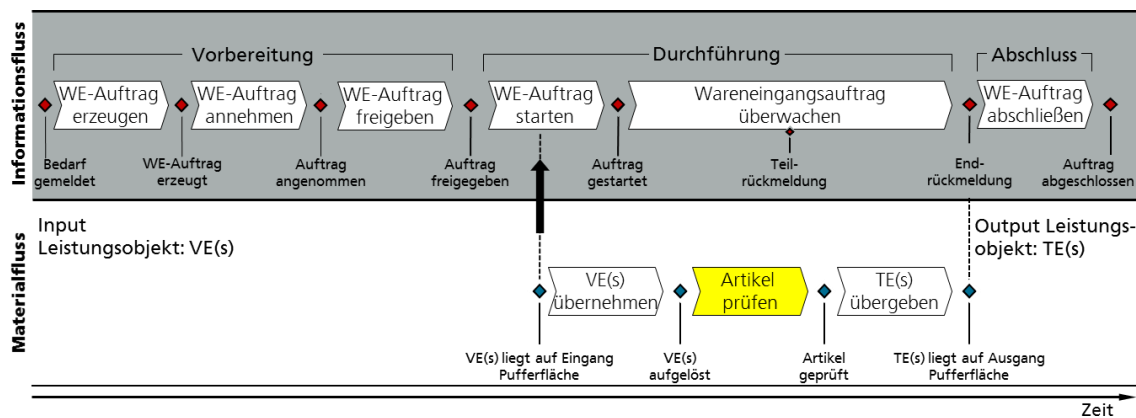


Abbildung 8: Prozessmodul Wareneingang

Die Informationsflussebene spiegelt im Wesentlichen die des generischen Modells wieder. Hierbei liegt der Betrachtungsgegenstand allerdings auf den Wareneingangsauftrag. Die Ablauflogik unterteilt sich, wie bereits oben erläutert, in die Phasen Vorbereitung, Durchführung und Abschluss. Die Form der Auftragserzeugung kann sowohl manuell als auch automatisch erfolgen. Bei der Art der Auftragserzeugung kann es sich sowohl um einen Eigen- als auch um einen Fremdauftrag handeln. Die systemtechnische Buchung erfolgt im ERP-System. Im Rahmen des Schrittes ‚Auftrag annehmen‘ werden beispielweise die notwendigen Ressourcen geprüft und gegebenenfalls reserviert. Die Schritte Lieferschein annehmen, Lieferschein prüfen und Zollbrief prüfen finden auf Informationsflussebene beim Prozessschritt ‚Auftrag starten‘ statt.

Auf Materialflussebene stellt der Input des Leistungsobjektes die Versandeinheit dar. Liegt das Material auf der Eingangspufferfläche vor und wurde der Auftrag durch Mitarbeiter des Wareneingangs freigegeben, können die physischen Schritte gestartet werden. Im ersten Schritt wird die Versandeinheit übernommen. Hierbei erfolgt ein Ladungsträgerwechsel, die Versandeinheit wird aufgelöst und eine Sichtprüfung des eingegangenen Materials wird durchgeführt. Die technische Prüfung findet im Prozessschritt ‚Artikel prüfen‘ statt. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf den technischen Spezifika wie Qualität, Gewicht und Maße. Die Artikel werden umgeschichtet und die Transporteinheit wird erzeugt. Im Anschluss an die technische Prüfung werden die zuvor

erzeugten Transporteinheiten übergeben und dem nächsten Prozessmodul bereitgestellt. Dies bedeutet ein Ladungsträger wird ausgewählt, z. B. Ameise, und das Material zur Ausgangspufferfläche des Wareneingangs transportiert.

Im Anschluss findet auf der Informationsflussebene der Schritt des ‚Auftrag abschließen‘ statt. Die Buchung kann wieder entweder automatisch oder manuell im ERP-System erfolgen.

4.1.4 Morphologischer Kasten zur Klassifizierung der CPS-Technologien

Um die beschriebenen CPS-Technologien auf das Referenzmodell anzuwenden und klassifizieren zu können, empfiehlt sich die Strukturierung mit Hilfe eines morphologischen Kastens in tabellarischer Form. Der morphologische Kasten ist eine auf den Schweizer F. Zwicky zurückgehende Kreativitätstechnik. Mit Hilfe des morphologischen Kastens lassen sich komplexe Problemstellungen unter gleichzeitiger Betrachtung aller möglichen Lösungen vollständig erfassen. Die mehrdimensionale Matrix stellt dabei die Basis des morphologischen Ansatzes.

Abbildung 9 zeigt den morphologischen Kasten zur Klassifizierung der CPS-Technologien. Innerhalb dieser Darstellung wurden die CPS-Technologien den o.g. Prozessmodulen, z.B. Wareneingang und Transport, zugeordnet. Die CPS-Technologien lassen sich auch der nächst feineren Ebene des Prozessmodells zuordnen. Die aufgeführten CPS-Technologien wurden in folgende Teilbereiche klassifiziert:

- Wearable Computing / Smart Devices
- Kameragestützte Assistenzsysteme
- Fahrerlose Transportsysteme
- Intelligente Behälter
- Robotik
- Stationäre Assistenz

Der morphologische Kasten stellt den aktuellen Entwicklungsstand von CPS-Technologien dar und bewertet diese anhand der Ausprägungen x (geeignet) und (x) (teilweise geeignet). Die Erweiterung des morphologischen Kastens um neue Entwicklungen kann leicht vorgenommen werden. Die Spalte ‚potentielle Aufgaben‘ gibt einen

ersten Überblick über die Funktionen der jeweiligen Technologie. Detailinformationen können den einzelnen Steckbriefen entnommen werden.

CPS		Haupt Einsatzgebiete						Potenzielle Aufgaben / Kommentar
		Wareneingang	innerbetrieblicher Transport	Lagerung	Kommissionierung	Verpackung	Warenausgang	
Wearable-Computing / Smart Devices	RFID-Armband	(X)		(X)	X		(X)	- Automatische Quittierung durch Entnahme/Abgabe/Bewegungen in der Kommissionierung - Ggf. automatische Quittierung bei Annahme der Lieferung (Wareneingang) bzw. bei Entnahme eines Artikels aus dem Lager oder Abgabe im Warenausgangsbereich
	ValidKomm	(X)		(X)	X		(X)	- Automatische Quittierung durch Entnahme/Abgabe/Bewegungen in der Kommissionierung - Ggf. automatische Quittierung bei Annahme der Lieferung (Wareneingang) bzw. bei Entnahme eines Artikels aus dem Lager oder Abgabe im Warenausgangsbereich
	Sensorarmband	(X)		(X)	X		(X)	- Automatische Quittierung durch Entnahme/Abgabe/Bewegungen in der Kommissionierung - Ggf. automatische Quittierung bei Annahme der Lieferung (Wareneingang) bzw. bei Entnahme eines Artikels aus dem Lager oder Abgabe im Warenausgangsbereich
	RFID-Handschuh	(X)		(X)	X		(X)	- Automatische Quittierung durch Entnahme/Abgabe/Bewegungen in der Kommissionierung - Ggf. automatische Quittierung bei Annahme der Lieferung (Wareneingang) bzw. bei Entnahme eines Artikels aus dem Lager oder Abgabe im Warenausgangsbereich
	NFC Wearable / Mobile Client	(X)		(X)	X		(X)	- Automatisches Auslesen von Daten - Identifikation von Waren bei der Entnahme und Abgabe
	Smartphone	X	(X)	X	X	X	X	- Anzeige von Kommissionierinformationen (Entnahmeort, Art und Anzahl Artikel, Abgabeplatz) - Quittierung erfolgt manuell durch Fotografieren des Barcodes etc. - Visuelle Anzeigeführung, wie Artikel verpackt werden müssen
	Smartwatches	X	(X)	X	X	X	X	- Anzeige von Kommissionierinformationen (Entnahmeort, Art und Anzahl Artikel, Abgabeplatz) - Quittierung erfolgt manuell durch Fotografieren des Barcodes etc. - Visuelle Anzeigeführung, wie Artikel verpackt werden müssen
	Datenbrille	X	(X)	X	X	X	X	- Anzeige von Kommissionierinformationen (Entnahmeort, Art und Anzahl Artikel, Abgabeplatz), Lagerinformation, Verpackungsinformationen etc. direkt im Sichtfeld - Quittierung erfolgt automatisch durch einen integrierten Barcodescanner/Kamera - Ggf. visuelle Steuerung/Navigations durch die Lagerumgebung
	Pick-by-Light			(X)	X			- Anzeige von Kommissionierinformationen durch Signallampen - Quittierung erfolgt manuell durch Quittierungstasten an Lagerplätzen bzw. Lichtsensoren
	Pick-by-Voice			(X)	X			- Vermittlung von Kommissionierinformationen durch Sprachsteuerung (über Kopfhörer) - Rückmeldungen/Quittierungen werden akustisch vermittelt, bspw. durch Nennung von Prüfziffer (des entnommenen Lagerplatzes und Abgabebehälters)
Fahrerlose Transportsysteme	Coaster	(X)	(X)	(X)	X	X	(X)	- Anzeige von Kommissionierinformationen (Entnahmeort, Art und Anzahl Artikel, Abgabeplatz), Lagerinformation, Verpackungsinformationen etc. durch Coaster-AR - Quittierung erfolgt manuell durch eine integrierte Kamera - Coaster bietet ggf. Überblick über eingesetzte Flurförderfahrzeuge, um innerbetrieblichen Transport zu koordinieren/optimieren
	KARIS PRO	(X)	X				(X)	- Dezentral gesteuertes, fahrerloses Transportsystem (durch Auslesen von RFID-Transpondern, Lasernavigation, Sensork) - Ggf. Abholung der Güter im Wareneingang bzw. Abgabe im Warenausgang
	Auto Pallet Mover (APM)	(X)	X				(X)	- Dezentral gesteuertes, fahrerloses Transportsystem (durch Auslesen von Sensoren an Abholspuren, Anbindung an WMS über WLAN, Lasernavigation) - Ggf. Abholung der Güter im Wareneingang bzw. Abgabe im Warenausgang
	FFI	(X)	X	(X)	X	(X)	(X)	- Bediener/Anwender steuert FFI berührungslos über Gesten und Bewegungen, Entlastung des Mitarbeiters im Transport, in der Kommissionierung etc. - Ggf. Abholung der Güter im Wareneingang bzw. Abgabe im Warenausgang
	iGo neo CX 20	(X)	X		X	(X)	(X)	- Bediener/Anwender steuert iGo neo CX 20 (Autonomer Horizontalkommissionierer) berührungslos über Bewegungen - Fahrt nach Abschluss des Kommissioniervorgangs autonom zum Warenausgang - Ggf. Abholung der Güter im Wareneingang
	proANT Transport-Roboter	(X)	X				(X)	- Dezentral gesteuertes, fahrerloses Transportsystem (durch Lasernavigation, Anbindung an WMS über WLAN) - Ggf. Abholung der Güter im Wareneingang bzw. Abgabe im Warenausgang
	TORsten	(X)	X				(X)	- Dezentrales Unterfahr-fahrerloses Transportsystem (durch Lasernavigation, Anbindung an WMS über WLAN) - Ggf. Abholung der Güter im Wareneingang bzw. Abgabe im Warenausgang
	SSI Schäfer FTS 2PICK		X	(X)	X			- Dezentral gesteuertes fahrerloses Transportsystem - Behälter und Paletten werden zur Aufnahme der kommissionierten Artikel mit sich geführt
	Fahrerlose Transportsysteme	(X)	X	(X)	(X)	(X)	(X)	- Anbieter bietet eine Bandbreite an Fahrzeugen, Technologien etc. an (für Lastenhandlung, zur Unterstützung der Kommissionierung etc.)
	FlexConveyer		X					- Dezentral gesteuertes, modulares Fördersystem
KIVA-Transportroboter	(X)	X		X	(X)	(X)	- Dezentral gesteuerte, autonome Transportroboter mit integrierten bzw. mobilen Regalen - Ggf. Abholung der Güter im Wareneingang bzw. Abgabe im Warenausgang	
Kommissionier-Roboter TORU	(X)	(X)	(X)	X			- Dezentral gesteuertes Kommissionier-Roboter - Selbständige Fahrt zum Lagerplatz und Entnahme der notwendigen Materialien	
Intelligente Behälter	InBin			X	X			- Intelligenter Behälter leitet und kontrolliert Kommissioniervorgang (Ankelausgabe, automatische Bestätigung, Fehlermeldung) - Ladungsträger wird zum Informationsträger (Füllstandsüberwachung, Auslösung Nachschub/Bestellvorgänge nach dem Kanban-Prinzip)
	Bin			X	(X)			- Intelligenter Behälter mit integrierter Füllstands-, Zahl- und Bestellinformation in Behälter (Auslösung Nachschub/Bestellvorgänge nach dem Kanban-Prinzip)
	DProdLog			X	(X)			- Intelligenter Behälter mit integrierter Füllstands-, Zahl- und Bestellinformation in Behälter (Auslösung Nachschub/Bestellvorgänge nach dem Kanban-Prinzip)
Robotik	Kommissionier-Roboter TORU		X		X			- Intelligenter, fahrerloser Kommissionierroboter
	RFID-Roboter TORY		X	X				- Intelligenter, fahrerloser Inventurroboter
	FlexConveyer		X					- Dezentral gesteuertes modulares Fördersystem
Kerngesteuerte Systeme	Der schlaue Klaus	X			(X)		X	- Über Touch-Monitor leitet der Schläue Klaus Mitarbeiter Schritt für Schritt z. B. durch die Wareneingangsprüfung - Automatische Quittierung z. B. des Wareneingangs
	Assembly Scout				X			- Vermittlung von Kommissionierinformationen über Bild, Text und Ton - Rückmeldungen/Quittierungen werden automatisch durchgeführt
	Autosynchrone Werkerführung				X			- Vermittlung von Kommissionierinformationen über einen Bildschirm - Rückmeldungen/Quittierungen werden automatisch durchgeführt
Stapel- und Montageassistent	Arbeitsplatz 4.0				X	X		- Gesten- und videogestützter Pack- und Montageassistent

Abbildung 9: Morphologischer Kasten

4.2 AP 2: Quantifizierung der Performancesteigerung von CPS-Technologien

Die folgenden Ergebnisse waren Gegenstand dieses APs:

Tabelle 2: Inhalte AP 2

AP 2: Quantifizierung der Performancesteigerung von CPS-Technologien	
Einsatz	<ul style="list-style-type: none"> • IPRI: 4 Personenmonate • IPA: 4 Personenmonate
Ergebnis	Predictive Performance Measurement Instrument zur Performancequantifizierung von CPS-Technologien

Geplante Ergebnisse lt. Antrag	Erzielte Ergebnisse
Entwicklung von Predictive Performance Measurement Instrument zur quantitativen Performancemessung von CPS-Technologien in der Intralogistik, auf Basis des Klassifikationsschemas	Entwicklung eines Instruments zur qualitativen Performancemessung von CPS-Technologien in der Intralogistik, auf Basis des Klassifikationsschemas

Im AP 2 wird der Nutzen von CPS-Technologien anhand von qualitativen Merkmalen untersucht. Das Vorgehen ist zweigeteilt: Im Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** werden zunächst vorhandene Methoden zur Technologiebewertung vorgestellt. Die Nutzenanalyse sowie die Nutzwertanalyse werden näher betrachtet und deren Anwendbarkeit auf die Nutzenbewertung von CPS-Technologien kritisch gewürdigt. Die Basis der qualitativen Nutzenbewertung bilden die Zieldimensionen der Produktion. Darauf aufbauend werden Teilziele definiert und der Nutzen der in AP1 identifizieren CPS-Technologien abgeleitet. Das Kapitel schließt mit einem Fazit im Abschnitt 4.2.6

4.2.1 Ziele und Motivation

Bei der Einführung von Industrie 4.0 Technologien insbesondere cyber-physischen Systemen werden zwei übergeordnete Ziele verfolgt. Zum einen sollen Kosten reduziert und zum anderen Potentiale erschlossen werden. Laut einer Studie der Unternehmensberatung PriceWaterhouseCoopers versprechen sich Unternehmen branchenübergreifend eine durchschnittliche Effizienzsteigerung durch den Einsatz von Industrie 4.0 Technologien in Höhe von 18 %.⁷⁰ Der Nutzen ist definiert als subjektive

⁷⁰ Koch et al. (2014), S. 19

Werteinschätzung eines Gutes und somit werbestimmend.⁷¹ Neben dem quantitativen Nutzen werden auch qualitative Vorteile erwartet. Die größten Vorteile werden im Bereich der Planung und Steuerung innerhalb der Produktion und Logistik gesehen. Darüber hinaus erwarten Unternehmen eine deutliche höhere Flexibilisierung ihrer Prozesse.⁷² Die Nutzenpotentiale von CPS-Technologien gehen allerdings weit über die Optimierung von Prozessen und Produktionstechniken hinaus. Um diese allerdings nutzen zu können, sind erhebliche Investitionen erforderlich.⁷³ Gerade klein- und mittelständische Unternehmen scheuen derartige Investitionen in CPS-Technologien. Sie befürchten hohe Implementierungskosten und einen geringen / nicht abschätzbaren Nutzen. Zur Bewertung des Potentials einer CPS-Technologie sind die Auswirkungen dieser Technologie dementsprechend hinsichtlich des Nutzens zu bewerten. Ein Nutzen liegt dann vor, wenn es zu einer Verbesserung von Prozessen bzw. des Wertstroms kommt. Dies ist der Fall, wenn die Ursachen der identifizierten Schwachstellen bzw. Probleme durch den Einsatz einer CPS-Technologie beseitigt bzw. vermieden werden können.⁷⁴ Die Bewertung des Nutzens stellt sich allerdings als schwierig dar. Nach Hausleben führt die Bewertung von entsprechenden Investitionen nach wie vor zu Problemen. Die Komplexität des Operationalisierens, Quantifizierens sowie Monetarisierens der Wertbeiträge stellt Unternehmen heutzutage vor Herausforderungen und ist in einigen Fällen sicherlich auch ein Grund, warum neue Technologien nur sehr zögerlich in der Praxis eingesetzt werden.⁷⁵ Die Literatur bringt eine Vielzahl von unterschiedlichen Methoden und Instrumenten mit der Bewertung von Technologien in Verbindung. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die gängigen Werkzeuge.

⁷¹ Vgl. Brockhaus (1998), S. 80

⁷² Koch et al. (2014), S. 20

⁷³ Koch et al. (2014), S. 20

⁷⁴ Vgl. Dombrowski et. al. (2018), S. 112

⁷⁵ Vgl. Hausleben (2016), S. 306

Tabelle 3: Überblick über gängige Instrumente zur Technologiebewertung⁷⁶

Instrument	Verfahren			Phase		Art		Horizont	
	Prognose	Analyse	Bewertung	Exploration	Bewertung	qualitative	quantitative	Gegenwart	Zukunft
Argumentenbilanz			X		X	X		X	
Benchmarking			X	X	X	X	X	X	
Bewertungsmatrix			X		X		X	X	
Conjoint-Analyse		X		X		X	X	X	X
Delphi-Methode	X			X		X	X	X	
Energie- und Stoffstromanalyse		X		X		X	X	X	
Entscheidungstheorie			X		X	X	X	X	
Kosten-Nutzen-Analyse			X		X		X	X	
Kosten-Wirksamkeits-Analyse			X		X		X	X	
Morphologische Klassifikation		X		X		X		X	
Nutzwertanalyse			X		X	X	X	X	
Patentanalyse	X			X		X			X
Portfoliotechnik			X		X	X	X	X	
Produktlinienanalyse			X	X	X	X		X	X
Quality Function Deployment		X			X	X	X	X	X
Rangreihenmethode			X		X	X		X	
Sensitivitätsanalyse		X			X		X	X	
Szenariotechnik	X			X		X			X
Target Costing			X		X	X	X		X
Technometrische Indikatoren			X		X		X	X	
Trendexploration	X			X			X		X
Verflechtungsmatrix		X			X	X		X	
Wertanalyse			X		X	X		X	
Wirkungsnetz		X		X	X	X		X	

⁷⁶ Vgl. Hall (2002), S.53f.

Instrument	Verfahren			Phase		Art		Horizont	
	Prognose	Analyse	Bewertung	Exploration	Bewertung	qualitative	quantitative	Gegenwart	Zukunft
Wirtschaftlichkeitsrechnung			X		X		X	X	

Die ausgeführten Instrumente sind in der Praxis weitverbreitet. Für eine ganzheitliche und strategische Bewertung von Technologien decken sie allerdings nur Teilaspekte ab. Insbesondere die Erfüllung der Kundenanforderungen als auch das Aufzeigen des Mehrwerts / Nutzen werden in diesen Verfahren nicht weiter berücksichtigt bzw. gehen nur indirekt in die Betrachtung mit ein.

Im Folgenden werden die Nutzenanalyse und die Nutzwertanalyse näher betrachtet.

4.2.2 Nutzenanalyse

Die Nutzenanalyse sowie die Nutzwertanalyse stellen zwei vorhandene Verfahren zum Bewerten des Nutzens dar. Die Nutzenanalyse hat die Zielsetzung durch die strukturierte Vorgehensweise finanzielle Auswirkungen einer Investition ableiten zu können. Die Durchführung erfolgt in einem mehrstufigen Verfahren. Das Auflisten und die monetäre Bewertung einzelner Nutzenkategorien sowie die Abschätzung der jeweiligen Umsetzungsrealisierbarkeit stellen die wesentlichen Elemente dieses Instruments dar.⁷⁷ Bei der Ermittlung der einzelnen Nutzenwirkungen erfolgt eine Einstufung des Nutzens in drei Kategorien:

1. **Direkter Nutzen:** Einsparungen bestehender Kosten und direkt zuordenbare Erlöswirkungen
2. **Relativer Nutzen:** Einsparungen zukünftiger Kosten anhand von Schätzungen und Benchmarks
3. **Schwer erfassbarer Nutzen:** Wirkungen durch die Investition die sich nicht unmittelbar zuordnen lassen z. B. höhere Transparenz im Prozess

Nach der Kategorisierung der einzelnen Nutzenaspekte werden die monetären Nutzwerte über die den gesamten Nutzungszeitraum ermittelt. Darüber hinaus wird die

⁷⁷ Vgl. Potthoff (1998), S. 18

Realisierungswahrscheinlichkeit (gering, mittel, hoch) bewertet. In einer 9-Felder-Matrix können die Aspekte anhand ihrer Kategorie und Realisierungswahrscheinlichkeit ein klassifiziert werden.

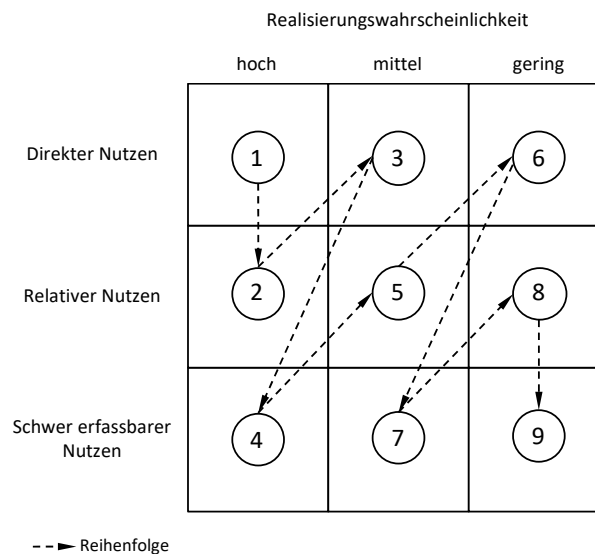


Abbildung 10: Strukturierung der Nutzenpositionen

Das Feld 1 ist aufgrund seiner hohen Realisierungswahrscheinlichkeit und direktem Nutzen am besten bewertbar. Der Nutzen des Feld 9 ist hingegen nur schwer quantifizierbar. Anschließend ist zu überprüfen ob die jeweiligen kumulierten Erlöse in den einzelnen Perioden die Kosten übersteigen. Zusammenfassend bietet die Nutzenanalyse ein strukturiertes Vorgehen, um die Nutzenseite einer Investition in CPS-Technologien differenzierter zu betrachten. Insgesamt stellt das Instrument ein sehr umfangreiches Verfahren dar, das stark vom Zugang zu Erfahrungswerten und Experteneinschätzungen abhängt. Die Ermittlung der Einsparungen durch die Einführung einer CPS-Technologie ist allerdings durch die geringen Erfahrungswerte nur sehr schwer quantifizierbar und somit nur schwer anwendbar.

4.2.3 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse auch bekannt als Scoring Modell stellt ein Verfahren dar, das eine mehrdimensionale Bewertung von Alternativen ermöglicht. Der wesentliche Unterschied zur Nutzenanalyse besteht darin, dass keine monetäre Größe ermittelt

wird, sondern ein Nutzwert.⁷⁸ Der Nutzwert ist eine Rechengröße, der Aussagen über den Nutzen der möglichen Alternativen trifft und so eine Vergleichbarkeit dieser verschiedenen Alternativen unterstützt. Mit Hilfe der Nutzwertanalyse lassen sich qualitative Attribute besser erfassen und bewerten.

Die Nutzwertanalyse lässt sich in 5 Schritte unterteilen:⁷⁹

1. **Festlegung der Zielsetzung und Muss-Kriterien:** Diese übergeordneten Ziele sind i. d. R. global und weitgehend unpräzise formuliert. Aufgrund dessen sollte diese stufenweise präzisiert werden.
2. **Aufstellung der Auswahlkriterien:** Die Auswahlkriterien bilden die Grundlage für die Evaluierung der Alternativen und bilden somit den Anforderungskatalog. Bei der Auswahl ist darauf zu achten, dass die Kriterien nicht direkt oder indirekt doppelt erfasst werden. Eine überschaubare Anzahl an Kriterien wird in der Literatur empfohlen.⁸⁰
3. **Festlegung der Bewertungsskala:** Ziel dieses Schrittes ist es, die einzelnen Größen auf eine gemeinsame Rechenbasis zu bringen.
4. **Gewichtung der Auswahlkriterien:** Innerhalb dieses Schrittes findet die Gewichtung der einzelnen Kriterien mit einem Multiplikator, der die relative Wichtigkeit für die Erreichung des Ziels überträgt. Die Gewichtung hängt von den Experten ab.
5. **Aufstellen und Bewertung der Alternativen:** In diesem Schritt erfolgt die Bewertung der einzelnen Alternativen entlang aller Kriterien. Nach der Durchführung werden die einzelnen Kriterien entsprechend ihrer relativen Bedeutung gewichtet.

Das Verfahren ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der möglichen Alternativen hinsichtlich der definierten Ziele. Das Festlegen der Entscheidungskriterien und deren Gewichtung ist jedoch stark vom vorhandenen Expertenwissen abhängig und so schwer übertragbar da er einem subjektiven Empfinden unterliegt. Zusammenfassung lässt sich feststellen, dass es in der Literatur kein geeignetes Instrument gibt, mit welchem sich der Nutzen von CPS-Technologien bewerten lassen können. Um relevante Nutzenaspekte / Potentiale identifizieren zu können, wurde im Rahmen des

⁷⁸ Vgl. Weber und Schäffer Utz (2011), S. 394ff.

⁷⁹ Vgl. Schulze (2009), S. 164ff.

⁸⁰ Vgl. Weber und Schäffer (2011), S. 396f.

Projektbegleitenden Ausschusses mit Hilfe der Delphi Methode eine Auflistung dieser Aspekte gemacht. Ziel war es hierbei relevante / wünschenswerte Potentiale durch die Einführung von CPS-Technologien zu identifizieren.

Nutzenaspekte:

- Kundenzufriedenheit erhöhen
- Flexibilität erhöhen
- Datenqualität verbessern
- Transparenz erhöhen
- Bestände reduzieren
- Durchlaufzeit reduzieren
- Maschinenauslastung
- Produktivität erhöhen
- Flächennutzung reduzieren
- Fehler vermeiden
- Produktqualität erhöhen
- Gefahren / Unfälle vermeiden
- (technische) Prozessstabilität erhöhen
- Mitarbeitermotivation erhöhen
- Anspruchsniveau an die Qualifikation reduzieren
- Ergonomie verbessern

Es fällt auf, dass die Industriepartner im Wesentlichen qualitative Aspekte im Rahmen der Befragung genannt haben. Im Rahmen der weiteren Diskussion bestätigte sich dies und es wurde beschlossen, das zu erarbeitende Instrument / Werkzeug auf rein qualitative Nutzenaspekte zu begrenzen.

4.2.4 Zieldimensionen

Basis der Nutzenbewertung von CPS-Technologien bilden die Zieldimensionen der Produktion nach Erlach, vgl.⁸¹. Zentrale Frage bei der Optimierung von Prozessen, ist nach den Zielen, an denen sich Verbesserungen messen lassen. Die jeweilige Zielerreichung gibt dann an, wie gut der Prozess ist, wie effizient dieser arbeitet. In Bezug auf die Produktion ist die Zielsetzung der Faktoren Zeit, Kosten und Qualität gängig. Konkret bedeutet dies kurze Durchlaufzeiten, hohe Produktqualitäten und geringe Herstellkosten. In jüngerer Zeit wird explizit die Produktvielfalt als weitere Zieldimension formuliert. Diese vier Zieldimensionen lassen sich auf die Nutzenbewertung von

⁸¹ Vgl. Erlach (2010), S.14

CPS-Technologien übertragen und bilden somit die Basis der Bewertung der Performancesteigerung. Den jeweiligen Zieldimensionen können typische Teilziele zugeordnet werden, vgl. Abbildung 11. Die Teilziele als auch die Nutzdimensionen sind in der Realisierung voneinander abhängig und können somit in Konflikten zueinander stehen.



Abbildung 11: Zieldimensionen der Produktion (nach Erlach (2010), S. 14)

Im Folgenden werden die vier Zieldimensionen näher erörtert⁸²:

1. Die *Variabilität* einer Produktion gibt an, wie breit das mit ihm bewältigbare Produktionsspektrum ist. Hier ist festzulegen, welche Produkte in jeweils wie vielen Varianten produziert werden sollen. Die Flexibilität einer Produktion gibt an, welche kurzfristigen Schwankungen der Marktnachfrage noch erfüllbar sind. Die Wandlungsfähigkeit beschreibt das Vermögen einer Produktion, kurz- und mittelfristig strukturell auf geänderte Anforderungen zu reagieren.
2. Die Qualität einer Produktion gibt zu einen an, wie gering der produzierte Ausschuss ist. Andererseits beschreibt sie, wie gut jeweils das jeweilige Toleranzniveau eingehalten wird und wie zuverlässig die Produktionsprozesse arbeiten.
3. Die Geschwindigkeit einer Produktion gibt zum einen an, wie zeitaufwendig die wertschöpfenden Prozessschritte sowie die dazugehörigen Nebentätigkeiten sind. Zum anderen gehört zu dieser Zieldimension die Dauer der Produktionsdurchlaufzeit.

⁸² Vgl. Erlach (2010), S.14

4. Die Wirtschaftlichkeit einer Produktion gibt im Wesentlichen seine Produktivität bezogen auf alle Produktionsfaktoren an. Hier finden sich schließlich die Faktorenkosten wieder, die durch die Anforderungen der Variabilitäts-, Qualitäts- und Geschwindigkeitsziele vorgeprägt sind.

Diese vier Zieldimensionen wurden dem Projektbegleitenden Ausschuss vorgestellt und für die Nutzenbewertung von CPS-Technologien diskutiert und ergänzt. Abbildung 12 stellt die erweiterten Zieldimensionen mit deren Teilzielen dar.

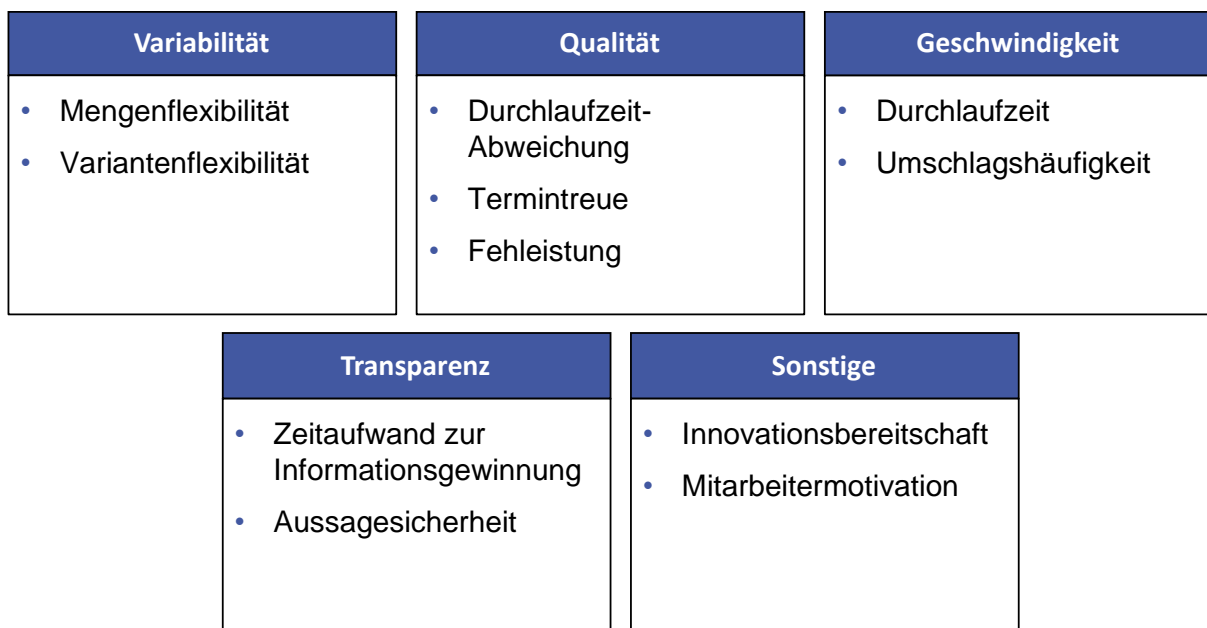


Abbildung 12: Übersicht erweiterte Zieldimensionen

Die **Variabilität** wird im Kontext der Intralogistik mit dem Begriff der Flexibilität gleichgesetzt. Als Teilziele der Zieldimension Variabilität wurden die Mengen- und Variantenflexibilität definiert. Ein zentraler Aspekt der Flexibilität von Prozessen stellt die **Mengenflexibilität** dar. Hierunter versteht man wie flexible die jeweiligen intralogistischen Prozesse unter Einsatz der jeweiligen CPS-Technologie mit Mengenschwankungen (z. B. Wareneingangspositionen) umgehen können. Die **Variantenflexibilität** hingegen beschreibt wie die Technologie unterschiedliche Varianten beherrschen kann. Aufgrund der aktuellen Entwicklungen in Richtung Losgröße 1 und kürzeren Produktlebenszyklen lässt sich ein nicht unerheblicher Flexibilitätsbedarf an Varianten ableiten.

Die zweite Zieldimension **Qualität** beinhaltet die Teilziele Durchlaufzeit-Abweichung, Termintreue und Fehlleistung. Die **Durchlaufzeit-Abweichung** drückt aus ob die IST-

Durchlaufzeit gegen dem definierten SOLL-Wert länger oder kürzer ist. Die Kennzahl / Teilziel lässt sich sowohl als interne Durchlaufzeitabweichung aber auch externe Lieferzeitabweichung berechnen.⁸³ Die **Termintreue** hingegen ist ein Maß für logistische Prozesssicherheit, die es zu maximieren gilt. Die Termintreue gibt Aussage darüber inwiefern die Terminzusagen (intern als auch extern) eingehalten werden. Insbesondere bei hohen Mengen- / und Nachfrageschwankungen ist die Termintreue gefährdet.⁸⁴ Die beiden Kennzahlen Durchlaufzeit-Abweichung und Termintreue werden in Anlehnung an Erlach der Zieldimension der Qualität zugeordnet.⁸⁵ Eine hohe Termintreue sowie eine geringe Durchlaufzeitabweichung spiegeln qualitativ sichere Prozesse wieder, so dass eine Zuordnung in diese Kategorie sinnvoll ist. Die **Fehlleistung** ist definiert als Erzeugnisse, die außerhalb der Qualitätsanforderungen sind. Diese können als Ausschuss deklariert werden oder aber auch für die Nacharbeit oder Recycling in Frage kommen.

Die dritte Dimension der **Geschwindigkeit** beschreibt die beiden Teilziele Durchlaufzeit und Umschlagshäufigkeit. Die **Durchlaufzeit** beschreibt innerhalb der Intralogistik die Zeitspanne, die von Beginn der Bearbeitung eines Prozessschritts bis zur Fertigstellung benötigt wird. Im Einzelnen setzt sich die Durchlaufzeit zusammen aus Rüstzeit, Bearbeitungszeit und Liegezeit. Die **Umschlagshäufigkeit** beschreibt die Häufigkeit, mit der gelagerte Produkte innerhalb einer Periode ersetzt wurden. Der Lagerabgang einer Periode wird hierzu auf den mittleren Lagerbestand dieser Periode bezogen und meist als Umschlag pro Jahr berechnet.⁸⁶ Die Dimension der Kosten / Wirtschaftlichkeit wird im AP 3 einer detaillierten Betrachtung unterzogen. Im Rahmen der Nutzenbewertung finden Kostenaspekte demnach keine weitere Anwendung. Die **Transparenz** sowie die Kategorie ‚**Sonstiges**‘ wurde im Rahmen des projektbegleitenden Ausschusses den Zieldimensionen hinzugefügt. Gerade in Hinblick auf Industrie 4.0 Technologien ist der Transparenzgewinn innerhalb des Unternehmens eine wichtige Voraussetzung für die Investitionsentscheidung. Im Hinblick auf digitalisierte Wertschöpfungsketten und immer höhere Anforderungen an echtzeitnahe Informationen entlang der Supply Chain nimmt die Transparenz eine wichtige Rolle ein. Datenaustausch entlang der Lieferkette um Prognosen besser vorausszusagen als auch Wartungsfenster besser planen zu können sind nur beispielhafte Anwendungsgebiete die

⁸³ Vgl. Wiendahl (2010), S. 129

⁸⁴ Vgl. Erlach (2010), S. 17

⁸⁵ Vgl. Erlach (2010), S. 14

⁸⁶ Vgl. Wiendahl (2010), S. 156

mit Hilfe einer besseren Transparenz gewährleistet werden können. Als Teil der Transparenz wurden gemeinsam mit den Industriepartnern zwei Teileziele definiert. Zum einen der **Zeitaufwand um Informationen zu gewinnen** und zum anderen die **Aussagesicherheit**. Der Zeitaufwand zur Informationsgewinnung soll durch den Einsatz von CPS-Technologien im Vergleich zu herkömmlichen Methoden / Technologien reduziert werden. Im besten Fall soll zu jeder Zeit echtzeitnahe Informationen über beispielsweise den Zustand eines Produktes informiert werden können. Dies kann z. B. mit Hilfe von Sensorik an / in Produkten während des Lagerungsprozesses stattfinden. Die Aussagesicherheit beschreibt die Qualität der Daten (auch: Datenqualität). Hierbei spielen Aspekte u. a. wie Korrektheit, Genauigkeit, Aktualität eine wichtige Rolle. Die Messung der Datenqualität beruht in den meisten Fällen eher auf subjektivem Empfinden und lässt sich nur in den wenigsten Fällen messen. Unter der Kategorie ‚Sonstiges‘ werden zwei Teilziele aufgeführt. Die **Innovationsbereitschaft** eines Unternehmens beschreibt inwiefern ein Unternehmen bereit ist in neue Technologien zu investieren ohne ggf. einen konkreten Vorabtest durchführen zu können. Hierbei stehen u. a. Aspekte wie Außendarstellung als Innovationstreiber im Vordergrund. Gerade klein- und mittelständische Unternehmen investieren nur schwerfällig in neuartige Technologien und können somit u. U. die Anschlussfähigkeit an den Wettbewerb verlieren. Darüber hinaus haben KMUs häufig mit der Problematik zu kämpfen gut ausgebildetes Personal zu finden. Die Bereitschaft in neuere Technologien zu investieren könnte Unternehmen attraktiver für neue Mitarbeiter erscheinen lassen und aber auch die Motivation von bestehendem Personal erhöhen und somit die Dauer der Betriebszugehörigkeit verbessern.

4.2.5 Qualitative Bewertung der Nutzenpotentiale

Die Nutzenbewertung, der in AP 1 erarbeiteten CPS-Technologien, wurden auf Basis der übergeordneten Zieldimensionen Variabilität, Qualität, Geschwindigkeit und Transparenz durchgeführt. Hierfür wurden Experten aus Forschung und Industrie gebeten den erwarteten Nutzen der Zieldimensionen auf die jeweilige CPS-Technologie zu bewerten. Für die Klassifizierung wird eine Ordinalskala verwendet. Die Einstufung erfolgt unter folgenden Ausprägungen: geringer Nutzen, mittlerer Nutzen, hoher Nutzen. Ein geringer Nutzen liegt vor, wenn sich kaum spürbare bzw. messbare Verbesserungen (< 5 %) im Prozess durch den Einsatz erkennen lassen. Ein mittlerer Nutzen liegt vor, wenn sich mittelmäßige Verbesserungen (> 5 % x < 25 %). Ein hoher Nutzen liegt

vor, wenn sich starke Verbesserungen (> 25 %) durch den Einsatz der jeweiligen Technologie erzielen lassen. Die Teilziele der jeweiligen Dimensionen fließen bei der Betrachtung des Nutzens mit ein werden aber nicht gesondert dargestellt. Im Rahmen einer Ausbaustufe ist es jedoch möglich, die Nutzenbetrachtung zu detaillieren und ausschließlich auf Ebene der Teilziele durchzuführen. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** werden die Nutzeinschätzungen der jeweiligen CPS-Technologien dargestellt.

Tabelle 4: Nutzen CPS-Technologie

	Varibilität	Qualität	Geschwindigkeit	Transparenz
RFID Armband	gering	hoch	mittel	hoch
Validkomm	mittel	hoch	mittel	hoch
Sensorarmband	gering	hoch	mittel	hoch
RFID Handschuh	mittel	hoch	mittel	hoch
NFC Wearables / Mobile Client	mittel	hoch	mittel	hoch
Smartphone	gering	mittel	mittel	hoch
Smartwatch	gering	gering	mittel	mittel
Coaster	gering	keine	gering	mittel
Datenbrille	hoch	hoch	mittel	hoch
Pick-by-light	hoch	hoch	mittel	mittel
Pick-by-Voice	hoch	hoch	mittel	hoch
KARIS PRO	mittel	hoch	gering	mittel
Auto Pallet Mover	mittel	hoch	gering	mittel
proANT Transport Roboter	mittel	mittel	gering	mittel
TORsten	hoch	hoch	gering	mittel
SSI Schäfer FTS 2 Pick	hoch	hoch	gering	mittel
Gestengesteur. Fahrzeug	mittel	mittel	gering	mittel
iGo neo CX 20	hoch	hoch	mittel	gering
KIVA-Transportroboter	mittel	hoch	gering	gering
Fahrerlose Transportsysteme	mittel	hoch	mittel	gering
Kommissionier Roboter TORU	mittel	mittel	hoch	gering
RFID_Roboter TORY	mittel	mittel	mittel	gering
FlexConveyor	hoch	gering	mittel	gering
Der schlaue Klaus	hoch	hoch	mittel	hoch
Assembly Scout	hoch	hoch	mittel	hoch
Autosynchrone Werkerführung	hoch	hoch	mittel	hoch
InBin	mittel	gering	gering	hoch
iBin	mittel	gering	gering	hoch
DProdLog	mittel	gering	gering	hoch
Arbeitsplatz 4.0	mittel	hoch	mittel	mittel

Beispiel: Schlaue Klaus

Der schlaue Klaus ist ein kamerabasiertes Assistenzsystem, das Unternehmen dabei helfen soll, komplizierte manuelle Prozesse (z. B. bei der Wareneingangsprüfung) schnell und fehlerfrei durchzuführen. Mitarbeiter legen den Artikel auf den Arbeitstisch unter die Kamera. Anschließend identifiziert das System anhand vorab eingelernter Merkmale den Artikel und zeigt hierzu die benötigten Artikeldaten an.

Die **Variabilität** wird als hoch eingeschätzt, da eine sehr hohe Variantenvielfalt unterschieden werden kann. Selbst ungelernete Mitarbeiter können eingesetzt werden und identifizieren die Artikel genauso schnell und sicher wie erfahrene Mitarbeiter. Die Ziel-dimension der **Qualität** wird ebenfalls als hoch eingeschätzt. Fehler lassen sich mit Hilfe der Augmented Reality z. B. im Rahmen des Montageprozesses vermeiden. Schritt für Schritt wird der Mitarbeiter den Prozess geführt. Wenn nicht das richtige Bauteil verbaut wurde, erhält der Mitarbeiter ein optisches und akustisches Signal uns

kann seinen Fehler direkt korrigieren. Die Verbesserungen der **Geschwindigkeit** wurden mittelhoch eingeschätzt. Durch den Einsatz der Technologie lassen sich u. a. Durchlaufzeitverkürzungen erreichen. Gerade bei hoher Komplexität und Variantenvielfalt lassen sich Einsparpotentiale durch die kameragestützte Assistenz erreichen. Der **Transparenz**-Zugewinn wird als hoch eingeschätzt. Zum einen werden schnell z. B. Wareneingangsprüfung Informationen zu Artikeln angezeigt und bei Bedarf zur Identifizierung für Folgeprozesse Etiketten ausgegeben werden. Zum anderen lassen Dokumentationsprozesse schnell und lückenlos automatisieren.

4.2.6 Eignung der Nutzenbewertung für CPS-Technologien

Die Eignung der Zieldimensionen als Basis der Nutzenbewertung ergibt sich aus den gewünschten Nutzenpotentialen von CPS-Technologien. In der Literatur existieren bisher keine geeigneten Methoden zur Quantifizierung der Performancepotentiale von Investitionen in CPS. Darüber hinaus bestehen deutliche Unterschiede der Potentialerschließung in Unternehmen. Fehlende Erfahrungswerte sowie die Einschätzung der Einsparpotentiale in Bezug auf die Intralogistik erschweren die Quantifizierung des Nutzens erheblich. Dem Weiterem erscheint für den Bereich der Logistik insbesondere der Intralogistik eine qualitative Einschätzung der Nutzenpotentiale aussagekräftiger. Aufgrund dessen wurde eine rein qualitative Bewertung der Nutzenpotentiale vorgenommen. Die Potenziale wurden anhand von verschiedenen Dimensionen dargestellt und fließen als qualitative Merkmale in die Bewertung der CPS-Investitionsprojekte mit ein. Ansatzpunkte für eine Detaillierung der qualitativen Nutzenbewertung stellen die definierten Teilziele der jeweiligen Zieldimensionen dar. Auch eine Differenzierung der Potentiale nach den intralogistischen Einsatzgebieten (Wareneingang, Transport, Lagerung, Kommissionierung, Verpacken und Warenausgang) erscheint sinnvoll und könnte in einer Ausbaustufe umgesetzt werden. Abschließend kann festgehalten werden, dass die Nutzenbewertung basierend auf den Zieldimensionen einen guten Einstieg für Auswahl von CPS-Technologien bietet. Unternehmen haben die Möglichkeit durch die vorangeschaltete Klassifizierung der Ziele eine Vorauswahl zu treffen.

4.3 AP 3: Kostenermittlung von CPS-Technologien durch weiterentwickeltes Life Cycle Costing

Die folgenden Ergebnisse waren Gegenstand dieses APs:

Tabelle 5: Inhalte von AP 3

AP 3: Kostenermittlung von CPS-Technologien durch weiterentwickeltes Life Cycle Costing	
Einsatz	<ul style="list-style-type: none"> • IPRI: 7 Personenmonate • IPA: 2 Personenmonate
Ergebnis	<ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwickeltes Life Cycle Costing zur Kostenermittlung von CPS-Technologien

Geplante Ergebnisse lt. Antrag	Erzielte Ergebnisse
Weiterentwicklung des Life Cycle Costing zur Kostenermittlung von CPS-Technologien in der Intralogistik	Weiterentwickelter Lebenszykluskostenansatz zur Profitabilitätsbewertung von CPS-Technologien

Im AP 3 werden die Kosten für CPS-Technologien für mithilfe eines weiterentwickelten Lebenszykluskostenansatzes untersucht. Die Vorgehensweise hierzu ist mehrstufig. Im Abschnitt 4.3.1 wird zunächst der Lebenszykluskostenansatz beschrieben. Abschnitt 4.3.2 wird das Life Cycle Costing für die Einführung von CPS angepasst. Es folgt eine exemplarische Berechnung der Lebenszykluskosten für ein CPS in Abschnitt 4.3.3. Im letzten Abschnitt folgt ein Fazit.

Als Grundlage für die Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Lebenszykluskosten von CPS-Technologien in der Intralogistik wurden zunächst bestehende Ansätze des Life Cycle Costing zu verschiedenen Anwendungsfällen identifiziert. Anschließend wurden Gemeinsamkeiten im Vorgehen und wichtige Prinzipien bei der Analyse von Lebenszykluskosten herausgearbeitet. Abschließend wurde unter Berücksichtigung der Prinzipien eine Checkliste relevanter Kostenbestandteile als Grundlage für eine Profitabilitätsbewertung erarbeitet und exemplarische anhand eines Anwendungsbeispiels verdeutlicht.

4.3.1 Life Cycle Costing

Ziele und Motivation

Als Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs) werden „die kumulierten Kosten, die eine Anlage oder ein System über seinen gesamten Lebenszyklus verursacht“⁸⁷ bezeichnet. Das Life Cycle Costing unterstützt Investitionsentscheidungen, indem durch eine modellgestützte Planung alle Lebenszykluskosten erfasst und ausgewertet werden.⁸⁸ Somit werden neben den unmittelbaren Beschaffungskosten auch zukünftige Folgekosten bei dem Vergleich mehrerer Alternativen berücksichtigt. Nach Bea und Haas ist die Entstehung und Verbreitung der lebenszyklischen Betrachtung von Kosten auf eine Änderung der Struktur der Produktlebenszyklen zurückzuführen. Insbesondere lassen sich insgesamt kürzere Lebenszyklen und eine explizite Verkürzung der Phase, in der ein Produkt am Markt angeboten wird, feststellen⁸⁹.

Weitere Ursachen sind der zunehmende internationale Wettbewerb, die steigende Komplexität von Unternehmensentscheidungen, weitreichendere Kundenansprüche und die Verbreitung nachhaltiger Strategien⁹⁰.

Zusätzlich problematisch ist, dass der Anteil der Beschaffungskosten gemessen an den Gesamtkosten des gesamten Lebenszyklus nur einen geringen Teil darstellt. In diesem Zusammenhang tritt das Prognoseproblem auf: Zukünftige Produktionspreise bzw. Kosten müssen geschätzt werden⁹¹. Dadurch sind Investitionsentscheidungen mit einem hohen Maß an Unsicherheit behaftet. Um unter diesen Bedingungen zuverlässig Entscheidungen treffen zu können, benötigt die Unternehmensführung ein Instrument, das „präzise Informationen über die Wirkbeziehungen und mehrperiodische Entwicklung der traditionellen Systemelemente Kosten, Zeit und Leistung (...)“ aufzeigt⁹².

Im Folgenden wird erläutert, was genau unter dem Konzept der Lebenszykluskostenrechnung verstanden wird und wie das Life Cycle Costing ein verlässliches Tool zur Wirtschaftlichkeitsbewertung langfristiger Projekte sein kann. Zunächst ist festzustellen, dass es kein allgemeingültiges Lebenszyklusmodell gibt. Stattdessen gibt es eine

⁸⁷ Uhl (2002), S. 8

⁸⁸ Vgl. Götze (2004), S. 292

⁸⁹ Vgl. Bea und Haas (2017), S. 349

⁹⁰ Vgl. Höhne (2009), S. 75

⁹¹ Vgl. Horváth (2011), S. 470

⁹² Höhne (2009), S. 75

Vielzahl an LCC-Ansätzen, die spezifisch auf den Verwendungszweck und die Ressourcen des Modellentwicklers abgestimmt sind⁹³. Entsprechend haben sich auch unterschiedliche Ansätze der Kategorisierung von LCC-Modellen entwickelt. Zunächst lassen sich Ansätze nach dem Zeitraum ihrer Durchführung differenzieren. Ex post Betrachtungen verwenden historische Daten, um Prozesse, Produkte und deren assoziierte Kosten zu analysieren, während ex ante Betrachtungen eingesetzt werden, um mittels Prognose und Schätzverfahren Entscheidungssituationen zu bewerten⁹⁴. Ein Ansatz der Klassifikation unterschiedlicher Lebenszyklusmodelle ist der Grad der Verallgemeinerung. Es lassen sich normierte, teilstandardisierte und individuelle Lebenszyklusmodelle unterscheiden⁹⁵. Standards wurden u.a. durch das Deutsche Institut für Normung (DIN), den Verband Deutscher Maschinen- und Anlagebau (VDMA) und der Society of Automotive Engineers (SAE) entwickelt. Teilstandardisierte Ansätze werden innerhalb von Branchen oder Unternehmen eingesetzt. Beispielhaft kann der Ansatz des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV)⁹⁶, das Maintenance-Total-Cost-of-Ownership Verfahren der Daimler AG oder das LLC-Konzept des ZF Standorts Friedrichshafen genannt werden⁹⁷.

Problematisch an Normen und Richtlinien⁹⁸ ist, dass diese nicht jeden Untersuchungsgegenstand (Lebenszyklusmodelle können für Produkte, Potenziale sowie ganze Organisationen⁹⁹ angewendet werden) oder jeden Modellierungskontext (bspw. Verfügbarkeit von Daten) abbilden können. Daher existiert eine Vielzahl an fallspezifischen und damit individuellen Modellen für unterschiedliche Anwendungsbereiche. Tabelle 6 gibt einen Überblick der in der Literatur thematisierten Anwendungsbereiche von Lebenszykluskostenanalysen und macht deutlich, dass Ansätze nicht nur anwendungsspezifisch sind, sondern sich auch durch unterschiedliche Schwerpunkte unterscheiden. Beispielsweise kann der Fokus neben monetären Größen auch auf ökologischen Aspekten liegen oder es werden die Lebenszykluskosten aus unterschiedlichen Perspektiven (Anlagenbauer oder Anlagennutzer) aufgezeigt. Daneben lassen sich Ansätze der Lebenszykluskostenrechnung nach der Art der Verknüpfung mit anderen

⁹³ Vgl. Sherif und Kolarik (1981), S. 288

⁹⁴ Vgl. Herrmann u.a. (2011), S. 225

⁹⁵ Vgl. Dreier und Wehking (2016), S. 2

⁹⁶ Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2010)

⁹⁷ Vgl. Köllner u.a. (2009)

⁹⁸ Eine Übersicht verschiedener standardisierter LCC Ansätze findet sich in Abele u.a. (2009), S. 58-59; Bünting (2009a), S. 41 ff. und Langdon (2005), S. 6 ff.

⁹⁹ Vgl. Zehbold (1996), S. 16

Managementansätzen systematisieren¹⁰⁰: Eine mögliche Variante ist die Kombination mit der Prozesskostenrechnung (Wie hoch sind die Lebenszykluskosten?) mit der Zielkostenrechnung (Wie hoch dürfen die Kosten einzelner Lebenszyklusphasen sein?) oder mit dem Design-to-Cost-Ansatz (Wie muss das Produkt gestaltet sein, damit eine Zielvorgabe nicht überschritten wird?).

Tabelle 6: Übersicht diverser Veröffentlichungen zu anwendungsspezifischen LCC-Modellen

Autor	Anwendungsbereich	Betrachtete Phasen
Abele u.a. (2009)	Werkzeugmaschinen	Anschaffungsphase, Nutzungsphase, Nachnutzungsphase
Bengtsson und Kurdve (2016)	Werkzeugmaschinen mit dynamischen Wartungskosten	Akquisition, Betrieb, (Lebensende)
Bünting (2009b)	Investitionsgüter	Entstehung, Betrieb, Verwertung (nach VDMA Einheitsblatt 34160)
Burkert und Dreizner (2011)	Investitionsgüter mit Fokus auf Energieeffizienz	Installation, Betrieb, Deinstallation
Carpentieri und Papariello (2006)	Automatisierte Produktionslinien	Predesign, Design, Produktion, Montage, Tests, Versand, erneute Montage, Tests, Garantie (aus der Sicht des Herstellers)
Dreier und Wehking (2016)	Fördertechnikanlagen	Explizit kein Phasenmodell, Einteilung von neuen Kostenarten innerhalb des Lebenszyklus
Enparantza u.a. (2006)	Werkzeugmaschinen	Akquisition, Betrieb, Wartung, Entsorgung
Helbig u.a. (2014)	Dezentrale komponentenbasierte Automatisierungslösungen	Betrachtet Ereignisse im Lebenszyklus: Einrichtung, Ausfall der Komponente, Änderung der Funktionalität, Wiederverwendung
Köllner u.a. (2009)	Werkzeugmaschinen aus Sicht eines Automobilzulieferers	Entstehungsphase, Betriebsphase
Ozdemir und Bayrak (2015)	RFID-Investitionen in dem Logistiksystemen des Militärs	Einteilung der Kosten in Konstruktion, Betrieb und Sonstige
Preisig und Kasser (2005)	Gebäude	Baukosten, Nutzungskosten, Entsorgungskosten
Rechl u.a. (2017)	Systeme der Intralogistik	Fokus auf die Kosten des Systemausfalls in der Betriebsphase
Uhl (2002)	Industrieanlagen und Systeme	Vorlauf-, Nutzungs-, Entsorgungsphase
Zwicker u.a. (2016)	Robotersysteme	Formation, Betrieb, Verwertung

Insgesamt ist festzustellen, dass es keine eindeutige Empfehlung gibt, nach welchen allgemeingültigen Verfahren die Lebenszykluskosten berechnet werden können. Normen und Richtlinien sind dazu geeignet, als Orientierung bei der Entwicklung eines

¹⁰⁰ Vgl. Höhne (2009), S. 56

eignes LCC-Modells zu dienen¹⁰¹. Im Folgenden wird das charakteristische Vorgehen bestehender Ansätze zur Bestimmung der Lebenszykluskosten geschildert. Dieses Vorgehen stellt die Basis für die Entwicklung einer spezifischen Methode für die Berechnung der Lebenszykluskosten eines CPS-Systems in der Intralogistik dar.

Charakteristisches Vorgehen bestehender Ansätze

Ziel dieses Abschnittes ist eine Synthese verschiedener Ansätze zur Berechnung von Lebenszykluskosten, um charakteristische Ablaufschritte zu identifizieren. Problematisch hierbei sind die unterschiedlichen Terminologien, Ausrichtungen und verwendete Methoden unterschiedlicher Autoren.

Riezler beschreibt sieben grundlegende Prinzipien der Lebenszyklusrechnung¹⁰².

- Das Prinzip der **Projektorientierung** verdeutlicht, dass die Lebenskostenanalyse eine periodenübergreifende Betrachtung einzelner Projekte ist. Somit werden die Kosten eines Projektes ermittelt und nicht die einer bestimmten Periode. In diesem Zusammenhang ist eine klare Definition der Projektspezifikationen und der Einsatzbedingungen notwendig. Dies ist insbesondere dann relevant, wenn mit der Lebenszyklusrechnung die Profitabilität mehrere Projekte verglichen werden soll¹⁰³.
- Nach dem Grundsatz der **Zahlungsorientierung** ist die monetäre Quantifizierung der Auswirkungen des Projekts anzustreben¹⁰⁴. Hier unterscheidet sich das Life Cycle Costing von dem Life Cycle Assessment (dt. Ökobilanz), welches statt monetären Größen ökologische Effekte über den Lebenszyklus misst¹⁰⁵. Riezler betont die hohe Relevanz der Beachtung von Zinseffekten und kalkulatorischen Zinsen¹⁰⁶. Das LCC untersucht Betrachtungszeiträume über mehrere Jahre bis Jahrzehnte.
- Nach dem Prinzip der **Lebenszyklusorientierung** werden Zahlungen eines Projekts nach typischen Lebenszyklusphasen kategorisiert. Dadurch wird die Transparenz und Übersichtlichkeit erhöht. Insbesondere können so Besonderheiten einzelner Phasen und Kostensubstitutionsbeziehungen oder Trade-Offs

¹⁰¹ Vgl. Dreier und Wehking (2016), S. 3

¹⁰² Vgl. Riezler (1996), S. 127 ff.

¹⁰³ Vgl. Bünting (2009a), S. 37

¹⁰⁴ Vgl. Riezler (1996), S. 134

¹⁰⁵ Vgl. Asiedu und Gu (1998), S. 889

¹⁰⁶ Vgl. Riezler (1996), S. 137

zwischen den Kosten verschiedener Phasen identifiziert werden¹⁰⁷. In der Literatur erfolgt die Definition von einzelnen Phasen des Lebenszyklus pragmatisch und fallspezifisch. Beispielsweise wird der Lebenszyklus unterschiedlich detailliert unterteilt. Entsprechend findet sich auch keine einheitliche Nomenklatur¹⁰⁸. Typischerweise werden zunächst drei Phasen (Projektinitiative, eigentliche Laufzeit des Projekts, Ende des Projekts), die sich nach Bedarf weiter in Subphasen untergliedern lassen, unterschieden. Teilweise wird aber auch auf ein explizites Phasenmodell verzichtet. Stattdessen werden Kostengruppen gebildet oder mögliche Szenarien betrachtet, die innerhalb des Lebenszyklus auftreten¹⁰⁹.

- Das Prinzip der **Einflussgrößenorientierung** verlangt die Identifikation signifikanter Einflussgrößen auf die Kostenentwicklung. Diese bilden die Grundlage für später Kostenprognosen.
- Die **Entscheidungsorientierung** macht deutlich, dass die Lebenszyklusrechnung ein Instrument zur Entscheidungsfindung ist. Die Vorteilhaftigkeit des Projekts wird bewertet, indem die Zahlungsströme der Unternehmung bei Durchführung des Projekts mit denen bei Nichtdurchführung verglichen werden¹¹⁰.
- Das Prinzip der **Integrationsorientierung** verlangt die Integration bzw. Verknüpfung der Lebenszyklusrechnung in die übrigen Informationssysteme des Controllings, um eine wirtschaftliche und redundanzfreie Datenerfassung zu gewährleisten.
- Nach dem **Prinzip der Einheitlichkeit von Planung- und Überwachungsrechnung** ist keine Planung ohne Kontrolle sinnvoll. Die ex ante Lebenszykluskalkulation kann mit Fortschreiten des Projekts um eine Überwachungskalkulation ergänzt werden. Zusätzlich können getroffene Annahmen überprüft werden, um so Lerneffekte für zukünftige Kalkulationen zu realisieren.

Insbesondere die Prinzipien der Projektorientierung, Lebenszyklusorientierung und Entscheidungsorientierung geben einen Rahmen vor, wie die Lebenskostenzyklusrechnung zu gestalten ist. Das folgende Konzept ist durch die Arbeit vieler weiterer

¹⁰⁷ Vgl. Zehbold (1996), S. 151

¹⁰⁸ Vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

¹⁰⁹ Vgl. Dreier und Wehking (2016) bzw. Helbig u.a. (2014)

¹¹⁰ Vgl. Riezler (1996), S 149

Autoren geprägt¹¹¹. Es umfasst folgende drei Schritte: Zunächst sind alle relevanten Kosten zu identifizieren und zu kategorisieren. Im zweiten Schritt wird das Projekt in Phasen unterteilt und die Kosten diesen Phasen zugeordnet. Abschließend können die Lebenszykluskosten im Sinne einer Investitionsrechnung berechnet werden.

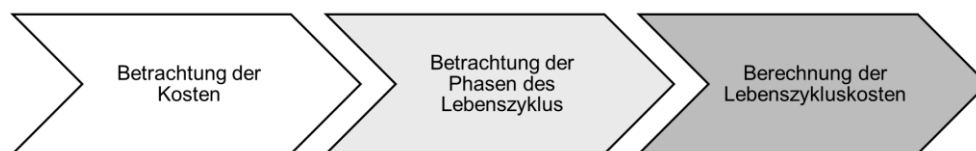


Abbildung 13: Vorgehen des Life Cycle Costing

Betrachtung der Kosten

Die Lebenszykluskostenrechnung zielt auf eine „vollständige Erfassung sämtlicher während des Produktlebenszyklus anfallender Kosten“ ab¹¹². Grundsätzlich gilt, dass bei jeder Lebenszyklusanalyse spezifisch festgelegt werden muss, welche Kostenelemente im welchem Detailgrad erfasst und analysiert werden sollen¹¹³. Da die ex ante Erfassung aller möglicherweise anfallenden Kosten eines Projektes kein einfaches Unterfangen ist, empfiehlt sich ein strukturiertes Vorgehen. Ein **Kostenstrukturplan** ist eine mögliche Methode, wie einzelne Kostenelemente zielgerichtet ermittelt und analysiert werden. Er erfasst Kosten, deren assoziierten Aktivitäten oder Ressourcen und ordnet sie ausgewählten Kategorien zu¹¹⁴. Mögliche Merkmale die einem Kostenelement zugeordnet werden können, sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Kategorisierungsoptionen für den Kostenstrukturplan

Kostenarten nach Produktionsfaktoren	Akteure oder Prozesse	Frequenz des Auftretens	Gewissheit über Kostenausmaß
<ul style="list-style-type: none"> ■ Personal ■ Material ■ Energie ■ Transport ■ Entsorgung ■ Ersatz und Reserveteile ■ Kapital ■ Anlagen 	Bspw. Prozesse <ul style="list-style-type: none"> ■ Im Betrieb ■ Der Instandhaltung ■ Der Administration 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Einmalig ■ Wiederholend, stetig ■ Wiederholend, unstetig 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Ex ante bekannte Kosten ■ Ex ante unbekannte Kosten

¹¹¹ Insb. Abele u.a. (2009); Höhne (2009); Langdon (2005) und Woodward (1997)

¹¹² Bea und Haas (2017), S. 349

¹¹³ Vgl. Abele u.a. (2009), S. 54

¹¹⁴ Vgl. Höhne (2009), S. 40-41

Tabelle 8: Exemplarischer Kostenstrukturplan für einige Kostenelemente

Kostenelement	Kostenarten nach Produktionsfaktoren	Akteure oder Prozesse	Frequenz des Auftretens	Gewissheit über Kosten ausmaß
Projektanbahnung	Personal	Planprozesse	Einmalig	Ex ante unbekannt
Anschaffungskosten einer Anlage	Anlagekosten	Angebotsprüfung	Einmalig	Ex ante bekannt
Wartungskosten einer Anlage (ungeplant)	Personal und Ersatz und Reserve-teile	Reparaturen, Stillstände/ Ausfälle	Wiederholend un stetig	Ex ante unbekannt
Stromverbrauch einer Anlage	Energie	Fertigungsprozesse	Wiederholend, stetig	Ex ante unbekannt

Ein häufig auftretendes Problem im Zusammenhang der Betrachtung von Kosten ist das sog. **Verrechnungsproblem**¹¹⁵. Im Kontext der Lebenszykluskostenrechnung thematisiert es die Problematik wie vor- und nachgelagerte Kostenpositionen zu verrechnen sind. Ein Lösungsvorschlag wird im nächsten Teilabschnitt „Betrachtung der Phasen des Lebenszyklus“ erläutert.

Betrachtung der Phasen des Lebenszyklus

In diesem Schritt sind folgende drei Aspekte zu berücksichtigen: Es gilt die Lebensdauer des zu untersuchenden Objekts zu bestimmen, diese in Phasen zu unterteilen und die im ersten Schritt ermittelten Kosten den Phasen zuzuordnen.

Zunächst ist zwischen der physischen und der wirtschaftlichen Lebensdauer zu unterscheiden: Die physische Lebensdauer ist durch die Grenze der technischen Belastbarkeit eines Produktes begrenzt, während die wirtschaftliche Lebensdauer (auch Nutzungsdauer) die durchschnittliche Zeitspanne misst, die ein Produkt seine Funktionen gerade noch voll erfüllt¹¹⁶.

Unproblematisch ist die Ermittlung der Lebensdauer, wenn es sich bei dem Bewertungsobjekt um ein standardisiertes Produkt handelt, denn dann liegen in der Regel Erfahrungswerte vor. Wird die Lebensdauer von Anlagen geschätzt, können die Abschreibungstabellen für allgemein verwendbare Anlagegüter des Bundesministeriums als Orientierung dienen.

¹¹⁵ Vgl. Horváth (2011), S. 468

¹¹⁶ Vgl. Höhne (2009), S. 37-38

Die angegebenen Lebensdauern von Herstellern von Werkzeugen, Maschinen oder ganzen Anlagen gehen explizit oder implizit von einem bestimmten Lastkollektiv (Belastungs- und Nutzungsintensität) aus, welches auf das Bewertungsobjekt einwirkt. Weichen die tatsächlichen Einsatzbedingungen von den Annahmen, die der Berechnung der Lebensdauer zugrunde liegen ab, ist dies entsprechend zu berücksichtigen. Liegen keine historischen Daten vor, ist ein experimenteller Ansatz zu wählen und die gewonnenen Daten mittels statistischen Verfahrens auszuwerten¹¹⁷.

Wie bereits angesprochen, wird der Lebenszyklus fallspezifisch in Phasen gegliedert. „Durch die lebenszyklus- und phasenorientierte Sichtweise erhalten die phasenspezifischen Ziele, Aktivitäten, Entscheidungen und Ergebnisse eine stärkere Beachtung“¹¹⁸. Tabelle 9 zeigt ein Phasenmodell, welches für Anlagen oder Werkzeugmaschinen eingesetzt werden könnte.

Tabelle 9: Exemplarisches Phasenmodell

Phasen ¹¹⁹ :	Prozesse ¹²⁰ :	Kosten ¹²¹ :
Projektinitiative: Installation	Projektierung, Bereitstellung und Anordnung	Beschaffungskosten, Infrastrukturkosten, sonstige Entstehungskosten
eigentliche Laufzeit des Projekts: Betrieb	Bereithaltung, Einsatz/ Betrieb, Instandhaltung, Verbesserung	Wartung und Inspektion, geplante und ungeplante Instandsetzung, Raumkosten, Material und Rohstoffe, Energiekosten, Hilfs- und Betriebsstoffe, Entsorgungskosten für produzierte Abfälle, Personalkosten, Werkzeugkosten, Rüstkosten, Lagerkosten, sonstige Betriebskosten
Ende des Projekts: Deinstallation	Ausmusterung, Verwertung, Entsorgung, Ersatz	Rückbau, Restwert, sonstige Verwertungskosten

Sind die relevanten Phasen des zu bewertenden Objekts identifiziert, sind als nächstes die im ersten Schritt kategorisierten Kosten den Phasen zuzuordnen. Einzelkosten, wie etwa der Anschaffungspreis oder die Kosten für die Entsorgung einer Anlage lassen sich direkt einzelnen Phase bzw. dem Kostenträger einzelner Phasen zuordnen¹²². Für alle weiteren Kostenpositionen muss eine Lösung für das angesprochene Verrech-

¹¹⁷ Ein mögliches Vorgehen ist in Herrmann u.a. (2011), S. 227-228 beschrieben.

¹¹⁸ Zehbold (1996), S. 110

¹¹⁹ Vgl. Burkert und Dreizner (2011), S. 7

¹²⁰ Vgl. Uhl (2002), S. 51

¹²¹ Vgl. VDMA 34160 [nachzulesen in Burkert und Dreizner (2011)]

¹²² Vgl. Dreier und Wehking (2016), S. 4

nungsproblem gefunden werden. Um dieses Problem zu lösen, ist die Prozesskostenrechnung (active based costing), bzw. ein an der Prozesskostenrechnung orientiertes Verfahren geeignet¹²³. Zunächst werden sich wiederholende „Kostenbündel“ (cost packages) definiert, welche aus verschiedenen Geschäftsprozessen bestehen¹²⁴. Die Geschäftsprozesse werden dann solange in Teilprozesse untergliedert, „bis die Ressourcenverbräuche nur noch von einem Kostentreiber abhängig sind“¹²⁵. Tabelle 10 zeigt exemplarisch das Vorgehen auf, wenn die Kosten des Geschäftsprozesses „physische Implementation einer Anlage“ als Teil des Kostenpakets „Implementierung“ quantifiziert wird¹²⁶. Problematisch ist dieses Vorgehen, wenn keine ausreichende Datengrundlage besteht, beispielsweise wenn die benötigte Zeit für einzelne Tätigkeiten nicht bekannt ist. Dann wird nach Schätzungen von Experten bzw. Mitarbeitern, die die entsprechende Tätigkeit ausführen, gefragt.

Tabelle 10: Kosten des Prozesses der physischen Implementation einer neuen Anlage¹²⁷

Teilprozesse:	Benötigte Zeit in Stunden:	Kosten pro Stunde in Euro
Mechanische Befestigung	1	90
Verkabelung der Komponente	2,5	100
Dokumentation der Verkabelung	1	100
Summe	4,5	440

Am Ende dieses Schrittes sind sämtliche Kosten entweder direkt oder indirekt über Prozesse oder Teilprozesse Kostenbündeln (cost packages) zugeordnet, die sich eindeutig den definierten Lebenszyklusphasen zuweisen lassen.

Berechnung der Lebenszykluskosten

In diesem Schritt geht es um eine ökonomische Evaluation der identifizierten Lebenszykluskosten. Hierfür können drei verschiedene Ansätze herangezogen werden: die Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung unter Berücksichtigung von entschei-

¹²³ Vgl. Asiedu und Gu (1998); Helbig u.a. (2014); Höhne (2009); Dreier und Wehking (2016) und Schweitzer u.a. (2016)

¹²⁴ Vgl. Helbig u.a. (2014), S. 334

¹²⁵ Dreier und Wehking (2016), S. 3

¹²⁶ Ein vergleichbares Vorgehen schlägt auch der VDI in der Tabelle zur Ermittlung der Kosten einer Anlage in der Nutzungsphase vor. Vgl. VDI 2884 (2005)

¹²⁷ Entnommen aus Helbig u.a. (2014), S. 335

dungsorientierten Kosten und Erlösen, die Grenzplankosten- und Deckungsbeitragsrechnung und die dynamische Investitionsrechnung¹²⁸. In der Literatur ist der Kapitalwertansatz und damit das Konzept der dynamischen Investitionsrechnung am weitesten verbreitet¹²⁹. Mit dieser Methode wird berücksichtigt, dass die Kosten im Lebenszyklus zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen und infolgedessen aufgrund der Zeitpräferenz des Investors nicht direkt vergleichbar sind. Für jede Kostenpositionen muss zu einem Basisdatum ein äquivalenter Zeitwert berechnet werden¹³⁰. Um den Zeitwert einer Zahlung zu berechnen, ist ein Diskontierungssatz notwendig. Dieser entspricht dem Zins einer alternativen Wertanlage, die über den gleichen Zeitraum festgelegt ist¹³¹. Für das Diskontieren der Zahlungen ist die Wahl einer passenden Diskontierungsrate entscheidend. Es gibt verschiedene Orientierungsmöglichkeiten, die helfen eine Diskontierungsrate festzulegen: den Zinssatz, den das Unternehmen für die Fremdfinanzierung aufwenden muss, die Opportunitätskosten des Kapitals des Unternehmens (Rendite, die das Unternehmen für sein Kapital am Markt erhalten würde), der Marktzins zu dem sich ein finanziell gesundes Unternehmen am Kapitalmarkt finanzieren kann oder der Zinssatz eines als sicher bewerteten Staatspapiers¹³². Die Diskontierungsrate kann entsprechend der Risikopräferenz um einen Risikoaufschlag ergänzt werden¹³³. Wurde eine Diskontierungsrate festgelegt, „werden alle Kosten zum jeweiligen Periodenende aggregiert und zum Zeitpunkt der Investition diskontiert (...)“¹³⁴. Das Verfahren ist in Abbildung 14 dargestellt¹³⁵.

¹²⁸ Vgl. Götze (2004), S. 301 ff.

¹²⁹ Vgl. Langdon (2005), S. 17

¹³⁰ Vgl. Langdon (2005), S. 15

¹³¹ Vgl. Burkert und Dreizner (2011), S. 16

¹³² Vgl. Langdon (2005), S. 21

¹³³ Vgl. Burkert und Dreizner (2011), S. 29

¹³⁴ Burkert und Dreizner (2011), S. 14

¹³⁵ nach Burkert und Dreizner (2011), S. 14

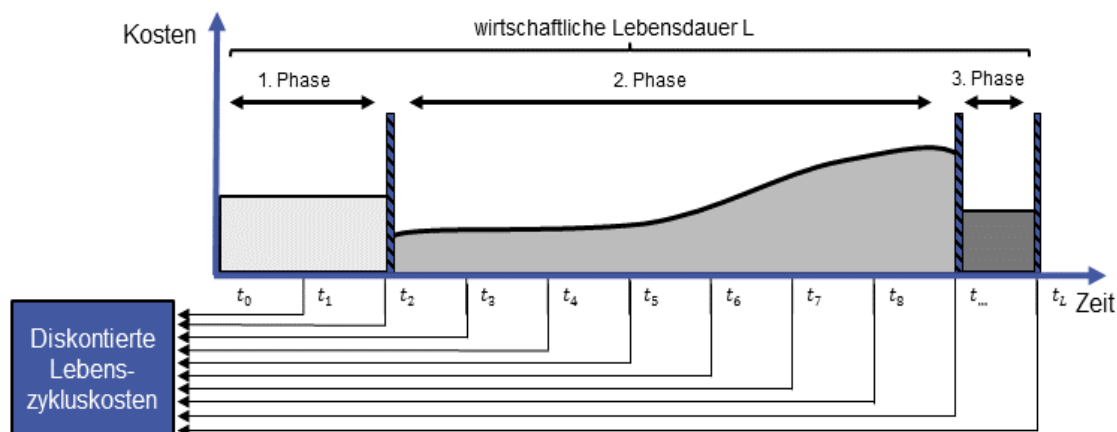


Abbildung 14: Bestimmen der Lebenszykluskosten per Diskontierung in einem Drei-Phasen-Modell

Neben der Zeitpräferenz kann es bei kapitalintensiven und langfristigen Projekten sinnvoll sein, die Inflation zu berücksichtigen. Ein mögliches Vorgehen ist in Abbildung 15 beschrieben¹³⁶.

Berücksichtigung der Inflation
$IAV_t = CV_t \times (1 + i)^t$
Mit <i>IAV</i> = inflation adjusted value; <i>CV</i> = constant Value; <i>i</i> = inflation rate; <i>t</i> = time
Berücksichtigung der Zeitpräferenz
$PV_t = \frac{IAV_t}{(1 + i + r)^t}$
Mit <i>PV</i> = present value; <i>r</i> = discount rate

Abbildung 15: Inflationsbereinigung und Berücksichtigung der Zeitpräferenz

Das Life Cycle Costing ist eine vielschichtige Analyse­methode, mit der es möglich ist, vor- und nachgelagerte Kosten einer Entscheidung zu quantifizieren. Sie bedient sich einer Reihe unterschiedlicher Werkzeuge aus verschiedenen Disziplinen: der Prozesskostenrechnung, verschiedener statistischer Verfahren zur Prognose von Kosten sowie Elementen der Investitionsrechnung. Daher kann das Life Cycle Costing als „Methodensammlung“ bzw. „Toolbox“ aufgefasst werden¹³⁷.

Die Analyse der Lebenskosten findet unterschiedlich dimensioniert statt: Teilweise werden lediglich „standardmäßige Prinzipien der Wirtschaftlichkeit“ (standard economical principals) angewandt, während andere Lebenskostenanalysen komplexe Mo-

¹³⁷ Vgl. Höhne (2009), S. 49

delle unter der Berücksichtigung optimaler Wartungs- und Reparaturstrategien umfassen¹³⁸. Life Cycle Costing Ansätze sind nicht vom zu analysierenden Objekt, sondern auch von den Ressourcen abhängig, die für die Modellierung der Lebenszykluskosten zu Verfügung stehen. Da die Entwicklung individueller Ansätze zur Berechnung der Lebenszykluskosten aufgrund mangelnder Standards und ihrer Komplexität mit hohen Kosten verbunden ist, sind Lebenszykluskostenmodelle in der Praxis nicht weit verbreitet. Dies „verdeutlicht, dass vor allem Konzepte benötigt werden, die zu einer stärkeren Verbreitung und Anwendung dieses Bewertungskonzeptes führen“¹³⁹. Ein solches Konzept hat alle Phasen des Lebenszyklus zu berücksichtigen, Kostenverläufe mit minimalem Input zu schätzen und relevante Kostentreiber zu identifizieren¹⁴⁰.

4.3.2 Life Cycle Costing für cyberphysische Systeme in der Intralogistik Rahmenbedingungen /Anpassung des LCC-Ansatzes an das Forschungsprojekt

Nach dem Prinzip der **Projektorientierung** wird zunächst im Rahmen der Lebenszyklusbetrachtung das zu betrachtende Projekt bzw. Objekt klar abgegrenzt¹⁴¹. Im konkreten Anwendungsfall handelt es sich um (idealerweise bereits ausgereifte) CPS-„Betriebsmittel“ im Sinne eines in sich abgeschlossenen Produktes. Da das Betriebsmittel (bspw. ein den Kommissionier-Prozess unterstützender RFID-Handschuh oder eine Augmented-Reality-Brille) jedoch nur mit einer demensprechenden Infrastruktur voll funktionsfähig ist, müssen Investitionen in diese mitberücksichtigt werden.

Im Folgenden wird demnach häufig stellvertretend für alle Bestandteile der Betriebsmittel und Infrastruktur der Begriff der „Technologie“ verwendet. Sollten die Bestandteile bzw. das betrachtete Projekt den Logistikprozess grundlegend verändern (z. B. Übergang von manuellen zu automatischen Intralogistiksystemen mit fahrerlosen Transportsystemen; Übergang von manueller zu automatischer Inventur mithilfe eines Inventurroboters), kann diese Definition unter Umständen sehr weitreichend sein.

Um die Kosten von CPS-Technologien umfangreich abbilden zu können, ist es notwendig den LCC-Ansatz an die Rahmenbedingungen des Forschungsprojekts anzupassen bzw. einen neuen Ansatz zu entwickeln. Hierbei ist festzustellen, dass ein

¹³⁸ Vgl. Langdon (2005), S. 49

¹³⁹ Mattes und Schröter (2011), S. 18

¹⁴⁰ Vgl. Asiedu und Gu (1998), S. 904

¹⁴¹ Vgl. Bünting (2009b), S. 37

„klassischer“ Ansatz, der sich individuell an verschiedene Anwendungsszenarien anpassen ließe, sich nicht in der LCC-Literatur identifizieren lässt¹⁴². Ebenfalls existiert kein vollständiger LCC-Ansatz für Intralogistiksysteme¹⁴³ oder für CPS-Technologien. Die Entwicklung eines speziellen LCC-Ansatzes erfolgt stattdessen über die Anpassung vergleichbarer Ansätze der (Lebenszyklus-) Kostenbetrachtung bei der Einführung neuer Technologien und der Bewertung von Intralogistiksystemen auf die in AP1 klassifizierten CPS-Technologien. Aufgrund eines fehlenden Ansatzes einer Lebenszykluskostenbetrachtung im gegebenen Anwendungsfall orientiert sich diese sehr allgemein an (Lebenszyklus-) Kosten sowohl bei der Einführung neuer Technologien, als auch bei Systemen der Intralogistik. Dementsprechend unterschiedlich sind die in Tabelle 7 dargestellten Strukturierungsmöglichkeiten von Kosten (und Zyklusphasen). Die Literatur reicht dabei von einer reinen Aufzählung einzelner Kostenbereiche (z. B. Feinbier u.a. 2008, Ullrich 2014) bis zu umfangreichen, allgemeinen Kostenbetrachtungen (Uckelmann und Scholz-Reiter 2011, Uckelmann 2012) inklusive der Strukturierung in einzelne Phasen (Bunduchi und Smart 2010, Bunduchi u.a. (2011a)).

Tabelle 11: Literaturübersicht: Strukturierung und Kontext der Kostenbetrachtung CPS-ähnlicher Betrachtungsobjekte

Autor	Betrachteter Kontext	Strukturierung der Kosten
Bunduchi und Smart (2010)	Kosten der Adoption von Prozessinnovationen (speziell: technologische Innovationen) in Anbieter-Netzwerken	Phasen von Prozessinnovationen: <ul style="list-style-type: none"> ■ Generation stage: development costs oder initiation costs ■ Acceptance stage: switching costs und capital costs ■ Implementation stage: implementation costs und relational costs
Bunduchi u.a. (2011b)	Kosten der Adoption von Prozessinnovationen am Beispiel der RFID-Technologie in Krankenhäusern	
Bunduchi u.a. (2011b)	Kosten der Adoption von Prozessinnovationen am Beispiel der Entwicklung der RFID-Technologie für die Industrie	
Ozdemir und Bayrak (2015)	Investitionskosten der RFID-Technologie in der Militärlogistik	Zusätzliche Kosten durch RFID: <ul style="list-style-type: none"> ■ Infrastrukturkosten ■ Kosten operativer Logistik ■ Sonstige Kosten
Rechl und Günthner (2016)	Kostentreiber von automatisierten Intralogistiksystemen	Phasen des System-Lebenszyklus: <ul style="list-style-type: none"> ■ Konzept und Design ■ Beschaffung und Implementierung ■ Betrieb ■ Entsorgung
Feinbier u.a. (2008)	Kosten der RFID-Technologie aus Erfahrungen in der Stahlindustrie	Einfache Aufzählung der Kostenbestandteile bei RFID-Technologie-Einführung (Aufzählung?)

¹⁴² Vgl. Thoben u.a. (2017), S. 13

¹⁴³ Vgl. RechI und Günthner (2016), S. 2-3

Autor	Betrachteter Kontext	Strukturierung der Kosten
Uckelmann und Scholz-Reiter (2011)	Kosten von „Internet-of-Things“-Lösungen abgeleitet aus Kosten der RFID-Einführung	Kosten-Ebenen von IoT-Lösungen: <ul style="list-style-type: none"> ■ Mobile Geräte ■ Aggregationsgeräte und Software (System)-Integration ■ Schulungen und Reorganisation ■ Anwendungen ■ Technisches und organisationales Netzwerk ■ Betrieb (operationale Kosten)
Uckelmann (2012)	Kosten von „Internet-of-Things“-Lösungen abgeleitet aus Kosten der RFID-Einführung	Strukturierung über „Semiotik“ <ul style="list-style-type: none"> ■ Physische Welt ■ Empirie ■ Syntaktik ■ Semantik ■ Pragmatik ■ Soziale Welt
Ullrich (2014)	(Kosten-) Kalkulation eines Fahrerlosen Transportsystems orientiert an der VDI-Richtlinie für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von FTS (VDI 4450)	Dreiteilung der Kalkulation (beinhaltet auch „Nutzen“ <ul style="list-style-type: none"> ■ Investitionen ■ Direkte Kosten ■ Indirekte Kosten ■ Zusatznutzen

Wie in Tabelle 11 ersichtlich, orientieren sich zahlreiche Autoren bei der Entwicklung ihrer Modelle an der Einführung der RFID-Technologie bzw. verwenden die Einführung als Beispiel in ihren Erläuterungen. Die Objektidentifikation mit Radiowellen bzw. die mit der Investition in RFID-Technologie verbundenen Kosten eignen sich als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines LCC-Ansatzes für CPS. So ist die Objektidentifikation via RFID nicht nur Bestandteil zahlreicher CPS-Lösungen, beispielsweise zur Optimierung des Lagermanagements in der Stahlindustrie¹⁴⁴, die Kostenstruktur der Investition in RFID lässt sich auch auf CPS-Technologien bzw. Bestandteile von CPS-Technologien übertragen: die in der (Intra-) Logistik zu transportierenden bzw. kommissionierenden Objekte (Güter/Waren, Personen, Transportmittel) müssen zur Identifikation der Position (und des Zustandes) via objektidentifizierender Technologie erkannt und die Informationen über selbstständig kommunizierende Software je nach Anwendungszweck verarbeitet werden¹⁴⁵. Hierbei ist einschränkend zu bedenken, dass die Objektidentifikation via RFID nicht mit CPS oder IoT-Lösungen gleichzusetzen ist. Die Objektidentifikation (über RFID, Barcode, Sensorik) stellt vielmehr einen

¹⁴⁴ Vgl. Feinbier u.a. (2008), S. 16

¹⁴⁵ Vgl. Ozdemir und Bayrak (2015), S. 95 ff.

Bestandteil der CPS-Technologien dar¹⁴⁶. Auf die durch Objektidentifikation erreichte Informationsgewinnung bzw. Informationsverbesserung erfolgt schließlich eine (Echtzeit-) Verarbeitung der Informationen (bspw. über Internetanbindung) und eine Reaktion (z.B. über Aktoren, Steuerung des Verhaltens des Logistikpersonals).

Bei der Entwicklung eines LCC-Ansatzes für CPS-Technologien ist zudem einschränkend zu beachten, dass es sich hierbei um eine Lebenszyklusbetrachtung eines Objektes (Technologie) handelt. Da die Lebensdauer eines solchen immer von der Intensität der Nutzung abhängt, ist eine generelle Einschätzung der Lebensdauer sehr komplex¹⁴⁷. Zusätzlich stellt sich bei einer Technologie grundsätzlich die Frage der zukünftigen Entwicklung, d.h. ob und in welcher Form Folgeinvestitionen möglich und notwendig sind, lässt sich aufgrund fehlender Erfahrungswerte nicht beurteilen. Aus Kostensicht wird dies vor allem dann relevant, wenn Folgeinvestitionen während der Betriebsphase getätigt werden müssen und wenn der Zeitpunkt dieser Investitionen prognostiziert werden soll. Alternativ kann der Lebenszyklus einzelner Betriebsmittel betrachtet werden (vgl. Kategorisierte CPS-Technologien aus AP1).

Kosten der CPS-Einführung und Abgrenzung in Lebenszyklusphasen



Abbildung 16: Vorgehen des Life Cycle Costing für CPS in der Intralogistik (1)

In Anlehnung an das Vorgehensmodell für die Ermittlung von Lebenszykluskosten (vgl. Abbildung 16) beschäftigt sich der folgende Abschnitt mit der gemeinsamen Betrachtung der Vorgehenschritte der Kosten- und Lebenszyklusbetrachtung mit dem Ergebnis einer Checkliste für anfallende Kosten bei CPS-Technologien (vgl. Tabelle 12). Ausgangspunkt der Checkliste sind die in Tabelle 11 zusammengefassten Ergebnisse der Literaturrecherche.

Nach dem Prinzip der **Lebenszyklusorientierung** (vgl. Kapitel 4.3.1) erfolgt die Einteilung der Phasen fallspezifisch¹⁴⁸. Aufgrund der Ergebnisse aus der Literaturrecher-

¹⁴⁶ Vgl. Uckelmann und Scholz-Reiter (2011), S. 230

¹⁴⁷ Vgl. Pflaum u.a. (2014), S. 88

¹⁴⁸ Vgl. Zehbold (1996), S. 151

che wird die bei der Lebenszyklusbetrachtung von Investitionsgütern übliche Dreiteilung der Lebenszyklusphasen (Tabelle 9: je eine Phase vor, während und nach des Betriebs) um eine Implementierungsphase ergänzt (vgl. Abbildung 17). Diese ist zwischen der Planungs- bzw. Initiierungsphase und der Betriebsphase anzusiedeln, lässt sich jedoch je nach Anwendungsfall nicht immer eindeutig von den „klassischen“ Phasen abgrenzen. Daneben werden die Kosten im Rahmen der Beendigung des Projektes (in Tabelle 9: Ende des Projekts/Deinstallation) der Betriebsphase zugeordnet.

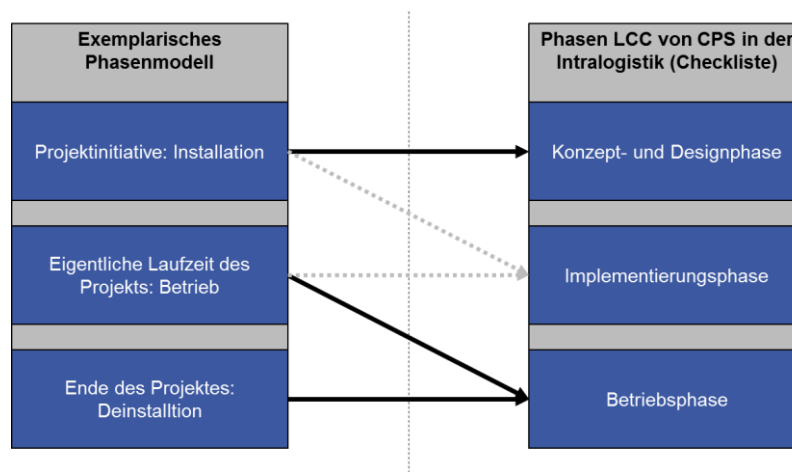


Abbildung 17: Anpassung der „klassischen“ Phasen des LCC an CPS in der Intralogistik

Rechl und Günther (2016) verweisen auf fundamentale Unterschiede zwischen Intralogistik- und Produktionsprozessen und eine demnach fehlende Eignung von LCC-Modellen der Bewertung von Maschinen und Anlagen für die Bewertung von Intralogistiksystemen¹⁴⁹. Bei (Intra-) Logistik-CPS sind für Maschinen und Anlagen konzipierte LCC-Modelle dementsprechend ebenfalls weniger geeignet. Des Weiteren identifizieren RechI und Günther (2016) zu diesem Zweck angepasste Phasen¹⁵⁰. Die identifizierten Phasen lassen sich auf ein LCC-Modell für CPS übertragen. Die Bezeichnung der Phasen der Checkliste erfolgt dementsprechend in Anlehnung an die Phasen der Projektkostenkalkulation via Lebenszykluskosten bei der Bewertung von Intralogistiksystemen nach RechI und Günther.

Davon ausgehend, dass die CPS-Technologien an bzw. in ein bestehendes Intralogistiksystem integriert werden, beziehen sich die in der Checkliste dargelegten Komponenten auf zusätzliche Kosten, d.h. Kosten die in Verbindung mit der Einführung der

¹⁴⁹ Vgl. RechI und Günthner (2016), S.2

¹⁵⁰ Vgl. RechI und Günthner (2016), S. 3

CPS-Technologien stehen. Bei physischen Bestandteilen, wie z.B. mobilen Endgeräten oder Transportfahrzeugen gestaltet sich die Zuordnung wesentlich einfacher, als beispielsweise bei Personalkosten im laufenden Intralogistikbetrieb bzw. dessen Verwaltung: Diese werden der Vollständigkeit halber hier zwar aufgeführt, die Wirkung der CPS-Technologien auf die Personalkostenstruktur muss jedoch nach dem Prinzip der Entscheidungsorientierung in Zusammenhang mit der CPS-induzierten Performancebeurteilung bzw. -steigerung (vgl. AP2, AP4) beurteilt werden. Folglich ist die Entscheidung von einem Vergleich mit anderen Investitionsmöglichkeiten oder mit dem Fall einer ausbleibenden Investition (sog. Unterlassungsalternative) abhängig (Vgl. Kapitel 0)¹⁵¹.

Konzept- und Designphase

Die Konzept- und Designphase umfasst alle vorbereitenden Tätigkeiten der Entscheidung über eine mögliche Technologieeinführung. Die Generierung entscheidungsrelevanter Informationen und Planung der im Rahmen der Technologieeinführung notwendiger Schritte¹⁵² bspw. über die Inanspruchnahme von Beratungsdienstleistungen oder die Durchführung von Wirtschaftlichkeitsbewertungen ist vorrangig von Personalkosten geprägt. Gleichzeitig hängt das Ausmaß der Planungstätigkeiten bzw. der Kosten erheblich von der CPS-Technologie (bzw. des Betriebsmittels) und der Tiefe des damit verbundenen Eingriffs in das bestehende Intralogistiksystem ab.

Bunduchi und Smart (2010) bezeichnen diesen Abschnitt bei der Adoption von Prozessinnovationen in Intralogistiksysteme als „generation stage“¹⁵³. Ist das innovierende Unternehmen nicht an der Entwicklung der Technologie selbst beteiligt, umfasst die Phase demnach vor allem „initiation costs“. Neben Kosten der konkreten Entscheidungsvorbereitung bezeichnen diese auch Kosten, die projektunabhängig im Rahmen der Informationsbeschaffung und Aufrechterhaltung eines Informationsstandes über mögliche technische und organisatorische Innovationen anfallen¹⁵⁴. Die Abgrenzung zur Implementierungsphase bzw. die Zuordnung der Kosten erfolgt über den Bezug zur (Kauf-) Entscheidung, d.h. mit der tatsächlichen Integration der CPS-Bestandteile in das Logistiksystem.

¹⁵¹ Vgl. Braun (2008), S. 8

¹⁵² Vgl. Großklaus (2008), S. 46

¹⁵³ Vgl. Bunduchi und Smart (2010), S. 369

¹⁵⁴ Vgl. Bunduchi und Smart (2010), S. 372-376

Tabelle 12: Checkliste: Kosten innerhalb der Lebenszyklusphasen von CPS-Technologien

Phase	Kosten
Konzept/ Design	Lohnkosten/Gehälter
	Kosten für in Anspruch genommene Beratungsleistungen
Beschaffung und Implementierung	Anschaffungskosten <ul style="list-style-type: none"> ■ Physische Bestandteile: <ul style="list-style-type: none"> ○ Betriebsmittel ○ Infrastruktur ○ i.V.m. Ausstattung der Produkte ■ Middleware und Softwarekosten (informationstechnische Ebene)
	Installationskosten <ul style="list-style-type: none"> ■ der physischen Bestandteile ■ der Middle- und Software auf Betriebsmittel und Infrastruktur ■ der Software auf [„Rechner“]
	Kosten für Software- und Systemintegration (ggf. Kosten für neue physische und informationstechnische Schnittstellen)
	Kosten für Tuning und Systemoptimierung
	Kosten für Personalschulungen
	Kapitalkosten der Investition
Betrieb	Geplante Instandhaltung/Wartungskosten
	Ungeplante Instandhaltung/Reparaturen
	Ersatzteilkosten
	Ersatzteillagerhaltungskosten
	Energiekosten
	Versicherung
	Entsorgungskosten
	Ggf. zusätzliche Personalkosten durch neue Schnittstellen oder der CPS-Betreuung
	Kosten für Softwareupdates
	Lizenzgebühren (Software)
	Systemerweiterung/Upgrading
	Kosten für Schäden (an Produkten und betrieblichen Einrichtungen) und Folgeschäden von Fehlidentifikationen
Entsorgung	Entsorgung wird als laufender Kostenpunkt in die Betriebsphase aufgenommen. Es ist davon auszugehen, dass nur einzelne Komponenten, aber niemals alle Bestandteile von CPS bzw. der Technologie „entsorgt“ werden müssen.

Beschaffungs- und Implementierungsphase

Die Art und parallel zur Designphase der Umfang der Kosten während der Beschaffung und Implementierung ist maßgeblich von den gewählten CPS-Technologien abhängig. Dementsprechend sind die Kostenkategorien möglichst allgemein formuliert. In der Checkliste wird bei den Anschaffungskosten zwischen Kosten physischer Komponenten einerseits und Kosten informationstechnischer bzw. systemtechnischer und organisationaler Komponenten andererseits unterschieden. Die Anschaffungskosten der

physischen Komponenten lassen sich wiederum in die Kosten der jeweiligen Betriebsmittel (z.B. mobile Endgeräte, Wearable-Computing-Devices, Fahrerloses Transportfahrzeug) und in die Kosten von Komponenten, die i.V.m. der Anpassung der Infrastruktur stehen, unterteilen. Infrastrukturkosten betreffen dabei die räumliche Ausstattung der Betriebs- und Logistikbereiche (z.B. Ausstattung der Räumlichkeiten mit Sensoren, Aktoren, RFID-Lesegeräten). Gegebenenfalls müssen die zu transportierenden bzw. kommissionierenden Produkte und Produktbestandteile selbst mit CPS-Komponenten (z.B. RFID-Tags) ausgestattet werden. Auf informationstechnischer Ebene fallen Kosten für Middleware und Software an.

Middleware ist eine Software, deren Hauptzweck darin besteht, verschiedene Systeme mit entsprechenden Anwendungen zu verbinden¹⁵⁵ und somit die Interaktion zwischen diesen zu ermöglichen. Entsprechend verbindet sie eine Komponente (bspw. Lesegeräte) mit dem Hauptrechner und lässt diese mit Backend- und Anwendungsprogrammen (bspw. Lagerverwaltung) kommunizieren¹⁵⁶.

Die Aufgaben der Middleware beschränken sich dabei nicht nur auf das Ermöglichen der Kommunikation zwischen den Systemen, sondern auch auf die Erleichterung eben dieser¹⁵⁷. Neben den Anschaffungskosten fallen Kosten für die räumliche Installation der Bestandteile, sowie die Installation der Middleware bzw. Software an. Sowohl im Rahmen der Integration der physischen, als auch der informationstechnischen Bestandteile können Kosten i.V.m. der Einführung neuer Schnittstellen (technischer wie organisatorischer) auf das Unternehmen zukommen. Das Testen der Funktionsfähigkeit des Systems bzw. der einzelnen CPS-Bestandteile ist ebenfalls mit Kosten verbunden. Hinzu kommen Schulungskosten für das Personal der Intralogistik, sowie Kosten der Kapitalbindung¹⁵⁸.

In Anlehnung an die Adoption von Prozessinnovationen bietet sich eine Betrachtung der von Bunduchi und Smart festgestellten „switching costs“ und „capital costs“ im Rahmen der „acceptance stage“ (Phase der Entscheidung und Entscheidungsakzeptanz) an: Das Ausmaß der Kosten der Systemintegration hängt demnach von der technischen und organisatorischen Komplementarität („switching costs“) zwischen bestehendem System und der Innovation ab. Die Kosten einer Innovation sind unter anderem davon abhängig, welche Ressourcen aufgrund der (technischen) Neuerung nicht

¹⁵⁵ Vgl. Heinzelman u.a. (2004), S. 8

¹⁵⁶ Vgl. Ozdemir und Bayrak (2015), S. 91

¹⁵⁷ Vgl. da Cruz u.a. (2018), S. 876

¹⁵⁸ Vgl. Ozdemir und Bayrak (2015), S. 92 ff.

mehr nutzbar sind. Unter „capital costs“ werden technologische und marktbezogene Unsicherheiten bei Investment-Entscheidungen subsumiert. Technologische Unsicherheiten beinhalten demnach das Risiko, dass die Technologie die Erwartungen des Unternehmens nicht erfüllen kann, marktbezogene Unsicherheiten beschreiben das Risiko durch Reaktion anderer Marktteilnehmer und Stakeholder¹⁵⁹.

Eine exakte Abgrenzung der Implementierungs- zur Betriebsphase fällt aufgrund der Kosten in Verbindung mit Test- und Optimierungsmaßnahmen schwer. So sind Konfigurierungsmaßnahmen bei einer solchen Vielzahl an (informations-) technischen Systembestandteilen obligatorisch. Generell können Optimierungsmaßnahmen jedoch bis weit in die Betriebsphase hinein reichen¹⁶⁰. Statt einer inhaltlich exakten Abgrenzung der Prozesse kann die Abgrenzung auch über einen festgelegten Zeitpunkt erfolgen.

Betriebsphase

Zahlreiche Kostenbestandteile von CPS während der Betriebsphase decken sich mit solchen aus bekannten LCC-Modellen bspw. aus der Beurteilung von Maschinen und Anlagen oder von Infrastrukturprojekten. Kosten für geplante und ungeplante Instandhaltungsmaßnahmen, Ersatzteile und Ersatzteillagerung sowie Energie- und Versicherungskosten lassen sich aus „klassischen“ LCC-Betrachtungen übernehmen. Bei Kosten für Softwareupdates und Kosten für Upgrading bzw. eine Systemerweiterung ergeben sich insofern Unterschiede, dass die zahlreichen Komponenten von CPS nicht als ein einzelnes Investitionsgut, i.S.e. Maschine betrachtet werden können. Hier ist es möglich, dass auf die anfängliche Investition weitere Investitionen in zusätzliche CPS-Bestandteile erfolgen werden. Diese sind dann wiederum von den gewählten Technologien abhängig und lassen sich dementsprechend auf einer allgemeinen Betrachtungsebene nicht weiter differenzieren. Kosten für Schäden an Infrastruktur und Produkten sowie Folgeschäden fehlerhafter Produktidentifikationen fallen parallel zu Personalkosten der Intralogistik auch ohne eine Investition in CPS an. Sie sind nach dem Prinzip der Entscheidungsorientierung (Vgl. Kapitel 4.3.1) mit den Kosten bei Nicht-Durchführung der Investition zu vergleichen und damit Gegenstand der Profitabilitätsbewertung in AP4 (zusammen mit den identifizierten Performancesteigerungen aus AP2).

¹⁵⁹ Vgl. Bunduchi und Smart (2010), S. 376-377

¹⁶⁰ Vgl. Albrecht und Wetzel (2009), S. 85

Entsorgung/ Deinstallation/ Nachbetriebsphase

Bei CPS ist davon auszugehen, dass nicht die gesamte Technologie „entsorgt“ wird, sondern lediglich einzelne Bestandteile während des Betriebes ausgetauscht werden müssen. Ebenso ist der Zeitpunkt einer endgültigen Entsorgung bei der Einführung einer Technologie schwer zu ermitteln bzw. es stellt sich die Frage, ob die Festlegung eines solchen Zeitpunktes in diesem Zusammenhang zielführend ist. Bei der Lebenszyklusbetrachtung von CPS in Intralogistiksystemen kann dementsprechend auf die Festlegung einer Phase nach dem Betrieb verzichtet werden. Entsorgung als Kostenbestandteil wird der Betriebsphase untergeordnet.

Da bei der Übernahme und Verwendung von CPS große Mengen an Daten gesammelt und verarbeitet werden, können mit Maßnahmen der Datensicherheit oder der Wahrung von Privatsphäre zusätzlich Kosten auf ein Unternehmen zukommen. Diese betreffen dabei z. B. das Gewähren von Zugriffsrechten. Die Maßnahmen können aber auch primär informierender Natur, d.h. vor allem mit der Aufklärung von Mitarbeitern und Stakeholdern über die tatsächlich gesammelten Daten verbunden sein¹⁶¹. Je nachdem wann die informierenden oder systemgestaltenden Maßnahmen durchgeführt werden, lassen sich deren Kosten in unterschiedliche Phasen einordnen. Da Systemintegration sowie Personalschulung allerdings nach dem Modell (Checkliste) der Beschaffungs- und Implementierungsphase zugeordnet werden, empfiehlt sich eine Untergliederung zu der Phase bzw. den Kostenbestandteilen der Phase¹⁶².

4.3.3 Exemplarische Berechnung von Lebenszykluskosten / Anwendung der Checkliste

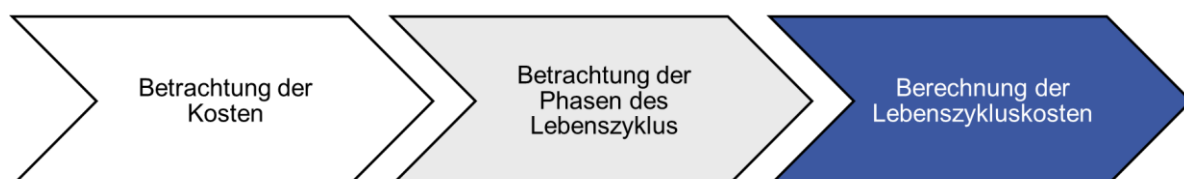


Abbildung 18: Vorgehen des Life Cycle Costing für CPS in der Intralogistik (2)

Im folgenden Abschnitt wird die Checkliste anhand des Beispiels einer RFID-gestützten „passiven“ Wearable Computing-Technologie angewandt. Vor dem Hintergrund der Bewertung von CPS-Technologien für kleine und mittelständische Unternehmen

¹⁶¹ Vgl. Garfinkel u.a. (2005), S. 35 ff.

¹⁶² Vgl. Gross und Thiesse (2005), S. 307

(KMU) und damit Unternehmen, deren Logistikprozesse noch von manuellen Tätigkeiten geprägt sind, empfiehlt sich die Betrachtung bereits ausgereifter Technologien bzw. Betriebsmittel (vgl. AP1).

Aufgrund der umfangreichen Erfahrungen mit dem Einsatz von RFID in Logistik- und Betriebsprozessen (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) wird deshalb als Beispiel die Kommissionierung mithilfe eines RFID-Handschuhs/Armbands gewählt, welcher über (akustische) Rückmeldungen Fehler im Rahmen der Kommissionierung vorbeugen soll. RFID-Handschuhe lassen sich im Vergleich zu komplexeren Anwendungssystemen wie fahrerlosen Transportfahrzeugen oder Kommissionier-Robotern einfacher mit ähnlichen Anwendungen (z.B. Sensor-Armband) vergleichen sowie mit anderen Anwendungen kombinieren. So kann die „passive“ Kommissionier-Unterstützung durch ein RFID-System mit zahlreichen Systemen der Informationsbereitstellung kombiniert werden. Hierunter fallen sowohl herkömmliche Kommissioniertechniken wie Kommissionierlisten und mobile Datenterminals, als auch solche, die selbst als CPS-Technologien charakterisiert werden können (z.B. Pick-by-Technologien).

Die Ausführungen **zur Beschaffungs- und Implementierungsphase** (insbesondere Infrastruktur-) Bestandteile orientieren sich dabei an den Feststellungen aus AP1 sowie ein Forschungsbericht des Lehrstuhls fml der Technischen Universität München zu papierlosen Montage- und Kommissionierungssystemen¹⁶³. Die schriftliche Ausformulierung über den Zusammenhang von Phasen und Kosten, welche bei der Einführung eines RFID-Handschuhs anfallen, erfolgt zunächst allgemein. Sie basiert auf der Zusammenführung der im Laufe der Arbeit gewonnen Erkenntnisse bzgl. der anfallenden Kosten und Phasen im LCC von CPS in der Intralogistik. Im Anschluss daran werden exemplarisch die Kosten für Anschaffung und Instandhaltung aufgegriffen. Diesen kommt gemäß Ausführungen eine große Bedeutung im LCC zu, da sie sich elementar auf die Profitabilität von CPS in der Intralogistik auswirken.

In die Beschaffungs- und Implementierungsphase fallen alle Schritte und Kosten die zur Inbetriebnahme des CPS und der RFID-Handschuhe von Nöten sind. Hierzu gehören Anschaffungen, Installation, Schulungen und Sonstiges. Zur Nutzung eines RFID-Handschuhes sind diverse Anschaffungen nötig. Damit die Handschuhe mit dem CPS kommunizieren können, werden neben den Handschuhen an sich entsprechende

¹⁶³ Vgl. Wölfle und Günthner (2011)

Rechner, Server, deren Infrastruktur, Akku-Ladevorrichtungen, gegebenenfalls Sensoren an Produktstandplätzen sowie Soft- und Middleware benötigt¹⁶⁴. Die Lebensdauer der einzelnen Komponenten ist für die Berechnung der Anschaffungskosten ebenfalls zu beachten¹⁶⁵. Diese Anschaffungen sind wiederum mit Installationen verbunden, deren Aufwand je nachdem, inwiefern ein Unternehmen die benötigten Ressourcen schon vorweisen kann, stark variiert (vgl. Arbeitspapier 1). Ist besagtes Unternehmen beispielsweise schon im Besitz von genügend Rechen- und Serverleistung, müssen in diesem Bereich keine extra Anschaffungs- und Installationskosten einberechnet werden. Zu beachten ist bei der Berechnung der Installationskosten, dass der laufende Betrieb eventuell eingeschränkt wird. Für die Integration des RFID-Handschuhs in die Abläufe des Unternehmens benötigen sowohl die Kommissionierer, die direkt mit den Handschuhen arbeiten, als auch die IT-Abteilung oder die Mitarbeiter, die das CPS betreuen, Schulungen. Weitere Kosten können durch Testläufe, Systemintegration und Kapitalkosten anfallen (vgl. Tabelle 8).

Durch die Inbetriebnahme des CPS wird die Betriebsphase erreicht. Auch hier fallen diverse Kostenpunkte an. Durch Reinigung und Pflege der Sensorik, durch Systemwartungen- und Überprüfungen etc. entstehen Instandhaltungskosten.

Falls ein Teil des RFID-Handschuhs oder des CPS, z.B. ein Sensor, defekt ist, muss ein Ersatzteil gekauft werden. Damit der Betrieb nicht erliegt, sollten für einen solchen Fall Ersatzteile und Ersatzhandschuhe gelagert werden, was zumindest geringe Lagerkosten (Güterlagerung und Verwaltung, Lagerraumkosten, etc.) verursacht. Die Kosten für die Lagerung steigen dabei mit der Vielfalt und Menge an einzulagernden Gegenständen. Sowohl die Handschuhe, als auch die datenverarbeitenden Rechner und Server benötigen Strom. Auf der einen Seite entlastet das CPS die Kommissionierer, bzw. macht ihre Arbeit effizienter, auf der anderen Seite können zur Betreuung des Systems an sich neue Personalkosten anfallen. Das CPS benötigt zudem in regelmäßigen Abständen Software- und Sicherheitsupdates, eventuell auch damit einhergehende Hardwarebeschaffungen. Zudem fallen Lizenzgebühren für die Nutzung der Soft- und Middleware an.

¹⁶⁴ Vgl. Wölflé und Günthner (2011), S. 115

¹⁶⁵ Vgl. Mauchle und Ritz (2007), S. 8

Je nach Höhe der Investition kann sich dies auch in den Versicherungskosten wieder spiegeln. Zu den Betriebskosten gehören im Falle eines CPS auch die Kosten für Ent-sorgungen, da davon ausgegangen werden kann, dass ein einmal implementiertes CPS nie in Gänze, sondern defekte Teile immer nur stückweise, während des Betrie-bes, entsorgt werden, weshalb eine Deinstallations-, bzw. Entsorgungsphase entfällt (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

■ **Beispiel Anschaffungskosten**

Kosten für den RFID-Handschuh selbst ergeben sich über den Anschaffungspreis und in Abhängigkeit der Anzahl der benötigten Betriebsmittel (bzw. ob pro Mitarbeiter ein Gerät angeschafft werden soll oder je gleichzeitig eingesetztem Personal). Da in den Handschuh bereits für die RFID-Technologie notwendige Lese- und Schreibvorrich-tungen, sowie Antenne und Stromversorgung in Form eines Akkus integriert sind, fal-len im Rahmen des Aufbaus der notwendigen Infrastruktur lediglich Kosten für die RFID-Transponder sowie für Akku-Ladevorrichtungen an. Kosten eines einzelnen Transponders können dabei je nach Anwendungsszenario variieren, die Anzahl der Transponder hängt von dem jeweiligen Intra-logistik- bzw. Kommissioniersystem ab: Je nachdem welche Objekte eingelagert werden, können die Transponder an den zu kommissionierenden Objekten selbst, an den Behältern (in denen sich die Objekte be-finden) oder an den Lagerplätzen selbst (i.d.R. Regalplätze) angebracht werden. Hier-bei sollte berücksichtigt werden, dass eine Markierung der Objekte oder der Behälter zusätzliche (laufende) Kosten während der Betriebsphase bedingen (neue Ob-jekte/Behälter müssen mit Transpondern ausgestattet werden). Auf der Software-Ebene können Kosten für Datenbanksysteme (z.B. Oracle, Microsoft Access) sowie für Warehouse-Management-Systeme anfallen. Sollten diese im Unternehmen bereits vorhanden sein, beschränken sich die Kosten ggf. nur auf eine Erweiterung dieser Systeme.

■ **Beispiel geplante Instandhaltung**

In diesem einfachen Beispiel betreffen mögliche Instandhaltungstätigkeiten lediglich die RFID-Handschuhe selbst. Die Kosten der Wartungsvorgänge pro Jahr hängen von der geplanten Anzahl der Vorgänge, dem damit verbundenen zeitlichen Aufwand, dem

Personalaufwand sowie den benötigten Materialien ab¹⁶⁶. Daneben kann noch die zeitliche Entwicklung der Kosten der geplanten Instandhaltung (und deren Zusammenhang mit der ungeplanten Instandhaltung) betrachtet werden. So kann bspw. angenommen werden, dass die Kosten der Instandhaltung aufgrund von Lerneffekten über den Nutzungszeitraum hinweg ab- und gegen Ende des Nutzungszeitraumes aufgrund erhöhten Verschleißes wieder zunehmen.

Wie im Rahmen des Beispiels zur Instandhaltung bereits angedeutet, spielt die Entwicklung der einzelnen Kostenpositionen über den Nutzungs- und damit Kalkulationszeitraum hinweg eine entscheidende Rolle. Dies betrifft beispielsweise auch die Entwicklung (bzw. Steigerung) von Beschaffungspreisen, Personal- oder Energiekosten für die jährliche Steigerungsraten angenommen werden können¹⁶⁷. Grund hierfür ist die in zuvor erläuterte Zeitpräferenz. Kosten (bzw. Erträge) zu späteren Zeitpunkten fallen bei der Investitionsentscheidung weniger stark ins Gewicht als solche zu Beginn des Nutzungszeitraumes. Der Detailgrad dieser Betrachtungen sollte jedoch in einem angemessenen Verhältnis zur absoluten Höhe der jeweiligen Kostenposition bzw. des Gesamtvolumens der Investition stehen. Dies gilt im Übrigen nicht nur für die zeitliche Veränderung einzelner Kostenpositionen, sondern für die Differenzierung der Kostenpositionen allgemein: Bei einfachen Beispielen wie RFID-Armbändern kann es ggf. wirtschaftlicher sein, einzelne Kostenpositionen zusammenzufassen bzw. statt einer detaillierten Kostenprognose Pauschalwerte (basierend auf Erfahrungswerten) anzunehmen.

4.3.4 Eignung des LCC-Ansatzes für CPS und Fazit

Die Eignung der Verwendung der LCC-Methodik als Grundlage der wirtschaftlichen Beurteilung von Investitionsobjekten ergibt sich aus dem hohen Anteil der Betriebs- und Entsorgungskosten bzw. deren zeitlichen Anfallens nach der Beschaffung. Insbesondere Personalkosten im Rahmen des Betriebs und der Instandhaltung des Investitionsgutes sind hier als treibender Faktor zu nennen. Bei CPS ist u.a. mit eben solchen Kosten bzw. Kostenverhältnissen zu rechnen. Dementsprechend kann diese „Grundvoraussetzung“ für die Eignung eines Investitionsobjektes als Betrachtungsobjekt eines LCC als erfüllt angesehen werden. Umgekehrt stellt sich die Frage ob das vergleichsweise aufwändige Verfahren des LCC für die Beurteilung von CPS notwendig

¹⁶⁶ Vgl. VDMA 34160 [nachzulesen in Burkert und Dreizner (2011)]

¹⁶⁷ Vgl. Burkert und Dreizner (2011), S. 23

ist oder ob „einfachere“ Beurteilungsansätze gewählt werden könnten. Hier liegt die Vermutung nahe, dass mit steigender Komplexität der Systeme (organisatorisch wie (informations-) technisch) die Komplexität der Kostenstruktur von CPS ansteigt und somit die Verwendung eines LCC-Ansatzes rechtfertigt.

Wie aus der Literaturrecherche hervorgeht, existiert kein allgemeingültiger Ansatz des LCC, insbesondere hinsichtlich der Einteilung in Phasen und der betrachteten Kosten. Demensprechend ist die im Rahmen des AP3 entwickelte allgemein gehaltene Checkliste fallspezifisch anzupassen. Ansatzpunkte für eine Anpassung bzw. weitere Differenzierung könnte z.B. eine Unterteilung nach den Einsatzgebieten der Intralogistik (Transport, Lagerung, Kommissionierung, Verpackung, Wareneingang und -ausgang) oder nach dem Automatisierungsgrad des Intralogistiksystems (manuell, halbautomatisiert, automatisiert) bieten.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Lebenszyklusbetrachtung der Kosten einer Technologie nur gemeinsam mit der Betrachtung der damit verbundenen Kosteneinsparungen bzw. Nutzensteigerungen zur Unterstützung einer Investitionsentscheidung herangezogen werden kann. Demensprechend werden die Ergebnisse aus der Kostenermittlung aus AP3 gemeinsam mit der Performancebewertung aus AP2 in ein Verfahren zur Profitabilitätsbeurteilung im Rahmen von AP4 überführt.

4.4 AP 4: Zusammenführung/Validierung des entwickelten Verfahrens

Die folgenden Ergebnisse waren Gegenstand dieses APs:

Tabelle 13: Inhalte von AP 4

AP4: Zusammenführung/Validierung des entwickelten Verfahrens	
Einsatz	<ul style="list-style-type: none"> • IPRI: 6 Personenmonate • IPA: 4 Personenmonate
Ergebnis	Erprobtes Verfahren zur Profitabilitätsbewertung von Investitionen in CPS-Technologien

Geplante Ergebnisse lt. Antrag	Erzielte Ergebnisse
Validierung des weiterentwickelten Life Cycle Costing zur Profitabilitätsbewertung von CPS-Technologie in der Intralogistik	Validiertes Verfahren zur Profitabilitätsbewertung von Investitionen in CPS-Technologien

Im AP 4 werden die Erkenntnisse aus AP 2 und 3 zusammengeführt und der weiterentwickelte Lebenszykluskostenansatz zusammen mit den Projektpartnern validiert. Die Vorgehensweise hierzu ist mehrstufig. Im Abschnitt 4.4.1 wird zunächst das Verfahren zur Profitabilitätsbewertung von CPS in der Intralogistik beschrieben. Abschnitt 4.4.2 wird die Methode mithilfe mehrerer Fallstudien validiert. Im letzten Abschnitt 4.4.3 folgen eine Analyse der Validierung und eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

Im Folgenden werden die gewonnenen Ergebnisse aus den vorangegangenen Arbeitspaketen in ein Verfahren zur Profitabilitätsbewertung von Investitionen in CPS im Bereich der Intralogistik überführt. Als Grundlage für dieses Bewertungsverfahren werden die in AP 2 identifizierten und quantifizierten Performancekriterien mit den ermittelten Kosten, die innerhalb der einzelnen LCC-Phasen bei CPS anfallen, verbunden. Anschließend wird das Verfahren im Rahmen einer vergleichenden Fallstudie mit drei verschiedenen Unternehmen validiert. Anhand der Ergebnisse wird dann die Relevanz des entwickelten Verfahrens bestimmt. Abschließend wird die Profitabilitätsbewertung auf Basis getätigter Erfahrungen aus Praxis und Wissenschaft so gestaltet, dass eine branchenübergreifende Anwendbarkeit des Verfahrens möglich ist.

4.4.1 Verfahren zur Profitabilitätsbewertung von CPS in der Intralogistik

Ziele und Motivation

Der Lebenszykluskostenansatz dient als Instrument der Entscheidungsfindung, um im Rahmen einer modellgestützten Planung alle Kosten, die innerhalb eines Investitionsprojektes anfallen, zu erfassen und zu bewerten¹⁶⁸. Dem liegt die Idee zugrunde, dass ein Objekt (bspw. Technologie) „nur eine begrenzte Lebensdauer besitzt und während dieser Zeit unterschiedliche Phasen durchläuft“¹⁶⁹. Referenziert man in diesem Zusammenhang auf die Ausführungen von Riezler (1996), so verweist dieser auf das Prinzip der Projektorientierung. Im präzisen Wortsinn beschreibt dieses im Kontext der LCC, die Fokussierung auf die periodenübergreifende Betrachtung der zu bewertenden Projekte¹⁷⁰. Diese Projektorientierung ist vor allem dann von großer Bedeutung, wenn eine Profitabilitätsbewertung verschiedener Projekte vorgenommen wird um eine Vergleichbarkeit dieser herbeizuführen. Letztendlich kann auf Basis dieser Informationen entschieden werden, ob und welches Projekt durchgeführt werden soll¹⁷¹. Die Anwendungsbereiche von LCC Modellen und ihre Ausgestaltung kann hierbei stark variieren (siehe hierzu die Übersicht diverser Veröffentlichungen zu anwendungsspezifischen LCC-Modellen). Neben der Bewertung einer Investition im Sinne der LCC Rechnung, ist aber auch die aus ihr resultierende Profitabilitätssteigerung zu berücksichtigen (siehe hierzu AP 2). Dies trifft auch auf Investitionen im intralogistischen Bereich in Form von CPS-Technologien zu. Durch Ihren Einsatz erhoffen sich Unternehmen enorme Performancesteigerungen (siehe AP 2). Mithilfe der Zusammenführung von LCC und Performanceaspekten, die aus der neunen Technologie resultieren, sollen Unternehmen befähigt werden, die Profitabilität von Investitionen in CPS-Technologien zu bewerten und so das Risiko von Fehlinvestitionen besser abschätzen zu können. Folglich muss bei der Entscheidung, ob und welche Investition getätigt wird, immer auf zwei Kriterien Rücksicht genommen werden:

- Welche Investition in CPS ist im Sinne des für diese Technologien entwickelten Bewertungsansatzes des LCC vorteilhaft?
- Mit welcher Investition in CPS in der Intralogistik lassen sich die größten Performancesteigerungen realisieren?

¹⁶⁸ Vgl. Götze (2004), S. 292

¹⁶⁹ Horváth et al. 2015, S. 224.

¹⁷⁰ Vgl. Riezler (1996), S. 128 ff.

¹⁷¹ Vgl. Büting (2009), S. 37

Folglich liegt der Fokus darin, dass so erstellte Bewertungsverfahren auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse zu validieren.

4.4.2 Validierung

Eine Aufstellung der in PA-Treffen als relevant identifizierten Kosten findet sich in Tabelle 14:

Tabelle 14: Als relevant identifizierte Kostenarten

Kostenart	Einzelne Kostenpunkte
Personalkosten	Löhne und Gehälter, interne Schulungen während des Betriebs
Kosten für bezogene Leistungen	Beratungsleistungen, Planungsgespräche durch den Anbieter, Ersatzleistungen für Ausfälle, externe Schulungskosten
Finanzierungskosten	Zinsen, Tilgung, Sonstige
Anschaffungskosten	Betriebsmittel, Einrichtungen, Hilfsstoffe, Infrastruktur, Ausstattung der Produkte
Installationskosten	Physische Bestandteile, Middleware auf Infrastruktur, Software auf Infrastruktur
Optimierung	Tuning der Betriebsabläufe, Systemoptimierung, Kosten für Betriebsausfälle während der Installation
Betriebskosten	Geplante Instandhaltungskosten, ungeplante Instandhaltungskosten, Ersatzteilkosten, Ersatzteillagerhaltungskosten, Energiekosten, Versicherung, Entsorgungskosten, zusätzliche Personalkosten durch neue Schnittstellen, zusätzliche Personalkosten durch CPS-Betreuung, Kosten für Softwareupdates, Kosten für Hardwareerneuerung, Lizenzgebühren für die Software, Kosten für Systemerweiterungen oder Upgrading, Kosten für unternehmensinterne Software, Inspektionskosten
Kosten für Schäden	An Produkten und betrieblichen Einrichtungen, Entsorgung, Reklamationskosten
Weitere Kostenfaktoren	z.B. Kommunikationskosten mit Zulieferern, Gebühren für Zulassungsverfahren, staatlich subventionierte Förderprogramme

Es erwies sich als nicht sinnvoll, die Kosten temporär verschiedenen Phasen zuzuordnen, da alle Kostenarten in Konzept- und Designphase, Beschaffungs- und Implementierungsphase und der Betriebsphase anfallen können. Stattdessen wurden die Kosten nach verschiedenen Kostenarten differenziert. Insbesondere in KMUs, in denen mehrere Aufgabenbereiche in Personalunion vorliegen können, sind Zuständigkeiten so einfacher zu erfassen und die relevanten Personen(gruppen) miteinzubeziehen. Die quantitativen Kostenarten können so als Grundlage einer Wirtschaftlichkeitsbewertung dienen. Anschließend wurde das so entwickelte Verfahren im Rahmen vergleichender

Fallstudien bei der Reiser Maschinenbau AG, der Wafios AG und der SMS Group validiert. Ursprünglich sollten innerhalb des jeweiligen Fallstudienpartners zwei interdisziplinäre Gruppen bestehend aus Produktions-, Logistik- und Controlling-Mitarbeiter gebildet werden. Beide Gruppen sollten dann den Einsatz von drei neuen CPS-Technologien in ihrem Unternehmen bewerten, wobei Gruppe 1 das entwickelte Verfahren nutzen (Behandlungsgruppe) und die 2. Gruppe nicht auf das Verfahren zurückgreifen darf (Kontrollgruppe). Allerdings weisen KMUs nicht die im Antrag beschriebene Organisationsstruktur auf, sondern es kommt häufiger zu einer Häufung von Funktionen in einer Person (Geyer und Uriep 2012; Abel et al. 2016). KMU verfügen in der Regel sowohl über eine geringere Arbeitsteilung als auch über wenige Spezialisten (Staiger 2008).

Daneben sollten die Projektkosten einmal mit dem traditionellen Lebenszykluskostenansatz und einmal mit dem weiterentwickelten Ansatz unter Einbezug der identifizierten Kostenarten und Nutzenpotentiale betrachtet werden. Die Ergebnisse, wie Einsparungen durch Nutzenpotentiale quantifiziert werden können, lagen zum Zeitpunkt der Fallstudie bei der Reiser AG noch nicht vor, weswegen die Profitabilität des CPS-Projekts rein nach den anfallenden Kosten beurteilt wurde. Damit dennoch eine Teilvalidierung des entwickelten Verfahrens vorgenommen werden konnte, wurde das Excel-Tool genutzt, um die einfache Anwendbarkeit der Methodik zu demonstrieren.

Fallstudie bei der Reiser AG

Bei Reiser erfolgte die Validierung im Gespräch mit dem Projektleiter der Reiser AG. Aufgrund der geringen Anzahl von circa 25 Mitarbeitern bei der Reiser AG erwies es sich jedoch weder als möglich noch zielführend, eine Behandlungs- und eine Kontrollgruppe zu bilden. Im Familienbetrieb übernehmen einzelne Personen die Aufgaben eines Logistik- oder Controlling-Mitarbeiters zum Teil nur für einige Stunden pro Tag. Somit wurde die Fallstudie zur Auswahl geeigneter CPS-Technologien mit dem Projektleiter im Einzelgespräch durchgeführt, da dieser für Planung und Implementierung von Neuerungen im Betriebsablauf verantwortlich ist. Wie im Antrag vorgesehen, wurden drei verschiedene Technologien miteinander verglichen. Aufgrund der relativ niedrigen Komplexität was die Einbindung in das bestehende ERP-System angeht, wurden Smartwatches, Datenbrillen und ein RFID-Armband ausgewählt. Anschaffungskosten der Hardware sind in allen Beispielen im Vergleich zu vollautomatischen Systemen

niedrig. Zudem eignen sich diese Technologien für einen Einsatz in der Kommissionierung gut, da die Hände frei bleiben.

Zunächst wurde jedes CPS-Projekt mit dem nicht weiter spezifizierten Lebenszykluskostenansatz betrachtet. Die relevanten Kostenarten wurden identifiziert und in Excel eingetragen. Dann wurden die Anschaffungskosten mit den sich ergebenden Einsparung verglichen. Die Entscheidung wurde eher intuitiv getroffen und basierte auf anwendungsnahe, praktischem Erfahrungswissen. Da jedoch die Betriebsphase des jeweiligen CPS so vernachlässigt wird, sind die Anschaffungskosten der größten Investitionsentscheidungen beeinflussende Faktor. Mögliche Einsparungen oder Effizienzsteigerungen, die erst im Laufe der Zeit entstehen, werden deshalb vernachlässigt. Allerdings werden Kaufentscheidungen für neue Technologien nicht immer rein auf Basis der Kosten getroffen. Beispielsweise hat die Firma Reiser in einen äußerst akkuraten Messstand zur Konturvermessung investiert, um für mehr Mitarbeitermotivation zu sorgen. Solche Faktoren sind qualitativ und lassen sich demnach im Demonstrator nicht abbilden.

Anschließend wurde das CPS-Projekt zur Validierung mit dem Demonstrator betrachtet. Bei der Verwendung des Demonstrators lassen sich die Kosten für die Einführung und den Betrieb eines CPS mit den gegenwärtig für den Betrieb anfallenden Kosten im Unternehmen vergleichen. Die Profitabilitätsbewertung basiert also auf dem Vergleich der Kosten mit und ohne CPS. Die Profitabilität ergibt sich dann am Ende der Nutzungsdauer der Technologie durch die Kostendifferenz.

$$\textit{Profitabilität: } \Delta = \textit{Kosten mit CPS} - \textit{Kosten ohne CPS}$$

Bei der Reiser AG wurden also alle laufenden Kosten für die geplante Nutzungsdauer jeder CPS-Technologie eingetragen. Anschließend wurde abgeschätzt, welche Kosten durch das CPS-Projekt anfallen würden. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde einmal unter Einbezug einer Fremdfinanzierung durchgeführt und einmal ohne ein Darlehen. Es hat sich als sinnvoll erwiesen, verschiedene Arten der Finanzierung in die Methodik einzubauen. So können auch Projekte in den Vergleich miteinbezogen werden, die zuvor durch hohe Anschaffungskosten nicht betrachtet worden wären. Solche Projekte konnten sich unter Einbezug einer Finanzierung dennoch als relevant erweisen. Der Anwender hat die Möglichkeit, eine endfällige Tilgung, ein Ratendarlehen oder ein Annuitätendarlehen zu betrachten. Bankkredite spielen laut Website des Bankenverbandes die wichtigste Rolle bei der Fremdfinanzierung von mittelständischen

Unternehmen in Deutschland¹⁷². Das Tool bietet einen Überblick über Zinsen, Tilgung und Restschuld pro Periode und den gesamten Zahlungen, die für die jeweilige Finanzierungsart anfallen.

Kosten, die durch die Einführung entstanden, konnten ausgeglichen werden, da die CPS-Lösung sich als langfristig effizienter herausstellte. Da die Kosten zudem übersichtlich abgetragen werden konnten, bot sich so die Möglichkeit einer intensiven Auseinandersetzung und vorausschauender Projektplanung. Zuvor wurden keine standardisierten und explizit festgelegten Prozessphasen betrachtet und ein bewusster Prozessablauf konnte nicht formuliert werden. Die Einteilung in Prozessphasen brachte Struktur in die Planung und wirkte so komplexitätsreduzierend.

Im vorliegenden Fall waren die Einsparungen schließlich vor allem Kosten im Bereich Personal geschuldet. Zum einen können Stellen mit geringem qualifiziertem Personal besetzt werden, was direkt und sofort ab Beginn der Betriebsphase zu niedrigeren Lohnkosten führt. Zudem kann neues Personal schnell eingelernt werden, was den Einsatz von Ferien- oder Zeitarbeitern erleichtert. Eine Einsparung bei internen Abläufen, insbesondere bei Kosten und Personal konnte auch in einer Fallstudie bei der Scheren AG festgestellt werden (PROZEUS 2008). Durch eine Umstellung manueller Scan-Vorgänge auf ein System mit RFID-Chips und Scannern können Warenein- und -ausgang sowie interne Warenbewegungen vollautomatisch ablaufen. Auch im Projekt Ko-RFID konnte eine Reduktion manuellen Aufwands festgestellt werden (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2008). Ein weiterer Punkt waren Kosteneinsparungen für Energie. Dies führt auch zu einer geringeren Energieintensität bei der Herstellung der Produkte und somit zu einer verbesserten Ökoeffizienz.

Mit einem kleinen Unternehmen zu beginnen, erwies sich deswegen als Vorteil, da die Bewertung des Projekts und die Entscheidung über dessen Durchführung bei einer einzelnen Person lag. Inkonsistenzen im Aufbau der Methodik wären so direkt aufgefallen. Das Vorgehen war dank der geringen Detailtiefe bei der Auflistung einzelner Kosten intuitiv und schnell anzuwenden und ist so auch für Anwender geeignet, die nicht aus dem Controlling kommen.

¹⁷² <https://bankenverband.de/fachthemen/unternehmens-finanzierung/> (abgerufen 22.08.2019)

Fallstudie bei der Wafios AG

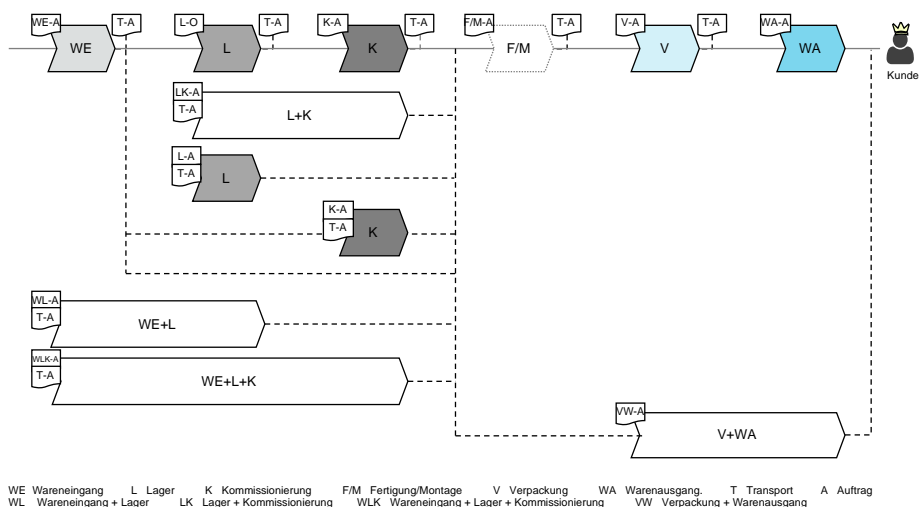
Bei einem größeren und strukturierteren Unternehmen wie der Wafios AG muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen dem Vorgehen, das im Antrag vorgeschlagen war und der Validierung mit einer Einzelperson. Die Wafios AG ist ein Unternehmen mit mehreren Standorten und einigen hundert Mitarbeitern. Daher erfolgen die Bearbeitung und Bewertung von Projekten bereits detaillierter und in einzelnen Abteilungen. Die Validierung bei der Wafios AG führte dennoch zu gleichen Ergebnissen wie bei der Reiser AG. Es erwies sich als besonders hilfreich, dass einzelne Kostenarten für die Auswertung ein- und ausgeblendet werden konnten, da dies zur Übersichtlichkeit des Demonstrators beitrug.

Im Rahmen der projektbegleitenden Ausschüsse wurden immer wieder angemerkt, dass eine Automatisierung von Prozessen bzw. der Einsatz von CPS-Technologien nur sinnvoll ist, wenn vorher die Prozesse verbessert wurden. Zum einen macht es keinen Sinn nicht bzw. schlecht funktionierende Prozesse zu optimieren und zum anderen können bereits durch Prozessverbesserungen deutliche Potentiale erschlossen werden. Aufgrund dessen folgt die allgemeine Vorgehensweise dem bewährten Prinzip: Verbessere zuerst die Prozesse und automatisiere diese anschließend. Als Beispielprozess mit dem höchsten Verbesserungspotential wurde bei der Wafios AG die Kommissionierung ausgewählt. Das in AP 1 vorgestellte Referenzmodell Intralogistik bildet die Grundlage für die Prozessanalyse und Ableitungen der Verbesserungen. Hierfür wurde das Prozessmodell verfeinert. Abbildung 19 zeigt das verfeinerte Prozessmodell am Beispiel der Kommissionierung. Innerhalb der Spalte ‚Ausprägungen‘ findet sich allgemeingültige Kriterien die für die jeweilige Aktivität geprüft werden sollten. In der Spalte der Kommissionierung finden sich die konkreten Kriterien für das jeweilige Funktionsmodul. Die Vorgehensweise zur Prozessanalyse wurde seitens Wafios AG grundsätzlich bestätigt. Das Referenzmodell bietet eine strukturierte und vollständige Vorgehensweise zur Identifizierung von Schwachstellen innerhalb der intralogistischen Prozesse. Der Versuch unternehmensübergreifende Begrifflichkeiten für die prozessspezifischen Ausprägungen zu formulieren gestaltet sich schwierig. In jedem Unternehmen existieren spezifische Fachbegriffe die zum allgemeinen Verständnis hier verwendet werden sollten. Folglich ist eine unternehmensspezifische Anpassung der Begrifflichkeiten notwendig und seitens der Wafios AG wünschenswert. Darüber hinaus sollte der Detaillierungsgrad der Funktionsmodule als auch der Aktivitäten veränderbar sein.

#	Detailierung Prozessbeschreibung					Funktionsmodule		
	Prozess	Aktivität	IM	Unteraktivität	Variante der Unteraktivität	Ausprägungen	Kommissionieren	
1	Vorbereitung	Auftrag erzeugen	I			Termin (Wann?)	Bedarftermin Verfügbarkeitstermin	
						Ort (Wo?)	Lagerort Lagerfach (Person zu Ware)	
						Art (Was?)	Materialart	
						Menge (Wieviel?)	Materialmenge	
						Verantwortlicher (Wer?)	Logistik (allgemein), detaillierter Mitarbeiter Lieferant	
						Hilfsmittel (Wie?)	Feste und variable Zuordnung	
	Auftrag annehmen	I	Ressourcenverfügbarkeit überprüfen Ressourcen reservieren		Arbeitsmittel, Personal, Fläche	x		
	Auftrag freigeben	I	Freigabe prüfen		Arbeitsmittel, Personal, Fläche	x		
			Freigabe übermitteln	Automatisch freigeben Manuell freigeben		x		
						x		
2	Durchführung	Auftrag starten	I	Auftragsinformation prüfen		Arbeitsmittel, Personal, Fläche	x	
				Leistungsobjekt buchen		VE, TE, LE, VPE, KE	TE	
		Leistungsobjekt übernehmen (inkl. Ident/Sicht-Prüfung)	M			Art, Menge, Termin, Ort	KE	
		Leistungsobjekt prüfen	M			Qualität, Menge		
		Leistungsobjekt bewegen	M				x	
		Leistungsobjekt entnehmen	M				x	
		Leistungsobjekt zusammenstellen	M				x	
		Leistungsobjekt packen	M					
		Auftrags überwachen	I	Teilrückmeldung durchführen	Auftragsstatus		DLZ, Arbeitsinhalt (Stück/Positionen/Weg/Std.)	Menge Störung
					Ressourcenstatus			x
Fertigstellungsprognose					DLZ, Arbeitsinhalt (Stück/Positionen/Weg/Std.)	Positionen		
Leistungsobjekt übergeben	M			VE, TE, LE, VPE, KE	TE			
3	Abschluss	Auftrag abschließen	I	Endrückmeldung durchführen (damit ist der Auftrag vollständig erledigt)	Auftragsstatus	DLZ, Arbeitsinhalt (Stück/Positionen/Weg/Std.)	Menge	

Abbildung 19: Detailliertes Prozessmodell Intralogistik (Ausschnitt)

Bei der Wafios AG existiert ein kombinierter Kommissionier- und Transportauftrag. Dieser lässt sich im aktuellen Prozessmodell nicht darstellen. Gerade klein- und mittelständische Unternehmen fassen mehrere Funktionsmodule und Verantwortlichkeiten zusammen. So kann es z. B. Fall geben, dass einen kombinierten Lager-, Kommissionier- und Transportauftrag gibt. Abbildung 20 gibt einen Überblick über die möglichen Kombinationen von Prozessmodulen.



WE Wareneingang L Lager K Kommissionierung F/M Fertigung/Montage V Verpackung WA Warenausgang T Transport A Auftrag
 WL Wareneingang + Lager LK Lager + Kommissionierung WLK Wareneingang + Lager + Kommissionierung VW Verpackung + Warenausgang

Abbildung 20: Kombinationen von Prozessmodulen

Die oben dargestellten Kombinationen sollten in einer Ausbaustufe berücksichtigt werden, so dass alle gerade bei klein- und mittelständischen Unternehmen alle Prozesse abbildbar sind.

Fallstudie bei der SMS Group

Die SMS group ist Anlagenlieferant für die metallurgische Industrie im Bereich Stahl, Aluminium, Kupfer und Metalle. Als Schwer-Maschinenbauer ist dem damit verbundenen Teilegewicht ist derzeit bei der SMS group kein Einsatz von CPS-Technologien in der Intralogistik geplant. Die Validierung bei der SMS group fand zweigeteilt statt. Im ersten Teil fand die Validierung des Demonstrators statt. Hierfür wurde der Leitfaden zur Verfügung gestellt und mit Hilfe dessen sollten exemplarische Werte eingepflegt werden. Der Schwerpunkt hier lag auf der Bedienfreundlichkeit für den Anwender als auch auf der Überprüfung der einzelnen Kostenbestandteilen. Die Bedienfreundlichkeit wurde grundlegend bestätigt. Teilweise erscheinen die Ladezeiten zwischen den einzelnen Masken etwas lang. Die Kostenbestandteile wurden seitens des Industriepartners als sehr detailliert bewertet. Positiv wurde angemerkt, dass die Kostenbestandteile teilweise optional sind und nicht alle verpflichtend für die Bewertung ausgefüllt werden müssen. Die Visualisierung der Ergebnisse sowie die Historisierung der Daten wurde besonders positiv hervorgehoben. Die Visualisierung der Daten zeigt auf einen Blick den Kostenverlauf und den Break-even-Point. Die Historisierung der Daten ermöglicht einen Vergleich mehrerer CPS-Technologien und erleichtert so die Entscheidungsfindung. Im schreiten Schritt wurde das Vorgehen zur Prozessanalyse mit Hilfe des Referenzmodells überprüft. Hier wurde identisch wie bei Wafios AG vorgegangen. Seitens der SMS group wurde angemerkt, dass ein Pre-Test wünschenswert wäre. Der Pre-Test hat zum Ziel, dass den Anwender eine Entscheidungshilfe gegeben wird welchen intralogistischen Prozess das höchste Verbesserungspotential hat. Idee ist es, hierfür einen Fragebogen zu erstellen. Dieser beinhaltet je Zieldimension 2 - 3 Fragen. Dieser Fragebogen wird sowohl an die intralogistischen Bereiche sowie an deren internen Lieferanten und Kunden versendet und ausgefüllt. Anschließend werden die Fragebogen ausgewertet und daraus das Verbesserungspotential der jeweiligen intralogistischen Bereiche abgeleitet. Im Anschluss an den Pre-Test würde dann mit Hilfe des Referenzmodell die detaillierte Analyse stattfinden. Die Anwen-

dungsbarkeit und der Detaillierungsgrad des Referenzmodells wurde grundlegend bestätigt. Verbesserungspotentiale wurden bei der Beschreibung der Aktivitäten sowie bei den Ausprägungen gesehen.

4.4.3 Ergebnisse und Analyse

Im Anschluss sollten die Ergebnisse diskutiert und analysiert werden, um die Relevanz des entwickelten Verfahrens zu überprüfen. Es wurde deutlich, dass das entwickelte Vorgehen zeigt, welche Technologien überhaupt in welchen Einsatzgebieten der Intralogistik eingesetzt werden können. So werden Informationen strukturiert und aussagekräftig präsentiert, die zukunftsrelevante Probleme, aber auch Innovationschancen aufzeigen. Die Informationsbeschaffung wird daher erleichtert und die damit verbundenen Kosten für KMUs werden gemindert. Der kurze, prägnante Überblick über Technologien ermöglicht es den Verantwortlichen, sich zudem wenig zeitintensiv zu informieren, denn in KMUs existieren in der Regel keine eigenen Forschungs- und Entwicklungsabteilungen. Oft werden Innovationen oder inkrementelle Produktentwicklungen aufgrund von Kundenanfragen betrieben (Zimmermann und Thomä 2016). Gerade in KMUs bleibt im Tagesgeschäft wenig Zeit, sich mit aktuellen Entwicklungen und Innovationen ausreichend zu beschäftigen (Verworn et al. 2000), die relevant für das Unternehmen sein könnten. Denn als Projektleiter muss nicht nur diese Rolle ausgefüllt werden, sondern unter Umständen auch die eines omnipräsenten Personalleiters oder die eines Managers, der sich überall auskennt und alles wissen muss. Zusätzlich erlaubt das Tool einen kurzen, aber aussagekräftigen Vergleich zwischen den verschiedenen Technologien auf dem Markt und den infolgedessen damit verbundenen Kosten.

Im Vergleich zwischen der Projektplanung mit und ohne Demonstrator wurde ersichtlich, dass das Excel-Tool Kostenarten in die Berechnung der Projektkosten mit einbezog, die davor keine Betrachtung gefunden hätten. Vor allem die Kosten, die mit der Implementierung und dem Betrieb eines Systems einhergehen, dass neue Software benötigt, werden oft nicht in Betrachtungen miteinbezogen. Daten, die Auskunft über den Zustand und die Auslastung eines CPS Auskunft geben, müssen in bestehende IT-Systeme eingebunden werden. Dies ist oft mit einem kleinen bis mittleren Aufwand für die IT des Unternehmens verbunden. Ohne den Demonstrator wären nur externe Kosten etwa für Hardware und Installation, die im Angebot vorkommen, in die Profita-

bilitätsbewertung eingeflossen. Der Demonstrator hilft folglich KMUs dabei, ein realistisches Bild ihrer internen Kosten zu zeichnen und diese nicht zu vernachlässigen. Als besonders relevant erwiesen sich dabei die Kosten für Optimierung und Installation. Der Demonstrator führt vor Augen, welche Personen(gruppen) im Unternehmen infolgedessen am Projekt beteiligt werden müssen. Möglicherweise ist aufgrund dessen der Aufbau neuer Kompetenzen nötig. Besonders Anforderungen an die IT wurden nicht betrachtet, beispielsweise um Schnittstellen vom CPS zu bestehenden ERP-Systemen zu betreuen. Zudem ist die Schaffung einer Stelle in der IT unter Umständen sinnvoll, um nicht in ein Abhängigkeitsverhältnis vom Anbieter der Technologie zu stehen.

Kosten, die durch das Projekt entstehen können, lassen sich den verschiedenen Phasen dadurch verursachungsgerecht zuordnen. Kosten für ein CPS, die im Zusammenhang mit der Produkteinführung oder einer Umstellung der Intralogistikprozesse einhergehen, werden in vollem Umfang abgebildet. Dies schafft zum einen für alle Seiten Planungssicherheit. Zudem zeigt das Excel-Tool potentielle versteckte Kosten auf, die für das Unternehmen in einer späteren Projektphase möglicherweise schwer zu stemmen wären. Ein weiterer Vorteil ergibt sich über die Ermittlung der Nutzungsdauer des CPS. So kann relativ genau erfasst werden, ab wann sich der Einsatz der Technologie auszahlt. Zu einem späteren Zeitpunkt kann dies die Basis für eine Finanzierung bilden, auf deren Grundlage ein Darlehen berechnet werden kann (Bankenverband und BDI).

Unter Einbeziehung von Darlehen in die Berechnung der Kosten kann das Unternehmen auch die Einführung kostenintensiver Systeme als Alternative in Betracht ziehen, ohne von hohen Anschaffungspreisen abgeschreckt zu werden. So kann das Unternehmen auf Einsparpotentiale aufmerksam werden, die in vollem Umfang erst in der Betriebsphase wirksam werden.

Die Fallstudie hat bewiesen, dass das entwickelte Vorgehen vor allem für KMU ein geeignetes Instrument darstellt, um Kosten und Nutzen eines CPS-Projektes abzuschätzen. Besonders nicht-finanzielle Innovationsbarrieren wie Defizite im Management von Innovationsprozessen oder regulatorisch-administrative Belastungen können reduziert werden. So sind Potentiale auch für kleine Unternehmen ausschöpfbar. Zudem ist das Vorgehen dank der geringen Detailschiefe bei der Auflistung einzelner Kosten intuitiv und schnell anzuwenden.

Zur Sicherstellung der branchenübergreifenden Anwendbarkeit des Verfahrens wurde das Verfahren abstrahiert. Die Kosten wurden nicht wie im Lebenszykluskostenansatz üblich verursachungsgerecht abgetragen, sondern einzelnen Phasen zugeschrieben. Konkret wurden die Kosten im Durchschnitt auf jede Phase verteilt. Dennoch besteht im Excel-Tool weiterhin die Möglichkeit, die Kosten in einzelnen Phasen händisch zu überschreiben. So kann die Methodik flexibel angepasst werden. Dies ist sowohl für kleine als auch große Unternehmen entscheidend.

Zudem werden sowohl Kosten als auch Potentiale im Durchschnitt über alle Phasen verteilt und dadurch verallgemeinert. Weil generische Kostenarten im Demonstrator verwendet werden, die sich allgemein auf Kosten in Personal oder Betrieb beziehen, und zusätzlich dennoch alle individuellen Kosten abgetragen werden können, ist das Excel-Tool branchenübergreifend anwendbar. Auch werden externe Dienstleistungen nicht expliziert aufgeführt und separiert. So gibt es beispielsweise keine Unterscheidung zwischen den Kosten für Angestellte in der IT oder Kosten für externe Dienstleister. Dies garantiert die Übertragbarkeit auf alle Unternehmen. Ferner variieren die Prozesse in der Intralogistik der produzierenden Industrie untereinander überdies nur geringfügig, sodass das Excel-Tool für alle Unternehmen anwendbar ist.

4.5 AP 5: Entwicklung eines Demonstrators und Schulungsvideos

Die folgenden Ergebnisse waren Gegenstand dieses APs:

Tabelle 15: Inhalte von AP 5

AP5: Entwicklung eines Demonstrators und Schulungsvideos	
Einsatz	<ul style="list-style-type: none"> • IPRI: 4 Personenmonate • IPA: 4 Personenmonate
Ergebnis	Praxisleitfaden bestehend aus Softwaredemonstrator und Schulungsvideo

Geplante Ergebnisse lt. Antrag	Erzielte Ergebnisse
Validierter Softwaredemonstrator inkl. Anwenderleitfaden und Schulungsvideo	Validierter Softwaredemonstrator inkl. Anwenderleitfaden und Schulungsvideo

Im AP 5 wurde ein Demonstrator mithilfe von Excel entwickelt, der die Erkenntnisse für Unternehmen leicht anwendbar macht. Die Vorgehensweise hierzu ist mehrstufig. Im Abschnitt 4.5.1 werden Aufbau und Handhabung des Demonstrators beschrieben. Abschnitt 4.5.2 wird die Methode mithilfe eines UML-Aktivitätendiagramms erklärt. Im letzten Abschnitt, 4.5.3, folgt der Anwenderleitfaden für den Demonstrator.

In AP 5 wurde zur Anwendung der bisherigen Ergebnisse ein Software-Demonstrator entwickelt. Dazu wurden die in AP 4 ermittelten Kosten- und Performancefaktoren zusammengefügt und in Excel durch anschauliche Berechnungen ergänzt. Die Umsetzung mit Excel erfolgte unter Anwendungen von Visual Basic for Applications (VBA). Ziel war, eine möglichst aufwandsarme und nutzerfreundliche Anwendung zu ermöglichen. Die nutzerfreundliche Anwendung wurde durch die im Projekt integrierten Unternehmen durch Fallstudien validiert und in mehreren Iterationsschleifen angepasst. Dazu wurde neben dem Demonstrator eine Anleitung mit einem Aktivitätsdiagramm erstellt, welches die Handhabung erleichtern soll. Darin werden ausführlich alle Funktionen des Tools dargestellt. Zusätzlich wurde ein Schulungsvideo angefertigt, das anhand eines fiktiven Fallbeispiels die Nutzung des Demonstrators erläutert. Dort wird auf Erläuterungen der Struktur, der Navigation und Besonderheiten der Nutzung hingewiesen.

4.5.1 Aufbau und Handhabung des Demonstrators

Die Funktionen sowie die Handhabung des Demonstrators werden schrittweise in der Bedienungsanleitung dargestellt:

Der Demonstrator dient der ex-ante Profitabilitätsbewertung von Cyber-Physischen-Systemen (CPS) in der Intralogistik. Er wurde in Kooperation des IPRI - International Performance Research Institut gGmbH - mit dem Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) im Rahmen des Forschungsprojektes Industrie 4.0 Profitabel entwickelt.

Der Softwaredemonstrator dient der Unterstützung der Umsetzung der einzelnen Bausteine. Die reine Betrachtung des Angebotspreises greift bei CPS-Technologien, die Folgekosten verursachen, zu kurz. Oft sind es gerade die in der Anschaffung teureren, dafür aber hochwertigeren Lösungen, die in der Nutzungsphase erhebliche Kosten einsparen. So werden beispielsweise durch effizientere Prozesse Kosten gesenkt. Im Sinne einer weitergehenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sollten daher alle Kosten über den gesamten Lebensweg einbezogen werden. Die Summe aller entstehenden Kosten über die Lebensdauer der CPS-Technologie wird Lebenszykluskosten genannt.

Mithilfe des vorliegenden Rechentools können die Lebenszykluskosten von verschiedenen CPS-Technologien berechnet und mit den aktuellen Kosten verglichen werden. Dadurch soll eine Entscheidungsfindung für oder gegen die Einführung einer CPS-Technologie unterstützt werden.

Das aufgestellte Modell stellt jedoch in keiner Weise ein Ersatz für professionelle Beratungsdienstleistungen dar. Ferner hat es keine Ansprüche auf Vollständigkeit. Zudem ist zu vermerken, dass die einzelnen Berechnungsschritte unter Hinzunahme von wissenschaftlichen Erkenntnissen sowie Erfahrungen von Unternehmen entstanden sind. Daraus ist jedoch nicht zu schlussfolgern, dass die Ergebnisse für eine strategische Planung und Entscheidung ausreichen. Die Anwendung des Excel-Tools darf nur als Anregung für die eigene Berechnung verstanden werden und muss vom Anwender angepasst und überprüft werden. Die Autoren übernehmen keine Gewähr für die Vollständigkeit und Richtigkeit der Berechnung. Die Berechnung erfolgt insoweit auf eigene Gefahr des Unternehmens.

4.5.2 UML-Diagramm

Das Aktivitätsdiagramm, verfasst in der Unified Modeling Language (UML) (vgl. Abbildung 21), veranschaulicht den Ablauf der Nutzung des Excel-Tools. Es beginnt mit dem Startpunkt, von dem aus der Kontrollfluss (ein Pfeil mit durchgezogener Linie) zur ersten Aktivität führt (dargestellt als blauer Kasten). Dies bedeutet, dass eine Aktion ausgeführt wird. Die Illustration des Strichmännchens mit der Beschriftung „Anwender“ führt ebenfalls einen Kontrollfluss zu der Aktivität *Leitfaden lesen*. Das Strichmännchen stellt den Akteur da, der eine Aktion ausführt. Zunächst muss der Anwender also den Leitfaden für den Demonstrator lesen. Dieser befindet sich auf dem ersten Blatt des Demonstrators. Der nächste Anwendungsschritt wird auf dem darauffolgenden Tabellenblatt ausgeführt. Dort werden ein oder mehrere Anwendungsbereiche und die Zieldimensionen für das CPS-Projekt ausgewählt. Von dieser Aktivität führt ein gestrichelter Pfeil weg, der einen Informationsfluss darstellt. Der Anwender informiert sich in diesem Schritt gleichzeitig über die Technologien, die für sein Anwendungsgebiet geeignet sind und entscheidet sich im Anschluss für eine Technologie. Von der Aktivität *Technologie wählen* führen zwei Kontrollflüsse weg. Der, in der Darstellung rechts ausgehende Pfeil, mit der Beschriftung „springt“, zeigt an, dass das Tool nach dem Auswählen der Eckdaten des Projekts automatisch auf das nächste Blatt zum Ausfüllen übergeht. Dort werden die Projektdaten und die Kosten, die während des laufenden Betriebs anfallen, eingetragen. Simultan geht ein Pfeil nach unten ab, welcher in eine Raute mit Kreis führt. Von der Raute gehen wiederum zwei Pfeile ab. Die Raute zeigt an, dass eine Entscheidung getroffen wird, die inklusiv ist. Das bedeutet, der Anwender kann also beide Pfade gleichzeitig verfolgen. Wählt er den Pfeil, der nach links zeigt, gelangt man zur Aktivität *Angebotsformular ausfüllen*. Der Pfeil, der vom Akteur ausgeht, zeigt, dass die Aktion vom Anwender ausgeführt werden muss. Anschließend wird das Formular an den Anbieter geschickt, dargestellt durch ein zweites Strichmännchen. Dieser füllt das Formular mit den Angaben zu seinem Produkt aus und sendet das Angebot zurück. Durch eine Aktion kann das Formular in den Demonstrator hochgeladen werden.

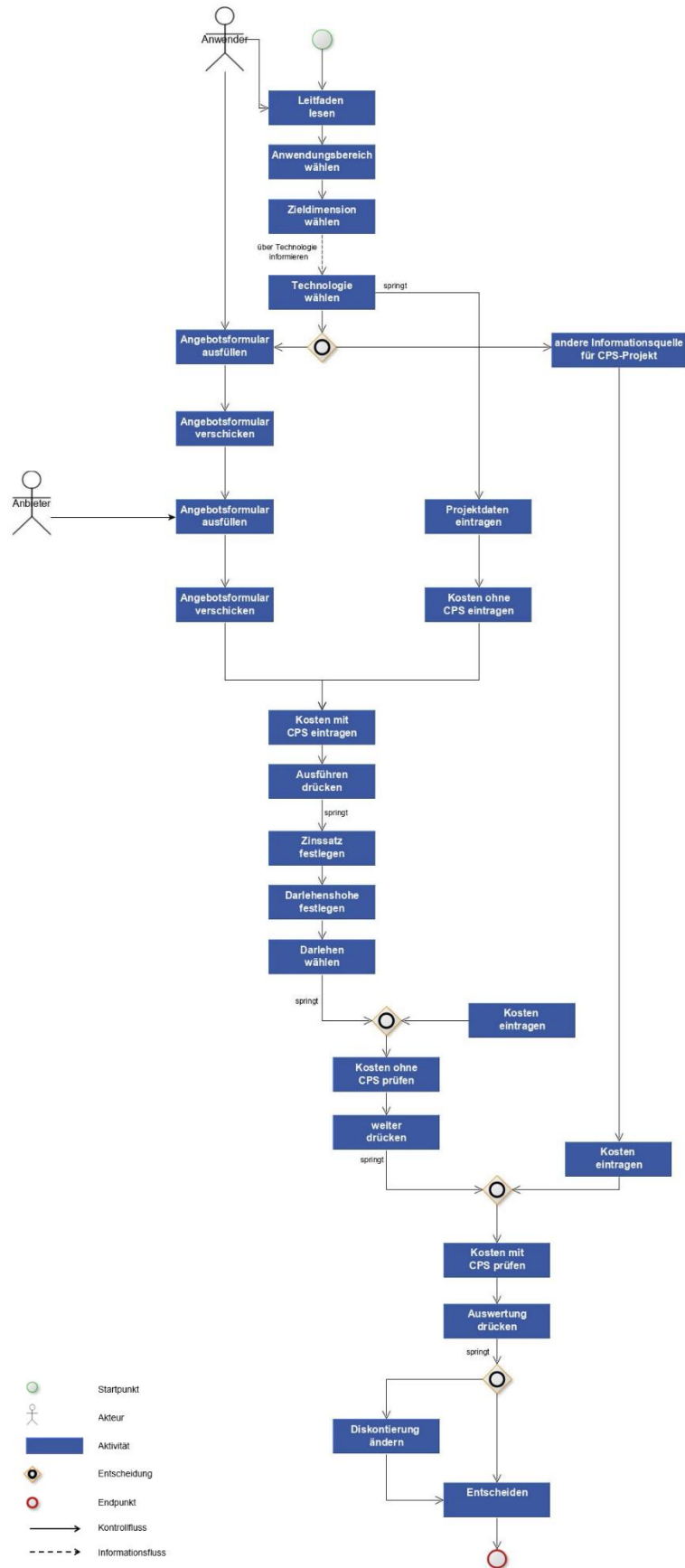


Abbildung 21: Aktivitätsdiagramm als UML-Modell des Tools

Dieser übernimmt die Kosten automatisch und trägt sie auf einem späteren Tabellenblatt ein, wodurch sie in die Berechnungen aufgenommen werden. Anschließend werden die Kosten für den Betrieb eingetragen, die durch die Durchführung des Projekts entstehen. Nimmt man von der Raute unter der Aktivität *Technologie auswählen* ausgehend den rechten Pfad, muss der Anwender anfallende Kosten für das CPS-Projekt aus anderen Quellen schätzen bzw. von bereits existierenden Angeboten manuell übertragen. Die Aktivität *Ausführen* wird durch einen Aktionsknopf aktiviert und das Tool geht auf das nächste Tabellenblatt über. Dort müssen Zinshöhe und Darlehenssatz sowie die Tilgungsvariante zur Finanzierung ausgewählt werden. Der Anwender entscheidet sich dann für ein Darlehen. Daraufhin lädt das Tool das nächste Tabellenblatt. Entweder trägt der Anwender hier Kosten, die auch während des normalen Betriebs noch anfallen manuell ein oder er fährt mit einer Prüfung der Kostenaufstellung fort. Mit der Aktivität *weiter drücken* springt das Tool zur Kostenberechnung mit CPS-Technologien. Auch hier mündet der Pfeil wieder in einer Entscheidung. Wurde das Angebotsformular nicht ausgefüllt und im Excel-Tool hochgeladen, folgt hier nun die manuelle Eintragung der anfallenden Kosten. Andernfalls werden die Kostenpunkte geprüft und mit der Aktivität *Auswertung* abgeschlossen. Man gelangt zur graphischen Darstellung des Kostenvergleichs. Die Entscheidungsmöglichkeit zeigt, dass man zudem noch den Zinssatz zur Diskontierung ändern kann. Schlussendlich entscheidet man sich dann für oder gegen die Durchführung des Projekts. Im Endpunkt endet das Aktivitätsdiagramm.

4.5.3 Anwenderleitfaden

Der Demonstrator besteht aus mehreren Tabellenblättern, die der Reihe nach durchlaufen werden müssen: einer Anleitung, dem Cockpit, Projekt und Personal, Finanzierung, Kostenermittlung ohne CPS, Kostenermittlung CPS und der Auswertung. Die Navigation durch die Präsentation erfolgt durch die *Weiter/Ausführen* Schaltflächen am unteren Ende jedes Tabellenblattes. Alternativ kann man die Tabellenblätter des Tools manuell durchschalten, wenn auf einem Blatt alle erforderlichen Daten ausgefüllt wurden.

Im oberen Abschnitt jedes Blattes werden zur Orientierung alle notwendigen Schritte, respektive Blätter, angezeigt. Anhand dieser Leiste wird ersichtlich, in welchem Schritt man sich momentan befindet. Für eine einfachere Anwendbarkeit ist dem Demonstra-

tor außerdem eine Farbcodierung hinterlegt. Anhand dieser ist sofort ersichtlich, welche Felder der jeweiligen Arbeitsmappe ansteuerbar sind und wo Werte eingetragen werden. Dabei ist zu beachten, dass je nach gewählter Voreinstellung manche Felder automatisch ausgefüllt oder auch gesperrt werden. Die Farbcodierung bedeutet dabei folgendes: Ein weißes Feld kann grundsätzlich angesteuert werden und sollte möglichst ausgefüllt werden. In die gelb hinterlegten Felder werden Werte automatisch übernommen. Grau bedeutet, dass das jeweilige Feld ist gesperrt. Dunkelblau hinterlegt sind Felder, die die nächsten Arbeitsanweisungen beinhalten. Mit der Aktivierung der Schaltfläche *Start* beginnt man die Nutzung des Demonstrators.

Tabellenblatt Cockpit

Im ersten Blatt, dem Cockpit, wird zunächst die grobe Orientierung für das Projekt vorgenommen. Ein Anwendungsbereich, eine Zieldimensionen und die gewünschte Technologie werden ausgewählt. Im ersten von drei Schritten muss der Anwender den Bereich der Intralogistik auswählen, in welchem eine CPS-Technologie zur Anwendung kommen soll. Die Anwendungsbereiche wurden entsprechend des morphologischen Kastens in Abbildung 22 gewählt. Dieser listet in einer Tabelle mögliche CPS-Technologien auf, die wiederum in die Kategorien Wearable Computing/Smart Devices, Fahrerlose Transportfahrzeuge, Intelligente Behälter, Robotik und stationäre Assistenz eingeteilt werden. In der Spalte daneben werden die Haupteinsatzgebiete der Technologien in der Intralogistik aufgezeigt.

CPS	Haupt Einsatzgebiete						Potenzielle Aufgaben / Kommentar	
	Wareneingang	innerbetrieblicher Transport	Lagerung	Kommissionierung	Verpackung	Warenausgang		
Wearable-Computing / Smart Devices	RFID-Armband	(X)		(X)	X		(X)	- Automatische Quittierung durch Entnahme/Abgabe/Bewegungen in der Kommissionierung - Ggf. automatische Quittierung bei Annahme der Lieferung (Wareneingang) bzw. bei Entnahme eines Artikels aus dem Lager oder Abgabe im Warenausgangsbereich
	ValidKomm	(X)		(X)	X		(X)	- Automatische Quittierung durch Entnahme/Abgabe/Bewegungen in der Kommissionierung - Ggf. automatische Quittierung bei Annahme der Lieferung (Wareneingang) bzw. bei Entnahme eines Artikels aus dem Lager oder Abgabe im Warenausgangsbereich
	Sensorarmband	(X)		(X)	X		(X)	- Automatische Quittierung durch Entnahme/Abgabe/Bewegungen in der Kommissionierung - Ggf. automatische Quittierung bei Annahme der Lieferung (Wareneingang) bzw. bei Entnahme eines Artikels aus dem Lager oder Abgabe im Warenausgangsbereich
	RFID-Handschuh	(X)		(X)	X		(X)	- Automatische Quittierung durch Entnahme/Abgabe/Bewegungen in der Kommissionierung - Ggf. automatische Quittierung bei Annahme der Lieferung (Wareneingang) bzw. bei Entnahme eines Artikels aus dem Lager oder Abgabe im Warenausgangsbereich
	NFC Wearable / Mobile Client	(X)		(X)	X		(X)	- Automatisches Auslesen von Daten - Identifikation von Waren bei der Entnahme und Abgabe
	Smartphone	X	(X)	X	X	X	X	- Anzeige von Kommissionierinformationen (Entnahmepunkt, Art und Anzahl Artikel, Abgabepunkt) - Quittierung erfolgt manuell durch Fotografieren des Barcodes etc. - Visuelle Anzeige/Anleitung, wie Artikel verpackt werden müssen
	Smartwatches	X	(X)	X	X	X	X	- Anzeige von Kommissionierinformationen (Entnahmepunkt, Art und Anzahl Artikel, Abgabepunkt) - Quittierung erfolgt manuell durch Fotografieren des Barcodes etc. - Visuelle Anzeige/Anleitung, wie Artikel verpackt werden müssen
	Datenbrille	X	(X)	X	X	X	X	- Anzeige von Kommissionierinformationen (Entnahmepunkt, Art und Anzahl Artikel, Abgabepunkt), Lagerinformation, Verpackungsinformationen etc. direkt im Sichtfeld - Quittierung erfolgt automatisch durch einen integrierten Barcodescanner/Kamera - Ggf. visuelle Steuerung/Navigation durch die Lagerumgebung
	Pick-by-Light			(X)	X			- Anzeige von Kommissionierinformationen durch Signallampen - Quittierung erfolgt manuell durch Quittierungstasten an Lagerplätzen bzw. Lichtsensoren
	Pick-by-Voice			(X)	X			- Vermittlung von Kommissionierinformationen durch Sprachsteuerung (über Kopfhörer) - Rückmeldungen/Quittierungen werden akustisch vermittelt, bspw. durch Nennung von Prüfziffern (des entnommenen Lagerplatzes und Abgabehalters)
Fahrerlose Transportsysteme	KARIS PRO	(X)	X				(X)	- Dezentral gesteuertes, fahrerloses Transportsystem (durch Auslesen von RFID-Transpondern, Lasernavigation, Sensorik) - Ggf. Abholung der Güter im Wareneingang bzw. Abgabe im Warenausgang
	Auto Pallet Mover (APM)	(X)	X				(X)	- Dezentral gesteuertes, fahrerloses Transportsystem (durch Auslesen von Sensoren an Abholplätzen, Anbindung an WMS über WLAN, Lasernavigation) - Ggf. Abholung der Güter im Wareneingang bzw. Abgabe im Warenausgang
	FIFI	(X)	X	(X)	X	(X)	(X)	- Bediener/Anwender steuert FIFI berührungslos über Gesten und Bewegungen, Entlastung des Mitarbeiters im Transport, in der Kommissionierung etc. - Ggf. Abholung der Güter im Wareneingang bzw. Abgabe im Warenausgang
	Go neo CX 20	(X)	X		X	(X)	(X)	- Bediener/Anwender steuert Go neo CX 20 (Autonomer Horizontal-Kommissionierer) berührungslos über Bewegungen - Fährt nach Abschluss des Kommissioniervorgangs autonom zum Warenausgang - Ggf. Abholung der Güter im Wareneingang
	proANT Transport-Roboter	(X)	X				(X)	- Dezentral gesteuertes, fahrerloses Transportsystem (durch Lasernavigation, Anbindung an WMS über WLAN) - Ggf. Abholung der Güter im Wareneingang bzw. Abgabe im Warenausgang
	TORsten	(X)	X				(X)	- Dezentrales Unterfahrfahrerloses Transportsystem (durch Lasernavigation, Anbindung an WMS über WLAN) - Ggf. Abholung der Güter im Wareneingang bzw. Abgabe im Warenausgang
	SSI Schäfer FTS 2PICK		X	(X)	X			- Dezentral gesteuertes fahrerloses Transportsystem - Behälter und Paletten werden zur Aufnahme der kommissionierten Artikel mit sich geführt
	Fahrerlose Transportsysteme	(X)	X	(X)	(X)	(X)	(X)	- Anbieter bietet eine Bandbreite an Fahrzeugen, Technologien etc. an (für Lastenhandlung, zur Unterstützung der Kommissionierung etc.)
	FlexConveyor		X					- Dezentral gesteuertes, modulares Fördersystem
	KIVA-Transportroboter	(X)	X		X	(X)	(X)	- Dezentral gesteuerte, autonome Transportroboter mit integrierten bzw. mobilen Regalen - Ggf. Abholung der Güter im Wareneingang bzw. Abgabe im Warenausgang
Intelligente Behälter	Kommissionier-Roboter TORU	(X)	(X)	(X)	X			- Dezentral gesteuertes Kommissionier-Roboter - Selbständige Fahrt zum Lagerplatz und Entnahme der notwendigen Materialien
	InBin			X	X			- Intelligenter Behälter leitet und kontrolliert Kommissioniervorgang (Ankündigungen, automatische Bestätigung, Fehlermeldung) - Ladungsträger wird zum Informationsträger (Füllstandsüberwachung, Auslösung Nachschub/Bestellvorgänge nach dem Kanban-Prinzip)
	Bin			X	(X)			- Intelligenter Behälter mit integrierter Füllstands-, Zahl- und Bestellinformation in Behälter (Auslösung Nachschub/Bestellvorgänge nach dem Kanban-Prinzip)
Robotik	DProdLog			X	(X)			- Intelligenter Behälter mit integrierter Füllstands-, Zahl- und Bestellinformation in Behälter (Auslösung Nachschub/Bestellvorgänge nach dem Kanban-Prinzip)
	Kommissionier-Roboter TORU		X		X			- Intelligenter, fahrerloser Kommissionierroboter
	RFID-Roboter TORY		X	X				- Intelligenter, fahrerloser Inventurroboter
Kameragesützte Systeme	FlexConveyor		X					- Dezentral gesteuertes modulares Fördersystem
	Der schlaue Klaus	X			(X)		X	- Über Touch-Monitor leitet der Schlaue Klaus Mitarbeiter Schritt für Schritt z. B. durch die Wareneingangsprüfung - Automatische Quittierung z. B. des Wareneingangs
	Assembly Scout				X			- Vermittlung von Kommissionierinformationen über Bild, Text und Ton - Rückmeldungen/Quittierungen werden automatisch durchgeführt
Ratio Anlage Arbeitsplatz	Autosynchrone Werkerführung				X			- Vermittlung von Kommissionierinformationen über einen Bildschirm - Rückmeldungen/Quittierungen werden automatisch durchgeführt
	Arbeitsplatz 4.0				X	X		- Gesten- und videogestützter Pack- und Montageassistent

Abbildung 22: Morphologischer Kasten

In der rechten Spalte sind potentielle Aufgaben oder Kommentare zu den jeweiligen Technologien zu sehen. Technologien, die sich noch in der Entwicklungsphase befinden, sind zudem hellgrau hinterlegt. Mögliche Anwendungsbereiche für CPS-Technologien sind also auch im Cockpit Wareneingang, innerbetrieblicher Transport, Lagerung, Kommissionierung, Verpackung und Warenausgang. Der Anwender wählt nun einen oder mehrere Anwendungsbereiche für das CPS-Projekt aus. Es ist zu beachten, dass je nach Auswahl des Anwendungsbereichs im unteren Teil des Blattes bereits eine Vorauswahl an verwendbaren Technologien getroffen wird. Welche Technologien für welche Anwendungsbereiche ersichtlich sind, kann ebenfalls im morphologischen Kasten abgelesen werden. Das heißt also, nicht für jeden Anwendungsbereich

steht jede Technologie zur Verfügung. Um zu zeigen, wie der Demonstrator funktioniert, wird beispielhaft ein Projekt in der Kommissionierung geplant (s. Abbildung 23):



Abbildung 23: Erster Arbeitsschritt im Cockpit

Im zweiten Schritt werden die Zieldimensionen ausgewählt (s. Abbildung 24). Mit dem Knopf *Reset* kann außerdem eine neue Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt werden.

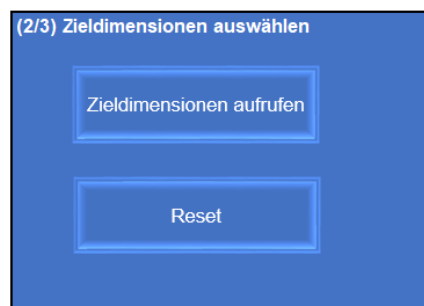


Abbildung 24: Auswahl der Zieldimensionen im Cockpit

Wählt man die Taste *Zieldimensionen aufrufen*, öffnet sich folgendes Fenster (s. Abbildung 25):

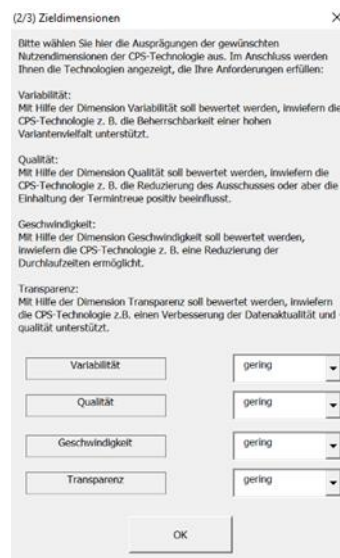


Abbildung 25: Auswahl der Zieldimensionen

Für jedes Unternehmen kann so mithilfe des Drop-Down-Kästchens individuell festgelegt werden, welche qualitativen Zieldimensionen einen geringeren, mittleren oder hohen Einfluss haben. Auch dadurch wird die Auswahl der Technologien erleichtert. Die

Dimension Variabilität soll bewerten, wie viele Serien das Unternehmen mit niedrigen Stückzahlen produziert. Gibt es viele Produkte mit Losgröße eins, ist eine hohe Variabilität vonnöten. Die Dimension Qualität beschreibt, wie sehr qualitative Merkmale im Unternehmen beeinflusst werden, etwa Fehlerquoten oder Termintreue. Die Dimension Geschwindigkeit gibt an, wie wichtig eine Reduktion von Prozesszeiten ist. Transparenz beschreibt, in welchem Maße die CPS-Technologie zur Datenaktualität und –qualität beiträgt. Beispielhaft wird ein hoher Einfluss für Geschwindigkeit und Qualität gewählt, ein mittlerer für Variabilität und ein geringer für Transparenz. Mit Drücken der Taste *Ok* werden diese gespeichert und die Kriterienauswahl als Filter angewendet. Nachfolgend soll die gewünschte Technologie ausgewählt werden. Anhand der Einschränkungen, die durch den Anwendungsbereich und die Zieldimensionen gegeben sind, werden die passenden Technologien mit Bild angezeigt (s. Abbildung 26):

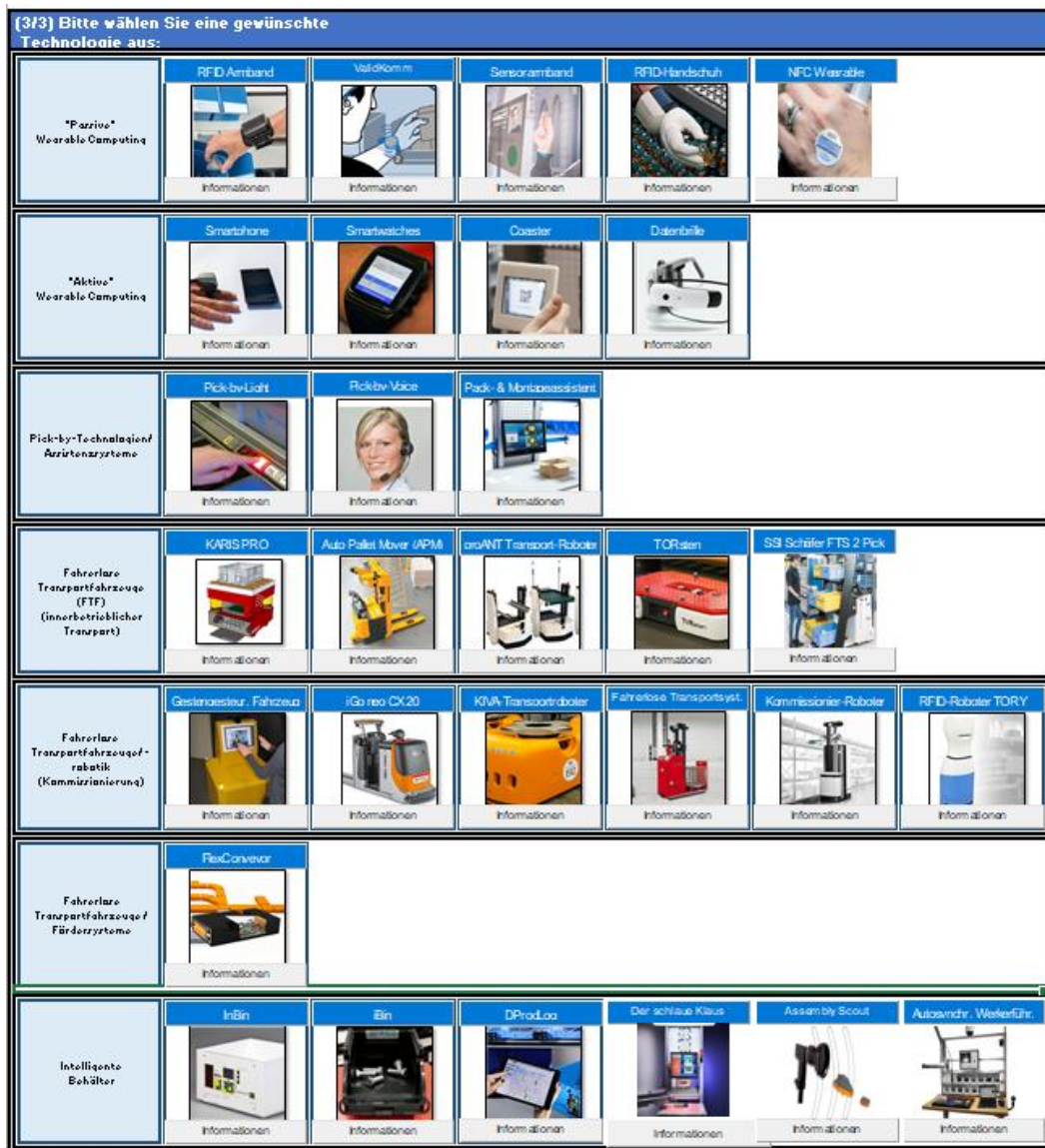


Abbildung 26: Technologieauswahl im Cockpit

Mit einem Klick auf den Kasten *Informationen* werden Details wie Technologien, Mensch-Maschinen-Interaktion, Handhabung u.v.m. zu der jeweiligen Technologie angezeigt (s. Abbildung 27).

Datenbrille	
Technologie	Sensork, WLAN, USB etc. je nach Anwendung
Anwender erforderlich / Mensch-Maschinen Interaktion	Ja
Handhabung / Kommunikationskanal	<ul style="list-style-type: none"> - Anwender trägt Datenbrille während des Prozessschrittes - Die Datenbrille ermöglicht eine Erweiterung der Wirklichkeit: Kontextabhängige digitale Informationen werden vor das Auge projiziert (Lagerumgebung und Projektion/Informationen werden gleichzeitig wahrgenommen) - Integrierter Barcodescanner/ Kamera - Echtzeitübermittlung der Daten durch WLAN-Anbindung an Lagerverwaltungssystem - Automatische Fehlererkennung
Anwendungsbeispiele/ Einsatzmöglichkeiten	<ul style="list-style-type: none"> - Wareneingang - Manuelle Kommissionierung - Montageprozesse - Lagerverwaltung - Qualitätsmanagement
Potenziale	<ul style="list-style-type: none"> - Detaillierte Anleitung für Anwender ohne zusätzliche Handgriffe (direkt im Sichtfeld) - Minimale Fehleranfälligkeit - Vermeidung zusätzlicher Prozessschritte (Quittierung etc.) - Keine Veränderung der gewohnten Prozessschritte - Flexibilität - Produktivitätsverbesserung (durch automatische Identifikation und Einblendung)
Anbieter	Smart Glasses M100 von Vuzix (https://www.vuzix.com/Products/m100-smart-glasses ; https://www.tup.com/datenbrillen-in-der-intralogistik-teil2-vuzix-smart-glasses-m100-im-test/) Picavi GmbH (gegründet unter Logocom GmbH) (liefert Software, offizieller Partner aller führenden Datenbrillen-Hersteller – bspw. für Google und Vuzix (http://picavi.com/hardware/#details)
Forschungspartner	
Zusatz	<ul style="list-style-type: none"> - Weitere sind Google Glasses von Google (https://developers.google.com/glass/), Hololens von Microsoft (https://www.microsoft.com/de-de/hololens), Visual Guided Picking von Visual Technologies (http://www.visual-technologies.de/) - Eigenständig nutzbar, keine Kombination mit anderen Lösungen erforderlich - Häufig mit integrierter Sprachsteuerung
Speichern	

Abbildung 27: Weiterführende Informationen zur Datenbrille

Dadurch lassen sich alle auswählbaren Technologien noch einmal im Detail vergleichen. Zudem kann jeder Anwender eigene Notizen im Kasten „Anbieter“ hinzufügen und diese mit einem Klick auf *Speichern* für spätere Vergleiche speichern. Beispielfhaft wird die Smartwatch als passende Technologie ausgewählt. Dies geschieht durch das Drücken des blauen Kastens *Smartwatches* oberhalb des Bildes. Nun sind alle Informationen angegeben, die im Cockpit benötigt werden und das Tool springt automatisch zum nächsten Blatt Projekt und Personal.

Tabellenblatt Projekt und Personal

Im zweiten Tabellenblatt müssen die Basis-Informationen für das ausgewählte Projekt angegeben werden. In einem ersten Schritt werden die Projektdaten für die ausgewählte Technologie angegeben (s. Abbildung 28).

(1/4) Geben Sie die Projektdaten für die ausgewählte Technologie im folgenden Anwendungsbereich an:

Gewählte Technologie:	Smartwatches
Name des Projekts	Beispielprojekt 1
Dauer einer Periode	Monat <input type="button" value="v"/>
Nutzungsdauer (in Perioden):	30
Konzept- & Designphase (in Perioden)	3
Beschaffungs- und Implementierungsphase (in Perioden):	3
Betriebsphase (in Perioden):	24
Betriebszeitstunden pro Tag	8
Nutzungsdauer im Jahr (in Tagen)	250
Energieverbrauch der gewählten Technologie (kWh)	
Energiekosten (TEUR/kWh)	0,000127
Reale Preissteigerungsrate Strom	0,01
Diskontierungssatz	0,7

Abbildung 28: Projektdaten eintragen

Die gewählte Technologie wurde bereits im Cockpit bestimmt. Das Projekt wird benannt. Für die Dauer einer Periode kann zwischen Jahren und Monaten gewählt werden. Die Nutzungsdauer in Perioden errechnet sich automatisch aus der Konzept- und Designphase, der Beschaffungs- und Implementierungsphase und der Betriebsphase. Die Dauer der einzelnen Phasen wird gemäß dem LCC-Ansatz eingeschätzt. Eine wichtige Bedeutung haben außerdem die Betriebszeitstunden pro Tag und die Nutzungsdauer in Tagen pro Jahr. Der Energieverbrauch der Technologien wird nur bei FTS von relevanter Bedeutung sein, weshalb diese Option nur für diese Technologieauswahl ansteuerbar ist. Der Grund ist die mangelnde Informationslage über den tatsächlichen Verbrauch der Geräte, weshalb dieser Aufwand nur bei diesen Technologien betrieben werden sollte. Die Energiekosten sind bereits eingetragen und basieren auf Daten des Statistischen Bundesamts aus dem zweiten Halbjahr 2017.

Da sich Smartwatches relativ einfach mit bereits vorhandenen Technologien und Systemen verknüpfen lassen und diese auch im Privatleben immer häufiger genutzt werden, wird von relativ kurzen Konzept- Implementierungsphasen ausgegangen. Als Betriebsphase werden zunächst zwei Jahre festgelegt. Die Betriebsstunden pro Tag liegen bei acht Stunden und die Nutzungsdauer im Jahr wurde auf 250 Tage festgelegt. Anschließend werden noch die Kosten für Strom und der unternehmensinterne Diskontierungssatz eingetragen.

Im zweiten Schritt werden die Kosten für Mitarbeiter eingetragen, die ohne den Einsatz des CPS anfallen würden (s. Abbildung 29). Dabei werden die Konzept- und Designphase und Beschaffungs- und Implementierungsphase so behandelt, als würde der Betrieb in den insgesamt sechs Monaten normal weiterlaufen. In der letzten Spalte

wird automatisch die Summe der Kosten für die einzelnen Arbeitnehmergruppen berechnet.

(2/4) Geben Sie die Kosten für Mitarbeiter - die ohne Einsatz von CPS-Technologie anfallen würden an:

	Arbeitnehmer / -Innengruppe	Gehalt pro Pers.-Tag EUR	Personentage je Phase						Summe in EUR
			Konzept- und Designphase		Beschaffungs- und Implementierungsphase		Betriebsphase		
				Personentage		Personentage		Personentage	
Personalkosten ohne CPS	Meister	300	60	Personentage	60	Personentage	480	Personentage	132000
	Geselle	144	300	Personentage	300	Personentage	2400	Personentage	432000
	Aushilfe	80	60	Personentage	60	Personentage	480	Personentage	48000
	-	0		Personentage		Personentage		Personentage	
	-	0		Personentage		Personentage		Personentage	
	-	0		Personentage		Personentage		Personentage	
	-	0		Personentage		Personentage		Personentage	
	-	0		Personentage		Personentage		Personentage	

Abbildung 29: Kosten ohne CPS

Im Beispiel arbeiten jeden Tag ein Meister, fünf Gesellen und zwei Aushilfen über die gesamte Laufzeit von 30 Monaten. Anschließend werden die Kosten für Mitarbeiter eingetragen, die beim Implementieren einer CPS-Technologie anfallen würden (s. Abbildung 30).

(3/4) Geben Sie die Kosten für Mitarbeiter - die mit Einsatz von CPS-Technologie anfallen würden an:

	Arbeitnehmer / -Innengruppe	Gehalt pro Pers.-Tag EUR	Personentage je Phase						Summe in EUR
			Konzept- und Designphase		Beschaffungs- und Implementierungsphase		Betriebsphase		
				Personentage		Personentage		Personentage	
Personalkosten mit CPS	Ingenieur	300	10	Personentage	20	Personentage	0	Personentage	9600
	Manager	420	15	Personentage	15	Personentage	0	Personentage	12600
	Ausbilder	300	0	Personentage	5	Personentage	0	Personentage	1500
	IT-Fachkraft	300	40	Personentage	40	Personentage	0	Personentage	25600
	Meister	300	60	Personentage	60	Personentage	480	Personentage	132000
	Geselle	144	300	Personentage	240	Personentage	1440	Personentage	285120
	Aushilfe	80	60	Personentage	30	Personentage	240	Personentage	26400
	-	0		Personentage		Personentage		Personentage	

Abbildung 30: Kosten mit CPS

Im Beispiel kommen einige neue Arbeitnehmer/-Innengruppen hinzu. Dies ist vor allem der Konzept- und Design- und der Beschaffungs- und Implementierungsphase geschuldet. Der Manager des Unternehmens muss sich in der Konzept- und Designphase mit der Planung und dem Treffen von Entscheidungen auseinandersetzen. Zudem muss er in der Beschaffungs- und Implementierungsphase Schulungen und den Roll-Out planen. Ein Ingenieur und eine IT-Fachkraft müssen sich mit der Konzeption und dem Design auseinandersetzen, um ein reibungsloses Ineinandergreifen des neuen Systems mit dem bereits bestehenden System zu gewährleisten. Auch in der Beschaffungs- und Implementierungsphase sind beide Arbeitnehmer/-Innengruppen noch mit Nachsteuerungen und kleineren Anpassungen betraut. In dieser Phase muss zudem das Personal durch einen Ausbilder geschult werden. Die Kostenersparnis

ergibt sich in der Betriebsphase. Es wird ersichtlich, dass weniger Personentage wie zuvor im Betrieb benötigt werden.

Im vierten Schritt (s. Abbildung 31) wird mit dem Knopf *Angebotsformular einlesen* das Dokument mit dem erhaltenen Angebot ausgewählt und hochgeladen (falls vorhanden).



Abbildung 31: Einlesen des Angebotsformulars

Fragen Sie hierfür die relevanten Daten wie Angebotspreis, Stromverbrauch etc. beim Anbieter ab und übertragen Sie diese Daten in den jeweiligen Produktsteckbrief. Zur Abfrage der Daten kann das produktspezifische Formular (s. Abbildung 32) zur Angebotseinholung ausgedruckt werden. In dem Formular werden die für die Kostenberechnung relevanten Daten abgefragt.

	A	B	C	D	E	F	G	
1	Angebotserstellung für CPS-Technologien in der Intralogistik							
2								
3								
4	Informationen (Vom Nachfrager auszufüllen)							
5	Name des Anbieters:	Beispielunternehmen 1						
6	Produktbezeichnung:	Smartwatch						
7								
8	Name des Nachfragers:	Beispielunternehmen 2						
9	Branche:	Maschinenbau						
10	Unternehmensgröße (Umsatz/MA):	10 Mio. EUR	50 Mitarbeiter					
11	Anzahl auszustattender Arbeitsplätze:	3	3 Mitarbeiter					
12	Technologiegruppe:	Passive Wearable Computing Devices						
13	Intralogistikprozess:	Wareneingang						
14	Weitere Informationen:	Bitte füllen Sie untenstehende Tabelle entsprechend Ihrem Angebot für die Ausrüstung von drei Arbeitsplätzen in dem Wareneingang aus.						
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23	Zeitspanne und Kosten in TEUR (Vom Anbieter auszufüllen)							
24		M1	M2	M3	M4	M5	LK	
25	... vor Transaktion:							
26	Beratungskosten:	3	4	2	0	0	0	
27		M1	M2	M3	M4	M5	LK	
28	_ während Transaktion/Installation:							
29	Schulungskosten:	3	3	3	0	0	0	
30	Einrichtung (Neue Arbeitsprozesse/-plätze):	3	2	0	0	0	0	
31	Produktmodifikationen (an Vorhandenen Erzeugnissen):	2	2	2	2	2	2	
32	Installationskosten bestehend aus: Hard-/ Middle- und Software	15	10	6	1	1	1	
33		M1	M2	M3	M4	M5	LK	
34	_ während Betrieb pro Periode:							
35	Energiekosten in kWh (On-Modus):	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	
36	Energiekosten in kWh (Off-Modus):	0	0	0	0	0	0	
37	Schulungskosten während Betrieb:	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
38	Entsorgungskosten:	0	0	0	0	0	0	
39	Kosten für Support (bspw. Gewährleistung):	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
40		M1	M2	M3	M4	M5	LK	
41	Lizenzkosten pro Periode:							
42	Inspektionskosten:	0	0	0	0	0	0	
43	Wartung- und Instandhaltungskosten:	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
44	Softwarekosten:	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
45	Ersatzteilkosten:	0	0	0	0	0	0	
46		M1	M2	M3	M4	M5	LK	
47	Weitere Kostenfaktoren (optional):							
48		0	0	0	0	0	0	
49		0	0	0	0	0	0	
50		0	0	0	0	0	0	
51		0	0	0	0	0	0	
52		0	0	0	0	0	0	
53		0	0	0	0	0	0	
54		0	0	0	0	0	0	
55		0	0	0	0	0	0	

Abbildung 32: Formular zur Angebotserstellung

Schritt 4, das Hochladen des Angebotsformulars ist jedoch optional, da die Kosten auch aus bereits existierenden Angeboten manuell in die Kalkulation mitaufgenommen werden können. Das Angebotsformular bietet die Möglichkeit, die Kosten für die jeweils ersten fünf Perioden jeder Phase einzutragen. Nach den ersten fünf Perioden werden die darauffolgenden Kosten als Lebenszykluskosten (LK) zusammengefasst.

Diese stehen für die laufenden Kosten, die die gesamte Projektdauer anfallen werden. Haben Sie die Daten in einer anderen Form erhalten, sind diese später auf Blatt 6, der Kostenermittlung CPS, händisch einzutragen.

Tabellenblatt Finanzierung

Mit *Ausführen* springt das Tool auf das nächste Blatt, Finanzierung. Hier werden drei Möglichkeiten zur Finanzierung angezeigt: ein Darlehn mit endfälliger Tilgung, ein Ratendarlehen und ein Annuitätendarlehen. Die Laufzeit in Perioden wird automatisch aus der Nutzungsdauer, die im Blatt Projekt und Personal bereits eingetragen wurden, übernommen. Zinssatz und Darlehensbetrag können für jede Finanzierungsart selbst festgelegt werden. Zum Vergleich lassen sich auch unterschiedliche Werte eintragen. Die Tilgungsrate passt sich automatisch an Auswahl der Periodenart an. Wurde im Blatt Projekt und Personal Jahre als Periodendauer gewählt, werden jährliche Raten angezeigt, bei Perioden in Monaten entsprechend monatliche Raten. Es wird von einem Zinssatz von fünf Prozent und einem Darlehensbetrag für die Anschaffung von fünf Smartwatches, Schulung, Beratung und Software von 10.000 € ausgegangen.

Tilgung						Ratendarlehen						Annuitätendarlehen					
Laufzeit (in Perioden)		Zinssatz	Darlehensbetrag		Auswählen	Laufzeit (in Perioden)		Zinssatz	Darlehensbetrag		Auswählen	Laufzeit (in Perioden)		Zinssatz	Darlehensbetrag		Auswählen
27		5,00%	10.000,00 €			27		5,00%	10.000,00 €			27		5,00%	40.000,00 €		
Jahr	Restschuld am Jahresanfang	Zinsen	Tilgung	Zu zahlende Rate pro Periode	Restschuld am Jahresende	Jahr	Restschuld am Jahresanfang	Zinsen	Tilgung	Zu zahlende Rate pro Periode	Restschuld am Jahresende	Jahr	Restschuld am Jahresanfang	Zinsen	Tilgung	Zu zahlende Rate pro Periode	Restschuld am Jahresende
1	10000	500	0	500	10000	1	10000	500	370,3703704	870,3703704	9629,62963	1	40000	2000	731,6743947	2731,674395	39268,32561
2	10000	500	0	500	10000	2	9629,62963	481,4814815	370,3703704	851,8518519	9259,25993	2	39268,32561	1963,41628	786,5281144	2731,674395	38606,06788
3	10000	500	0	500	10000	3	9259,25993	462,962965	370,3703704	833,333354	8888,88889	3	38500,65749	1925,003375	806,6712021	2731,674395	37693,35647
4	10000	500	0	500	10000	4	8888,88889	444,444445	370,3703704	814,8148154	8518,51851	4	37693,35647	1884,669824	847,0045731	2731,674395	36846,39319
5	10000	500	0	500	10000	5	8518,51851	425,925925	370,3703704	796,2962954	8148,14814	5	36846,39319	1842,335955	889,1547997	2731,674395	35972,0371
6	10000	500	0	500	10000	6	8148,14814	407,407405	370,3703704	777,777775	7777,77777	6	35972,0371	1797,851855	933,8253397	2731,674395	35023,21456
7	10000	500	0	500	10000	7	7777,77777	388,888885	370,3703704	759,2592554	7407,40737	7	35023,21456	1751,160728	980,5136667	2731,674395	34042,70089
8	10000	500	0	500	10000	8	7407,40737	370,3703704	370,3703704	740,7407364	7037,03669	8	34042,70089	1702,130895	1029,539395	2731,674395	33013,16154
9	10000	500	0	500	10000	9	7037,03669	351,851845	370,3703704	722,222154	6666,66665	9	33013,16154	1650,638077	1081,016317	2731,674395	31923,14523
10	10000	500	0	500	10000	10	6666,66665	333,333325	370,3703704	703,7036954	6296,2961	10	31923,14523	1596,607211	1135,067133	2731,674395	30797,07809
11	10000	500	0	500	10000	11	6296,2961	314,814805	370,3703704	685,1851754	5925,9257	11	30797,07809	1539,853905	1191,82049	2731,674395	29625,2376
12	10000	500	0	500	10000	12	5925,9257	296,296285	370,3703704	666,6666504	5555,5553	12	29625,2376	1480,36268	1251,413155	2731,674395	28353,84698
13	10000	500	0	500	10000	13	5555,5553	277,777765	370,3703704	648,1481359	5185,1849	13	28353,84698	1417,692304	1313,98209	2731,674395	27039,864
14	10000	500	0	500	10000	14	5185,1849	259,259245	370,3703704	629,6296354	4814,8145	14	27039,864	1351,9932	1379,681195	2731,674395	25660,1428
15	10000	500	0	500	10000	15	4814,8145	240,740725	370,3703704	611,110954	4444,4441	15	25660,1428	1283,20914	1448,665255	2731,674395	24211,51755
16	10000	500	0	500	10000	16	4444,4441	222,222205	370,3703704	592,5925754	4074,0737	16	24211,51755	1210,579877	1521,098517	2731,674395	22690,4193
17	10000	500	0	500	10000	17	4074,0737	203,703685	370,3703704	574,0740554	3703,7033	17	22690,4193	1134,520952	1597,153443	2731,674395	21093,26559
18	10000	500	0	500	10000	18	3703,7033	185,185165	370,3703704	555,555504	3333,3329	18	21093,26559	1058,482979	1677,011133	2731,674395	19465,26487
19	10000	500	0	500	10000	19	3333,3329	166,666645	370,3703704	537,070354	2992,9625	19	19465,26487	979,817237	1760,961671	2731,674395	17855,3928
20	10000	500	0	500	10000	20	2992,9625	148,148125	370,3703704	518,5184954	2592,5921	20	17855,3928	892,768601	1888,904755	2731,674395	15880,48805
21	10000	500	0	500	10000	21	2592,5921	129,629605	370,3703704	499,9999754	2222,2217	21	15880,48805	799,324024	1941,349992	2731,674395	13865,13806
22	10000	500	0	500	10000	22	2222,2217	111,111085	370,3703704	481,4814504	1851,8413	22	13865,13806	698,2969028	2008,421492	2731,674395	11826,72056
23	10000	500	0	500	10000	23	1851,8413	92,592565	370,3703704	462,9629354	1481,4809	23	11826,72056	591,330282	2140,33836	2731,674395	9886,382197
24	10000	500	0	500	10000	24	1481,4809	74,074045	370,3703704	444,4444354	1111,1105	24	9886,382197	484,3191098	2247,355285	2731,674395	7839,029932
25	10000	500	0	500	10000	25	1111,1105	55,555525	370,3703704	425,925954	740,7401	25	7839,029932	371,9513456	2339,723049	2731,674395	5979,303863
26	10000	500	0	500	10000	26	740,7401	37,037005	370,3703704	407,4073754	370,3697	26	5979,303863	253,9651932	2477,70922	2731,674395	4260,594662
27	10000	500	10000	10500	0	27	370,3697	18,518485	370,3703704	388,8888554	-0,0007	27	4260,594662	130,0797331	2601,594662	2731,674395	26813011,11
Summe		15000	10000		23500	Summe		454377,3917	450877,3917	457877,3913		Summe		130615,365	1347115,365		

Abbildung 33: Blatt Finanzierung

Im Beispiel (s. Abbildung 33) wird das Ratendarlehen gewählt, da es sich dabei insgesamt um die billigste Finanzierung handelt. Mit *Auswählen* springt der Demonstrator nun automatisch auf das Blatt Kostenermittlung ohne CPS (s. Abbildung 34).

Tabellenblatt Kostenermittlung ohne CPS

In diesem Tabellenblatt werden alle Perioden der geplanten Nutzungsdauer angezeigt. Konzept- und Designphase, Beschaffungs- und Implementierungsphase und Betriebs-

phase sind jeweils farblich voneinander abgegrenzt. In der ersten Spalte sind verschiedene Kostenkategorien aufgeführt. Die Personalkosten für Löhne und Gehälter werden automatisch aus dem Blatt Projekt und Personal übernommen, sobald in der zweiten Spalte diese Kosten für die Phase durch das Auswählen von *Ja* aktiviert wurden.

Phase	Nützungsphase				Konzept & Designphase				Beschaffungs- & Implementierungsphase				Betriebsphase			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Personal	Kosten aktiviert für Phase															
Lohn und Gehälter	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Zeitraum Personal	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400
Personale Kostenträger	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400
Planungsphase																
Planungsphase durch Anbieter																
Erstellung der Angebote																
Erstellung des Leistungsverzeichnisses																
Finanzierung																
Zinsen																
Geldzinsen																
Ertragszinsen																
Anschaffungskosten																
Einzelanschaffungskosten																
Einzelanschaffungskosten																
Einzelanschaffungskosten																
Einzelanschaffungskosten																
Installationskosten																
Physische Installation																
Medien- und Materialkosten																
Software- und Materialkosten																
Einzelanschaffungskosten																
Optimierung																
Test der Betriebsfähigkeit																
Erstellung des Testplans																
Erstellung des Testplans																
Betriebskosten																
Interdisziplinäre Zusammenarbeit																
Interdisziplinäre Zusammenarbeit																
Interdisziplinäre Zusammenarbeit																
Interdisziplinäre Zusammenarbeit																
Kosten für Schäden																
Personelle und Sachliche Einbußen																
Personelle Einbußen																
Sachliche Einbußen																
Weitere Kostenfaktoren																
Stm. Einbußen																
Stm. Einbußen																
Stm. Einbußen																
Stm. Einbußen																
Gesamtwert	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400	22400
Diskontinuierlicher Wert nach Anlage von Perioden 1	21431,1	20598,1	19617,1	18768,6	17956,75	17189	16436,3	15725,9	15045,7	14394,9	13772,2	13176,47	12606,51	12061,2	11539,5	11040,3
Kumulierte Kosten	21431,074	43051,124	64552,279	86220,871	107777,627	128194,52	147626,41	165666,106	182600,006	198513,12	213400,595	227166,067	239855,581	251525,052	262225,581	271995,064

Abbildung 34: Kostenermittlung ohne CPS

In diesem Beispiel sind die Kosten für eine interne Schulung in dieser Phase deaktiviert, da *Nein* ausgewählt wurde (s. Abbildung 34). Diese Zeile ist daher ausgegraut. Wird die Kostenart jedoch aktiviert, lassen sich selbstständig Kosten eintragen, die bei der Auswertung berücksichtigt werden. Nach jeder Kategorie werden zudem die Gesamtkosten pro Periode für die Kategorie angezeigt. Weitere Kategorien sind Bezogene Leistungen, Finanzierung, Anschaffungskosten, Installationskosten, Optimierung, Betriebskosten, Kosten für Schäden und weitere Kostenfaktoren (s. Abbildung 35). Der Posten Weitere Kostenfaktoren kann komplett selbstständig definiert werden. Darunter könnten zum Beispiel Kosten für die Abstimmung Planung mit Lieferanten und Zulieferern fallen. Eine andere Möglichkeit wären staatlich subventionierte Zuschüsse. Diese würden dann als Einkommen mit einem negativen Vorzeichen in die

Kostenauflistung eingetragen werden und in die Berechnung mit einbezogen. Sowohl in diesem Blatt als auch in Kostenermittlung CPS sind negative Vorzeichen möglich.

Kosten		
		Kosten aktiviert für Phase
Personal		
Löhne und Gehälter	Ja	▼ 3
Schulungen (intern) während dem Betrieb	Ja	▼
Gesamtkosten Personal		
Bezogene Leistungen		
Beratungsleistungen	Ja	▼
Planungsgespräch durch Anbieter	Ja	▼
Ersatzleistungen für Ausfälle	Nein	▼
Schulungskosten (extern)	Ja	▼
Gesamtkosten Bezogene Leistungen		
Finanzierung		
Zinsen	Ja	▼
Tilgung	Ja	▼
Sonstige	Nein	▼
Gesamtkosten Finanzierung		
Anschaffungskosten		
Betriebsmittel	Ja	▼
Einrichtungen	Ja	▼
Hilfsstoffe	Nein	▼
Infrastruktur	Nein	▼
Ausstattung der Produkte	Ja	▼
Gesamtkosten Anschaffungskosten		
Installationskosten		
Physische Bestandteile	Ja	▼
Middleware auf Infrastruktur	Nein	▼
Software auf Infrastruktur	Ja	▼
Gesamt Installationskosten		
Optimierung		
Tuning der Betriebsabläufe	Ja	▼
Systemoptimierung	Nein	▼
Kosten für Betriebsausfall während Installation	Nein	▼
Gesamt zusätzliche Installationskosten		
Betriebskosten		
Instandhaltung geplant	Ja	▼
Instandhaltung ungeplant	Nein	▼
Ersatzteilkosten	Ja	▼
Ersatzteillagerhaltungskosten	Nein	▼
Energiekosten	Ja	▼
Versicherung	Nein	▼
Entsorgungskosten	Nein	▼
zusätzliche Personalkosten durch neue Schnittstellen	Nein	▼
zusätzliche Personalkosten durch CPS-Betreuung	Nein	▼
Kosten für Softwareupdates	Nein	▼
Kosten für Hardwareerneuerung	Nein	▼
Lizenzgebühren (Software)	Ja	▼
Systemerweiterung/Upgrading	Nein	▼
Kosten für unternehmensinterne Software	Nein	▼
Inspektionskosten	Ja	▼
Gesamt Betriebskosten		
Kosten für Schäden		
an Produkten & betrieblichen Einrichtungen	Ja	▼
Entsorgung	Nein	▼
Reklamationskosten	Nein	▼
Gesamtkosten für Schäden		
Weitere Kostenfaktoren		
Bitte Eintragen...	Ja	▼
	Nein	▼
	Nein	▼
	Nein	▼
	Nein	▼
Gesamtkosten für weitere Angaben		

Abbildung 35: Verschiedene Kostenfaktoren

Ganz unten stehen dann die Gesamtkosten, die das Unternehmen pro Periode trägt, sowie der diskontierte Barwert zu Periode 1 und die kumulierten Kosten. Mit dem Drücken der Taste *Weiter* gelangt man zum Blatt Kostenermittlung CPS.

Tabellenblatt Kostenermittlung CPS

Das Blatt Kostenermittlung CPS sieht genauso aus, wie das Blatt Kostenermittlung ohne CPS. Hier werden mit Hilfe des für die Einführung von CPS weiterentwickelten Life Cycle Costing ex ante Betrachtungen eingesetzt, um mittels Prognose und Schätzverfahren die Entscheidungssituation bewerten zu können. Es ist zu beachten, dass die Personalkosten im Durchschnitt über alle Phasen hinweg auf die verschiedenen Perioden abgetragen werden. Dies ist zwar nicht verursachungsgerecht, erwies sich jedoch als die praktikablere Lösung. Andernfalls hätten die Personalkosten erneut händisch eingetragen werden müssen. Zudem führt dies nur zu geringen Änderungen in der Diskontierung. Auch hier werden automatisch wieder alle Kostenkategorien übernommen, die vorher bereits eingetragen wurden. Das bedeutet, Personalkosten und die Kosten für die Finanzierung sind bereits eingetragen. Hat man auf dem Blatt Projekt und Personal das ausgefüllte Formular zur Angebotserstellung hochgeladen, sind weitere Kategorien bereits ausgefüllt: Bezogene Leistungen, Anschaffungskosten, Installationskosten und Betriebskosten. Wurde das Angebotsformular nicht ausgefüllt oder die Informationen in anderer Form übermittelt, lassen sich die Daten einfach händisch eintragen. Auch zusätzliche Kosten können sich leicht aktivieren und eintragen lassen. Ganz unten stehen wieder die Gesamtkosten, der diskontierte Barwert zu Periode 1 und die kumulierten Kosten. Wurden alle notwendigen Daten eingetragen, kann mit der Aktivierung des Aktionsknopfs *Weiter zur Auswertung* am Ende des Blattes, zur Auswertung gelangen.

Tabellenblatt Auswertung

Angezeigt werden die Lebenszykluskosten mit und ohne CPS und die Kosten in den einzelnen Phasen. Der Graph zeigt, ab welchem Zeitpunkt der Einsatz von CPS-Technologien in der Intralogistik weniger kostenintensiv ist im Vergleich zu der aktuellen Situation ohne Einsatz einer CPS-Technologie (s. Abbildung 36). In der Darstellung wird die Periode gelb unterlegt, in der die Kosten ohne CPS, die Kosten mit CPS übersteigen.

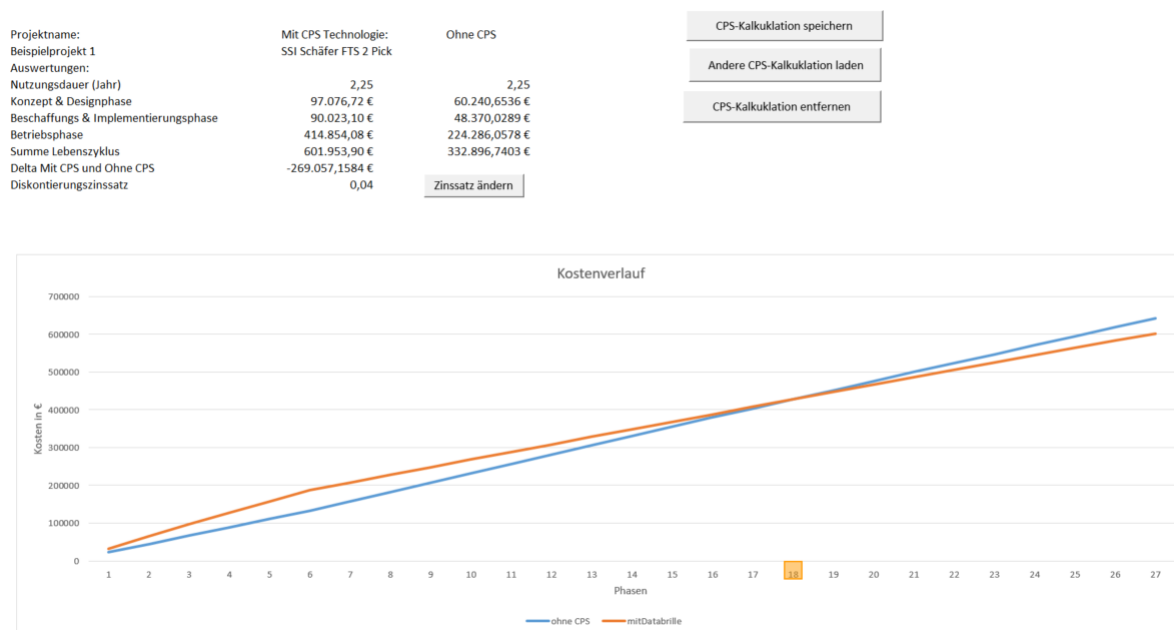


Abbildung 36: Auswertung

Der Diskontierungssatz kann auch in der Auswertung mit einem Klick auf *Zinssatz ändern* noch entsprechend angepasst werden. Der Kalkulationszinsfuß spiegelt die Erwartungen des Investors bezüglich der zu erzielenden Mindestverzinsung des einzusetzenden Kapitals wider. Dies ermöglicht eine Anpassung der Investitionsrechnung, ohne dass der gesamte Prozess erneut durchgeführt werden muss. Die Analyse zum Einsatz einer CPS-Technologie kann mit der Taste *CPS-Kalkulation speichern* gespeichert werden. Dazu wird das Tabellenblatt *Kostenermittlung CPS* gespeichert und archiviert. Zum Vergleich mit anderen Technologien kann mit *andere CPS-Kalkulation laden* auch eine vorherige Analyse hochgeladen werden. Mit *CPS-Kalkulation entfernen* kann die Analyse gelöscht werden. Auf einen Blick können so alle Kosten erfasst, und sogar mehrere Investitionen verglichen werden. Das Tool kann somit als einfache, übersichtliche Entscheidungshilfe genutzt werden.

4.6 AP 6: Projektmanagement und Transfer

Ziel von AP 6 war es, die Verbreitung der erzielten Projektergebnisse in Praxis und Wissenschaft sicherzustellen.

Tabelle 16: Inhalte von AP6

AP 6: Dokumentation, Projektmanagement und Transfer	
Einsatz	<ul style="list-style-type: none">• IPRI: 4 Personenmonate• IPA: 4 Personenmonate
Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none">• Organisierte Arbeitstreffen sowie verbreitete Ergebnisse in Praxis und Wissenschaft

Noch im Rahmen der Projektbeantragung wurde ein Transferplan für die Verbreitung der Ergebnisse erarbeitet. Dieser ist nochmals in Kapitel 7: Plan zum Ergebnistransfer ab Seite 120 des vorliegenden Abschlussberichts aufgeführt. Dabei sind ebenfalls die einzelnen Maßnahmen zur Verbreitung der erzielten Ergebnisse beschrieben (vgl. Tabelle 18 sowie Tabelle 19)

5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit sowie Verwendung der Zuwendung

Die Notwendigkeit der geleisteten Arbeit ergibt sich aus der identifizierten Forschungslücke. Industrie 4.0 lässt immense Performancesssteigerungen erwarten. Während große Unternehmen bereits vereinzelt Investitionen in CPS-Technologien in der Intra-logistik getätigt haben, ist eine Verbreitung bei KMU gering. KMU sind infolgedessen dem Risiko ausgesetzt, Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Konkurrenten sowie technologische Anschlussfähigkeit an Kunden und Zulieferer zu verlieren. Deshalb sind Investitionen in CPS-Technologien elementar. Dabei ist gerade für KMU eine Profitabilitätsbewertung zur Absicherung von Investitionsentscheidungen und Vermeidung existenzbedrohender Fehlinvestitionen bedeutend. Jedoch fehlt es an Methoden, die eine Profitabilitätsbewertung von CPS-Technologien ermöglichen. Solch eine Methode wurde im Rahmen des Forschungsprojekts Industrie 4.0 profitabel entwickelt. Hierfür wurde das Life Cycle Costing weiterentwickelt und eine Methode zur Quantifizierung von Performancesssteigerungen erarbeitet.

Die Angemessenheit der geleisteten Arbeit ergibt sich aus der Anwendung geeigneter wissenschaftlicher Methoden und der Zusammenarbeit mit Experten in der unternehmerischen Praxis in adäquater Weise. So wurden in den bisher bearbeiteten AP umfassende Literaturrecherchen, Inhaltsanalysen, tiefgreifende Experteninterviews und Workshops durchgeführt. Die Erkenntnisse wurden sukzessive in den aufeinander aufbauenden APs weiter verwertet und in wissenschaftlichen sowie praxisbezogenen Publikationen veröffentlicht.

Für die durchgeführten Recherchen und Untersuchungen wurden wissenschaftliche Mitarbeiter an jedem der beiden beteiligten Institute beschäftigt (vgl. Tabelle 17). Die wissenschaftlichen Mitarbeiter wurden durch studentische Hilfskräfte unterstützt.

Die geleistete Arbeit entspricht dem begutachteten sowie bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

Tabelle 17: Einsatz des wissenschaftlich-technischen Personals in Personenmonaten (PM)

Forschungs- stelle	Haushaltsjahr 2016	Haushaltsjahr 2017	Haushaltsjahr 2018	Haushaltsjahr 2019	Gesamt
IPRI	0,00 PM	10,09 PM	17,06 PM	5,08 PM	32,23 PM
IPA	0,75 PM	8,83 PM	13,21 PM	1,72 PM	24,51 PM
				Summe:	57,74 PM

6. Nutzen, Innovationsbeitrag und Anwendungsmöglichkeiten der erzielten Ergebnisse

6.1 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse

Die Erfolgsaussichten für eine zeitnahe Umsetzung der Ergebnisse nach Projektende in die unternehmerische Praxis sind als sehr hoch einzuschätzen, da die Ergebnisse praxisorientierte Lösungen liefern. Daher ist davon auszugehen, dass für Unternehmen großes Interesse besteht, die Forschungsergebnisse in der Praxis zu nutzen.

- Die Ergebnisse haben durch die Erprobung und Validierung bei Unternehmen des PA bereits erste Anwendung gefunden. Damit ist sichergestellt, dass die Ergebnisse praxisrelevant sind und unmittelbar umgesetzt werden können.
- Die Ergebnisse des Forschungsprojekts sind für alle Unternehmen zugänglich.
- Im Transferkonzept wurden Maßnahmen ergriffen, um die Ergebnisse zeitnah zu verbreiten und dem potentiellen Nutzerkreis zur Verfügung zu stellen. Durch die Transfermaßnahmen wurde eine Vielzahl an Unternehmen verschiedenster Branchen erreicht.
- Es müssen keine zusätzlichen finanziellen Mittel für die Umsetzung der Ergebnisse aufgebracht werden, da das entwickelte Verfahren direkt eingesetzt werden kann.
- Es kann eine unmittelbare Umsetzung der Forschungsergebnisse erreicht werden. Zusätzlich wird die Schulung mittels Seminare und Webinare durch die Forschungsinstitute angeboten.
- Zur Verbesserung der Möglichkeiten der industriellen Umsetzung wurden die Projektergebnisse in Form eines Softwaredemonstrators sowie eines Schulungsvideos zur unternehmerischen Nutzung angeboten.
- Für die Anwendung des Softwaredemonstrators sind von den Unternehmen keine besonderen technischen Voraussetzungen notwendig.

6.2 Innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten der erzielten Ergebnisse

Die Forschungsergebnisse befähigen KMU, Investitionen in CPS-Technologien zu bewerten. So können Unternehmen koordinierte Technologieinvestitionen transparent tätigen. Für KMU entsteht unmittelbarer und mittelbarer Nutzen aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens. Der innovative Beitrag der erzielten Ergebnisse geht mit den industriellen Anwendungsmöglichkeiten einher:

- Mithilfe des entwickelten Klassifizierungsschemas können KMU die für sie relevanten CPS-Technologien in der Intralogistik aufwandsarm identifizieren.
- Die analysierten Potentiale von CPS-Technologien sensibilisieren KMU zum ggf. erstmaligen Einsatz von CPS-Technologien innerhalb der Intralogistik.
- Durch das entwickelte Instrument zur qualitativen Nutzenbewertung von CPS-Technologien in der Intralogistik werden KMU befähigt, nur in solche Technologien zu investieren, die die unternehmenseigene Intralogistik hinsichtlich relevanter Parameter optimieren.
- Die Analyse und Kalkulation der durch den Einsatz von CPS-Technologien verursachten Kosten befähigt KMU, diese über den ganzen Einsatzzeitraum zu prognostizieren. Hierdurch werden sämtliche Kosten transparent gemacht. Dadurch können verzerrte Investitionsentscheidungen durch die reine Berücksichtigung der Anschaffungskosten vermieden werden (ex-ante-Kontrolle der Kosten statt ex-post-Kontrolle).
- Zur Sicherstellung einer angemessenen Kongruenz zwischen der Profitabilität und den Kosten der CPS-Technologie, können Unternehmen auf das entwickelte Verfahren zur Profitabilitätsbetrachtung von CPS-Technologien zurückgreifen.
- Durch die Optimierung der Investitionen in CPS-Technologien profitieren Unternehmen mittelbar durch die aus dem Einsatz der CPS-Technologie resultierende Performancesteigerung. Dies führt mittelbar zu einem höheren Gewinn.
- Durch den zunehmenden Einsatz von CPS-Technologien profitieren Unternehmen von einer höheren Transparenz der Produktionsprozesse.
- Investitionen in CPS-Technologien erhalten die technologische Anschlussfähigkeit an Kunden und Lieferanten. Dies trägt zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit bei.

- Potentiale aus CPS-Technologien, wie Flexibilität, verbessern auch die Kundenzufriedenheit. Dadurch kann die Wettbewerbsfähigkeit gesichert und gesteigert werden.
-

7. Plan zum Ergebnistransfer und Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzepts

Erste Schritte zum Ergebnistransfer sind während der Projektlaufzeit durchgeführt worden. Weitere Maßnahmen zur Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse sind im Anschluss an das Projekt vorgesehen. Über den Austausch zwischen den Forschungsstellen und den Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses sowie weiteren interessierten Unternehmen hat bereits ein erster Wissenstransfer stattgefunden. Dieser ist die Basis für die praktische Umsetzbarkeit der Ergebnisse. Die während des Berichtszeitraums durchgeführten Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft sind Tabelle 18 zu entnehmen. Die nach dem Berichtszeitraum geplanten Maßnahmen zum Ergebnistransfer sind in Tabelle 19 aufgeführt.

Tabelle 18: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Transfermaßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Umsetzung
Tag der offenen Tür im „Industrie 4.0-Anwendungszentrum“ des IPA	<ul style="list-style-type: none"> • Bekanntmachen der Ergebnisse aus AP 1 und Vorstellung der Anwendung aus-gewählter CPS-Technologien 	<ul style="list-style-type: none"> • Tag der offenen Tür am Fraunhofer IPA (Organisation durch IPA und IPRI) 	<ul style="list-style-type: none"> • Durchgeführt im Rahmen der PA-Sitzung am 06.04.17 in Stuttgart
Presse-/ Öffentlichkeitsarbeit	<ul style="list-style-type: none"> • Bekanntmachen des Projekts und der Ergebnisse 	<ul style="list-style-type: none"> • Pressemitteilungen über den IDW - Informationsdienst Wissenschaft 	<ul style="list-style-type: none"> • PM zum Projektstart veröffentlicht (02.02.17); • PM zum Projektende wird noch veröffentlicht (voraussichtlich Oktober 2019)
Vorstellung Projekt u. Ergebnisse in IPRI-Journal	<ul style="list-style-type: none"> • Bekanntmachen Projekt und Ergebnisse • Teilnahmeinformationen 	<ul style="list-style-type: none"> • IPRI-Journal 	<ul style="list-style-type: none"> • IPRI-Journal (Sommer-Ausgabe 2017, Nr. 24, S. 3; ISSN 1865-4762) • IPRI-Jahresbericht 2016 (S. 24-25) • IPRI-Jahresbericht 2018 (S. 28-29) • IPRI-Journal (Sommer-Ausgabe 2019,

Transfermaßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Umsetzung
			<p>Nr. 26, S. 10; ISSN 1865-4762)</p>
<p>Vorträge: Vorstellung des Projekts auf praxisorientierter Veranstaltung</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Bekanntmachen Projekt • Ansprache Unternehmen • Validierung Ergebnisse • Verbreitung Ergebnisse 	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie-Arbeitskreis „Industrie 4.0“ (durch IPRI organisiert); IPA-Fachtagungen; LOGIMAT; VDI-Seminar • 	<ul style="list-style-type: none"> • Vorstellung des Projekts bzw. von (Teil-) Ergebnissen und Ansprache von Unternehmen auf der LOGIMAT 2017 (am 15.03.17 in Stuttgart) • Vorstellung von Teilergebnissen auf dem öffentlichen Symposium des Arbeitskreises Industrie 4.0 (am 28.06.2017 in Ulm) • Vorstellung von Teilergebnissen auf dem öffentlichen Symposium des Arbeitskreises Industrie 4.0 (05.06.2018 in Ulm) • Vorstellung des Projekts und von Teilergebnissen auf dem VDI-Seminar Auftragsplanung und -steuerung für Produktionsunternehmen (12. Und 13. März 2019)
<p>Vorträge: Vorstellung auf wissenschaftlicher Veranstaltung</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Verbreitung u. Diskussion Ergebnisse • Beiträge zur Forschung 	<ul style="list-style-type: none"> • CIRP, Euroforum, VDI-Wissensforum 	<ul style="list-style-type: none"> • Vorstellung des Projekts im Rahmen einer Sitzung des Schmalenbach-Arbeitskreises "Integrationsmanagement für neue Produkte" (am 24.05.17 in Stuttgart) • Vorstellung des Projekts im Rahmen des „Serviceforums Region Stuttgart 2017“ (am 04.07.17 in Stuttgart) • Vorstellung des Projekts im Rahmen des „2. Koordinatorentreffen „Kompetenz Montage – kollaborativ und wandlungsfähig“ (KoKoMo)“ (am 25.04.2018 in Aachen)

Transfermaßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Umsetzung
			<ul style="list-style-type: none"> • Vorstellung des Projekts im Arbeitskreis Industrie 4.0 (am 12.07.2018 in Esslingen; am 21.07.2018 in Ulm; 19.03.2019 in Ulm)
Veröffentlichung Ergebnisse in wissenschaftlichen Medien	<ul style="list-style-type: none"> • Integration der Ergebnisse in den Status Quo der Forschung 	<ul style="list-style-type: none"> • Journal of Cost Management; Zeitschrift für Controlling 	<ul style="list-style-type: none"> • Beitrag „Was kostet ein Cyber-physisches System?“ in der IT & Production veröffentlicht (Ausgabe 10/2018);
Veröffentlichung Projektergebnisse mit Fokus auf die Praxis	<ul style="list-style-type: none"> • Verbreitung Ergebnisse • Integration Ergebnisse in die Unternehmenspraxis 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitschrift f. wirtschaftlichen Fabrikbetrieb; Controller Magazin; wt-online; IPRI-Praxis-Paper 	<ul style="list-style-type: none"> • Beitrag „Cyber-Physische Systeme in der Intralogistik“ in der ZWF veröffentlicht (Ausgabe 05/2018);
Veröffentlichung Projektergebnisse mit Fokus auf die Praxis	<ul style="list-style-type: none"> • Verbreitung Ergebnisse • Integration Ergebnisse in die Unternehmenspraxis 	<ul style="list-style-type: none"> • APMS 2019 Conference, Austin Texas 	<ul style="list-style-type: none"> • Beitrag: Self-Assessment of Industry 4.0 Technologies in Intralogistics for SME's
Schulungsfilm zur Anwendung des Demonstrators	<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützung Umsetzung • Verbreitung Ergebnisse 	<ul style="list-style-type: none"> • Durchführung durch IPRI 	<ul style="list-style-type: none"> • Schulungsfilm auf der Projekt-Homepage: http://www.ipri-institute.com/industrie40profitabel/
Präsenz im Internet	<ul style="list-style-type: none"> • Bekanntmachen der Ergebnisse und Termine 	<ul style="list-style-type: none"> • Projekt-Webseite; IPRI- und IPA Webseite; Projekt-Blog 	<ul style="list-style-type: none"> • IPRI-Homepage: http://www.ipri-institute.com/laufendeprojekte/; • Projekt-Homepage: http://www.ipri-institute.com/industrie40profitabel/; • Projektblog: http://neues-aus-der-forschung.de/?p=455) Webseiten wurden fortlaufend aktualisiert
Integration in die universitäre Lehre	<ul style="list-style-type: none"> • Integration in die wissenschaftliche Diskussion 	<ul style="list-style-type: none"> • Universität Stuttgart • Studienarbeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Studienarbeit zu AP1 am IPA durchgeführt

Transfermaßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Umsetzung
			(Thema: Intralogistikprozess)
Integration in die universitäre Lehre	<ul style="list-style-type: none"> • Integration in die wissenschaftliche Diskussion 	<ul style="list-style-type: none"> • Universität Stuttgart • Bachelorarbeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Bachelorarbeit am IPA durchgeführt (Thema: Entwicklung eines Kurz-Check für die Intralogistik)
Integration in die universitäre Lehre	<ul style="list-style-type: none"> • Integration in die wissenschaftliche Diskussion 	<ul style="list-style-type: none"> • Universität Stuttgart • Studienarbeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Studienarbeit zu AP2 am IPA durchgeführt (Thema: Bewertung von CPS-Technologien in der Intralogistik)

Tabelle 19: Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Transfermaßnahme	Ziel	Ort / Rahmen
Integration Ergebnisse in universitäre Lehre	<ul style="list-style-type: none"> • Verbreitung Ergebnisse • Integration in die wissenschaftliche Diskussion 	Seminarreihe Methoden u. Anwendungen der Profitabilitätsbewertung von CPS
Vorstellung der Ergebnisse im „Industrie 4.0-Anwendungszentrum“ IPA	<ul style="list-style-type: none"> • Verbreitung Ergebnisse • Weiterentwicklung Ergebnisse • Übertragung Ergebnisse 	Vorstellung der Ergebnisse im Industrie 4.0-Anwendungszentrum“ des Fraunhofer IPA IPRI Praxispaper Ende 2019
Veröffentlichung der Projektergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Verbreitung der Ergebnisse 	z.B. Buch-Beitrag Profitabilitätsbewertung von CPS in der Buchreihe Controlling-Berater
Webinare, Seminare	<ul style="list-style-type: none"> • Verbreitung Ergebnisse • Unterstützung der Umsetzung in der Praxis 	Konzeption durch die Forschungsstellen; Durchführung bei Unternehmen: https://www.ipri-institute.com/veranstaltungen
Vorstellung der Ergebnisse in einem IPRI-Fachworkshop	<ul style="list-style-type: none"> • Verbreitung Ergebnisse • Unterstützung der Umsetzung in der Praxis 	Vor Ort bei den jeweiligen Unternehmen
Vorträge: Vorstellung des Projekts auf praxisorientierter Veranstaltung	<ul style="list-style-type: none"> • Verbreitung der Ergebnisse 	Vorstellung der Ergebnisse im Management Circle Seminar Produktion mit SAP (24. Und 25.07.2019 in München)

8. Forschungsstellen

1. Forschungsstelle 1: IPRI – International Performance Research Institute gGmbH

Die IPRI – International Performance Research Institute gemeinnützige GmbH wurde mit der Zielsetzung gegründet, Forschung auf dem Gebiet des Performance Managements von Organisationen, Unternehmen und Unternehmensnetzwerken zu betreiben.

Unter der Leitung von Prof. Dr. Mischa Seiter untersucht IPRI in Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen und kleinen und mittleren Unternehmen die Wirkungszusammenhänge und Potenziale in den Bereichen Controlling, Finanzen, Logistik und Produktion.

Forschungsschwerpunkt des Gründers Prof. Horváth ist die Erarbeitung neuer Methoden im Bereich des Controllings und der Transfer dieser Ergebnisse in die Praxis. Die Forschungsstelle arbeitet eng mit der Bundesvereinigung Logistik e. V., dem VDMA und Unterverbänden (Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., Forschungsvereinigung Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik e. V.) sowie der IHK zusammen. Zudem wird der Kontakt zu Experten aus der Praxis über regelmäßige Veranstaltungen und Workshops hergestellt.

Tabelle 20: IPRI – International Performance Research Institute gemeinnützige GmbH

Forschungsstelle	IPRI – International Performance Research Institute gemeinnützige GmbH
Anschrift	Königstraße 5, 70173 Stuttgart
Leitung der Forschungsstelle	Prof. Dr. Mischa Seiter
Kontakt	Tel.: 0711 - 620 32 68 - 0, www.ipri-institute.com

2. Forschungsstelle 2: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)

Das Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA mit Sitz in Stuttgart ist eines der größten der 72 über Deutschland verteilten Institute und Forschungseinrichtungen der Fraunhofer Gesellschaft. Mit mehr als 500 Beschäftigten im wissenschaftlichen Bereich erzielte das Fraunhofer IPA in 2018 einen Betriebshaushalt von 63 Mio. €. Als Bestandteil des Fraunhofer Netzwerks betreibt das

Fraunhofer IPA anwendungsorientierte Forschung zum direkten Nutzen für Unternehmen und zum Vorteil der Gesellschaft. Organisatorische und technologische Aufgabenstellungen aus dem Produktionsbereich von Industrieunternehmen bilden die Schwerpunkte der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Die effiziente Nutzung von Ressourcen wird immer mehr in den Fokus produzierender Unternehmen gerückt und ist damit fester Bestandteil der gestellten Herausforderungen in Projekten sowohl in der Forschung als auch in der Industrie. Die Erfahrung des Fraunhofer IPA aus zahlreichen Projekten ist eine gute Erfahrungsgrundlage auch für das vorliegende Forschungsvorhaben.

Tabelle 21: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)

Forschungsstelle	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)
Anschrift	Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Leitung der Forschungsstelle	Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Kontakt	0711- 970 - 1800

9. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 19183 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.

Für die Förderung sei an dieser Stelle gedankt.



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



10. Quellenverzeichnis

- Abele, E., Dervisopoulos, M. und Kuhrke, B. (2009), Bedeutung und Anwendung von Lebenszyklusanalysen bei Werkzeugmaschinen, in: Schweiger (Hrsg., 2009), S. 52–79.
- acatech (Hrsg., 2011), *Cyber-Physical Systems, Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion*, Berlin, Heidelberg, 2011.
- Albrecht, V. und Wetzel, P. (2009), M-TCO—Daimler AG, in: Schweiger (Hrsg., 2009), S. 81–95.
- Arnold, D. (2006), *Intralogistik, Potentiale, Perspektiven, Prognosen*, 2006.
- Arnold, D., Furmans, K., Isermann, H., Kuhn, A. und Tempelmeier, H. (2008), *Handbuch Logistik*, 2008.
- Asiedu, Y. und Gu, P. (1998), Product life cycle cost analysis, State of the art review, in: *International journal of production research* 36, 1998, 4, S. 883–908.
- Ballmer, T. T. und Brennenstuhl, W. (1986), *Deutsche Verben, Eine sprachanalytische Untersuchung des deutschen Verbwortschatzes*, Tübingen, 1986.
- Bauernhansl, T., ten Hompel, M. und Vogel-Heuser, B. (Hrsg., 2014), *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden, 2014.
- Bauernhansl, T., ten Hompel, M. und Vogel-Heuser, B. (Hrsg., 2014), *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden, 2014.
- bayme vbm (2014), *Industrie 4.0 und CPS - Bedarfe und Lösungen aus Sicht des Mittelstandes*. Unter Mitarbeit von Bertram Brossardt, www.baymevbm.de/cps.
- Bea, F. X. und Haas, J. (2017), *Strategisches Management*, Stuttgart, 2017.
- Bengtsson, M. und Kurdve, M. (2016), Machining equipment life cycle costing model with dynamic maintenance cost, in: *Procedia CIRP* 48, 2016, S. 102–107.
- Bettenhausen, K. D. und Kowalewski, S. (2013), Cyber-physical systems, Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation, in: *VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik*, 2013, S. 9–10.
- Bichler, K., Krohn, R., Riedel, G. und Schöppach, F. (Hrsg., 2010), *Beschaffungs- und Lagerwirtschaft*, Wiesbaden, 2010.
- Bichler, K., Krohn, R., Riedel, G. und Schöppach, F. (2010), Kommissionierung, in: Bichler, Krohn, Riedel, Schöppach (Hrsg., 2010), S. 209–223.
- BITKOM (2014), *Industrie 4.0 - Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland, Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland*. Hg. v. BITKOM und Fraunhofer IAO, Berlin.
- Braun, T. (2008), *Investition und Finanzierung, Konzeptionelle Grundlagen für eine entscheidungsorientierte Ausbildung*, 2008.
- Bunduchi, R. und Smart, A. U. (2010), Process Innovation Costs in Supply Networks, A Synthesis, in: *International Journal of Management Reviews* 12, 2010, 4, S. 365–383.
- Bunduchi, R., Weisshaar, C. und Smart, A. U. (2011a), Mapping the benefits and costs associated with process innovation, The case of RFID adoption, in: *Technovation* 31, 2011, 9, S. 505–521.
- Bunduchi, R., Weisshaar, C. und Smart, A. U. (2011b), Mapping the benefits and costs associated with process innovation, The case of RFID adoption, in: *Technovation* 31, 2011, 9, S. 505–521.
- Bünting, F. (2009a), Lebenszykluskostenbetrachtungen bei Investitionsgütern, in: Schweiger (Hrsg., 2009), S. 36–50.
- Bünting, F. (2009b), Lebenszykluskostenbetrachtungen bei Investitionsgütern, in: Schweiger (Hrsg., 2009), S. 35–50.
- Burkert, F. und Dreizner, K. (2011), Referenzmodell Lebenszykluskosten, Erarbeitung eines Referenzmodells zum Vergleich von energieeffizienten Investitionsprojekten mit nicht oder minder energieeffizienten Investitionsprojekten einschließlich eines korrespondierenden Berechnungstools.
- Carpentieri, M. und Papariello, M. (2006), A life cycle cost framework for automotive production lines, in: *Proceedings of LCE2006*, 2006.
- da Cruz, M. A. A., Rodrigues, J. J. P., Al-Muhtadi, J., Korotaev, V. V. und Albuquerque, V. H. C. de (2018), A Reference Model for Internet of Things Middleware, in: *IEEE Internet of Things Journal* 5, 2018, 2, S. 871–883.
- Das Internet der Dinge (2005): Springer.
- Dreier, J. und Wehking, K.-H. (2016), Lebenszykluskosten von elektrischen Antriebssystemen, in: *Logistics Journal: Proceedings* 2016, 2016, 05.
- Enparantza, R., Revilla, O., Azkarate, A. und Zendoia, J. (2006), A life cycle cost calculation and management system for machine tools.
- Feinbier, L., Schittko, L. und Gallais, G. (2008), The benefits of RFID for slab-and coil-logistics, in: Retrieved November 16, 2008, S. 2009.
- Fraunhofer IIS (2014), *CYBER-PHYSICAL SYSTEMS@FRAUNHOFER IIS*. Unter Mitarbeit von K. Brohasga.
- Fraunhofer IML (2015), *LOGISTIK entdecken, Topthema: CYBER-PHYSICAL SYSTEMS*.

- Garfinkel, S. L., Juels, A. und Pappu, R. (2005), RFID privacy, An overview of problems and proposed solutions, in: *IEEE Security & Privacy* 3, 2005, 3, S. 34–43.
- Geisberger, E. und Broy, M. (2012), *agendaCPS, Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems*, 2012.
- Götze, U. (2004), *Kostenrechnung und Kostenmanagement*, Berlin/Heidelberg, 2004.
- Gross, S. und Thiesse, F. (2005), RFID-Systemeinführung—Ein Leitfaden für Projektleiter, in: (2005), S. 303–313.
- Großklaus, R. H. G. (2008), *Neue Produkte einführen*, in: *Von der Idee zum Markterfolg*, Wiesbaden, 2008.
- Gudehus, T. (2010), *Logistik, Grundlagen - Strategien - Anwendungen*, 4. Aufl., Berlin, Heidelberg, 2010.
- Günther, E. (Hrsg., 2009), *Dresdner Beiträge zur Lehre der Betrieblichen Umweltökonomie*, 2009.
- Günthner, W., Klenk, E. und Tenerowicz-Wirth, P. (2014), Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0, in: *Bauernhansl, ten Hompel, Vogel-Heuser (Hrsg., 2014)*, S. 297–323.
- Günthner, W., Klenk, E. und Tenerowicz-Wirth, P. (2017), Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0, in: *Vogel-Heuser, Bauernhansl, Hompel (Hrsg., 2017)*, S. 99–125.
- Harik, R., Rivest, L., Bernard, A., Eynard, B. und Bouras, A. (Hrsg., 2017), *Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries*, 13th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2016, Columbia, SC, USA, July 11-13, 2016, Revised Selected Papers, 2017.
- Heidenblut, V. und ten Hompel, M. (2011), *Taschenlexikon Logistik*, in: *Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik*, Berlin/Heidelberg, 2011.
- Heinzelman, W. B., Murphy, A. L., Carvalho, H. S. und Perillo, M. A. (2004), Middleware to support sensor network applications, in: *IEEE network* 18, 2004, 1, S. 6–14.
- Helbig, T., Hoos, J. und Westkämper, E. (2014), A method for estimating and evaluating life cycle costs of decentralized component-based automation solutions, in: *Procedia CIRP* 17, 2014, S. 332–337.
- Herrmann, C., Kara, S. und Thiede, S. (2011), Dynamic life cycle costing based on lifetime prediction, in: *International Journal of Sustainable Engineering* 4, 2011, 3, S. 224–235.
- Höhne, C. (2009), *Life Cycle Costing-Systematisierung bestehender Studien*, in: *Günther (Hrsg., 2009)*.
- Hompel, M. ten, Schmidt, T. und Nagel, L. (2007), *Materialflusssysteme, Förder- und Lagertechnik*, 3., völlig neu bearbeitete Auflage, Berlin, Heidelberg, 2007.
- Horváth, P. (2011), *Controlling*, 12., vollst. überarb. Aufl., München, 2011.
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A. und Wahlster, W. (2013), *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern; Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*, Berlin, 2013.
- Kaufmann, T. (2015), *Geschäftsmodelle in Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge, Der Weg vom Anspruch in die Wirklichkeit*, Wiesbaden, 2015.
- Köllner, T., Wieser, R. und Striefler, M. (2009), Betrachtungen zu Life-Cycle-Costing bei Werkzeugmaschinen aus der Sicht eines Automobilzulieferers, in: *Schweiger (Hrsg., 2009)*, S. 97–116.
- Krüger, J. und Lambrecht, J. (2014), *Industrie 4.0, "Chancen der vierten Industriellen Revolution"*, in: *Krüger, Parthey, Wink (Hrsg., 2014)*, S. 9–29.
- Krüger, J., Parthey, H. und Wink, R. (Hrsg., 2014), *Wissensforschung und Innovation: Wissenschaftsforschung Jahrbuch 2014*, Berlin, 2014.
- Langdon, D. (2005), *Literature review of life cycle costing (LCC) and life cycle assessment (LCA)*, in: *Resource document. Davis Langdon Management Consulting. http://www.tmb.org.tr/arastirma_yayinlar/LCC_Literature_Review_Report.pdf, 2005.*
- Martin, H. (2016), *Transport- und Lagerlogistik*, Wiesbaden, 2016.
- Mattes, K. und Schröter, M. (2011), *Wirtschaftlichkeitsbewertung, Bewertung der wirtschaftlichen Potenziale von energieeffizienten Anlagen und Maschinen: Kurzstudie; Effizienzfabrik, Innovationsplattform Ressourceneffizienz in der Produktion*, 2011.
- Mauchle, P. und Ritz, C. (2007), *Beschaffung von Motoren unter der Vollkostenbetrachtung*, Schnyder Ingenieure AG.
- Ozdemir, A. und Bayrak, M. (2015), Assessment of RFID Investment in the Military Logistics Systems Through The Life Cycle Cost (LCC) Model, in: *Journal of Military and Information Science* 3, 2015, 4, S. 88–102.
- Pflaum, A., Hohmann, C., Hoffmann, B., Boppert, J. und Klötzer, C. (2014), *Industrie 4.0 und CPS - Bedarfe und Lösungen aus Sicht des Mittelstands, Kurzstudie*, bayme vbm, https://www.baymevbm.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Regionen-und-Marketing/2016/Downloads/Kurzstudie_CPS_20141007.pdf.
- Pfohl, H.-C. (2010), *Logistiksysteme, Betriebswirtschaftliche Grundlagen*, 8., neu bearb. und aktualisierte Aufl., Berlin, 2010.

- Preisig, H. R. und Kasser, U. (2005), Lebenszykluskosten-Nutzen oft teurer als Bauen, in: Gruppe der Schweizerischen Bauindustrie (SBI)(Hrsg.) Jahresbericht 2005, 2005.
- Rechl, F. und Günthner, W. (Hrsg., 2016) (2016), Identification of significant life-cycle costs of intralogistics systems as a basis for investment decisions. Proceedings of the 5th P&OM World Conference.
- Rechl, F., Krebs, K. und Günthner, W. (2017), Model of Monetisation of the Non-availability of Intralogistics Systems for the Evaluation of System Design Alternatives, in: Harik, Rivest, Bernard, Eynard, Bouras (Hrsg., 2017).
- Riezler, S. (1996), Lebenszyklusrechnung, Wiesbaden, 1996.
- Rügge, I. (2008), Mobile IKT-Lösungen im Spannungsfeld übergeordneter Leitkonzepte und Interaktionsgestaltungsparadigmen, in: Rügge (Hrsg., 2008), S. 13–39.
- Rügge, I. (Hrsg., 2008), Mobile Solutions, Wiesbaden, 2008.
- Schmidt, W., Fleischmann, A. und Gilbert, O. T. (2009), Subjektorientiertes Geschäftsprozessmanagement, in: HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik 46, 2009, 2, S. 52–62.
- Schweiger, S. (Hrsg., 2009), Lebenszykluskosten optimieren, 2009.
- Schweiger, S. (Hrsg., 2009), Lebenszykluskosten optimieren, 2009.
- Schweitzer, M., Küpper, H.-U., Friedl, G., Hofmann, C. und Pedell, B. (2016), Systeme der Kosten- und Erlösrechnung, 2016.
- Seeck, S. (2010), Erfolgsfaktor Logistik, 2010.
- Sherif, Y. S. und Kolarik, W. J. (1981), Life cycle costing, Concept and practice, in: Omega 9, 1981, 3, S. 287–296.
- ten Hompel, M., Sadowsky, V. und Beck, M. (2011), Kommissionierung, Berlin, Heidelberg, 2011.
- Thalheim, B. und Nissen, I. (2015), Wissenschaft und Kunst der Modellierung, Kieler Zugang zur Definition, Nutzung und Zukunft, Berlin/Boston, 2015.
- Thoben, K.-D., Wiesner, S. und Wuest, T. (2017), Industrie 4.0" and smart manufacturing—a review of research issues and application examples, in: Int. J. Autom. Technol 11, 2017, 1.
- Trenkle, A. und Furmans, K. (2017), Der Mensch als Teil von Industrie 4.0, Interaktionsmechanismen bei autonomen Materialflusssystemen, in: Vogel-Heuser, Bauernhansl, ten Hompel (Hrsg., 2017), S. 45–59.
- Trommsdorff, V. und Steinhoff, F. (2013), Innovationsmarketing, 2013.
- Uckelmann, D. (2012), Performance Measurement and Cost Benefit Analysis for RFID and Internet of Things Implementations in Logistics, in: Uckelmann (Hrsg., 2012), S. 71–100.
- Uckelmann, D. (Hrsg., 2012), Quantifying the Value of RFID and the EPCglobal Architecture Framework in Logistics, Berlin, Heidelberg, 2012.
- Uckelmann, D., Harrison, M. und Michahelles, F. (Hrsg., 2011), Architecting the Internet of Things, Berlin, Heidelberg, 2011.
- Uckelmann, D. und Scholz-Reiter, B. (2011), Integrated Billing Solutions in the Internet of Things, in: Uckelmann, Harrison, Michahelles (Hrsg., 2011), S. 229–251.
- Uhl, H. (2002), Mehrdimensionale Optimierung der lifecycle costs von komplexen (Industrie-) Anlagen und Systemen unter Beachtung von Wissensmanagement-Ansätzen, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften 2002.
- Ullrich, G. (2014), Die ganzheitliche FTS-Planung, in: Ullrich (Hrsg., 2014), S. 209–240.
- Ullrich, G. (Hrsg., 2014), Fahrerlose Transportsysteme, Wiesbaden, 2014.
- van Randen, H. J., Bercker, C. und Fieml, J. (2016), Einführung in UML, Analyse und Entwurf von Software, Wiesbaden, 2016.
- VDI 2884 (2005), Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC): VDI Verlag, Düsseldorf.
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2010), VDV-Mitteilung 2315–Life Cycle Cost (LCC) bei Linienbussen–Bewertungskriterien bei Ausschreibungen, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, <http://www.beka-verlag.de/vdv-mitteilung-2315-print-version-life-cycle-costs-lcc-bei-linienbussen-bewertungskriterien-bei-ausschreibungen.html>.
- Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, T. und Hompel, M. ten (Hrsg., 2017), Handbuch Industrie 4.0 Bd.4, Berlin, Heidelberg, 2017.
- Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, T. und ten Hompel, M. (Hrsg., 2017), Handbuch Industrie 4.0 Bd.3, Berlin, Heidelberg, 2017.
- Wannenwetsch, H. (2014), Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung, 2014.
- Wöfle, M. und Günthner, W. A. (2011), Papierlose Produktion und Logistik, 2011.
- Woodward, D. G. (1997), Life cycle costing--theory, information acquisition and application, in: International journal of project management 15, 1997, 6, S. 335–344.
- Zehbold, C. (1996), Lebenszykluskostenrechnung, Wiesbaden, 1996.
- Zwicker, C., Hammerstingl, V., Possin, C. und Reinhart, G. (2016), Life Cycle Cost Estimation of Robot Systems in an Early Production Planning Phase, in: Procedia CIRP 44, 2016, S. 322–327.

Literaturverzeichnis

- Abel, Jörg; Decius, Julia; Güth, Sandra; Schaper, Niclas (2016): Kompetenzentwicklung bei Un- und Angelernten in nicht-forschungs-intensiven KMU. Status Quo und Zukunft einer strategischen Notwendigkeit. In: *Betriebspraxis und Arbeitsforschung* 22, S. 41–50.
- Bankenverband; BDI: Positionspapier des Bankenverbands und des Bundesverbands der Deutschen Industrie zur Finanzierung von Industrie 4.0.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hg.) (2008): Intelligente Logistiknetze mit RFID. Praxisnahe Informationen für Hersteller, Anwender und Dienstleister (1).
- Geyer, Gunnar; Uriep, Amrisha (2012): Strategien der Internationalisierung von KMU. In: *HWWI Policy Paper* 65.
- Horváth, Péter; Gleich, Ronald; Seiter, Mischa (2015): Controlling. 13., komplett überarb. Aufl.
- PROZEUS (2008): Projekt Schnell, sicher, kundenorientiert: RFID-gesteuerte Lager-Logistik. eBusiness-Praxis für den Mittelstand zusammen mit der Heinrich Schreier Spedition.
- Staiger, Mark (2008): Wissensmanagement in kleinen und mittelständischen Unternehmen. Systematische Gestaltung einer wissensorientierten Organisationsstruktur- und Kultur. München, Mering: Rainer Hampp Verlag.
- Verworn, Birgit; Lüthje, Christian; Herstatt, Cornelius (2000): Innovationsmanagement in kleinen und mittleren Unternehmen (7). In: *Working Paper*.
- Zimmermann, Volker; Thomä, Jörg (2016): Innovationshemmnisse in KMU. Vielfältige Hemmnisse sprechen für eine breit aufgestellte Förderpolitik. In: *KfW Research Fokus Volkswirtschaft* 130.