



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Fariborz Baghdadi

Optimierung der Produktionsprozesse mittels KI in Industrie 5.0

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Fariborz Baghdadi

**Optimierung der Produktionsprozesse
mittels KI in Industrie 5.0**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Mechatronik
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr. Christian Müller
Zweitprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Benedikt Plaumann

Abgabedatum: 20.09.2023

Zusammenfassung

Fariborz Baghdadi

Thema der Bachelorthesis

Optimierung der Produktionsprozesse mittels KI in Industrie 5.0

Stichworte

Künstliche Intelligenz, Industrie 5.0, Produktion, Reifegradmodelle, Mensch-Technik-Organisation

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit untersucht, wie künstliche Intelligenz (KI) in der Industrie 5.0 zur Optimierung von Produktionsprozessen eingesetzt werden kann. Industrie 5.0 baut auf der Industrie 4.0 auf, fokussiert jedoch ethische, nachhaltige, resilienzorienteerte und menschenzentrierte Ansätze. Des Weiteren zeigt sich eine rasante Entwicklung der KI, die zu einem vermehrten Einsatz in allen Bereichen der Wertschöpfungskette führt. Der methodische Ansatz ist die praktische Durchführung eines zuvor systematisch ausgewählten Reifegradmodells. Die Ergebnisse zeigen auf, dass für die erfolg-reiche Anwendung von Reifegradmodellen in Bezug auf Industrie 5.0 nachhaltige und resilienzbezogene Dimensionen aufgenommen werden müssen.

Fariborz Baghdadi

Title of the paper

Optimization of Production Processes through AI in Industry 5.0

Keywords

Artificial Intelligence, Industry 5.0, Production, Maturity Models, Human-Technology-Organization

Abstract

This study explores the potential application of artificial intelligence (AI) in optimiz-ing production processes within the context of Industry 5.0. Building upon the foundations of Industry 4.0, Industry 5.0 places emphasis on ethical, sustainable, resilience-oriented, and human-centric approaches. Furthermore, the rapid evolution of AI is driving its increased integration across all stages of the value chain in manufacturing. The methodological approach involves the practical implementation of a systematically chosen maturity model. The findings underscore the importance of incorporating sustainable and resilienacerelated dimensions for the successful application of maturity models in the context of Industry 5.0.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund und Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Forschungsfragen.....	2
1.3	Struktur der Arbeit	3
2	Grundlagen	4
2.1	Entwicklung der Industrie 5.0	4
2.2	Künstliche Intelligenz	7
2.2.1	Geschichte und Entwicklung	7
2.2.2	Definition der KI	11
2.2.3	KI-Ebenen und Methoden	12
2.3	Reifegradmodelle	16
3	KI in Industrie 5.0	20
3.1	Instandhaltung	21
3.2	Logistik.....	21
3.3	Qualitätskontrolle	22
3.4	Digitale Assistenzsysteme	22
3.5	Produktionssteuerung.....	23

3.6	Robotik	24
4	Diskussion	25
4.1	Definition von Industrie 5.0 und Unterschiede zu Industrie 4.0.....	25
4.2	Auswahl des Reifegradmodells	30
4.3	Vorstellung und Durchführung des ausgewählten Reifegradmodells	34
4.4	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse	38
4.4.1	Reifegrad und strategische Optionen von IPT	38
4.4.2	Bewertung des Reifegradmodells	43
4.5	Limitation der Arbeit	44
5	Fazit	46
6	Ausblick.....	47
7	Literaturverzeichnis	48
8	Anhang.....	I

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Entwicklung der industriellen Revolutionen.....	5
Abbildung 2 Meilensteine der KI.....	10
Abbildung 3 Lernmethoden vom "Machine Learning" [8].....	13
Abbildung 4 Aufbau des Industrie 4.0 Maturity Index von Acatech [36].....	16
Abbildung 5 Ebenen des InAsPro-Modells [42].....	18
Abbildung 6 Relevante Aspekte der Industrie 5.0	25
Abbildung 7 Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Industrie 4.0 und Industrie 5.0 in Anlehnung an [61].....	29
Abbildung 8 Übersicht Ergebnis vom Vergleich der Reifegradmodelle	33
Abbildung 9 SWOT-Analyse des IPT	35
Abbildung 10 Bewertung der strategischen Optionen nach Aufwand und Nutzen	36
Abbildung 11 Gewichtsstrukturmatrix der strategischen Optionen nach MTO	36
Abbildung 12 Gesamtergebnis des Digitalisierungsgrades von IPT der Dimensionsebenen	38
Abbildung 13 Darstellung der Teilergebnisse der Produktlebenszyklusphasen	39
Abbildung 14 Ist-Zustand Darstellung der PLZ-Phase Entwicklung.....	39
Abbildung 15 Ist-Zustand Darstellung der PLZ-Phase Fertigung.....	40
Abbildung 16 Ist-Zustand Darstellung der PLZ-Phase Montage	41
Abbildung 17 Ist-Zustand Darstellung der PLZ-Phase Aftersales	42
Abbildung 18 Ergebnis des Vergleichs der strategischen Optionen	42
Abbildung 19 Ebenen der Künstlichen Intelligenz [8]	I
Abbildung 20 Vergleichsmatrix der Reifegradmodelle	II
Abbildung 21 Reifegradmodelle.....	III

Glossar

CNN

Convolutional Neural Networks

DL

Deep Learning

GAN

Generativ Adversarial Networks

IoT

Internet of Things

KI

Künstliche Intelligenz

ML

Machine Learning

PLZ

Produktlebenszyklus

RM

Reifegradmodell

RNN

Recurrente Neuronale Netze

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Die industrielle Revolution hat im Laufe der Zeit verschiedene Phasen durchlaufen, von der Mechanisierung im 18. Jahrhundert über die Elektrifizierung und Automatisierung bis hin zur jüngsten Phase der Digitalisierung und Vernetzung von Maschinen. Diese Entwicklungen betonen die ansteigende Relevanz von Technologien wie der künstlichen Intelligenz (KI). Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Integration von KI in den Produktlebenszyklus (PLZ) und die damit in Verbindung stehenden Fragen bezüglich der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit. Es ist wichtig zu verstehen, dass die *Industrie 5.0* nicht nur eine technologische Revolution ist, sondern auch soziale und kulturelle Veränderungen mit sich bringt. KI spielt in der *Industrie 5.0* eine zunehmende Rolle, und weist durch die Möglichkeit einer Effizienzsteigerung durch die Optimierung von Automatisierungs- und Produktionsprozessen großes Potential auf [1]. Komplexe Produktionsabläufe können durch KI aus verschiedenen Blickwinkeln analysiert und durch Mustererkennung optimiert werden. Zusätzlich können Prognosen erstellt und Entscheidungen getroffen werden. Das alles kann signifikant dazu beitragen, die Produktqualität zu verbessern, Produktionskosten sowie Energieverbrauch zu senken und Lieferzeiten zu verkürzen. Darüber hinaus kann KI dazu beitragen, Arbeitsbedingungen für Mitarbeiter:innen zu verbessern, indem gefährliche oder monotone Aufgaben übernommen werden und den Mitarbeitenden so die Bearbeitung höherwertiger Aufgaben ermöglicht wird. KI wird bereits in den Bereichen Fertigung und Logistik eingesetzt und ermöglicht beispielsweise die visuelle Qualitätskontrolle von Smartphones, die früher durch Menschen durchgeführt wurde. Diese Entwicklungen unterstreichen die Relevanz von KI in der Industrie [2].

Eine Herausforderung besteht jedoch darin, den richtigen Umgang mit Automatisierung durch KI einerseits und menschlicher Kontrolle und Entscheidungsfindung andererseits zu finden. Es ist wichtig, dass Menschen weiterhin eine zentrale Rolle in den Produktionsprozessen spielen und KI nicht als Ersatz für den Menschen, sondern lediglich als Werkzeug dient, um ihre Arbeit zu unterstützen.

Um die Implementierung derartiger Technologien effizient und nachhaltig durchführen zu können, werden zunächst mehr Informationen über die damit einhergehenden Chancen, Herausforderungen und Risiken benötigt. Eine genauere Betrachtung dieser Thematik, wie sie im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen wird, kann bei der Sammlung und Einordnung derartiger Informationen helfen. Dadurch soll durch eine Untersuchung des Einsatzes von KI in Produktionsprozessen ein Beitrag zur Lösung bestehender Herausforderungen geleistet werden, um sowohl die Effizienz als auch die Arbeitsbedingungen zu verbessern. Es wird

erwartet, dass die Ergebnisse dieser Arbeit dazu beitragen werden, das Verständnis für die Rolle der KI in der *Industrie 5.0* zu vertiefen und praktische Anleitungen für ihre erfolgreiche Implementierung zu liefern.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht darin, den Einfluss von KI im Kontext von *Industrie 5.0* zu erforschen. Die zentrale Forschungsfrage lautet: "Wie können Produktionsprozesse in der *Industrie 5.0* mithilfe von KI optimiert werden?" Um diese Frage zu beantworten, werden folgende Aspekte und Fragen genauer untersucht:

1. Welche Entwicklungsphasen der Industrie gibt es und was sind die charakteristischen Merkmale der *Industrie 5.0*?
2. Was sind die Hauptkonzepte und Ebenen der KI hinsichtlich der Optimierung von Produktionsprozessen?
3. Die Untersuchung und Analyse der implementierten KI-Ansätze in der Industrie mit Hilfe von Fallstudien und Praxisbeispielen mittels geeigneter Methodik
4. Welche Rolle spielt der Mensch und in welchem Zusammenhang steht er zur Technik und zur Organisation?
5. Untersuchung der Chancen und Limitationen von KI hinsichtlich der Produktionsoptimierung

In dieser Bachelorarbeit werden darüber hinaus folgende Ziele verfolgt: Zunächst soll ein allgemeiner Überblick über die Entwicklung der Phasen der industriellen Revolutionen sowie über die Grundlagen der KI und der aktuell vorhandenen Reifegradmodelle (RM) gegeben werden. Im Anschluss wird die Rolle der KI in der heutigen Industrie beleuchtet. Es werden Anwendungsbeispiele für die Verwendung von KI in der Produktion präsentiert, die aufzeigen, wie spezifische KI-Methoden zur Prozessoptimierung beitragen und dabei helfen können, das volle Potential von Produktionsprozessen und vorhandenen Ressourcen auszu-schöpfen.

Darüber hinaus gilt es zu klären, was genau unter dem Begriff *Industrie 5.0* zu verstehen ist. In diesem Zusammenhang werden aktuelle RM untersucht und miteinander verglichen. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird eines dieser Modelle ausgewählt, anhand dessen eine exemplarische Durchführung in der Praxis, genauer am Institut für Produktionstechnik (IPT) an der Hochschule für anerkannte Wissenschaft (HAW) in Hamburg, dargestellt wird.

Schließlich wird das ausgewählte RM im Hinblick auf *Industrie 5.0* und den Aspekt Mensch diskutiert. Limitationen und zukünftige Herausforderungen werden aufgezeigt und durch Optimierungsvorschläge ergänzt. Diese Arbeit soll somit einen umfassenden Einblick in das Zusammenspiel von KI und *Industrie 5.0* bieten und dabei helfen, das Potenzial dieser Technologien für die Optimierung von Produktionsprozessen zu verstehen.

1.3 Struktur der Arbeit

In den vorhergehenden Abschnitten wurde ein Überblick über den Hintergrund und die Motivation der vorliegenden Arbeit gegeben, die Zielsetzung und die Forschungsfragen wurden vorgestellt und eingeordnet und die Struktur der weiteren Arbeit wird nun skizziert.

Das zweite Kapitel widmet sich der fundierten Darstellung der wesentlichen Grundlagen, die für das Verständnis der Thematik unerlässlich sind. Dies umfasst eine ausführliche Präsentation der Evolution von *Industrie 5.0* sowie eine Behandlung der KI, welche eine umfassende Beschreibung ihrer geschichtlichen Entwicklung, eine Begriffsdefinition und eine eingehende Erörterung der verschiedenen Ebenen und Methoden beinhaltet. Anschließend werden fünf ausgewählte RM im Zusammenhang mit *Industrie 5.0* vorgestellt und verglichen.

Im dritten Kapitel dieser Arbeit werden vielfältige praxisnahe Beispiele und Fallstudien präsentiert, die die Integration von KI im Kontext von *Industrie 5.0* veranschaulichen. Hierbei werden verschiedene Anwendungsgebiete beleuchtet, darunter die Bereiche Instandhaltung, Logistik, Qualitätskontrolle, digitale Assistenzsysteme, Produktionssteuerung und Robotik. Die Rolle von KI und ihr optimierender Einfluss auf diese Prozesse werden eingehend beleuchtet und analysiert.

Der vierte Abschnitt dieser Arbeit vertieft die Definition von *Industrie 5.0* und stellt die wesentlichen Unterschiede im Vergleich zu *Industrie 4.0* heraus. Hier wird zudem ein spezifisches Reifegradmodell ausgewählt und präsentiert, welches im Anschluss am Institut für Produktionstechnik (IPT) an der Hochschule für anerkannte Wissenschaft (HAW) exemplarisch durchgeführt wird. Die Ergebnisse dieser praktischen Durchführung werden daraufhin ausführlich analysiert und kritisch diskutiert. Abschließend erfolgt eine kritische Betrachtung der Limitationen dieser Arbeit.

Im letzten Teil folgen eine Zusammenfassung und abschließende Beurteilung der Arbeit und ihrer Ergebnisse. Daraus wird ein fundiertes Fazit abgeleitet, welches die Gesamterkenntnisse würdigt und zusammenfasst. Zudem bietet dieser Abschnitt einen Ausblick auf potentielle zukünftige Forschungen und die nächsten Schritte im Bereich der KI in der *Industrie 5.0*.

2 Grundlagen

Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Erkenntnisse und Entwicklungen dargestellt, die die Grundlage der verwendeten Konstrukte *Industrie 5.0* und *KI* darstellen. Im anschließenden Unterkapitel wird zunächst auf die Historie der einzelnen industriellen Revolutionen eingegangen, um den momentanen Wandel von *Industrie 4.0* zu 5.0 besser einordnen zu können. Daraufhin wird die Entwicklung der *KI* in einen geschichtlichen Kontext gesetzt, bevor das aktuelle Verständnis von *KI* definiert und anhand verschiedener Anwendungsebenen dargestellt wird. Im letzten Unterkapitel wird ein Überblick über fünf erprobte Bewertungsinstrumente gegeben, die die jeweilige Reife eines Unternehmens in Bezug auf *Industrie 4.0* beurteilen. Dies bildet das Fundament für die im späteren Verlauf durchgeführte Bewertung und Analyse der *RM*.

2.1 Entwicklung der Industrie 5.0

Im folgenden Unterkapitel wird ein Überblick über die anbrechende Phase der industriellen Revolution, der *Industrie 5.0*, vermittelt. Hierbei werden sowohl technologische Aspekte als auch sozioökonomische Konsequenzen und Herausforderungen betrachtet. Das Ziel besteht darin, die Grundlagen und Methoden dieser Phase vor dem Hintergrund ihrer historischen Entwicklung zu erläutern und eine historische Einordnung der wichtigsten Meilensteine zu liefern.

Industrie 1.0

Die Bezeichnung *industrielle Revolution* kennzeichnet ursprünglich den Paradigmenwechsel einer agrarwirtschaftlichen Struktur hin zu einer industriellen Gesellschaft [3]. Die Erfindung der Dampfmaschine von Thomas Newcomen im Jahr 1712 und die später folgende Optimierung des Wirkungsgrades der Dampfmaschine von 3% bis zu 50% von James Watt, legten die Grundpfeiler der ersten industriellen Revolution. Im 18. Jahrhundert folgte der Einsatz von Dampfmaschinen in Bergwerken und führte neben der Spinnmaschine und dem Webstuhl zur Entwicklung der Textilindustrie, von Werkzeugmaschinen, Eisenbahnen und Schiffen [4]. Die zu dem Zeitpunkt zur Verfügung gestellte Menge an Kohle und Stahl führte zu den nächsten großen Veränderungen. Die Kohle als Energiespeicher im Zusammenspiel mit Dampfmaschinen verbesserten die menschliche Produktivität in der Industrie. Die Dampfmaschine war daher nicht nur ein Katalysator für die industrielle Güterherstellung, sondern revolutionierte auch die Transportmöglichkeiten durch die Entwicklung der Dampflokomotive und des Dampfschiffes [3].

Industrie 2.0

Die zweite industrielle Revolution begann im frühen 20. Jahrhundert mit der Entdeckung des Erdöls, der Entwicklung des Verbrennungsmotors, der Elektrizität und des Fließbands [3]. Die Entdeckung des Erdöls ermöglichte mit der Entwicklung des Verbrennungsmotors den Einsatz von Maschinen in der Industrie.

Weitere revolutionäre Aspekte waren die Erfindung des Telefons und die Weiterentwicklung des Telegraphen, welche eine schnellere Kommunikation über weite Entfernungen, sowie den Austausch von Informationen in Echtzeit realisierten [5]. Des Weiteren förderte der Fortschritt in der Elektrotechnik den Einsatz elektrifizierter Maschinen und Anlagen, was zu Massenproduktion und einer signifikanten Produktivitäts- und Effizienzsteigerung beitrug. Diese Revolution führte einerseits zu positiven Entwicklungen, wie einer Verbesserung der Lebensqualität der Menschen und einer Steigerung der Produktivität und Mobilität, andererseits jedoch auch zu negativen Aspekten, wie monotonen Arbeitsabläufen und der Entwicklung einer Konsumgesellschaft [3]. Die rasante Industrialisierung führte überdies zu einer erheblichen Umweltbelastung, insbesondere durch Luft- und Wasserverschmutzung. Darüber hinaus zählen schlechte Arbeitsbedingungen in den Fabriken, die Ausbeutung der Arbeiterklasse und soziale Ungerechtigkeit zu den Merkmalen dieser Zeit [3].

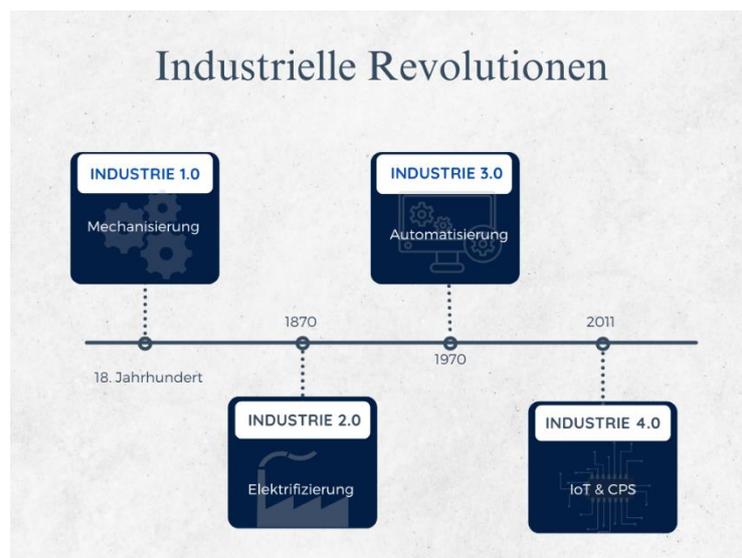


Abbildung 1 Entwicklung der industriellen Revolutionen

Industrie 3.0

Im Zeitraum der 1970er bis in die frühen 2000er zeichnete sich mit dem Aufkommen des Computers und den Fortschritten in der Informatik der Beginn der dritten industriellen Revolution ab. Die Einführung der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) ermöglichte die Automatisierung und den Einsatz von Robotern in der Industrie. Durch die Integration von computergesteuerten Drehbänken und Fräsmaschinen in der Fertigung, computerunterstützten Zeichnungserstellung und 3D-Modellierung (CAD), sowie der Verwendung von Modellen zur Visualisierung und Simulation wurde es möglich, das Produktdesign und die

Auslegung von Anlagen digital zu testen, ohne vorerst aufwändige Prototypen produzieren zu müssen [1, 2].

Dank dieser innovativen Technologien wurde nicht nur die nächste Stufe der Automatisierung erreicht, sondern auch ein signifikantes Maß an Effizienz innerhalb der Produktionskette. Dies resultierte in einer gesteigerten Produktivität und einer erhöhten Flexibilität innerhalb industrieller Abläufe.

Industrie 4.0

Die vierte industrielle Revolution, auch *Industrie 4.0* genannt, begann Anfang des 21. Jahrhunderts. Die Industrie 4.0 wurde zum ersten Mal auf der Hannovermesse HMI im Jahr 2011 präsentiert [6]. Diese Phase kann als Weiterentwicklung, der zuvor bereits durchlaufenen industriellen Revolutionen, betrachtet werden. Wie in Abbildung 1 ersichtlich wird, zeichnete sich jede dieser Revolutionen durch bestimmte Merkmale, wie der Mechanisierung von Arbeitsvorgängen, der Elektrifizierung von Massenproduktion oder der Computerisierung und Automatisierung von Prozessen aus [5]. Basierend auf den bereits genannten Revolutionen wurden in der *Industrie 4.0* die Möglichkeiten der digitalen Technologie genutzt, um Produktivität, Effizienz und Flexibilität der industriellen Produktion weiter zu steigern.

Die Vorteile der Digitalisierung und Vernetzung in der Industrie ebnen den Weg zu innovativen Produkten und Dienstleistungen, welche die jeweiligen Parteien auf dem globalen Markt wettbewerbsfähig halten [7]. In diesem Kontext sind Technologiebereiche wie Internet of Things (IoT)- und cyberphysische Systeme, Smartfactory, Big Data, intelligente mobile Endgeräte und Informationssicherheit von zentraler Bedeutung [7].

Gemäß der *Industrie 4.0 Plattform* ist das Hauptcharakteristikum dieser vierten industriellen Phase ein fortgeschrittenes Stadium der Organisation und Verwaltung der gesamten PLZ-Wertschöpfungskette, welche sich an individuellen Kundenbedürfnissen orientiert [7]. Dieser Prozess erstreckt sich demnach über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts, von der Idee bis zum Recycling und ist jeweils an individuelle Wünsche, Vorstellungen und Bedürfnissen auf Kundenseite angepasst. Eine der tragenden Säulen dieses Paradigmas ist die Echtzeitverfügbarkeit sämtlicher relevanter Daten durch die Integration aller involvierten Stakeholder. Das Resultat sind unternehmensinterne, selbstorganisierte, dynamische Netzwerke, die anhand variabler Faktoren wie Kosten, Aufwand und Ressourcenverfügbarkeit adaptiert werden können [6].

2.2 Künstliche Intelligenz

Im folgenden Unterkapitel wird zunächst ein Überblick über die Entstehung und die prägenden Phasen der KI geliefert. Diese historische Einordnung hilft dabei, den aktuellen Stand, die rapide Entwicklung der KI und die damit einhergehenden Implikationen besser beurteilen zu können. Der darauffolgende Abschnitt, *Definition der KI*, beschäftigt sich mit der Frage, was genau unter dem Begriff KI verstanden wird und welche Charakteristika und Abgrenzungen zu anderen Technologien relevant sind. Abschließend werden unter Punkt 2.2.3 *KI-Ebenen und Methoden* die unterschiedlichen Schichten und Ansätze KI vorgestellt. Hier wird insbesondere darauf eingegangen, welche Methoden und Technologien in der Praxis Anwendung finden und wie diese das Feld der KI prägen. Insgesamt soll dieses Unterkapitel sowohl Neulingen, als auch Fachleuten ein umfassendes und tiefgreifendes Verständnis der KI ermöglichen.

2.2.1 Geschichte und Entwicklung

Der Begriff *Künstliche Intelligenz* wurde erstmalig im Jahr 1956 von John McCarthy eingeführt, mit der Vorstellung, dass Computer nach menschlicher Rationalität handeln könnten [8]. Er postulierte gemeinsam mit weiteren namenhaften KI-Forschern, dass die menschliche Intelligenz mit Hilfe geeigneter Programme und leistungsstarker Rechner repliziert werden könne [9]. Die Geschichte der KI begann allerdings bereits 1950 mit Alan Turings Turing-Test [10]. Dieser Test prüft die Fähigkeit einer Maschine, menschenähnliche kognitive Prozesse nachzuahmen. Ein Proband soll dabei anonymisiert mit einem Menschen und einer Maschine kommunizieren und versuchen, den jeweiligen Gesprächspartner zu identifizieren. Der Test gilt als bestanden, wenn der Proband nicht mit Sicherheit sagen kann, ob es sich um eine Maschine oder einen Menschen handelt. Die Maschine muss dabei vier Abstraktionsebenen beherrschen: natürliche Sprachverarbeitung, Wissensspeicherung, automatisierte Schlussfolgerungen und maschinelles Lernen [8].

Die Entwicklung des General Problem Solver Programms (GPS) im Jahr 1959 markiert einen Meilenstein, indem es erstmals ermöglichte, eine Vielzahl von Problemen mittels mathematischer Formulierungen abzubilden und Lösungswege nach menschlicher Logik zu entwerfen, anstatt nur die korrekte Lösung vorherzusagen [8]. Die ersten Bausteine der heutigen Chat-Bots wurden 1966 von Joseph Weizenbaum, mit dem Programm ELIZA, gelegt [9]. Dieses Programm simulierte Gesprächspartner (beispielsweise einen Psychotherapeuten) durch Mustererkennung, wobei es nach Schlüsselwörtern in Benutzereingaben suchte und vordefinierte Skripte zum Reagieren benutzte.

Dank bedeutender Fortschritte, angetrieben durch neu entwickelte Programme und eine gesteigerte Rechenleistung, nahm die Begeisterung für dieses Feld bis Mitte der 60er Jahre sowohl bei Unternehmen als auch bei Regierungen stark zu, was zu beträchtlichen Investitionen in diesem Bereich führte. Dennoch kam es ab Ende der 60er bis in die 70er Jahre, trotz gezielter Fortschritte und daraus erhofften Weiterentwicklungen zu einem sogenannten *KI-Winter*, der zu einem starken Rückgang an Interesse und Finanzierungen führte. Ursächlich für die Rückschläge in der KI-Forschung zu dieser Zeit waren beispielsweise eine begrenzte

Rechenleistung und Schwierigkeiten bei der Bewältigung der kombinatorischen Explosion. Zusätzlich führten ethische Bedenken, sowie Kritik an der Reduzierung des Menschen auf ein informationsverarbeitendes System zu einem Rückgang der Unterstützung und Förderung, was viele Wissenschaftler dazu veranlasste, das Forschungsfeld der KI zu verlassen [11].

Wie in der weiter untenstehenden Abbildung 2 zu erkennen ist, wurden im Anschluss vielfältige Anwendungen von KI in den unterschiedlichsten Bereichen erprobt. So erfolgten im Jahr 1972, mit der von Alain Colmerauer erfundenen Logikprogrammiersprache Prolog, die ersten Anwendungen von KI im Gesundheitswesen. Vier Jahre später entwickelten Shortliffe und Buchanan ein Expertensystem namens MYCIN in der Programmiersprache LISP, das zur Identifizierung von Blutinfektionen und zur Empfehlung von Behandlungsmöglichkeiten eingesetzt wurde [10]. In den 1980er Jahren folgten die ersten kommerziellen Anwendungen von KI. Die damaligen Expertensysteme waren jedoch noch recht unausgereift, so erfolgte die Umwandlung von Befehlen in formale Regeln händisch. Diese Problematik wird heute durch den Einsatz von Machine Learning (ML) überwunden [12]. In den späten 1980er Jahren wurde mit der Pionierarbeit von Terrence J. Sejnowski und Charles Rosenberg und ihrer Entwicklung von "NETtalk" der erste Grundpfeiler der heutigen Sprachverarbeitungstechnologien gelegt. Bei dem Programm handelte es sich um eine der ersten Anwendungen von künstlichen neuronalen Netzen und es konnte bereits durch die Eingabe von Beispielsätzen und Phonemsequenzen nicht nur Wörter lesen und korrekt aussprechen, sondern auch unbekannte Wörter erkennen und interpretieren [13]. Der nächste Meilenstein in der Entwicklung der KI ereignete sich im Jahr 1997, als der Wettkampf zwischen IBMs Deep Blue und dem Schachweltmeister Garri Kasparov großes Aufsehen erregte. Deep Blues knapper Sieg in der Schachpartie wurde häufig als Sieg der KI über den Menschen bezeichnet. Kritiker argumentierten jedoch, dass Deep Blue mehr auf Rechenleistung als auf echte Intelligenz setzte, obwohl es heuristische Algorithmen für eine intelligente Suche verwendete [9].

Zwischen 2000 und 2010 schien es in der KI-Forschung keine bedeutenden Durchbrüche zu geben, doch fand ein stetiger Fortschritt statt. Ab 2011 wurden diese Fortschritte, beispielsweise in Form von der von Apple veröffentlichten und auf Spracherkennungstechnologie basierten persönlichen Assistentin *Siri* deutlich sichtbar [12].

Ein weiterer bedeutender Meilenstein für die KI war, als IBMs KI-System "Watson" 2011 an der Quizshow *Jeopardy!* teilnahm und gegen menschliche Spieler gewann. Dies zeigte das Potenzial von KI, menschliche Sprache zu verstehen und komplexe Fragen zu beantworten. Dieser Erfolg förderte erneut das Interesse und die Investitionen in KI-Forschung und -Entwicklung.

Das Jahrzehnt ab 2010 war ein entscheidender Zeitpunkt für die KI. In dieser Zeit begann KI, bestimmte menschliche Fähigkeiten zu übertreffen. Dies wurde durch andere technologischen Fortschritte, wie Deep Learning (DL) und IoT, ermöglicht [14].

Weitere bedeutende Fortschritte in der Welt der KI wurden im Jahr 2015 verzeichnet, als Daimler sein erstes selbstfahrendes Nutzfahrzeug vorstellte. Parallel dazu erreichten Googles autonome Fahrzeuge eine Fahrleistung von 1,6 Millionen Kilometern und stellten ihre Anpassungsfähigkeit in städtischen Umgebungen unter Beweis. Zudem revolutionierten Entwicklungen im Bereich des DLs die Bilddatenverarbeitung, indem sie eine akkurate

Kategorisierung von Fotos erlaubten. Mit Amazons Alexa und Microsofts Cortana wurden ebenfalls im Jahr 2015 zwei weitere bemerkenswerte Sprachassistenzsysteme veröffentlicht [10].

In den Jahren 2017 und 2018 gab es erneut bedeutende Leistungsfortschritte hinsichtlich der KI. 2017 besiegte die KI "Liratus" mit Hilfe des klassischen Reinforcement-Learnings menschliche Profis im Poker [15]. OpenAI gewann ein Jahr später gegen Profispieler im Videospiel Dota 2, wobei das Spiel sowohl strategisches Denken als auch eine schnelle Reaktion erfordert [16]. Parallel dazu führte Google's *Duplex* erfolgreich ein Gespräch über Telefon mit einem Friseur, um einen Friseurtermin auszumachen [17]. Diese Meilensteine demonstrieren die verbesserten Fähigkeiten von KI in komplexen Aufgaben und Kommunikation.

Mit Beginn des Jahrzehnts 2020 brachte OpenAI eine Vielzahl an innovativen KI-Modellen hervor, einschließlich solcher wie GPT-3, DALL-E und GLIDE [12]. ChatGPT, ein KI-Modell von OpenAI, welches menschenähnliche Dialoge simuliert, wurde 2020 eingeführt und schnell zu einem beliebten Werkzeug für Chatbot-Entwickler. Nach seiner öffentlichen Freigabe im November 2022 verzeichnete es innerhalb von fünf Tagen eine Millionen Anmeldungen, ein bisher unerreichter Erfolg für einen Online-Service [18].

Das Europäische Parlament schlug im April 2021 erstmalig Regulierungen von KI vor, die unter anderem die Klassifizierung von KI-Anwendungen in drei Risikogruppen vorsieht. Diese soll eine Unterscheidung zwischen Systemen mit unakzeptablen Risiken, die verboten werden sollen, hochriskanten Anwendungen, die bestimmte gesetzliche Anforderungen erfüllen müssen, und weiteren Anwendungen, die größtenteils unreguliert bleiben vornehmen [19].

Seit dem Jahr 2023 durchläuft die KI eine rasante Entwicklung. Derartige Tools sind seitdem massentauglich geworden und können sowohl im Alltag als auch im Arbeitsleben eingesetzt werden [20]. Im März 2023 wurden erneut bedeutende Fortschritte in der KI-Technologie erzielt. Dazu gehört beispielsweise die neue Version von ChatGPT, welche Plugins einbindet, durch die Bilder als Informationen verarbeitet werden können. Des Weiteren stellte Midjourney die fünfte Version des leistungsfähigen KI-Bildgenerators vor. Gleichzeitig haben Tech-Riesen wie Google und Microsoft ihre KI-Integration in ihren populären Anwendungen verstärkt, was das Potenzial der KI in der heutigen Technologiewelt hervorhebt [20].

Ende Mai 2023 präsentierte der Gründer und CEO von NVIDIA, Jensen Huang, den DGX GH200 Supercomputer. Er bietet eine Rechenleistung von einer Exaflop, was bedeutet, dass er eine Quintillion Berechnungen pro Sekunde durchführen kann und verfügt über 144 Terabyte gemeinsamen Speicher, wodurch die Verarbeitung großer Datenmengen ermöglicht wird. Zusätzlich dazu kann der DGX GH200 bis zu 256 NVIDIA GH200 Grace Hopper Superchips zu einer einzigen, rechenzentrumsähnlichen Einheit kombinieren, was die Kommunikation und Datenübertragung zwischen den Chips verbessert. Die Kombination aus hoher Leistung, großem Speicher und fortschrittlicher Technologie ermöglicht es, komplexe Aufgaben und Berechnungen in kürzester Zeit



Abbildung 2 Meilensteine der KI

durchzuführen und eröffnet neue Möglichkeiten für Forschung und Anwendungen [21].

Im Zuge der im Jahr 2021 vorgeschlagenen KI-Regelungen wurde der erste Gesetzesentwurf des EU-Parlaments im Juli 2023 verabschiedet. Neben der bereits genannten Klassifizierung der Risikoklassen von KI-Anwendungen war die Kennzeichnung aller Dienstleistungen, die mithilfe von KI geschaffen werden, ein weiterer Aspekt in diesem Entwurf. Dies soll den Verbrauchern ermöglichen festzustellen, ob sie mit KI-Systemen interagieren, um gegebenenfalls eine Überprüfung durch Menschen zu verlangen [22].

2.2.2 Definition der KI

Die KI lässt sich auf unterschiedliche Weisen konzeptuell erfassen. Bei der Definition von KI handelt es sich um ein komplexes und umstrittenes Thema und bisher gibt es noch keine allgemein anerkannte Definition. Dies liegt daran, dass für den Begriff *Intelligenz* selbst noch keine eindeutige Definition vorliegt [23]. Jedoch sind sich so gut wie alle Definitionen darin einig, dass die KI die Fähigkeit der Maschine ist, menschliche Fähigkeiten zu imitieren. Darüber hinaus stimmen fast alle Definitionen darin überein, dass KI zu einem Teilbereich der Informatik gehört, in welchem sowohl Computer-Hardware, als auch -Software eingesetzt wird. Die meisten KI-Definitionen legen großen Wert auf Autonomie als Eigenschaft der KI, betonen also die Fähigkeit der KI, Aufgaben und Prozesse ohne menschliches Eingreifen zu bewältigen. Die wesentlichen Unterschiede der verschiedenen Definitionen ergeben sich in Bezug auf den Grad der Intelligenz und die Anwendungsbereiche der KI. Eine der aussagekräftigsten Definitionen ist die nach Pfannstiel und lautet wie folgt:

„Künstliche Intelligenz beschreibt den Einsatz von Geräten, Computern, Softwareprogrammen, Maschinen und Technologien, die basierend auf Algorithmen agieren und ihre Umgebung analysieren. Durch Algorithmen können Probleme gelöst, Aufgaben ausgeführt und komplizierte Prozesse nachgebildet werden. Dabei dient KI nicht nur zur Nachahmung menschlichen Verhaltens, vielmehr sollen selbstständig, unabhängig und bestmöglich Probleme und Aufgaben bearbeitet werden. Entwickelte Algorithmen zeichnen sich durch eine definierte Abfolge von Rechenvorschriften aus, die von Menschen entwickelt wurden und es z. B. einer Maschine erlauben, zu einem gewissen Grad autonom zu handeln“ [24].

KI unterteilt sich in ihrer Gesamtheit in zwei Hauptkategorien: *starke* und *schwache* KI. Diese Unterscheidung basiert vor allem auf den jeweiligen Anwendungsbereichen und Fähigkeiten der KI. Während schwache KI auf eine bestimmte Aufgabe oder Funktion spezialisiert und für genau definierte, spezifische Zwecke programmiert ist, hat starke KI das Potenzial, jede menschliche Tätigkeit nachzuahmen – von einfachen Handlungen bis hin zu komplexem Denken und Emotionen [25]. Schwache KI eignet sich für vordefinierte Aufgaben, die nach einer festgelegten Methodik gelöst werden. Dazu zählen beispielsweise Bild- oder Spracherkennung, Textübersetzung und Navigationssysteme, welche in digitalen Assistenzsystemen, wie Alexa, Siri und Google Assistent verwendet werden [26]. Vergleichbare Fortschritte bei der starken KI lassen derzeit noch auf sich warten. Trotz jahrzehntelanger Arbeit in diesem Sektor, sind wir noch nicht am Punkt einer vollends ausgereiften Technologie angekommen. Aktuell sind ML-Methoden diesbezüglich die vielversprechendsten Ansätze in der KI-Forschung [27].

2.2.3 KI-Ebenen und Methoden

Das folgende Unterkapitel beleuchtet diverse Ansätze und Methoden der KI, angefangen bei Suchalgorithmen über neuronale Netzwerke bis hin zu spezialisierten Lernverfahren. Eine Übersicht der jeweiligen theoretischen Grundlagen und Funktionsweisen erleichtert das weitere Verständnis von KI und den möglichen Anwendungen dieser.

Search Tree (Suchbaum):

Suchbaumfunktionen sind in der Informatik ein zentrales Element im Bereich der KI. Sie ermöglichen Entscheidungsstrukturen, welche Denkweisen in ihre Algorithmen integrieren, die denen von menschlicher Intelligenz ähnlich sind. Der A*-Algorithmus ist eine bekannte Methode, welche zu den sogenannten informierten Suchalgorithmen gehört. Er sucht in gewichteten Diagrammen, basierend auf einer Kostenfunktion, nach dem besten Pfad, wobei die Kosten verschiedene Parameter, wie Distanz, Zeit oder Energieverbrauch repräsentieren können. Der A*-Algorithmus erweitert den Pfad mit den niedrigsten Kosten, bis ein bestimmtes Kriterium erreicht ist. Die Auswahl des besten Pfads erfolgt durch eine heuristische Methode, die anhand begrenzter Informationen über ein System Entscheidungen trifft. Der A*-Algorithmus sucht den effizientesten Pfad, wobei die Tiefe der Suche von der verfügbaren Rechenkapazität abhängt und bestimmte Pfade bevorzugt analysiert werden [8].

Machine Learning

Machine-Learning bezeichnet einen Prozess, bei dem sich die "Maschine" im Verlauf ihres Einsatzes von den anfänglichen Vorgaben wie Daten und Regeln, zunehmend emanzipiert. Im Gegensatz zu traditionellen Systemen, die auf festgelegter Logik basieren, strebt die KI hier danach, eigenständig aus Erfahrungen zu lernen. Das Ziel ist es, aufgrund gesammelter Erfahrung kontinuierlich bessere Ergebnisse zu erzielen. Die anfänglichen Algorithmen dienen lediglich als Startpunkt für die Entwicklung neuer Ansätze. Falls sich im Verlauf des Lernprozesses neue Algorithmen als effektiver herausstellen, integriert die "Maschine" diese eigenständig in ihre Vorgehensweise [28]. In diesem Kontext spielen die folgenden drei Methoden, welche in der untenstehenden Abbildung 3 skizziert sind, eine bedeutsame Rolle im Bereich des maschinellen Lernens:

1. **Überwachtes Lernen (Supervised Learning):** Das Ziel beim überwachten Lernen ist es, mit Hilfe bekannter Eingangs- und Ausgangsgrößen aus einer Teilmenge der Daten ein Muster zwischen den genannten Größen zu erkennen, wobei ein Teil der Daten für die Validierung des Trainings verwendet wird. Bei dieser Lernmethode ist eine Interaktion durch den Nutzer für die Trainingsphase erforderlich. **Klassifikation** und **Regression** gehören zu Methoden des überwachten Lernens, wobei bei der Klassifikation die Eingabedaten in vordefinierte Klassen eingeteilt werden, während bei der Regression die Ausgabewerte vorhergesagt werden. Beide Methoden streben jedoch an, ein Muster bzw. eine Relation zwischen Eingabe und Ausgabe aus Trainingsdaten zu erlernen [8].

2. Unüberwachtes Lernen (Unsupervised Learning): Im Gegensatz zum überwachten Lernen liegt der Schwerpunkt bei Unsupervised Learning darauf, die Eigenschaften der Daten zu charakterisieren, anstelle Ein- und Ausgangsdatenkorrelationen herzustellen [29]. Die Stärke dieses Lernverfahrens liegt in der Identifikation für den Menschen verborgener Muster, die in die Kategorien *Clustering* und *Association* unterteilt werden.

Unter Clustering versteht man die Gruppierung ähnlicher Objekte, basierend auf ihren Merkmalen und Attributen, während das Associative Learning Beziehungen zwischen Datenparameter erkennt [8].

Ein weiterer Unterschied zum überwachten Lernen weist das unüberwachte Lernen bei der Benutzung unbeschrifteter Daten auf. Hierbei geht es um die Erkennung von Ähnlichkeiten und Mustern, ohne vorab vorhandene Klassifikationen oder Kategorien aus den Trainingsdaten zu verwenden [29].

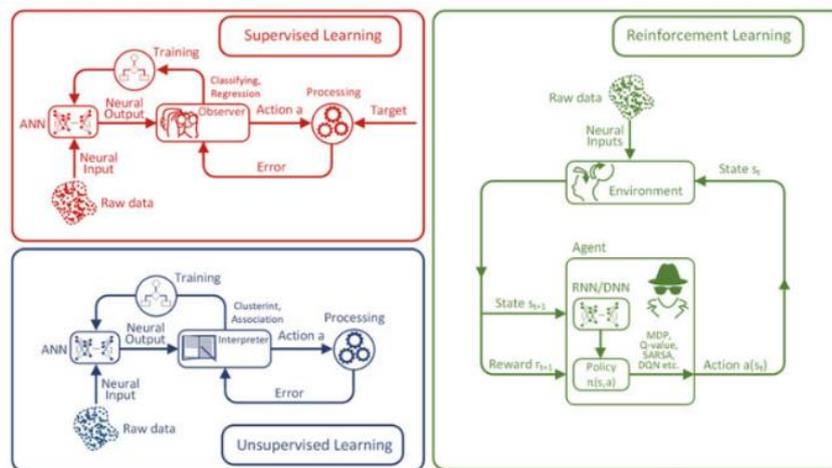


Abbildung 3 Lernmethoden vom "Machine Learning" [8]

3. Bestärkendes Lernen (Reinforcement Learning): Reinforcement Learning (RL) ist die dritte Lernmethode, neben Supervised und Unsupervised Learning, welche einen "Agenten" einsetzt, der mit seiner Umgebung interagiert, um so belohnungsmaximierende Strategien zu entwickeln. Im Gegensatz zu anderen Methoden passt sich RL dynamisch an veränderliche Daten an und ermöglicht schnellere Problemlösungen durch Trial-and-Error-Ansätze. Durch den kontinuierlichen Feedback-Mechanismus verfeinert der Agent schrittweise seine Vorhersagemodelle, wodurch oftmals weniger Iterationszyklen notwendig sind [6].

Diese Methode eignet sich besonders für begrenzte Trainingsdaten, unklare Zieldefinitionen oder Situationen, in denen Interaktion mit der Umwelt nötig ist [1].

Artificial Neural Network (ANN)

In biologischen neuronalen Netzwerken (BNN) kommunizieren Neuronen über elektrochemische Transmitter, während Computer auf seriellen, adressbasierten Berechnungen basieren. Das Gehirn arbeitet parallel und assoziativ, ermöglicht kreative Lösungen und verarbeitet Informationen divergent. Computer sind hingegen nicht adaptiv und haben begrenzte Lösungsmöglichkeiten. Das Ziel bei künstlichen neuronalen Netzen ist ein mathematisches Modellieren der biologischen Netzwerke, wobei ein Netzwerk jeweils aus einer Eingabe-, einer verdeckten (hidden) und einer Ausgabeschicht besteht. Verbindungen zwischen Neuronen haben Gewichtungen, die die Signalstärke modulieren [8]. Die Gewichtswerte werden mit Hilfe der Aktivierungsfunktionen angepasst. Des Weiteren stellen sie die nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangssignalen von Neuronen dar und beeinflussen die Effizienz des Modells. Je nach Eingangsdaten, Anforderungen und Anwendung werden unterschiedliche Aktivierungsfunktionen ausgewählt und das Modell damit trainiert [30].

Deep Learning

Deep Learning ist eine komplexe Lernmethode für künstliche neuronale Netzwerke, die durch tiefere Strukturen als herkömmliche Netze gekennzeichnet ist. Ein Deep Neural Network (DNN) besitzt mindestens zwei Hidden-Layer Ebenen, wobei es keine klare Grenze hinsichtlich der versteckten Schichten gibt [31]. Neben DNNs umfasst DL auch andere Netzwerkformen wie Convolutional Neural Networks (CNN), welches hauptsächlich für Bild- und Tonerkennung eingesetzt wird. Des Weiteren nutzt Deep Learning Supervised Learning für klassifizierende Regression mit bekannten Daten, Unsupervised Learning für Clustering und Association bei unbeschrifteten Daten, sowie Reinforcement Learning im Kontext von Umgebungseinflüssen. Welche der genannten Methoden für die Modellierung angewendet wird, hängt von dem jeweiligen Anwendungsfall ab [8].

Mit Hilfe von DL können komplexe und intelligente Anwendungen, wie Gesichts-, Objekt-, und Spracherkennung, Textumwandlung sowie fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme realisiert werden [31].

Convolutional Neural Network (CNN)

CNNs sind spezialisierte Netzwerke für grafische Eingaben, welche wie ANNs aus Neuronen mit anpassbaren Gewichtungen bestehen. CNNs sind für Bilder optimiert, da sie die direkten Verbindungen und die Backward-Propagation-Methode fürs Training nutzen. Während normale ANNs bei Bildern und Videos hinsichtlich der Hidden-layers ineffizient wären, da sie zu viele Verbindungen benötigen, teilen CNNs Bilder in Kaskaden auf, trainieren diese separat und erkennen so spezifische Bildmerkmale effizienter [8].

Für die Muster- und Objekterkennung nutzen die CNNs Filter Kernel, um Merkmale effizient zu identifizieren. Nach dieser Operation entstehen sogenannte Featuremaps, die die identifizierten Merkmale abbilden. Die Datenreduzierung erfolgt mit Hilfe der Pooling Operation, bei der nur der dominante Wert eines Bereichs gespeichert wird [32].

Recurrente Neuronale Netze (RNN)

Recurrente Neuronale Netze (RNN) sind auf die Analyse sequenzieller Daten wie Text und Sprache spezialisierte Architekturen. Dennoch hat sich ihre Leistung in der Spracherkennung als weniger effizient im Vergleich zu tiefen Feedforward-Netzwerken herausgestellt [33]. Im Gegensatz zu herkömmlichen Neuronalen Netzen zeichnen sich RNNs durch ihre einzigartige interne Rückkopplungsstruktur aus. Diese Struktur ermöglicht es dem Netz, den aktuellen Zustand zu speichern und in die Analyse nachfolgender Daten einzubeziehen. Dieses Merkmal verleiht RNNs die Fähigkeit, Eingabedaten im Kontext vorhergehender Informationen zu interpretieren. Allerdings bringt diese Fähigkeit auch Herausforderungen mit sich. Das Training solcher Netze erfordert nicht nur die Berücksichtigung aktueller, sondern auch vergangener Netzwerkzustände, was den Prozess komplexer gestaltet. Ein Problem dabei ist, dass Informationen aus der Vergangenheit im Laufe der Zeit an Bedeutung verlieren. Hierfür wurden Long Short-Term Memory (LSTM) Netze entwickelt, die eine zusätzliche Schicht haben, um Informationen über längere Zeiträume zu speichern [32].

Generative Adversarial Networks (GAN)

Generative Adversarial Networks (GAN) sind Netzwerke, die sequenzielle Daten, analysieren können. Diese Netzwerke bestehen aus einem Generator, der Datenmuster erzeugt, die realen Daten ähneln, und einem Diskriminator, der zwischen authentischen und generierten Daten unterscheidet [34].

Während des Trainings werden Generator und Diskriminator mit zufälligen Gewichten initialisiert. Der Generator erzeugt synthetische Beispiele aus zufälligem Rauschen und der Diskriminator bewertet sie als echt oder gefälscht. Die Generator-Leistung wird durch eine Verlustfunktion bewertet und mithilfe von Backpropagation verbessert, während die Gewichte des Diskriminators unverändert bleiben, um die Stabilität des Trainingsprozesses zu gewährleisten [35]. Der beschriebene Trainings-Prozess dieser Netzwerke ist komplex und erfordert viel Aufwand, da der Generator und Diskriminator gleichzeitig und in gegensätzlicher Weise trainiert werden [34].

2.3 Reifegradmodelle

Im folgenden Unterkapitel werden fünf ausgewählte RM vorgestellt, welche im Laufe der Arbeit miteinander verglichen werden. Das primäre Ziel dieses Abschnitts ist es, ein Grundverständnis für die Konzeption und Anwendung verschiedener Modelle zu schaffen, welche dafür genutzt werden können, um den Reifegrad eines Unternehmens systematisch zu ermitteln. Dies dient dazu, dem Leser den Entscheidungsfindungsprozess näher zu bringen, der für die Bewertung der hier vorliegenden Fragestellung zugrunde liegt. Eine tabellarische Darstellung der wichtigsten Merkmale der vorgestellten RM ist im Anhang, in Abbildung 21 zu finden.

Industrie 4.0 Maturity Index (Acatech)

Bei diesem Reifegradmodell handelt es sich um ein von der deutschen Akademie der Technikwissenschaften (Acatech) entwickeltes Messinstrument, mit dessen Hilfe der aktuelle Entwicklungszustand eines Unternehmens hinsichtlich der Passung an *Industrie 4.0* ermittelt werden kann. Der *Industrie 4.0* Maturity Index ermöglicht eine individuelle Zielsetzung, angepasst an die jeweiligen Wünsche und Erwartungen, so dass je nach Unternehmen die Entwicklungsstufe mit dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis angestrebt werden kann.

Wie in Abbildung 4 veranschaulicht wird, untersucht das Reifegradmodell fünf übergeordnete Funktionsbereiche des Unternehmens, (*Entwicklung, Produktion, Logistik, Service* und *Marketing/Vertrieb*) hinsichtlich vier Gestaltungsfelder und bietet dafür jeweils sechs

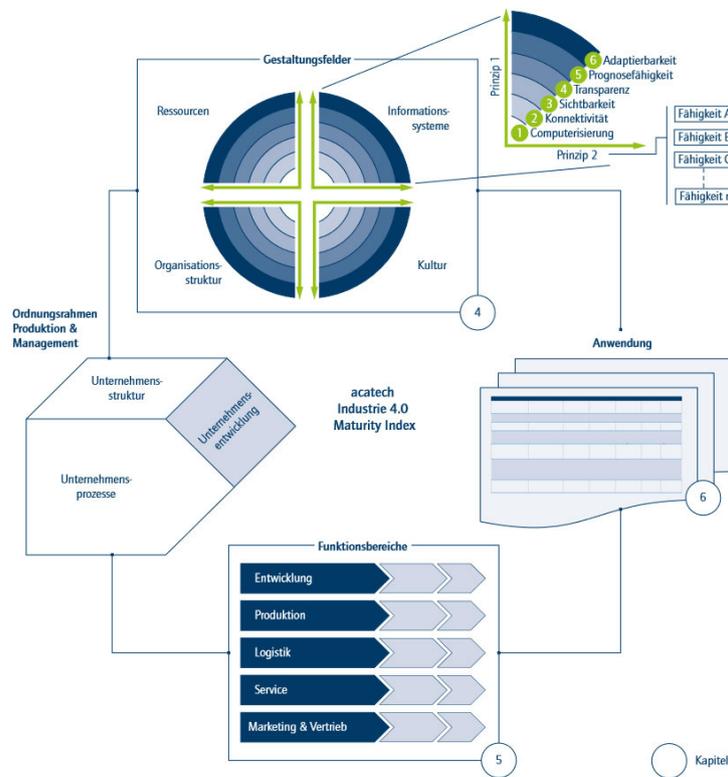


Abbildung 4 Aufbau des Industrie 4.0 Maturity Index von Acatech [36]

aufeinander aufbauende Reifestufen als Bewertungsmaßstab an. Die Gestaltungsfelder bezeichnen dabei die *Ressourcen*, die *Informationssysteme*, die *Organisationsstruktur* und die *Kultur* des entsprechenden Unternehmens. Anhand einer Bewertung der Gestaltungsfelder mittels Fragebogen werden sogenannte handlungsleitende Prinzipien aufgestellt, aus denen sich die zu entwickelnden Fähigkeiten für *Industrie 4.0* ableiten lassen. Die vier Gestaltungsfelder werden für die fünf Funktionsbereiche hinsichtlich definierter Entwicklungsstufen, welche den sechs möglichen Ausprägungen der Reifegradstufen entsprechen (Computrierung, Konnektivität, Sichtbarkeit, Transparenz, Prognosefähigkeit und Adaptierbarkeit) bewertet [36].

Industrie 4.0 Readiness (IMPULS-Stiftung von VDMA)

Das IMPULS-Stiftung-Industrie-4.0-Readiness-Modell des VDMA wurde konzipiert, um Unternehmen dabei zu helfen, ihren aktuellen Stand in Bezug auf *Industrie 4.0* zu erfassen, Bereiche mit möglichem Entwicklungspotenzial zu identifizieren und Strategien zu Förderung dieses Potenzials in Gang zu setzen. Die Reife des Unternehmens wird mithilfe eines Fragebogens, anhand sechs maßgeblicher Dimensionen (*Strategie und Organisation*, *Smart Factory*, *Smart Operations*, *Smart Products*, *Data-driven Services* und *Mitarbeiter*) in insgesamt 18 Unterpunkten ermittelt. Die sechs Dimensionen werden jeweils anhand definierter Entwicklungsstufen (Außenstehender, Anfänger, Fortgeschrittener, Erfahrener, Experte und Exzellenz) bewertet, welche durch gewisse Kriterien charakterisiert werden. Ein Beispiel für derartige Kriterien im Bereich *Data-driven Services* ist die Frage nach dem Angebot datenbasierter Dienstleistungen, dem Umsatzanteil mit datenbasierten Dienstleistungen oder dem Anteil der genutzten Daten [37]. Die Auswertung anhand dieser genormten Kriterien ermöglicht es, das Unternehmen mit anderen Unternehmen in den Vergleich zu stellen. Mit Hilfe der Online-Selbstcheck-Plattform für Unternehmen kann der Fragebogen niedrigschwellig ausgefüllt werden. Die Auswertung wird anschließend zusammen mit individuellen, für das Unternehmen ausgewählten Maßnahmen, zum lokalen Speichern zur Verfügung gestellt [38].

Quick-Check Industrie 4.0

Der Quick-Check Industrie 4.0 ist ein Instrument, das mit dem Ziel der unternehmerischen Leistungssteigerung durch *Industrie 4.0*, im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts INLUMIA, entwickelt wurde. Es erlaubt einem Unternehmen eine Bewertung der eigenen *Industrie 4.0*-Fähigkeiten, einen Vergleich zu anderen entsprechenden Unternehmen, sowie eine individuelle Stärken- und Schwächen-Analyse vorzunehmen. Der Reifegrad des Unternehmens wird anhand der drei Dimensionen *Technik*, *Business* und *Mensch* ermittelt. Das Modell besteht aus vier Phasen, die Vorbereitungsphase, die Phase des Reifegradmodells, gefolgt von einer Auswirkungsanalyse, mit der abschließend die Ermittlung einer erfolgsversprechenden Zielposition erfolgt. Neben einer Bewertung der eigenen Passung zu *Industrie 4.0* und dem Vergleich zu Mitbewerbern, werden Unternehmen durch den Quick-Check Industrie 4.0 konkrete Handlungsempfehlungen angeboten, um die Leistungsfähigkeit in den entsprechenden Bereichen zu verbessern [39].

Der Quick-Check Industrie 4.0 wird online, in Form eines Fragebogens, durchgeführt. Es steht eine spezielle Plattform zur Verfügung, auf der Unternehmen die Fragen beantworten

können [40]. Die Plattform ermöglicht eine einfache Dateneingabe und bietet im Anschluss eine Auswertung der Ergebnisse. Unternehmen können so ihre Stärken und Schwächen im Bereich *Industrie 4.0* erkennen und gezielte Maßnahmen zur Weiterentwicklung ergreifen.

InAsPro

Bei InAsPro handelt es sich um ein Verbundforschungsprojekt, (Integrierte Arbeitssystemgestaltung in digitalisierten Produktionsunternehmen) mit dem Ziel produzierende Unternehmen bei der Digitalisierung zu unterstützen. Dies gelingt durch die Entwicklung eines so genannten modularen Transformationskonzeptes, welches das Unternehmen, unter der Berücksichtigung der Aspekte Technologie, Mensch und Organisation dabei anleitet, Digitalisierungstechnologien bedarfsgerecht einzuführen [41].

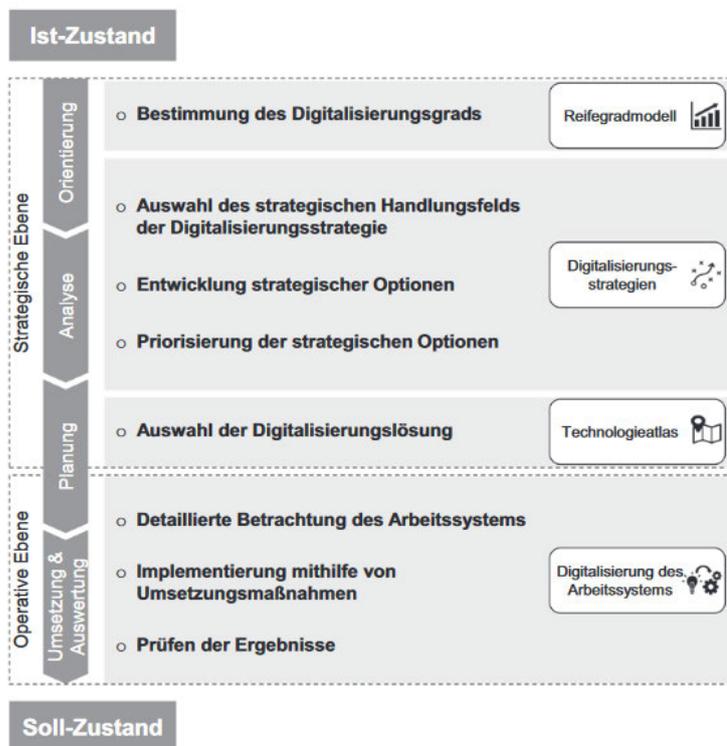


Abbildung 5 Ebenen des InAsPro-Modells [42]

Welche Digitalisierungstechnologie für das Unternehmen am sinnvollsten ist und wie diese am besten implementiert werden kann, wird, wie in Abbildung 5 veranschaulicht, anhand einer Bewertung der folgenden vier Aspekte abgeleitet: Reifegradanalyse, angestrebte Digitalisierungsstrategie, dem Technologieatlas und Digitalisierung des Arbeitssystems.

Die Anwendung von InAsPro erfordert interdisziplinäre Teams aus dem Unternehmen, um eine vollständige Bewertung des Unternehmens zu erhalten [42]. Insgesamt bietet das Transformationskonzept Unternehmen Hilfestellungen bei der Digitalisierung ihrer Arbeitssysteme, angefangen von der Bestimmung des Digitalisierungsgrads, bis hin zur operativen Umsetzung von Digitalisierungsmaßnahmen.

Industrie 4.0 Assessment

Das Reifegradmodell *Industrie 4.0 Assessment* wurde entwickelt, um Unternehmen, insbesondere KMUs, bei einer Selbsteinschätzung in Bezug auf *Industrie 4.0*, sowie bei der Identifikation und Priorisierung individueller Umsetzungsstrategien für den Einsatz von Techniken und Aspekten der *Industrie 4.0*, zu unterstützen.

Bei dem *Industrie 4.0 Assessment* handelt es sich um ein reifegradbasiertes Bewertungsmodell, mit fünf Abstufungen, für jedes der identifizierten *Industrie 4.0* Konzepte. Im Unterschied zu anderen Modellen werden hier anstatt einer allgemeinen Likert-Skala konkrete Maßnahmen oder technische Lösungen angeboten, was den Unternehmern die Überprüfung und Bewertung des aktuellen Stands ihrer Implementierung erleichtert.

Die Hauptdimensionen des Modells sind *Operation*, *Organization*, *Socio-Culture* und *Technology* und sie umfassen insgesamt 21 Unterkriterien [43].

3 KI in Industrie 5.0

Im vorherigen Abschnitt 2.1 wurde bereits die historische Entwicklung, die zur Entstehung der aktuellen Smart Factory geführt hat, skizziert. Hinsichtlich der Transformation zur vierten industriellen Revolution befinden sich zahlreiche Unternehmen noch in der Anfangsphase. In dieser Phase setzen sie intelligente Systeme und innovative Ansätze der *Industrie 4.0* ein, um die Produktivität und Qualität ihrer Produkte zu steigern. Innerhalb dieser Phase spielt jene Technologie eine entscheidende Rolle, welche Smart Manufacturing ermöglicht [44]. Eine zentrale Schlüsseltechnologie in diesem Kontext ist die KI, die im Verlauf dieses Kapitels näher erläutert wird. Die KI kann als eine bahnbrechende Technologie betrachtet werden, die die Grundlage für die fünfte industrielle Revolution gelegt hat. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden verschiedene Anwendungsbereiche der KI präsentiert, anhand derer die entscheidende Rolle der KI in der Produktion dargestellt wird.

Zusätzlich erwarten Unternehmen, dass maschinelles Lernen (ML) ihnen dabei hilft, die Produktqualität zu verbessern, die Flexibilität zu erhöhen, die Kosteneffizienz zu steigern und den Energieverbrauch, sowie die Umweltbelastung zu reduzieren. ML-Techniken haben bereits erfolgreich in der Industrie Fuß gefasst. Dennoch sind nach wie vor einige Herausforderungen zu bewältigen, darunter unzureichende Datengrundlagen und die mangelnde Zuverlässigkeit von ML-Methoden, die weiterhin erforscht werden müssen. Diese Methoden werden vor allem in der Produktion eingesetzt, um intelligente und autonom arbeitende Systeme zu entwickeln. Sie bieten erhebliches Potenzial entlang der gesamten Wertschöpfungskette, angefangen bei der Produktentwicklung über die Produktionsplanung bis hin zur Qualitätskontrolle und dem Vertrieb [45]. Im Kontext der Smart Factory zielt die KI darauf ab, nicht nur Daten zu verarbeiten, sondern auch prädiktive Fähigkeiten zu entwickeln. Sie werden beispielsweise eingesetzt, um Vorhersagen über Bewegungen von Robotern zu treffen, frühzeitig Systemausfälle zu erkennen, Warenmengen an die jeweilige Kundennachfrage anzupassen und Prozesse, durch die Berücksichtigung vorhersehbarer Faktoren, zu optimieren [26]. Im Folgenden werden verschiedene Anwendungsbereiche der KI im Kontext von Prozessen innerhalb der Smart Factory näher erläutert. Diese Bereiche umfassen Instandhaltung, Logistik, digitale Assistenzsysteme, Produktionssteuerung, sowie Robotik und Automatisierungstechnik.

3.1 Instandhaltung

Eine Studie von BearingPoint aus dem Jahr 2021 untersuchte eine Vielzahl an Unternehmen aus der DACH-Region, hauptsächlich aus den Bereichen Maschinenbau, Automobilindustrie, Chemie, Pharma und Elektronik über das Thema *Predictive Maintenance*. 75% der Unternehmen beschäftigten sich mit dem Thema und die Hälfte hatte solche Projekte bereits erfolgreich durchgeführt, wobei die Unternehmen im Durchschnitt die Stillstandszeiten um 18% und die Wartungs- und Servicekosten um 17% reduzieren konnten [46].

Mit Hilfe der Methoden der sogenannten Predictive Maintenance, der vorausschauenden Wartung, wird der voraussichtliche Zeitpunkt der nächsten Wartung, basierend auf dem Verschleiß beispielsweise von Werkzeugen und Betriebsmitteln, bestimmt [47]. Durch den Einsatz von Sensoren wird ein kontinuierliches Monitoring von Maschinenparametern ermöglicht, womit ein digitales Modell des aktuellen Maschinen- und Prozesszustands abgebildet wird. Mithilfe von ML und weiterer Algorithmen werden diese Daten analysiert, um Abweichungen beziehungsweise Muster zu identifizieren. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Fähigkeit zukünftige Komponentenausfälle dynamisch zu prognostizieren, selbst wenn nicht alle Szenarien im Vorfeld bekannt sind [29].

Beispielhaft für die Umsetzung dieses Konzeptes kann das von der Schaeffler-Gruppe entwickelte System betrachtet werden, welches für die Überwachung ihrer Maschinen eingesetzt wird. Sämtliche Parameter, wie Schmierzustand, Temperatur und Schwingungen in Lagern, werden mittels Sensoren in Echtzeit erfasst. Anhand dieser Daten wird die Erstellung eines digitalen Modells des Maschinenzustands ermöglicht. Des Weiteren kann beispielweise das Nachfüllen von Schmierstoff durch die Steuerung einer automatischen Wartungsmaßnahme durchgeführt werden. Sollten sich diese Maßnahmen als nicht wirksam herausstellen, werden weitere potentielle Fehler erfasst und dem zuständigen Techniker auf sein Smartphone übermittelt [47].

3.2 Logistik

Im Rahmen der Logistik wird KI nicht nur zur Optimierung der Effizienz in der Verwaltung der Materialien und Werkzeuge genutzt, sondern auch zur Steuerung autonomer Fahrzeuge im Produktionsprozess. Die KI-Technologien, welche sowohl in der Logistik als auch im Predictive Maintenance zum Einsatz kommen, zielen darauf ab, Materialfluss und Wartungsbedarf präziser zu steuern und somit die Effizienz zu steigern [48]. Mit Hilfe moderner Softwarelösungen können Unternehmen Informationen über Lagerbestände erhalten, wodurch die Planung optimiert werden kann. Darüber hinaus lassen sich mit Hilfe von KI Benachrichtigungssysteme für kritische Lagerbestände und Algorithmen, die Lagerdisponenten bei der Materialplanung unterstützen, realisieren [47].

Ein wesentlicher Fortschritt im Bereich des autonomen Fahrens in der Logistik hat das Fraunhofer-Institut mit der Entwicklung des sogenannten *LoadRunners* vorangetrieben. Hierbei handelt es sich um ein autonomes Transportfahrzeug, welches Dank 5G und moderner Technologie im Schwarm organisieren und Aufträge selbstständig annehmen und bearbeiten

kann. Das System ist in der Lage Lasten gemeinsam zu transportieren und mit hohen Geschwindigkeiten zu sortieren. Da dieses System auf einem bereits umgesetzten Drohnenschwarm-Konzept basiert, kommt keine zentrale Steuerung zum Einsatz. Des Weiteren zeichnet sich der LoadRunner bei der Freiheit der Bewegungsrichtung aus, sodass er sich in jede Richtung drehen kann, ohne extra rangieren zu müssen [49].

Ein weiteres Beispiel hinsichtlich der Optimierung der Kommissionierung durch KI ist das Amazon Unternehmen. Amazon nutzt für autonom smarte Anwendungen, wie der automatischen Sortierung von Paketen, KI-gesteuerte Systeme wie *Robin* und für das Laden von Paketen kollaborative Roboter wie *Sparrow*. Somit sorgen diese beiden Technologien für die Steigerung der Effizienz in der Kommissionierung und Sortierung in Lagern [50].

3.3 Qualitätskontrolle

Im Qualitätsmanagement werden zunehmend automatisierte Bildanalyse-Systeme, welche mit 2D- und 3D-Kameras ausgestattet sind, eingesetzt, um Produkte auf Qualitätsmerkmale und auf geometrische Eigenschaften zu prüfen [29]. Werden beim DL geeignete Eingangsdaten verwendet, ist das System in der Lage, Anomalien zu erkennen, Ursachen für Schwankungen in der Qualität zu identifizieren und potentielle zukünftige Qualitätsprobleme zu antizipieren. Des Weiteren können diese Informationen an weitere Systeme in der Prozesskette übermittelt werden, welche daraufhin Einstellungen verändern, um die Qualitätsanforderungen zu erfüllen [29], [47].

Mit Hilfe der CNNs können sowohl die optische Inspektion von Werkstücken als auch nicht-optische Qualitätssicherung, wie beispielsweise eine Temperaturprüfung anhand von Infrarotbildern, durchgeführt werden. Intel zum Beispiel setzt DL ein, um Fehler in Computerchips zu erkennen und diese zu klassifizieren, wodurch mögliche Produktionsprobleme identifiziert werden können [51]. Ein weiteres Beispiel für den Einsatz der KI in der Qualitätskontrolle ist die von Gestalt Robotics entwickelte KI-Plattform für Oberflächenüberwachung mittels maschinellen Lernens. Die für das ML entscheidenden Daten werden hierbei ebenfalls mittels 2D- und 3D-Kameras bereit gestellt, um die Objekte auf Schäden oder geometrische Abweichungen zu prüfen [47].

Es lässt sich festhalten, dass es Unternehmen mithilfe von KI gelingt, den manuellen Aufwand in der Qualitätskontrolle zu reduzieren, was wiederum eine umfassendere und detailliertere Prüfung ohne steigende Kosten ermöglicht [52].

3.4 Digitale Assistenzsysteme

Assistenzsysteme helfen den Mitarbeitenden in der Produktion steigende Anforderungen an Flexibilität und Effizienz zu bewältigen, indem sie relevante Informationen im richtigen Kontext bereitstellen. Diese Systeme sind nicht nur in der Lage die Effizienz mittels Planungsalgorithmen und Bilderkennung zu optimieren, sondern sogar den Stresslevel von Mitarbeitern zu messen [47]. Im Gegensatz zu herkömmlichen, starren Systemen lernen diese Systeme durch die Interaktion mit den Mitarbeitern und passen sich dabei deren Qualifikationen an.

Darüber hinaus erlauben sie den Mitarbeitenden, eine handfreie Steuerung durch Gesten- und Spracherkennung [29].

Der Möbelhersteller Homag nutzt das Assistenzsystem *Intelliguide*, welches mit Hilfe von ML-Methoden und einer Kamera beim effizienten Aufbau von Möbeln unterstützt. In Verbindung mit einer Säge werden Holzplatten nach einem Schnittplan zersägt, während das Assistenzsystem den Prozess anhand der Kamera überwacht. Die integrierte Intelligenz erkennt Fehler, etwa falsch eingelegte Platten oder fehlerhaft positionierte Werkstücke. Der Algorithmus des Systems wurde durch Beispieldaten trainiert und nutzt ein neuronales Netzwerk zur Werkstückerkennung. Insgesamt wird dadurch die Gesamtanlageneffektivität gesteigert, der Ausschuss reduziert und die Mitarbeiterarbeit erleichtert [28].

Ein weiteres Praxisbeispiel hinsichtlich digitaler Assistenzsysteme ist das von der Firma TRUMPF GmbH + Co. KG entwickelte Assistenzsystem für die Blechbearbeitung. Es hilft Mitarbeitenden bei der Sortierung ausgeschnittener Teile aus großen Metallblechen. Die Kamera erkennt das zuletzt entnommene Teil, nimmt einen Abgleich mit den entsprechenden Projektdaten vor und informiert anschließend den Mitarbeiter über den korrekten Ablageort des Bauteils [47].

3.5 Produktionssteuerung

Die Prozesse einer vollautomatischen Industrieanlage bringen zahlreiche Herausforderungen mit sich, unter denen die Steuerung der Produktionsparameter besonders hervorsticht [51]. Die effiziente Steuerung von Produktionsprozessen ist entscheidend für Qualität, Termintreue und Kapazitätsauslastung. Sind die Prozesse und der Auftragsfortschritt transparent gestaltet, können voraussichtliche Wartungen und Störungen frühzeitig erkannt werden [29]. Mithilfe der KI können sowohl aktuelle Daten, als auch die von bereits durchlaufenen Produktionsprozessen, miteinander verarbeitet werden. Dieser erweiterte Datenpool kann zu verbesserten Prozessergebnissen führen, wobei nachfolgende Prozesse bei qualitätsrelevanten Abweichungen angepasst werden können. Darüber hinaus agieren die trainierten neuronalen Netze effektiv in komplexen Systemen, um Zusammenhänge, welche nicht von Menschen feststellbar sind, aufzudecken. Somit können beispielsweise die Ursachen für wiederkehrende Engpässe in der Produktion identifiziert werden [47].

Ein Praxisbeispiel hinsichtlich der Optimierung der Produktionssteuerung ist die von LANA Labs entwickelte Web-Plattform, welche die Geschäftsprozesse mithilfe einer KI automatisch analysiert und somit eine schnelle Fehler-/Risiko-Analyse und demnach eine Prozessoptimierung ermöglicht. Anhand dieser Software werden die Prozesse automatisch visualisiert, Ist- und Soll-Zustände abgeglichen und eine Fehler-Ursachenanalyse, basierend auf Machine-Learning-Methoden, durchgeführt. Anwender können die Dashboards individualisiert in andere IT-Systeme wie SAP oder Oracle integrieren und somit die Produktionsprozesse effizient gestalten [53].

3.6 Robotik

Für die Integration von Robotern in menschliche Arbeitsbereiche werden flexible Wahrnehmungs- und Interaktionsfähigkeiten benötigt. KI, insbesondere neuronale Netze, können dabei genutzt werden, um die Programmierung von Robotern derart komplexen Umgebungen anzupassen. Die Anwendung von ML ermöglicht robotischen Systemen selbstlernend auf ihre Umwelt zu reagieren.

Ein Beispiel hierfür ist der Versuch, einem Roboterarm menschliche Bewegungen für eine fließende Übergabe eines Werkstückes von Mensch zu Roboter beizubringen. Für die Erlernung der Bewegung werden rekurrente neuronale Netze mit LSTM-Zellen verwendet. Eine optimierte Bewegungsplanung und die Vermeidung von Kollisionen kann durch Reinforcement Learning hergestellt werden.

Ein weiteres Beispiel ist das neuronale Netzwerk namens ClearanceNet, welches mit dem Ziel eingeführt wurde, eine Bewegungsplanung, basierend auf Kollisionsvermeidung mit Objekten, zu erstellen. Dies soll unter anderem potentiell fatale Unfälle von Fertigungsrobotern verhindern, welche sowohl Sachschäden in hohen Summen als auch schwere Verletzungen bei Mitarbeitenden nach sich ziehen können. Das Netzwerk erzielt bereits eine hohe Genauigkeit in physikalischen Simulationen, doch sind für den sicheren Einsatz in einer Umgebung mit Menschen weitere Verbesserungen notwendig. Die Entwickler planen daher Updates zur Erkennung von Personen und zur Erhöhung der Sicherheit [51].

Ein führender Anbieter in diesem Bereich ist das dänische Unternehmen Universal Robots, welches ML und Reinforcement Learning einsetzt, um die Programmierung zu vereinfachen und den Robotern neue Fähigkeiten beizubringen. Durch ML werden selbstlernende Systeme ermöglicht, wodurch Roboter vielseitiger werden und sich ihre Einsatzgebiete erweitern. Universal Robots setzt darüber hinaus Reinforcement Learning ein, um Roboter eigenständig Aufgaben lösen zu lassen, wie das Einstecken eines Kabels in die Steckdose.

Qualitätskontrolle anhand Bilderkennung ist, wie bereits beschrieben, ein weiterer Einsatz von ML. Im Bereich der Robotik agieren die Roboter als Schnittstellen, die die Funktionen von Greifern oder Kameras unterstützen. Durch den Einsatz von Reinforcement Learning können Taktzeiten reduziert und Energiekosten gesenkt werden [28].

Die Augmented Reality (AR) bietet das Potential, Produktionsprozesse durch die Übertragung von digitalen Informationen auf die physische Umwelt zu optimieren. Mithilfe einer direkten Einblendung von Arbeitsanweisungen können Arbeitsabläufe effizienter und fehlerfreier gestaltet werden. Darüber hinaus ermöglicht AR beispielsweise eine interaktive Schulung von Mitarbeitenden, wodurch die Einarbeitungszeit reduziert und die Produktivität gesteigert wird [54].

Ebenso bietet Virtual Reality (VR), die als Darstellung und Wahrnehmung einer durch den Computer erstellten interaktiven virtuellen Umgebung definiert wird, die Fähigkeit, über die bloße Anzeige von CAD-Bauteilen hinaus zu gehen und komplette Umgebungen virtuell zu visualisieren [55].

4 Diskussion

In der nachfolgenden Diskussion werden zunächst wesentliche Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen *Industrie 4.0* und *Industrie 5.0* dargestellt. Der Begriff *Industrie 5.0* wird definiert und die Diskussion und Kritikpunkte um dieses Thema werden aufgeführt. Im Anschluss wird die Auswahl des Reifegradmodells *InAsPro* und der Vergleich zu den restlichen bereits vorgestellten Reifegradmodellen beschrieben. Im anschließenden Unterkapitel wird die Durchführung des Modells am Institut für Produktionstechnik und die dabei angewendeten Methoden illustriert. Daraufhin folgt die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse, sowie der vom Modell erstellten Analyse und den angebotenen Handlungsoptionen. Abschließend folgt eine kritische Betrachtung und Nennung der Limitationen der vorliegenden Arbeit.

4.1 Definition von Industrie 5.0 und Unterschiede zu Industrie 4.0

Trotz einer bereits laufenden Anwendung von *Industrie 4.0* gibt es nach wie vor Herausforderungen bei der Implementierung dieser, beispielsweise unklare Vorteile, hohe Investitionen und fehlende einheitliche Definitionen [56]. Im Jahr 2021 veröffentlichte die Europäische Kommission ein Whitepaper zu *Industrie 5.0*, welches eine potentielle neue industrielle Revolution signalisiert und diesen Begriff wie in Abbildung 9 grafisch dargestellt, folgendermaßen definiert [57]:

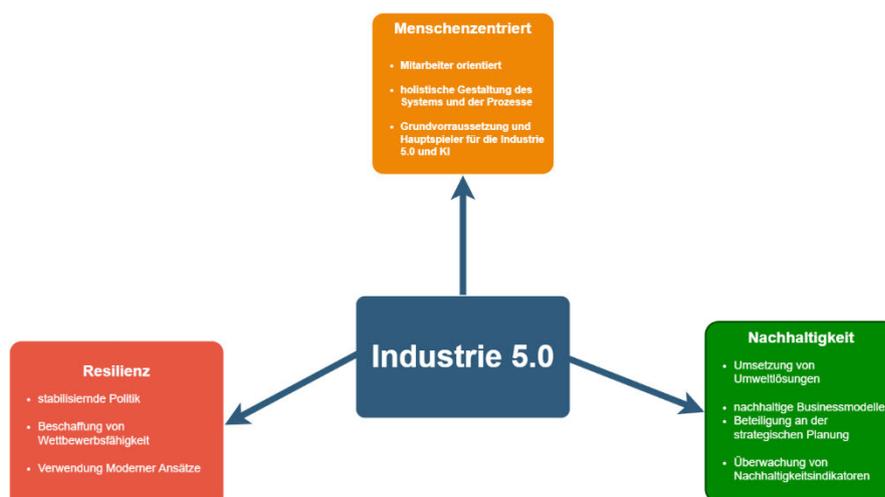


Abbildung 6 Relevante Aspekte der Industrie 5.0

Industrie 5.0 ist ein neuartiges Konzept, das über die reine Fokussierung auf Gewinn hinausgeht und auf den Aspekten der **Menschlichkeit**, **Nachhaltigkeit** und **Resilienz** beruht. Das bedeutet, die Bedürfnisse und Rechte der Arbeitnehmer:innen in den Mittelpunkt der Produktion zu stellen und Technologien so zu nutzen, dass sie den Menschen den meisten Nutzen bringen. Zusätzlich besteht der Anspruch innerhalb der Industrie nachhaltige, kreisförmige Prozesse zu entwickeln, die verwendeten Ressourcen wiederzuverwenden und die Umweltauswirkungen zu minimieren. Der Aspekt der Resilienz bezieht sich auf die Fähigkeit der Industrie, Krisen besser bewältigen und kritische Infrastruktur unterstützen zu können. *Industrie 5.0* zielt auf einen holistischen Ansatz ab, in der die Industrie nicht nur Arbeitsplätze und Wachstum anbietet, sondern darüber hinaus als autarker Anbieter von Wohlstand fungiert. In diesem Denken wird ein Fokus auf die Berücksichtigung der Grenzen des Planeten und das Wohlergehen der Arbeitnehmer:innen gelegt [57].

Mensch-Technik-Organisation (MTO)

Bei dem MTO-Konzept handelt es sich um einen festen Bestandteil der Arbeitspsychologie und betrachtet das Zusammenspiel von Menschen, technischen Hilfsmitteln und organisatorischen Strukturen in Unternehmen. Es wurde entwickelt, um eine ganzheitliche Sicht von Unternehmen zu fördern und die Wechselwirkungen zwischen den drei Elementen *Mensch*, *Technik* und *Organisation* zu berücksichtigen. Die Wirksamkeit des MTO-Konzepts liegt in seiner Fähigkeit begründet, auf die Koordination und Zusammenarbeit in Arbeitsprozessen, sowie der Implementierung neuer Techniken förderlich einwirken zu können. Die Ziele des MTO-Konzepts sind vielfältig und hängen von der spezifischen Anwendung ab. Im Allgemeinen zielt es darauf ab, das Zusammenspiel von Mensch, Technik und Organisation zu optimieren, um die Effizienz und Effektivität von Arbeitsprozessen zu verbessern. Darüber hinaus kann es dazu beitragen, ein vertieftes Wissen über betriebliche Arbeitsorganisation und -abläufe zu erlangen.

Insgesamt lässt sich sagen, dass das MTO-Konzept ein wertvolles Werkzeug für Unternehmen ist, das bei der Optimierung von Arbeitsprozessen und der Entwicklung eines besseren Verständnisses für die Organisationsstrukturen hilfreich sein kann [59, 60].

Im Rahmen des MTO-Ansatzes im Zusammenhang mit KI spielt die Akzeptanz der Menschen dieser Technologie gegenüber eine wichtige Rolle. Die Meinungsmonitor Künstliche Intelligenz Studie (MeMo:KI) zeigt eine zunehmende Akzeptanz von KI, insbesondere in der medizinischen Corona-Forschung. Allerdings sinkt die Zustimmung, wenn KI in die Privatsphäre eindringt oder existenzielle Fragen klären soll [60]. Bei dem vermehrten Einsatz von KI in Arbeitsprozessen ist daher zu bedenken, wie eine Akzeptanz in der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine hergestellt werden kann.

Die Frage, ob es sich bei der *Industrie 5.0* um eine eigenständige industrielle Revolution, oder immer noch um die vierte industrielle Entwicklungsphase handelt, ist in der aktuellen Literatur noch umstritten. Argumentiert wird beispielsweise mit der Tatsache, dass die *Industrie 5.0* auf der Technologie der *Industrie 4.0* aufbaut. Andererseits wird betont, dass die *Industrie 5.0* einen deutlich stärkeren Fokus auf die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine, eine individuelle Produktion, Nachhaltigkeit und verbesserte Arbeitsbedingungen legt.

Dadurch habe sie das Potential, revolutionäre Fortschritte in der Arbeitsgestaltung zu bewirken [57].

Günther, Prell und Reiff-Stephan von der technischen Hochschule Wildau vertreten die Meinung, dass die *Industrie 5.0* eine deutliche Abkehr von der Technologiezentrierung der *Industrie 4.0* darstellt. Sie betonen die Humanisierung der Industrie, bei der der Mensch als zentrale Ressource im Produktionsprozess angesehen wird. Dies beinhaltet eine stärkere Betonung von Aspekten wie Beteiligung von Mitarbeitenden, Nachhaltigkeit und Resilienz. Günther et al. weisen darauf hin, dass die Herausbildung der *Industrie 5.0* weniger auf technologischen Hürden als auf der bisher vernachlässigten Interaktion zwischen Mensch und Maschine basiert [61].

Kim Phuc Tran ergänzt entsprechend, dass die zunehmende Bedeutung die das Paradigma der *Industrie 5.0* im Kontext der modernen Produktionssysteme gewinnt, durch die Schwerpunktsetzung auf eine Kooperation zwischen Mensch und Maschine begründet ist. Die *Industrie 4.0* löste mit der Einführung fortschrittlicher Konzepte wie KI, Industrial Internet of Things (IIoT), Cyber-Physical Systems (CPS), Big Data und Cloud-Computing eine Revolution in der Fertigungstechnologie aus. Dennoch unterliegt sie bestimmten Limitationen, darunter die Vernachlässigung sozioökonomischer und umweltbezogener Aspekte wie Arbeitsplatzverluste und Umweltprobleme. Kim Phuc Tran behauptet, dass die *Industrie 5.0* eine Antwort auf diese Einschränkungen bietet, indem sie eine Optimierung der Interaktionen zwischen Menschen und Maschinen anstrebt. In dieser fortgeschrittenen Industrielandschaft dienen Technologien nicht als Ersatz für menschliche Arbeitskraft, sondern als hilfreiche Werkzeuge. Eine Kernkomponente in Tran's Auslegung der *Industrie 5.0* ist die Augmented Intelligence (Aul), die eine Verschmelzung der kognitiven Fähigkeiten von KI und menschlicher Intelligenz (HI) darstellt. In dieser Konstellation agieren KI und Aul als zentrale kognitive Einheit, die den Fertigungsprozess umfassend steuert, überwacht und optimiert, und somit als entscheidende Triebkraft für die Realisierung der Vision der *Industrie 5.0* fungiert [51].

Die *Industrie 5.0* soll also einen tiefgreifenden Entwicklungsschritt der *Industrie 4.0* markieren, dessen Fokussierung auf die bestmögliche Zusammenarbeit von Mensch und Maschine, sowie sozioökonomischen und umweltbezogenen Aspekten zu einem Alleinstellungsmerkmal führen.

In Abweichung der bisherigen Diskussion zum Thema *Industrie 5.0* argumentieren Bendig et al., dass der derzeitige Diskurs um *Industrie 5.0* nicht zwangsläufig auf eine bevorstehende industrielle Revolution hindeutet. Zum einen betonen sie, dass die Technologien, die als Grundlage für die *Industrie 5.0* dienen, keine neuen Paradigmen darstellen, sondern auf bereits etablierten Technologien der *Industrie 4.0* basieren. Zu diesen zählen das IoT, Additive Fertigung sowie die KI. Eine revolutionäre Veränderung, wie sie in früheren industriellen Revolutionen durch neue Technologien angestoßen wurde, sei demnach nicht feststellbar [56]. Des Weiteren argumentieren Bendig et al., dass die zentralen Elemente von *Industrie 5.0* — Fokussierung auf Mensch, Nachhaltigkeit und Resilienz — bereits ausführlich im Kontext der *Industrie 4.0* erforscht wurden. Diese Aspekte stellen somit ebenso keine radikal neuen Konzepte dar, sondern sind eher als eine Weiterentwicklung oder Vertiefung der bereits existierenden Forschungsansätze in der *Industrie 4.0* zu betrachten [56].

Eine weitere dem Konzept von *Industrie 5.0* widersprechende Perspektive wird von Professor Liggesmeyer vertreten, indem er die verwendete Terminologie in seinem Artikel "*Industrie 5.0 – ein begrifflicher Nonsens*" scharf kritisiert. Liggesmeyer argumentiert, dass die Bezeichnung *Industrie 5.0* nicht nur irreführend ist, sondern auch den authentischen Fortschritt im Kontext der *Industrie 4.0* überschattet. Dabei stellt er klar, dass *Industrie 4.0* weit mehr als reine Digitalisierung ist. Das Hauptziel besteht vielmehr darin, Massenproduktion durch individuell angefertigte Produkte zu ersetzen, die zu vergleichbaren Kosten produziert werden können. Liggesmeyer warnt vor den potentiellen negativen Auswirkungen einer vorschnellen Verwendung des Begriffs *Industrie 5.0*, insbesondere da in der Ära der *Industrie 4.0* noch zahlreiche ungelöste Herausforderungen bestehen. Darüber hinaus betont er die Möglichkeiten, die bereits durch *Industrie 4.0* in Bezug auf Nachhaltigkeit und Klimaschutz verwirklicht werden können [62]. Die inflationäre Verwendung des Begriffs *Industrie 5.0* könnte also sowohl vorschnell als auch kontraproduktiv sein, da er von dem vorhandenen und noch nicht ausgeschöpften Potential der *Industrie 4.0* ablenkt.

Um die Debatte *Industrie 5.0* versus *Industrie 4.0* herrscht ein differenzierter Diskurs, der von Optimismus und chancenorientiertem Denken einerseits und Skeptizismus andererseits geprägt ist. Insgesamt gibt es jedoch Einigkeit darüber, dass der Mensch mehr denn je im Mittelpunkt der industriellen Entwicklungen steht und diese mit zunehmender Geschwindigkeit voranschreiten. Dabei ist es jedoch weniger relevant, sich auf den Namen der aktuellen Phase der Industrialisierung zu fokussieren, als vielmehr auf die Identifizierung und Bewältigung der bestehenden Herausforderungen.

Im weiteren Verlauf werden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Begriffe detailliert dargestellt, doch es lässt sich bereits sagen, dass die vier Hauptthemen **Mensch**, **Nachhaltigkeit**, **Resilienz** und **KI-Technologie** im Fokus liegen müssen. Zusätzlich zu den oben bereits beschriebenen Erkenntnissen lassen sich aus einer Studie aus dem Jahr 2022, welche im Journal *Applied System Innovation* veröffentlicht wurde, Faktoren ausmachen, die die Unterschiede und Gemeinsamkeiten von *Industrie 4.0* und *Industrie 5.0* genauer beleuchten. In der untenstehenden Abbildung 7 sind die einzelnen Aspekte in tabellarischer Form dargestellt.

Demnach handelt es sich bei der industriellen Revolution um einen Prozess der kontinuierlichen Weiterentwicklung, welcher mit der Mechanisierung seinen Anfang genommen und über Massenproduktion, hin zur Automatisierung und schließlich zur Digitalisierung geführt hat. In dieser Entwicklung stellen *Industrie 4.0* und *Industrie 5.0* keine separaten Entwicklungsstadien dar, sondern sind vielmehr als aufeinander aufbauende Phasen zu betrachten. Wie bereits erwähnt teilen sich die beiden Epochen eine Vielzahl an Schlüsseltechnologien und Konzepten, wie Cloud Computing, IoT, Big Data, Cyber-Sicherheit und Digitalisierung. Diese technologischen Grundlagen sind sowohl für die *Industrie 4.0* als auch für die *Industrie 5.0* von zentraler Bedeutung und tragen maßgeblich zur Effizienzsteigerung und Optimierung der Produktionsprozesse bei. Die beiden Phasen unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihrer übergeordneten Ziele und in der Berücksichtigung menschlicher und ökologischer Aspekte. Während die *Industrie 4.0* primär auf Smart Manufacturing und Optimierung der Prozesse abzielt, legt die *Industrie 5.0* einen verstärkten Fokus auf Nachhaltigkeit, Umweltverantwortung und die Einbeziehung der menschlichen Dimension in die Produktion. Damit bindet

Industrie 5.0 einen ethischen Rahmen für den Technologieeinsatz ein, der menschliche Werte und Bedürfnisse in den Vordergrund stellt. In der Betrachtungsweise des Menschen innerhalb des Systems liegt der nächste Unterschied zwischen den beiden Entwicklungsstadien. Die *Industrie 4.0* legt ihren Fokus auf die menschliche Verlässlichkeit und eine reibungslose Interaktion zwischen Mensch und Maschine, beispielsweise in Form monotoner, sich immer wiederholender Bewegungen. Die *Industrie 5.0* betrachtet den Menschen hingegen aus einer ganzheitlichen sozio-technischen Perspektive und legt Wert auf die Förderung einer menschenzentrierten Arbeitsumgebung, welche es den Mitarbeiter:innen ermöglicht, ihr volles Potential auszuschöpfen. In Bezug auf die Organisation der Produktionssysteme wird in der *Industrie 4.0* Wert auf integrierte Wertschöpfungsketten und eine Echtzeit-Datenüberwachung gelegt, wohingegen *Industrie 5.0* den ethischen Einsatz von Technologie, soziozentrische, resiliente Entscheidungen und die Berücksichtigung ökologischer Aspekte als entscheidend erachtet. Während in der *Industrie 4.0* wirtschaftliche Systeme und Abfallminimierung gefördert wird, konzentriert sich die *Industrie 5.0* auf eine nachhaltige Produktion, bei der durch den Einsatz erneuerbarer Energiequellen und energieeffizienter Technologien eine CO₂-neutrale Produktion realisiert werden soll.

Es lässt sich festhalten, dass sich *Industrie 4.0* und *Industrie 5.0* eine gemeinsame technologische Basis teilen, sich jedoch in ihren Zielen und im Umgang mit menschlichen und ökologischen Faktoren unterscheiden. *Industrie 5.0* baut auf den Errungenschaften der *Industrie 4.0* auf, verfolgt allerdings einen ethischen, menschenzentrierten Ansatz, der auf eine nachhaltigere und sozial verantwortungsvollere Produktion abzielt [63].

	Industrie 4.0	Industrie 5.0
Ziele	Smart Manufacturing, Optimierung	Nachhaltigkeit, Umweltverantwortung, Menschenzentriert, Soziale Vorteile, Menschliche Werte und Ethik
Mensch als Faktor	Menschliche Verlässlichkeit, Interaktion zwischen Mensch und Computer, Wiederholte Bewegungen	Sicherheit und Management der Mitarbeiter, Lernen/Schulung für Mitarbeiter, Datenschutz und Mitarbeiterrechte
Organisation	Integrierte Kette, Echtzeit-Datenüberwachung	Ethischer Einsatz von Technologie, Soziozentrische Entscheidungen, Geopolitische Resilienz
Technologien & Konzepte	Cloud Computing, IoT, Big Data, Cyber Security, Digitalisierung, Automation, CPS, Horizontale und vertikale Integration, Additive Fertigung	Cloud Computing, IoT, Big Data, Cyber Security, Digitalisierung, Automation, CPS, Mensch-Maschine-Interaktion, Mehrsprachige Sprach- und Gestenerkennung, Tracking-Technologien, Kollaborative Roboter, Bioinspirierte Sicherheitseinrichtungen, Entscheidungsunterstützungssysteme, Intelligente Netze, Prädiktive Wartung, Augmented Reality, Mixed Reality, KI
Auswirkung auf Umwelt	Wirtschaftliche Systeme, Abfallvermeidung, Erhöhter Material- und Energieverbrauch, Verlängerter Produktlebenszyklus	Nachhaltige Produktion, Abfallvermeidung, erneuerbare Energien, energieeffiziente Technologien, CO ₂ -Neutralität

Abbildung 7 Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Industrie 4.0 und Industrie 5.0 in Anlehnung an [61]

4.2 Auswahl des Reifegradmodells

Der folgende Abschnitt fokussiert sich auf die Evaluierung der fünf in Kapitel 2.3 bereits vorgestellten RM im Kontext von *Industrie 5.0*. Eine entsprechende Bewertungsmatrix ist in Abbildung 20 im Anhang zu finden und ermöglicht einen detaillierten Vergleich der verschiedenen Modelle. Bei den untersuchten Reifegradmodellen handelt es sich um den *Industrie 4.0 Maturity Index (Acatech)*, *Industrie 4.0 Readiness (IMPULS)*, *Quick-Check Industrie 4.0 (INLUMIA)*, *Industrie 4.0 Assessment* sowie *InAsPro*.

In diesem Kapitel werden zentrale Fragen bezüglich der Anwendbarkeit der bisherigen RM für *Industrie 4.0* im Kontext des digitalen Transformationsprozesses von *Industrie 5.0* sowie deren Flexibilität hinsichtlich neuer Anforderungen gestellt. Die Grundwerte der Bewertungsmatrix stammen aus den Quellen [38] und [58], wurden jedoch durch zusätzliche Recherchen sowie weitere Informationen, die in der vorliegenden Arbeit präsentiert wurden ergänzt.

Die abschließende Modellevaluation basiert auf sechs Hauptkategorien. Im Hinblick auf die Gewichtung wird das Kriterium *Mensch* mit 20% in die Gesamtbewertung einbezogen, während die übrigen Kriterien eine gleichverteilte Gewichtung von jeweils 16% erhalten. Bei den sechs Hauptkategorien handelt es sich um: *Mensch*, *Technik*, *Organisation*, *Nachhaltigkeit*, *Resilienz* und *Anwendbarkeit*. Insgesamt gibt es 30 Subkriterien unter diesen Hauptkategorien, anhand derer die einzelnen Aspekte auf einer Bewertungsskala von 0 bis 100 in Zehnerschritten beurteilt werden. Diese Bewertungen fließen schließlich in die Gesamtbewertung für jedes Hauptkriterium ein.

Mensch

Im Kontext der *Industrie 5.0* nimmt der Aspekt *Mensch* eine zentrale Position ein und repräsentiert demnach mit 20% des Gesamtergebnisses den größten Anteil. Dies impliziert, dass die genannte Höchstbewertung in diesem Bereich nur dann erzielt werden kann, sofern alle zugehörigen Unterkategorien optimal - mit 100% - abschneiden. Beim Vergleich der Modelle *Industrie 4.0 Maturity Index (Acatech)* und *Quick-Check Industrie 4.0 INLUMIA* werden deutliche Differenzen in der Fokussierung des menschlichen Aspekts ersichtlich, wobei Teilergebnisse von 5% respektive 8% erzielt werden. Dies legt nahe, dass die Modelle den menschlichen Faktor in unterschiedlichem Maße priorisieren. Das Wohlergehen der Mitarbeiter:innen wird bei beiden Modellen weniger in Betracht gezogen. Bei der Untersuchung der Unterkategorien *Mitarbeiterqualifikation* und *Menschliche Werte und Ethik* zeigt das Modell *InAsPro* eine hohe Gewichtung dieser Aspekte mit Werten von 70% für die erste Unterkategorie und 40% für die Zweite. Im Gegensatz dazu hat der *Industrie 4.0 Maturity Index (Acatech)* lediglich eine Gewichtung von 20% in der *Mitarbeiterqualifikation* und 10% in *menschlichen Werten und Ethik*. Dies deutet auf eine höhere Priorisierung qualifizierter Mitarbeiter:innen im *InAsPro*-Modell und auf eine divergierende Priorisierung der einzelnen Unterkategorien zwischen den Modellen hin.

Technik

Die Integration technologischer Fortschritte ist für die Effizienz und Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen unerlässlich. Im *Industrie 4.0 Assessment*-Modell wird der technologische Aspekt mit einer Wertung von 10% am stärksten gewichtet, wobei ein besonderer Fokus auf Automatisierung/Digitalisierung und AR & VR liegt. Das weist darauf hin, dass dieses Modell die Implementierung und Nutzung der für *Industrie 5.0* benötigten Technologien priorisiert. Demgegenüber weist das *Quick-Check Industrie 4.0 INLUMIA*-Modell mit 4% die geringste Priorisierung technischer Aspekte, insbesondere von IoT sowie KI und ML, die jeweils nur mit 10% bewertet werden, auf. Dieses Modell legt demnach einen stärkeren Fokus auf andere Aspekte der *Industrie 5.0*, möglicherweise auf organisatorische oder menschliche Faktoren. Die unterschiedliche Schwerpunktsetzung der einzelnen Modelle sollte bei der Anwendung dieser berücksichtigt werden. Die Höchstbewertung für den technologischen Aspekt liegt in der für die vorliegende Arbeit verwendeten Bewertungsmatrix bei 16%.

Organisation

Die Kategorie *Organisation* spielt in allen betrachteten Modellen eine wesentliche Rolle. Die jeweiligen Unterkategorien, wie *Echtzeit-Datenüberwachung*, *Unternehmensstruktur*, *Kommunikation*, *Change-Management* und *Schulung/Weiterbildung*, welche in der für die vorliegende Arbeit erstellten Bewertungsmatrix Berücksichtigung finden, werden ebenfalls miteinbezogen. Mit einer Bewertung von 4% wird der organisatorische Aspekt bei *INLUMIA* am geringsten und bei *InAsPro*, mit 10% am meisten berücksichtigt. Das Reifegradmodell *InAsPro* fokussiert dabei besonders die Aspekte *Change-Management* und *Schulung/Weiterbildung*. Die geringste Bewertung erreichte das Modell *INLUMIA* mit jeweils 10% für die Aspekte *Kommunikation* und die *Echtzeit-Datenüberwachung*.

Nachhaltigkeit

Keines der Modelle fragt den Aspekt *Nachhaltigkeit* spezifisch ab. Die in der Bewertungsmatrix vergebenen Werte konnten durch die Berücksichtigung anderer Aspekte abgeleitet werden, die auch auf Nachhaltigkeit schließen lassen. Dabei handelt es sich um Unterkategorien wie *CO2-Neutralität*, *Ressourceneffizienz*, *erneuerbare Energien* und *Abfallvermeidung*, durch welche die Nachhaltigkeit eines Unternehmens indirekt erfasst werden kann.

Resilienz

Ähnlich wie bei der Kategorie *Nachhaltigkeit* wird auch auf *Resilienz* kaum eingegangen, jedoch können die für *Industrie 5.0* entscheidenden Kriterien hinsichtlich der *Resilienz* implizit erfasst werden. Nichtsdestotrotz weist das Reifegradmodell von *InAsPro* mit einer Bewertung von 9% auch auf dieser Ebene das beste Ergebnis auf.

Die Unterkategorien beziehen sich auf *soziale und ökologische Resilienz*, *organisationale Resilienz*, *technische Resilienz* und *Krisenmanagement*. *InAsPro* erzielt in allen Bereichen außer dem *Krisenmanagement* 60% und beweist damit eine ganzheitliche Betrachtung der *Industrie 5.0*. Das Reifegradmodell *INLUMIA* erreicht hingegen höchstens 20% bezüglich der genannten Aspekte und kann damit in Bezug auf Resilienz kaum Aussagen treffen.

Anwendbarkeit

Die Hauptkategorie *Anwendbarkeit* wurde in allen Modellen berücksichtigt und erreichte Werte zwischen 7% bei *Acatech* und 14% bei *InAsPro*. Die Unterkategorien beinhalten die *Ermittlung des Ist-/Soll-Zustands*, die *Ermittlung des Reifegradindex*, *Zugang/Tool* und *Modifizierbarkeit*. Das Modell *InAsPro* erreicht bei der *Ermittlung des Reifegradindex* den Höchstwert von 100%. Die geringste Bewertung erhielten die Modelle *INLUMIA* und *IMPULS* bei dem Aspekt der *Modifizierbarkeit* mit jeweils 10% und das Modell *Acatech* in Bezug auf *Zugang/Tool*, mit ebenfalls 10%.

Gesamt

Anhand der Gesamtbewertung, die im Anhang in Abbildung 20 zu sehen ist, wird widergespiegelt, wie gut die vorgestellten Modelle jeweils den Reifegrad eines Unternehmens in Bezug auf *Industrie 5.0* einschätzen können. Höhere Prozentwerte gehen hierbei mit einer höheren Reife einher.

Die höchste Gesamtbewertung erzielt dabei das Reifegradmodell *InAsPro*, mit einem Wert von 54%. Es deckt die Dimensionen *Mensch*, *Organisation*, *Resilienz* und *Anwendbarkeit* am umfassendsten ab und erzielt auch in den restlichen Dimensionen obere Durchschnittswerte. *InAsPro* scheint daher für eine ganzheitliche Bestimmung des Reifegrads in der *Industrie 5.0* am besten geeignet zu sein.

Mit einer Gesamtbewertung von 43% folgt das Reifegradmodell *Industrie 4.0 Assessment*. Auf der Dimension *Technik* kann dieses Modell am besten differenzieren, den *Nachhaltigkeitsaspekt* deckt es jedoch am schlechtesten ab. In den restlichen Bereichen erzielt es Durchschnittswerte. Es handelt sich bei diesem Modell ebenfalls um ein leistungsfähiges, wenn auch nicht besonders umfassendes Instrument zur Bewertung der *Industrie 5.0*-Reife. Das Modell *Industrie 4.0 Assessment* wurde unter besonderer Berücksichtigung der Faktoren *Produktion und operative Abläufe*, *organisatorische und managementorientierte Abläufe*, *Unternehmenskultur und mitarbeiterbezogene Themen*, sowie *Daten- und prozessorientierte Technologien* konzipiert [43]. Es deckt damit einen Großteil der in *Industrie 5.0* entscheidenden Merkmale zuverlässig ab.

Die Modelle *IMPULS* und *Acatech* decken die *Industrie 5.0* Merkmale mit einer Bewertung von 39%, respektive 35% beinahe gleich gut ab, jedoch ist das Modell von *Acatech* hinsichtlich der *Anwendbarkeit* vergleichsweise umständlich und beschränkt. Bis auf den Bereich *Nachhaltigkeit*, in dem das Modell von *Acatech* am besten abschneidet, erreichen beide Modelle Werte im oberen Durchschnittsbereich.

Den niedrigsten Wert erzielt das Modell *INLUMIA* mit einer Gesamtpunktzahl von 29%. Dieses erreicht sowohl auf den Dimensionen *Technik*, *Organisation* als auch *Resilienz* die geringste Bewertung und weist damit Verbesserungspotenzial auf.

Die im Anhang aufgeführte Bewertungsmatrix bietet eine klare Übersicht über die Stärken und Schwächen der einzelnen Modelle in Bezug auf die verschiedenen Subkriterien der *Industrie 5.0*. Dies bietet die Möglichkeit einer fundierten Entscheidung bezüglich der Auswahl des Reifegradmodells mit dem meisten Nutzen für die jeweilige Fragestellung.

Wie in der untenstehenden Abbildung 8 ersichtlich wird, ergibt die Analyse der verschiedenen RM, dass sowohl der Aspekt *Nachhaltigkeit* als auch *Resilienz* in den bisherigen

Bewertungsmaßstäben für *Industrie 4.0* kaum Berücksichtigung finden. Da diese Merkmale jedoch eine entscheidende Rolle in der *Industrie 5.0* spielen und auch bei der Implementierung von *Industrie 5.0*-Strategien bedacht werden sollten, ist eine bessere Repräsentation dieser Aspekte in den Bewertungsmaßstäben benötigt.

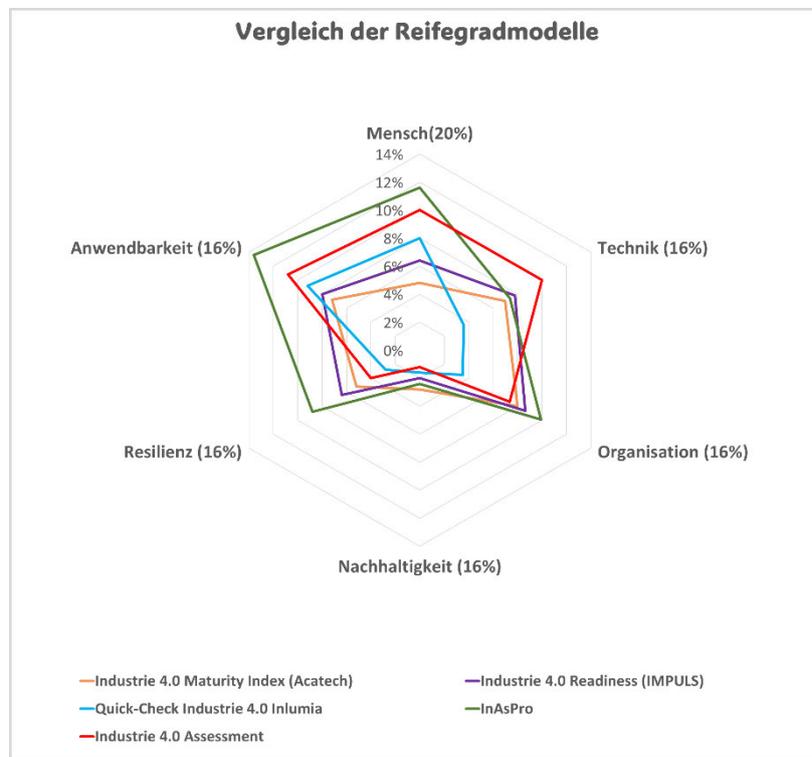


Abbildung 8 Übersicht Ergebnis vom Vergleich der Reifegradmodelle

Die folgenden Forschungsergebnisse einer Studie aus dem Jahr 2023, in welcher ein Review der existierenden RM vorgenommen wurde, bestätigen diese Beobachtung. Hein-Pensel et al. zeigen darin auf, dass bestehende RM hauptsächlich technische Aspekte berücksichtigen, und nur begrenzt menschenzentrierte Elemente wie die Bedürfnisse von Mitarbeiter:innen einschließen. Angesichts der Anforderungen von *Industrie 5.0* und der digitalen Transformation wird argumentiert, dass zukünftig menschenorientierte Ansätze fokussiert und durch die Implementierung partizipativer Elemente ergänzt werden sollten. Des Weiteren wird die Relevanz einer ganzheitlichen Betrachtung betont, in der sowohl technische und menschliche Bedürfnisse als auch alle beteiligten Interessengruppen und Prozesse berücksichtigt werden. Dies ist entscheidend, um nachhaltige digitale Systeme erfolgreich einzuführen, weshalb eine humanzentrierte Haltung als unerlässliche Grundvoraussetzung für die Umsetzung der digitalen Transformation angesehen wird [64].

Anhand des durchgeführten Vergleichs mit Hilfe der Bewertungsmatrix und der bisher diskutierten Erkenntnisse, wurde ersichtlich, dass sich das Modell *InAsPro* am besten für die Demonstration eines realen Fallbeispiels eignet. Durch eine solch praxisnahe Darstellung lässt sich die Tauglichkeit des Modells verifizieren.

Die durchgeführte Analyse unterstreicht die Notwendigkeit, RM regelmäßig zu überarbeiten und sie an die aktuellen Entwicklungsschritte der digitalen Transformation anzupassen,

insbesondere für KMUs im produzierenden Gewerbe. Ein ganzheitliches Modell, das technologische und menschliche Aspekte gleichermaßen berücksichtigt und die Beteiligung relevanter Stakeholder sicherstellt, wird als zentral für eine erfolgreiche und nachhaltige digitale Transformation betrachtet [64].

4.3 Vorstellung und Durchführung des ausgewählten Reifegradmodells

In Kapitel 2.3 wurde das ausgewählte Reifegradmodell bereits eingeführt. Im folgenden Abschnitt wird zunächst der Aufbau des Modells dargestellt, bevor auf die praktische Durchführung des Modells eingegangen wird.

Das Reifegradmodell *InAsPro* dient der Bestimmung des aktuellen Digitalisierungsgrads eines Unternehmens und ermöglicht diesem eine Eigenbewertung in den Bereichen *Strategie*, *Technologie*, *Organisation* und *Mensch* vorzunehmen. Zusätzlich unterstützt das Modell bei der Findung und Umsetzung von Lösungsstrategien, um eine unternehmensinterne Entwicklung zu fördern. Durch seine mehrstufige Struktur erfordert das durchgeführte Modell einen höheren Detaillierungsgrad und vermehrten Aufwand im Vergleich zu anderen Reifegradmodellen. Die Durchführung läuft dabei in vier Phasen ab.

Die Bewertung des Digitalisierungsgrads ist der erste Schritt des gesamten Prozederes und erfolgt anhand einer vierstufigen Ratingskala. Der ermittelte Reifegrad dient als Ausgangspunkt für zukünftige Digitalisierungsvorhaben.

In der zweiten Phase wird eine individuelle Digitalisierungsstrategie formuliert, welche die Ergebnisse des Reifegradmodells, bezüglich der jeweiligen Unternehmensstrategie, den Handlungsfeldern und der strategischen Optionen berücksichtigt.

In der dritten Phase wird der Technologieatlas eingeführt. Dieser bietet eine Auswahl an entsprechenden Digitalisierungslösungen an, die auf die jeweiligen technischen Ziele, das strategische Handlungsfeld, die PLZ-Phase und die Mitarbeiterziele angepasst sind. Zusätzlich wird auf praxisnahe Problemfelder eingegangen und etwaige Chancen und Risiken für Mitarbeiter und Unternehmen werden beleuchtet.

Bei der letzten Phase handelt es sich um die tatsächliche operative Realisierung der Digitalisierung des Arbeitssystems. Dies kann ein langfristiger Vorgang sein, der mithilfe des Modells, ganzheitlich begleitet wird. In Anlehnung an die Projektmanagementphasen, wird ein individualisierter fünfstufiger Prozess gestaltet, in dem konkrete Umsetzungsmaßnahmen empfohlen werden, welche die Dimensionen *Mensch*, *Technik* und *Organisation* mit einbeziehen. Anhand eines Follow-ups kann abschließend überprüft werden, welche Fortschritte erzielt wurden.

Durchführung des Reifegradmodells

Im Verlauf der vorliegenden Arbeit wird die Durchführung des Reifegradmodells *InAsPro* am Institut für Produktionstechnik (IPT) an der Hochschule für anerkannte Wissenschaft (HAW), demonstriert. Das IPT befasst sich intensiv mit der Produktionstechnik und deren Digitalisierung. Eine Untersuchung anhand des Modells *InAsPro* stellt einen umfassenden und

mehrstufigen Ansatz zur Bewertung der digitalen Reife einer Organisation dar, weshalb es sich für den Kontext des IPTs gut eignet. Der Ablauf erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der Institutsleitung, was die Relevanz und Akzeptanz der Ergebnisse innerhalb der Organisation erhöht.

Im Folgenden werden die vier oben beschriebenen Phasen des Modells in ihrer praktischen Umsetzung beschrieben. In der ersten Phase geht es um die Ermittlung des Reifegrads. Hierzu wurden zunächst allgemeine Fragen über das Unternehmen gestellt. Das IPT wird der Branche der Metallerzeugnisse und -verarbeitung zugeordnet, mit einer geschätzten Anzahl von weniger als 20 Mitarbeitern. Diese spezifischen Charakteristika wurden im *InAsPro*-Demonstrator erfasst und dienten als Grundlage für die weitere Analyse. Der Fragebogen des Modells ist in fünf Hauptkategorien unterteilt: *Unternehmen*, *Entwicklung*, *Fertigung*, *Montage* und *Aftersales*. Diese Kategorien umfassen insgesamt 163 Fragen, welche sich auf die Dimensionen *Technik (T)*, *Organisation (O)* und *Mensch (M)* beziehen. In der Kategorie "Unternehmen" wird zusätzlich die *Strategie (S)* berücksichtigt.

Nach der umfangreichen Datenerhebung wurde der entsprechende Reifegrad für das IPT ermittelt, was eine wichtige Grundlage für die weitere strategische Ausrichtung bietet. Im Anschluss an die Reifegradbestimmung wurden strategische Handlungsfelder identifiziert. Hiermit beginnt die zweite Phase des Modells. Für das IPT wurde die Unternehmensstrategie *Fokussierung* mit dem strategischen Handlungsfeld *Daten* und dem Ziel *Daten analysieren und auswerten* festgelegt.

Um diese Strategie weiter zu verfeinern, wurde eine SWOT-Analyse durchgeführt. Diese Untersuchung ermöglichte die Identifikation intrinsischer Stärken und Schwächen sowie extrinsischer Chancen und Risikofaktoren.

<p>Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> ↗ Mitarbeitereinsatz ↗ Mitarbeitermotivation ↗ umfangreicher Maschinenpark 	<p>Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> ↘ geringe Budgets ↘ fehlende Integrationsfähigkeit älterer Maschinen und Anlagen
<p>Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> ↗ Zusammenarbeit mit externen Partnern 	<p>Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> ↘ anhaltende, angespannte Haushaltssituation

Abbildung 9 SWOT-Analyse des IPT

Wie in Abbildung 9 ersichtlich wird, zählen in diesem Kontext die Mitarbeiterressourcen, die Arbeitsmotivation und der Zugang zu einem umfangreichen Maschinenpark zu den Stärken des IPT. Demgegenüber stellen begrenzte finanzielle Ressourcen und die mangelnde Integrationskapazität veralteter Maschinen und Anlagen die intrinsischen Schwächen dar. Die Kooperation mit externen Partnern wird als einzige Chance zur Überwindung der identifizierten Schwächen angesehen. Als signifikantes Risiko wird die kontinuierliche, angespannte Budgetsituation identifiziert.

Anschließend wurden die Elemente der SWOT-Analyse in Relation zueinander gesetzt, um strategische Handlungsoptionen zu formulieren. Zunächst werden für die Variablen *Aufwand* und *Nutzen* spezifische Indikatoren festgelegt, anhand derer die strategischen Optionen sowohl in verschiedenen Kategorien als auch innerhalb einer Gewichtungsstruktur evaluiert werden. In der kategorialen Analyse werden *Aufwand* und *Nutzen* mittels einer Skala, deren Ausprägungen von 1 für minimalen Aufwand bis 9 für maximalen Aufwand reichen, quantifiziert. In der Analyse werden die strategischen Optionen gemäß der Gewichtungsstruktur auf Grundlage der jeweiligen Einflusstärken der MTO-Elemente (Mensch, Technik, Organisation) gewichtet und aggregiert. Daraufhin wurden die strategischen Optionen nach Aufwand und Nutzen sowie nach deren Einfluss auf die MTO-Elemente gewichtet und visualisiert. Abbildung 10 stellt die kategoriale und Abbildung 11 die nach MTO-Gewichtete-Analyse dar:

KATEGORIEN	Aufwand <i>1: niedriger Aufwand, 9: hoher Aufwand</i>			Nutzen <i>1: niedriger Nutzen, 9: hoher Nutzen</i>		
	Strategische Optionen	Kosten für Anschaffungen von Hardware-/Softwarelösungen	Qualifizierung und Einsatz der Mitarbeitenden und Studierenden	Mittelwert	Imagegewinne für gleichbleibende Studierendenzahl	hohe Qualität der Lehre für eine moderne, digitale Produktion (studierendenzentriert)
a. gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit externen Partnern aufsetzen	5 v	6 v	5,5	8 v	8 v	8,0
b. stärkere Einbindung von Mitarbeitenden und Studierenden in Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit externen Partnern	5 v	6 v	5,5	8 v	8 v	8,0
c. bestehende Anlagen mit externer Unterstützung nachrüsten, modernisieren oder ggf. auch neue Anlagen beschaffen	7 v	8 v	7,5	8 v	9 v	8,5
d. Kreis möglicher Kooperationen erweitern, Stakeholder erkennen und analysieren	3 v	8 v	5,5	9 v	8 v	8,5
e. einfache, selbstentwickelte Lösungen verfolgen	3 v	4 v	3,5	6 v	6 v	6,0
f. transparente Kommunikation mit den Stakeholdern ausbauen	3 v	7 v	5,0	8 v	8 v	8,0
g. mehr Marketing zu externen Partnern (Industrieunternehmen, Öffentliche Hand)	3 v	7 v	5,0	8 v	8 v	8,0

Abbildung 10 Bewertung der strategischen Optionen nach Aufwand und Nutzen

GEWICHTUNGSSTRUKTUR	M Mitarbeiter, Führungskräfte, Unternehmenskultur, etc.	T Vernetzung, Benutzerfreundlichkeit, etc.	O Arbeitsorganisation, Informationsweitergabe, etc.	Summe
	Strategische Optionen			
	-- stark negativer Einfluss, - leicht negativer Einfluss, 0 neutral (negativer & positiver Einfluss), + leicht positiver Einfluss, ++ stark positiver Einfluss			
a. gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit externen Partnern aufsetzen	++ v	+ v	- v	2
b. stärkere Einbindung von Mitarbeitenden und Studierenden in Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit externen Partnern	++ v	+ v	- v	2
c. bestehende Anlagen mit externer Unterstützung nachrüsten, modernisieren oder ggf. auch neue Anlagen beschaffen	+ v	+ v	+ v	3
d. Kreis möglicher Kooperationen erweitern, Stakeholder erkennen und analysieren	+ v	0 v	- v	0
e. einfache, selbstentwickelte Lösungen verfolgen	+ v	0 v	+ v	2
f. transparente Kommunikation mit den Stakeholdern ausbauen	+ v	+ v	0 v	2
g. mehr Marketing zu externen Partnern (Industrieunternehmen, Öffentliche Hand)	+ v	0 v	0 v	1

Abbildung 11 Gewichtsstrukturmatrix der strategischen Optionen nach MTO

Nach der Auswahl einer strategischen Option wurde mit dem Institutsleiter abschließend ein messbares Ziel, mit realistischer Terminierung und Investitionsschätzung festgelegt, welches kontinuierlich auf der Plattform überwacht werden kann. Die Durchführung des Reifegradmodells *InAsPro* am IPT war im Rahmen der vorliegenden Arbeit hiermit vorerst beendet.

Wie oben beschrieben bietet das Modell jedoch noch zwei weitere Phasen an. In der dritten Phase sieht das Modell vor, anhand einer Auswahl an Digitalisierungslösungen, welche im Technologieatlas präsentiert werden, eine individuell angepasste Strategie zu identifizieren. Es bietet individualisierte Implementierungsvorschläge an, um die festgelegten Ziele frist- und qualitätsgetreu zu erreichen. Die empfohlene Umsetzung orientiert sich dabei an den Phasen des Projektmanagements und ist in die Phase der Analyse des Arbeitssystems, die Definitionsphase, Planungsphase, Realisierungsphase und die Abschlussphase gegliedert. Jeder dieser Projektmanagementphasen werden Umsetzungsbausteine zugeordnet, die nach den Dimensionen Mensch, Technologie und Organisation untergliedert sind.

Während des gesamten Verlaufs sollten der Ist- und Soll-Zustand kontinuierlich im Blick behalten werden. In der letzten Phase des Modells findet ein abschließender Vergleich statt, indem der ursprünglich ausgefüllte Fragebogen erneut durchgeführt wird. Die Reifegrade des Ausgangs- und des Optimierungszustands können so miteinander verglichen werden. Durch die kontinuierliche Überwachung und Anpassung der Strategien kann sich das Unternehmen solide und organisiert weiterentwickeln.

4.4 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

4.4.1 Reifegrad und strategische Optionen von IPT

Bei der Durchführung eines Reifegradmodells handelt es sich um einen langen Prozess, bei dem viele Personen aus verschiedenen Unternehmensebenen involviert sind, mit dem Ziel den aktuellen Stand der Digitalisierung im Unternehmen zu ermitteln und mögliche Verbesserungspotenziale aufzuzeigen. Im Folgenden werden zum einen die Ergebnisse des durchgeführten Modells *InAsPro* dargestellt und diskutiert, und zum anderen die Qualität des Modells hinsichtlich der *Industrie 5.0* bzw. 4.0 bewertet. Das Gesamtergebnis des Digitalisierungsgrades von IPT, sowie die einzelnen Ergebnisse der Dimensionsebenen, sind in Abbildung 12 dargestellt.



Abbildung 12 Gesamtergebnis des Digitalisierungsgrades von IPT der Dimensionsebenen

Das IPT erzielt insgesamt einen Reifegrad von 2,2, welcher vom Digi-Planer der Anfängerstufe (1,5 - 2,4) zugeordnet wird. Die Dimensionsebenen *Strategie*, *Technologie* und *Organisation* bewegen sich im gleichen Wertebereich, die *Mensch*-Ebene erzielt jedoch im Vergleich zu den anderen Dimensionsebenen ein um 12% besseres Ergebnis. Wie in Abbildung 13 zu sehen ist, weisen die Gesamtergebnisse aus den einzelnen PLZ weniger Varianz auf und liegen hauptsächlich über dem Wert 2. Das in der Abbildung gezeigte Diagramm dient als Übersicht der jeweiligen Reifegrade pro PLZ-Phase. Der höchste Wert wird der *Montage* mit 2,5 zugeordnet, wohingegen sich die *Fertigung* und die *Aftersales* mit einem Reifegrad von 1,9 die letzte Stelle teilen.

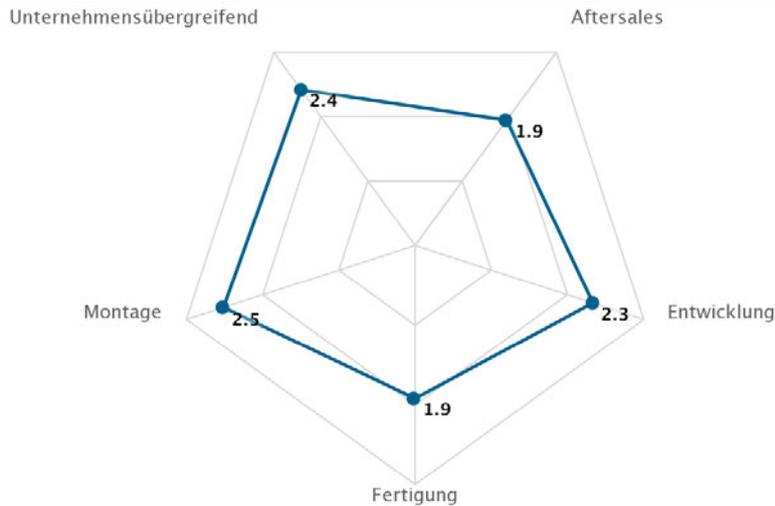


Abbildung 13 Darstellung der Teilergebnisse der Produktlebenszyklusphasen

Im Folgenden werden die Einzelbewertungen je PLZ-Phase näher betrachtet. Es gibt insgesamt vier Phasen mit dazugehörigen Teilaspekten, die im Detail analysiert werden.

Entwicklung

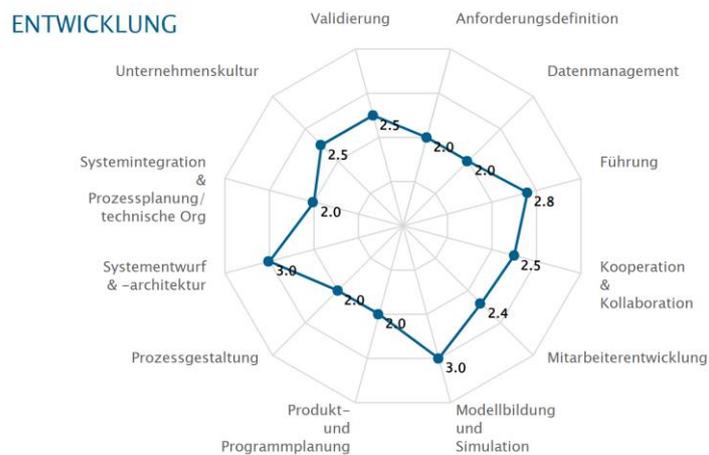


Abbildung 14 Ist-Zustand Darstellung der PLZ-Phase Entwicklung

In der obenstehenden Abbildung 14 werden die erzielten Werte der einzelnen, unter die Dimension *Entwicklung* fallenden Subkriterien dargestellt. Die besten Bewertungen in dieser Phase wurden für die *Modellbildung/Simulation* und den Aspekt *Systementwurf & -architektur*, mit einem jeweiligen Reifegrad von 3,0 erzielt. Diese Teilaspekte zeigen, dass das IPT über eine hohe Kompetenz in der Erstellung und Validierung virtueller Modelle und der Definition von Systemanforderungen und -architekturen verfügt. Die schlechtesten Bewertungen in dieser Phase wurden für die *Prozessgestaltung*, die *Produkt- und Programmplanung*, das *Datenmanagement*, die *Anforderungsdefinition*, die *Systemintegration* und die

Prozessplanung/technische Organisation vergeben, die alle einen Reifegrad von 2,0 haben. Diese Teilaspekte zeigen, dass das IPT noch Verbesserungspotenzial in der Gestaltung und Steuerung von Entwicklungsprozessen, der Planung und Überwachung von Produkt- und Programmzielen, dem Management von Daten und Informationen, der Definition von Kunden- und Stakeholderanforderungen, der Integration von Systemkomponenten und der Organisation von technischen Ressourcen hat.

Fertigung

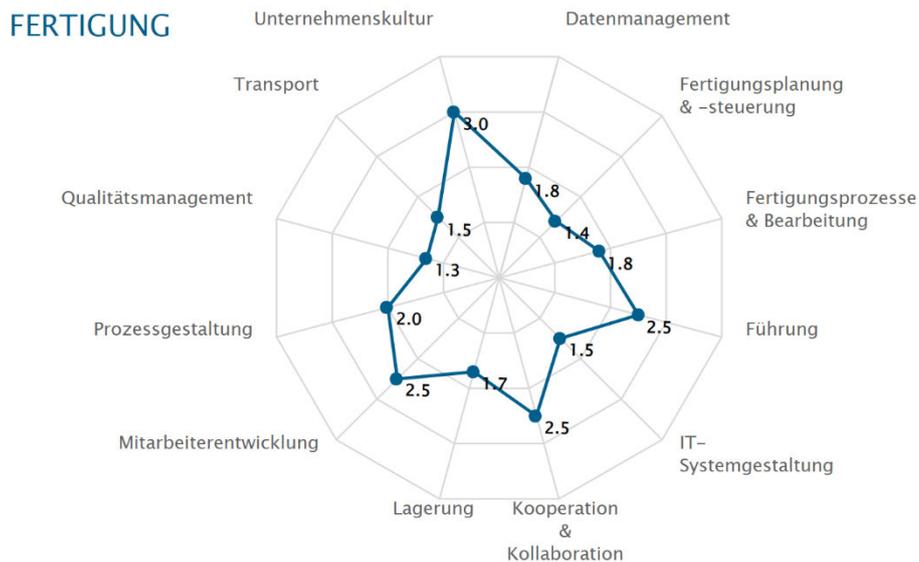


Abbildung 15 Ist-Zustand Darstellung der PLZ-Phase Fertigung

Abbildung 15 bildet die vergebenen Werte für die Subkategorien der Dimension *Fertigung* ab. Um die Produktion effizient und qualitativ hochwertig zu gestalten, sind verschiedene Teilaspekte zu berücksichtigen. Die *Unternehmenskultur* erzielt in dieser Phase die höchste Bewertung mit einem Reifegrad von 3,0. Dies bedeutet, dass das IPT eine Unternehmenskultur pflegt, die auf Lernen und Positivität basiert und die Mitarbeiter anspricht und unterstützt. Die niedrigsten Bewertungen mit einem Reifegrad von 1,7 oder weniger haben das *Qualitätsmanagement*, die *Fertigungsplanung & -steuerung*, die *IT-Systemgestaltung* und die *IT-Systemintegration* bekommen. Diese Ergebnisse lassen auf Verbesserungsmöglichkeiten in der Qualitätssicherung und -kontrolle der Produkte, der Planung und Steuerung der Fertigungsabläufe, der Gestaltung sowie der Integration von IT-Systemen zur Unterstützung der Fertigung des IPTs schließen.

Montage

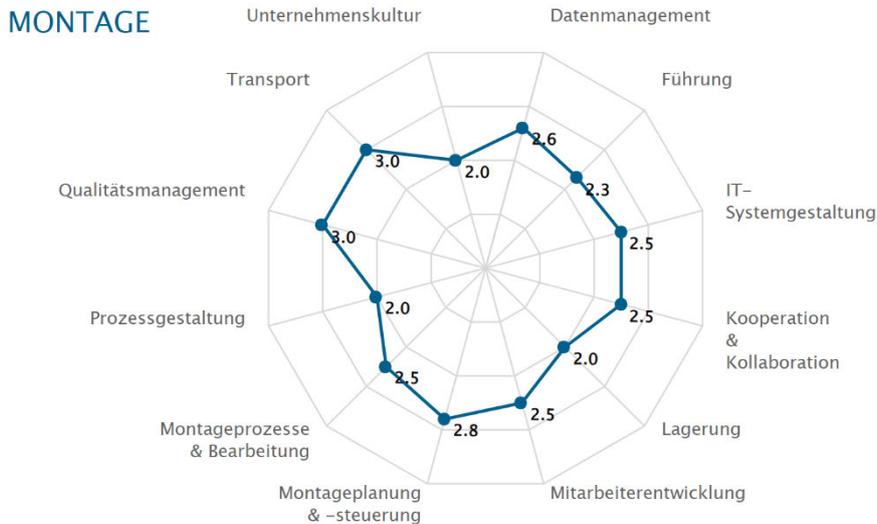


Abbildung 16 Ist-Zustand Darstellung der PLZ-Phase Montage

In der Abbildung 16 werden die Bewertungen der Unterkategorien der Dimension *Montage* ersichtlich. Die Bereiche *Transport* und *Qualitätsmanagement* erhielten die höchsten Bewertungen mit einem jeweiligen Reifegrad von 3,0. Dies unterstreicht die Kompetenz des IPTs die Organisation, Planung und Durchführung sowohl der Produkttransporte als auch der allgemeinen Abläufe, die darauf abzielen, Kundenzufriedenheit und Wettbewerbsfähigkeit aus der Managementebene heraus zu fördern, effektiv zu optimieren. Dagegen erzielten die Bereiche *Lagerung*, *Unternehmenskultur* und *Prozessgestaltung*, jeweils mit einem Reifegrad von 2,0, die niedrigsten Bewertungen. In diesen Bereichen bestehen also noch Optimierungspotenziale, insbesondere hinsichtlich der Überwachung der Lagerhaltung, der Entwicklung einer positiven und lernorientierten Unternehmenskultur sowie der Gestaltung und Anpassung der Montageprozesse.

Aftersales

Im Bereich Aftersales gibt es diverse Faktoren, die einen direkten Einfluss auf Kundenzufriedenheit und -bindung haben. Im Kontext des IPTs werden die Studierenden als 'Kunden' betrachtet. In Abbildung 17 sind die Bewertungen der erfragten Faktoren dargestellt und es zeigt sich, dass die Kriterien *Unternehmenskultur*, *Führung*, *Kooperation & Kollaboration* sowie *Mitarbeiterentwicklung* die höchsten Ergebnisse, mit einem jeweiligen Reifegrad von 2,5 erzielen. Dies unterstreicht die Fähigkeiten des IPTs, eine konstruktive und lernfördernde Unternehmenskultur zu pflegen, welche zusätzlich durch eine effektive und motivierende Führungsstruktur unterstützt wird. Weiterhin zeugt dies von einer ausgeprägten Fähigkeit des IPTs, einer tiefgehenden und effektiven Zusammenarbeit, sowohl mit internen als auch externen Partnern und Kollegen und einer Priorisierung von Fortbildungen für Mitarbeiter. Im Gegensatz dazu wurden die *IT-Systemgestaltung* und die *Prozessgestaltung* mit Geringstwerten von 1,3 respektive 1,0 bewertet, was darauf schließen lässt, dass die Ausarbeitung und Anpassung der Aftersales-Prozesse, sowie die Entwicklung und Integration von IT-Systemen

zur Unterstützung dieser Prozesse noch unzureichend sind und von einer Optimierung profitieren würden

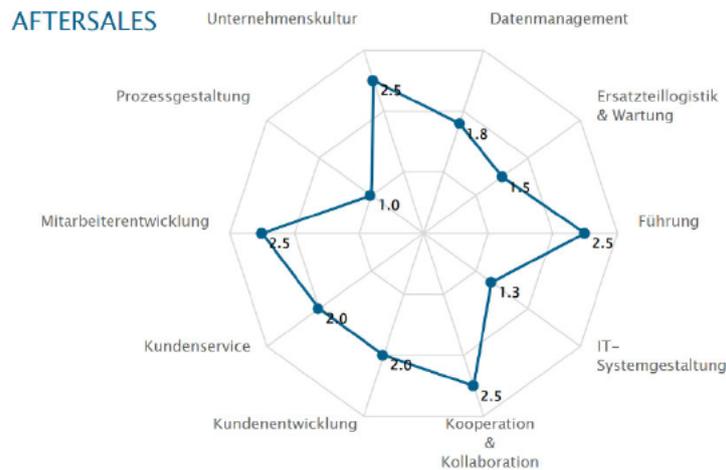


Abbildung 17 Ist-Zustand Darstellung der PLZ-Phase Aftersales

Strategische Optionen

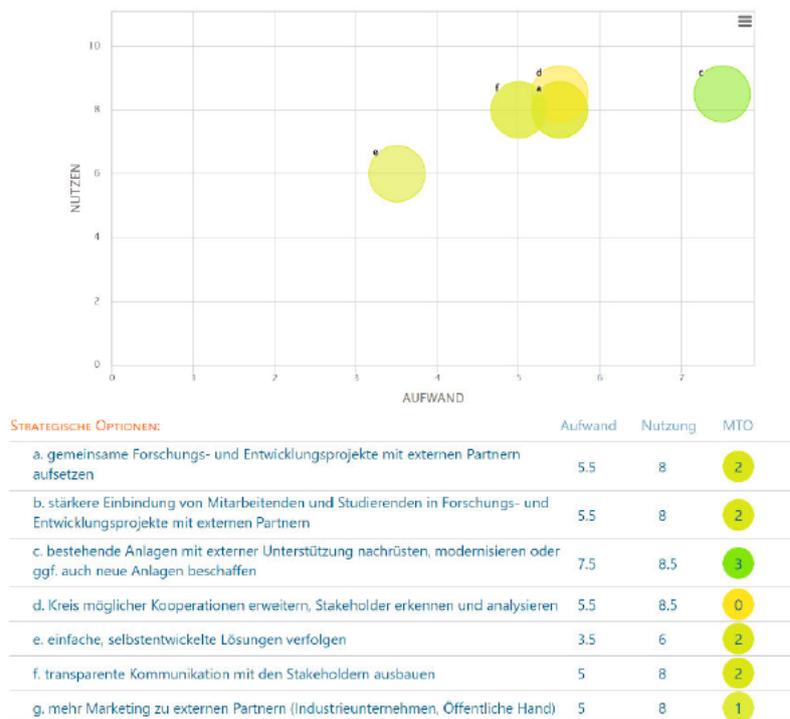


Abbildung 18 Ergebnis des Vergleichs der strategischen Optionen

In der obigen Grafik (Abbildung 18) wird erkennbar, dass sich der Großteil der vorgestellten Strategien in Bezug auf das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand sehr ähneln. Besonders hervorzuheben sind zwei spezifische Fälle - hier C und D benannt - mit gleichen Nutzenwerte, aber unterschiedliche MTO-Merkmale. Dabei zeichnet sich die Strategie C, die den Fokus auf eine Modernisierung bestehender Anlagen und den Erwerb aktueller Technologie legt, als

bevorzugte Wahl aus. Diese Herangehensweise bietet zwei Vorteile zugleich, zum einen kann mit geringerem Aufwand ein größerer Mehrwert geschaffen werden, zum anderen bietet sie auch vielfältige Projektmöglichkeiten für Studenten und Dozenten. Zudem erhöht sie die Attraktivität der Studiengänge des Departments Maschinenbau und Produktion für angehende Studierende.

Es scheint, als hätte Strategie E ein gutes Verhältnis von Aufwand und Nutzen, doch ist zu beachten, dass hausinterne Entwicklungen oft mehr Personal und Zeit in Anspruch nehmen können als fertig verfügbare Lösungen. Dennoch können damit zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden.

Bei der Betrachtung der verschiedenen zur Verfügung stehenden Strategien lässt sich festhalten, dass die Auswahl der richtigen Strategie individuell ist und sich nach Wünschen, Ansprüchen und Bedürfnissen des jeweiligen Unternehmens richtet. Während manche bereit sind einen großen Aufwand zu investieren, um demnach auch einen großen Nutzen zu erhalten, ist es anderen möglicherweise lieber, kleine, schnell umsetzbare Veränderungen durchzuführen, die ebenfalls zu Verbesserungen führen können.

Abschließend lässt sich für die Bewertung des Reifegrads des Instituts für Produktionstechnik (IPT) in Bezug auf *Industrie 5.0* festhalten, dass es sich zwar noch in der Anfängerstufe befindet, doch bereits einige solide Qualitätsmerkmale aufweist. Besonders auf der Dimension *Mensch* weist das IPT bereits vielversprechende Ressourcen und Strukturen auf. Es besteht allerdings noch in allen vier übergeordneten Bereichen (*Mensch, Technologie, Organisation* und *Strategie*) Verbesserungspotential. Die differenzierte Analyse der PLZ-Phasen ergibt gute Werte für die *Montage*, doch deutliche Defizite in den Bereichen *Fertigung* und *Aftersales*. Es gilt zu beachten, dass die Digitalisierung ein kontinuierlicher Prozess ist und es immer Raum für Verbesserungen gibt. Daher sollte das IPT seine Bemühungen fortsetzen, um seinen Reifegrad in Bezug auf *Industrie 5.0* weiter zu erhöhen.

4.4.2 Bewertung des Reifegradmodells

Bei der Gesamtbetrachtung des Reifegradmodells *InAsPro* fällt auf, dass ein zentraler Kritikpunkt das Fehlen einiger der für *Industrie 5.0* charakteristischen Begriffe ist. Insbesondere die Konzepte von *Nachhaltigkeit* und *Resilienz*, die in der aktuellen industriellen Revolution von zentraler Bedeutung sind, finden in dem Modell keine Repräsentanz. In der Diskussion um den Reifegrad eines Unternehmens in Bezug auf *Industrie 5.0* sollten diese Begriffe einen angemessenen Platz finden. Das Modell bietet, ebenso wie die anderen Modelle, keine Möglichkeit zur Anpassung der Kriterien oder der Umfrage an. Andernfalls könnten diese fehlenden Konzepte möglicherweise manuell integriert werden.

Des Weiteren gibt es Hinweise darauf, dass einige Formulierungen des Fragebogens zu Überschneidungen führen können. Eine Überarbeitung oder genauere Abstimmung dieser Fragen könnte die Qualität der Ergebnisse erheblich steigern. Trotz dieser teils fundamentalen Kritikpunkte überzeugt das Modell in vielen Aspekten. Es zeichnet sich beispielsweise durch eine eingängige Präsentation und Erklärung aus. Die klaren Handlungsanweisungen und die präzise, hochauflösende Visualisierung tragen maßgeblich zur Verständlichkeit des Modells bei.

Hinzu kommt eine umfassende Berücksichtigung von MTO-Aspekten in jeder PLZ-Phase. Das zur Verfügung gestellte Tool, der Digi-Planer, stellt zudem ein effektives Instrument dar, mit dessen Hilfe nicht nur die Überwachung messbarer Ziele, sondern auch die gleichzeitige Initiierung und Kontrolle mehrerer Projekte unter Einbindung mehrerer Mitarbeiter ermöglicht wird. Die Funktion *Digitalisierung des Arbeitssystems* vervollständigt das Projektmanagement, indem sie von der Anfangsanalyse, über die Definition und Planung, bis hin zur finalen Umsetzung alles abdeckt. Nach Abschluss des Transformationsprozesses bietet das erneute Ausfüllen des Fragebogens einen weiteren Mehrwert, indem es eine fundierte Bewertung der erreichten Entwicklungsstadien im Vergleich zum ursprünglichen Zustand ermöglicht und den Weg für anstehende Optimierungen weist. Abschließend ist das Feedback des Institutsleiters zu betonen, der die Ergebnisse als realitätsgetreu hervorhob. Dies unterstreicht, dass das *InAsPro*-Modell in der Lage ist, den Reifegrad eines Unternehmens im Kontext von *Industrie 4.0* akkurat abzubilden. Dieses Feedback und die genannten Eigenschaften des Reifegradmodells legen nahe, dass es durch gezielte Anpassungen noch weiter verbessert und für eine Anwendung in Bezug auf *Industrie 5.0* erweitert werden kann.

4.5 Limitation der Arbeit

In Bezug auf die Limitationen dieser Arbeit sind einige Aspekte zu berücksichtigen. Hinsichtlich der Auswahl der RM ist anzumerken, dass sich aufgrund des Umfangs der vorliegenden Arbeit auf fünf verschiedene Modelle beschränkt werden musste. Es besteht jedoch eine Reihe an verschiedenen Bewertungsinstrumenten, die die Reife von Unternehmen in Bezug auf unterschiedliche Faktoren erfassen. Dabei sind einige spezifisch für den Einsatz in der KI konzipiert und andere, wie auch die hier vorliegenden, eher allgemein gehalten. Ein entscheidendes Auswahlkriterium für die verwendeten RM war die freie Verfügbarkeit dieser. Einige Modelle, insbesondere die auf KI spezialisierten, sind mit teilweise beträchtlichen Kosten verbunden. Die Verwendung dieser Modelle wäre im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit nicht ökonomisch gewesen, weshalb auf solche verzichtet wurde. Zusätzlich ist hierbei anzumerken, dass die momentane rasante Entwicklung der KI täglich zu Fortschritten führt, welche hier möglicherweise nicht mehr berücksichtigt werden konnten. Die hier zugrunde liegenden Daten und Informationen beschränken sich auf die Mitte des Jahres 2023.

Die nächste Limitation bezieht sich auf die in der vorliegenden Arbeit angewandte Forschungsmethodik. Eine vollständige Durchführung des Reifegradmodells *InAsPro* war im Kontext dieser Studie nicht möglich, da die nächsten Schritte die Umsetzung einer Handlungsstrategie und den anschließenden Vergleich in Bezug auf den Soll-Zustand durch eine erneute Überprüfung vorsehen. Eine umfassende und präzise Bewertung kann demnach erst nach dem vollständigen Abschluss des Reifegradmodells vorgenommen werden, wenn auch bereits hilfreiche Erkenntnisse durch die Ermittlung des aktuellen Zustands des IPTs geliefert wurden und zukünftige Strategien analysiert werden konnten.

Des Weiteren muss darauf hingewiesen werden, dass die hier ermittelten Ergebnisse bezüglich der Bewertung der RM nicht ohne weiteres generalisierbar sind, da es unternehmensabhängig ist, auf welche Aspekte besonderer Fokus gelegt werden soll. Demnach hängen die

Auswahl und Bewertung der verschiedenen RM stark von den Interessen und Vorstellungen des Unternehmens ab und müssen in dem jeweiligen Kontext betrachtet werden.

Zusätzlich sollte beachtet werden, dass es aufgrund des begrenzten Umfangs dieser Arbeit nicht möglich war, einen tiefergehenden Einblick in jeden Bereich zu geben. Da es sich bei den ausgewählten Hauptkonstrukten, der *Industrie 5.0* und der KI jeweils um große und im Transformationsprozess befindende Merkmale handelt, musste eine angemessene Begrenzung gefunden werden, ohne großen Informationsverlust in Kauf nehmen zu müssen. Aus dieser Herausforderung ergibt sich die nächste Limitation, die mangelnde Betrachtung der Debatte um KI und *Industrie 5.0* aus ethischer Perspektive. In der Geschichte der Mensch-Maschine-Interaktion haben ethische Diskussionen immer eine wichtige Rolle gespielt. Mit dem Aufkommen autonomer Systeme sind diese Aspekte noch präsenter geworden. Besonders im Fokus stehen momentan Sicherheitsfragen und die Entscheidungsdomäne des Menschen. Diese und weitere ethische Aspekte müssen stetig auf aktuelle Entwicklungen übertragen werden und dürfen im Diskurs um die Integration von KI in die Arbeitswelt nicht vernachlässigt werden.

Bezüglich der Akzeptanz des Menschen der KI gegenüber kann noch keine endgültige Aussage getroffen werden. Eine aktuelle Studie ergibt jedoch, dass in Deutschland ein klarer Bedarf an KI-Bildung und -Aufklärung besteht [65]. Die Einstellung zu KI in Deutschland ist ambivalent. Ein signifikanter Anteil der Befragten schätzt die aktuelle Bedeutung von KI als hoch ein und diese Einschätzung steigt sogar noch, wenn es um die zukünftige Relevanz geht. Trotz des Interesses an KI zeigt sich ein deutlicher Kontrast bei der tatsächlichen Nutzung von KI in Unternehmen und der Überzeugung an das Vorhandensein der notwendigen KI-Kompetenzen. Viele Unternehmen haben sich noch nicht mit KI auseinandergesetzt und eine Mehrheit der Befragten fühlt sich im Umgang mit KI nicht kompetent. Derartige Vorbehalte der Mitarbeiter stellen demnach das größte Hindernis für die Implementierung von KI dar.

5 Fazit

Es lässt sich festhalten, dass es sich bei der *Industrie 5.0* zweifellos um die Weiterentwicklung der *Industrie 4.0* handelt, in der eine Reihe an Konzepten in den Vordergrund gerückt sind, die bisher eher vernachlässigt wurden. Dazu zählen ethische, nachhaltige sowie resilienz- und menschenorientierte Ansätze, welche in der *Industrie 4.0* bisher noch nicht integriert waren. In diesem Denken ähnelt die *Industrie 5.0* dem MTO-Konzept. Bei der Implementierung von *Industrie 5.0*-Strategien ist besonders die Akzeptanz der Menschen neuen Technologien gegenüber ein entscheidender Faktor, welcher für eine erfolgreiche Umsetzung nicht vernachlässigt werden darf. Ob es sich bei dem Wandel zu *Industrie 5.0* tatsächlich um eine eigenständige industrielle Revolution handelt, bleibt jedoch strittig.

Anhand der Geschichte und Entwicklung der KI wird ersichtlich, dass die Meilensteine in diesem Bereich in immer kürzeren Abständen erzielt werden. Dieser rasante Fortschritt in der zukünftigen Entwicklung der KI kann durch die stetige Verbesserung der Hardware mit zunehmender Genauigkeit vorhergesagt werden. Eine bestehende Herausforderung bleibt die Klärung einer allgemeingültigen Definition von KI. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bereits der Begriff *Intelligenz* nicht eindeutig definiert ist. KI und die damit einhergehenden Methoden werden in Zukunft aufgrund ihrer Fähigkeit Produktionsprozesse aus verschiedensten Blickwinkeln heraus zu optimieren und dadurch zur Effizienzsteigerung beizutragen, zweifellos in sämtlichen Bereichen der Wertschöpfungskette vermehrt zum Einsatz kommen.

Bezüglich des durchgeführten Reifegradmodells *InAsPro* lässt sich zum einen festhalten, dass das IPT bereits einige solide Qualitätsmerkmale in Bezug auf *Industrie 5.0* aufweist, insgesamt jedoch noch in allen abgefragten Bereichen Verbesserungspotential besteht. Zum anderen konnte festgestellt werden, dass das Modell *InAsPro* sowohl Stärken als auch Schwächen bei der Anwendung in Bezug auf *Industrie 5.0* aufweist. Durch gezielte Anpassungen, insbesondere der Aufnahme einer Nachhaltigkeits- und resilienzorientierten Dimension kann es jedoch weiter verbessert werden und den Anforderungen, die mit dem Übergang zu *Industrie 5.0* einhergehen gerecht werden.

Abschließend ist auf die Limitationen der vorliegenden Arbeit hinzuweisen, speziell hinsichtlich der Auswahl der RM und der mangelnden Berücksichtigung ethischer Aspekte. Trotz dieser Einschränkungen liefert die durchgeführte Studie wertvolle Erkenntnisse für das Verständnis von *Industrie 5.0* und KI.

Abschließend lässt sich sagen, dass KI in der Produktionsoptimierung eine entscheidende Rolle spielt und das Potenzial hat, die Produktionsindustrie maßgeblich zu beeinflussen. Es ist jedoch wichtig, sowohl die technischen als auch die menschlichen Aspekte zu berücksichtigen, um eine erfolgreiche Integration und Akzeptanz von KI in der Industrie zu gewährleisten.

6 Ausblick

Die Fortführung und Vollendung des Reifegradmodells *InAsPro* stellt den logischen nächsten Schritt dieser Arbeit dar. Dies wäre einer endgültigen Bewertung des Reifegradmodells dienlich, anhand derer das Reifegradmodell im Anschluss weiterentwickelt werden könnte. Grundsätzlich sollten jedoch neue RM im Hinblick auf *Industrie 5.0* und den damit verbundenen Anforderungen entwickelt werden. Diese Modelle sollten individuell anpassbar und einfach anwendbar, aber gleichzeitig umfangreich sein, da der technische Aspekt vielseitiger geworden ist und Herausforderungen wie Nachhaltigkeit und der Umgang des Menschen mit KI bewältigt werden müssen. Auf Basis der vorliegenden Arbeit könnte ein Modell entwickelt und getestet werden, welches mit bereits bestehenden Modellen verglichen wird.

Im Kontext der KI ergeben sich zukünftig noch viele Fragen, wie beispielsweise die Regulierung dieser. Die Sicherung von Arbeitsplätzen sollte an erster Stelle stehen. Es ist zwar absehbar, dass einige Berufe aussterben werden, doch gilt es dafür ausreichende und angemessene Alternativstellen zu finden. Darüber nutzen bereits einige Menschen die Möglichkeiten verschiedener KI-Tools, um mehrere Berufe gleichzeitig auszuüben. Diese Aspekte sollten bei der Beschränkung von KI beachtet werden.

Im Hinblick auf KI in der *Industrie 5.0* wird weitere Forschung zu den möglichen Chancen, aber auch Herausforderungen und Risiken benötigt, um eine nachhaltige Implementierung, die den eigenen Anforderungen einer menschenzentrierten und resilienten Funktionsweise entspricht zu ermöglichen. Bereits bestehende RM, die Unternehmen bei dieser Entwicklung begleiten sollen müssen um *Industrie 5.0* spezifische Faktoren, wie nachhaltigkeits-, resilienz- und menschenzentriertes Denken ergänzt werden. Dieser Prozess könnte anhand gängiger Projektmanagementmethoden stetig überwacht werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit spezifische Modelle für den Zweck der Umsetzung von *Industrie 5.0* zu entwickeln.

7 Literaturverzeichnis

- [1] R. T. Kreuzer und M. Sirrenberg, *Künstliche Intelligenz verstehen: Grundlagen – Use-Cases – unternehmenseigene KI-Journey*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. doi: 10.1007/978-3-658-25561-9.
- [2] „KI in der Industrie“, *Bosch Global*. <https://www.bosch.com/de/stories/kuenstliche-intelligenz-in-der-industrie/> (zugegriffen 17. September 2023).
- [3] U. Sandler, Hrsg., *Industrie 4.0 grenzenlos*. in Xpert.press. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. doi: 10.1007/978-3-662-48278-0.
- [4] W. Kersten, H. Koller, und H. Lödding, Hrsg., *Industrie 4.0: wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*. in Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB). Berlin: Gito mbH Verlag, 2014.
- [5] „Industrielle Revolution • Zusammenfassung, Erfindungen“, *Studyflix*. <https://studyflix.de/geschichte/industrielle-revolution-3785> (zugegriffen 2. Juli 2023).
- [6] W. Babel, *Industrie 4.0, China 2025, IoT: Der Hype um die Welt der Automatisierung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. doi: 10.1007/978-3-658-34718-5.
- [7] W. Dorst, „Umsetzungsstrategie Industrie 4.0“, *Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0*.
- [8] A. Mirfendreski, *Künstliche Intelligenz für die Entwicklung von Antrieben: Historie, Arbeitsprozesse, Konzepte, Methoden und Anwendungsbeispiele*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022. doi: 10.1007/978-3-662-63495-0.
- [9] P. Buxmann und H. Schmidt, Hrsg., *Künstliche Intelligenz: Mit Algorithmen zum wirtschaftlichen Erfolg*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. doi: 10.1007/978-3-662-61794-6.
- [10] W. Ertel, *Grundkurs Künstliche Intelligenz*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. doi: 10.1007/978-3-658-13549-2.
- [11] T. Cole, *Erfolgsfaktor künstliche Intelligenz: KI in der Unternehmenspraxis: Potenziale erkennen - Entscheidungen treffen*. München: Hanser, 2020.
- [12] „Die Geschichte der Künstlichen Intelligenz (KI)“. <https://www.hnu.de/forschung/institute-kompetenzzentren/technologie-transfer-zentrum-ttz-guenzburg/ttz-blog-ki-for-everyone/alle-artikel/artikel/2023/05/22/die-geschichte-der-kuenstlichen-intelligenz-ki?cHash=31283c1c4e1a9a5e7f8f93761ce915ba> (zugegriffen 23. Juli 2023).
- [13] „Geschichte der Künstlichen Intelligenz“, *Bosch Global*. <https://www.bosch.com/de/stories/geschichte-der-kuenstlichen-intelligenz/> (zugegriffen 22. Juli 2023).
- [14] „KI-Historie: Die Geschichte der künstlichen Intelligenz“. <https://www.cio.de/a/die-geschichte-der-kuenstlichen-intelligenz,3251651> (zugegriffen 24. Juli 2023).

- [15] heise online, „Künstliche Intelligenz: Poker-KI Libratus kennt kein Deep Learning, ist aber ein Multitalent“, *heise online*, 2. Februar 2017. <https://www.heise.de/news/Kuenstliche-Intelligenz-Poker-KI-Libratus-kennt-kein-Deep-Learning-ist-aber-ein-Multitalent-3615068.html> (zugegriffen 24. Juli 2023).
- [16] „OpenAI Five defeats Dota 2 world champions“. <https://openai.com/research/openai-five-defeats-dota-2-world-champions> (zugegriffen 24. Juli 2023).
- [17] „Google Duplex: An AI System for Accomplishing Real-World Tasks Over the Phone“, 8. Mai 2018. <https://ai.googleblog.com/2018/05/duplex-ai-system-for-natural-conversation.html> (zugegriffen 24. Juli 2023).
- [18] „Alle Informationen zu ChatGPT: Kostenlos testen auf Deutsch“, *computerbild.de*, 31. Mai 2023. <https://www.computerbild.de/artikel/ChatGPT-deutsch-kostenlos-testen-35038619.html> (zugegriffen 24. Juli 2023).
- [19] „Ein europäischer Ansatz für künstliche Intelligenz | Gestaltung der digitalen Zukunft Europas“, 30. Juni 2023. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/policies/european-approach-artificial-intelligence> (zugegriffen 24. Juli 2023).
- [20] S. Reismann, „2023 – Durchbruch der Künstlichen Intelligenz - Netzpiloten.de“, *Netzpiloten Magazin*, 28. März 2023. <https://www.netzpiloten.de/2023-durchbruch-der-kuenstlichen-intelligenz/> (zugegriffen 24. Juli 2023).
- [21] R. Merritt, „Live from Taipei: NVIDIA CEO Unveils Gen AI Platforms for Every Industry“, *NVIDIA Blog*, 29. Mai 2023. <https://blogs.nvidia.com/blog/2023/05/28/computex-key-note-generative-ai/> (zugegriffen 24. Juli 2023).
- [22] „EU-Parlament bringt Regeln für KI auf den Weg – DW – 14.06.2023“, *dw.com*. <https://www.dw.com/de/eu-parlament-bringt-regeln-f%C3%BCr-ki-auf-den-weg/a-65847846> (zugegriffen 24. Juli 2023).
- [23] C. Bünthe, *Die chinesische KI-Revolution: Konsumverhalten, Marketing und Handel: Wie China mit Künstlicher Intelligenz die Wirtschaftswelt verändert*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. doi: 10.1007/978-3-658-29795-4.
- [24] M. A. Pfannstiel, *Künstliche Intelligenz im Gesundheitswesen: Entwicklungen, Beispiele und Perspektiven*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. doi: 10.1007/978-3-658-33597-7.
- [25] „Strong AI vs. Weak AI: What’s the Difference?“, *Lifewire*. <https://www.lifewire.com/strong-ai-vs-weak-ai-7508012> (zugegriffen 6. September 2023).
- [26] H. W.-S.-H. für angewandte Wissenschaften, „Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt“, *Hochschule Würzburg-Schweinfurt - Zur Startseite mit Accesskey 0*. <https://ki.thws.de/thematik/starke-vs-schwache-ki-eine-definition/> (zugegriffen 8. September 2023).
- [27] „Künstliche Intelligenz (KI)“, *Alexander Thamm GmbH*. <https://www.alexanderthamm.com/de/data-science-glossar/kuenstliche-intelligenz-ki/> (zugegriffen 11. September 2023).
- [28] R. Weber und P. Seeberg, *KI in der Industrie: Grundlagen, Anwendungen, Perspektiven*. München: Hanser, 2020.
- [29] B. Pokorni, M. Braun, und C. Knecht, „MENSCHENZENTRIERTE KI-ANWENDUNGEN IN DER PRODUKTION“.

- [30] A. Oppermann, „Aktivierungsfunktionen in neuronalen Netzen: Sigmoid, tanh, ReLU -“, *KI Tutorials*, 2. August 2021. <https://artemoppermann.com/de/aktivierungsfunktionen/> (zugegriffen 8. September 2023).
- [31] S. Bhattacharyya, Hrsg., *Deep learning: research and applications*. in De Gruyter frontiers in computational intelligence, no. volume 7. Boston: De Gruyter, 2020.
- [32] M. Feiner und M. Schöllhorn, „KI4Industry KI für den Mittelstand“.
- [33] A. Graves, A. Mohamed, und G. Hinton, „Speech Recognition with Deep Recurrent Neural Networks“. arXiv, 22. März 2013. Zugegriffen: 8. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/abs/1303.5778>
- [34] M. Schmidt-Colberg, „Generative Adversarial Networks (GAN): Eine Übersicht und Beispiele zum Thema GAN“.
- [35] „Generative Adversarial Network“, *DeepAI*, 22. Juli 2020. <https://deepai.org/machine-learning-glossary-and-terms/generative-adversarial-network> (zugegriffen 8. September 2023).
- [36] G. Schuh, R. Anderl, R. Dumitrescu, und A. Krüger, „Industrie 4.0 Maturity Index“, 2020.
- [37] „Industrie 4.0-Readiness-Check“. <https://www.industrie40-readiness.de/> (zugegriffen 19. Juni 2023).
- [38] „Industrie 4.0 Readiness“. <https://www.industrie40-readiness.de/?sid=62931&lang=de> (zugegriffen 25. Juni 2023).
- [39] J. Schumacher und N. Gronau, „Im Vergleich: Industrie 4.0-Reifegradmodelle“, 2022.
- [40] „Quick-Check Industrie 4.0 Survey“. <https://www.surveymonkey.de/r/inlumia> (zugegriffen 25. Juni 2023).
- [41] „Digi-Planer - InAsPro“. <https://www.inaspro.de/Demonstrator/index.php> (zugegriffen 25. Juni 2023).
- [42] W. Bauer, S. Mütze-Niewöhner, S. Stowasser, C. Zanker, und N. Müller, Hrsg., *Arbeit in der digitalisierten Welt: Praxisbeispiele und Gestaltungslösungen aus dem BMBF-Förderschwerpunkt*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. doi: 10.1007/978-3-662-62215-5.
- [43] D. T. Matt, *KMU 4.0 - Digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen*. GITO Verlag, 2018. doi: 10.30844/wgab_2018.
- [44] K. P. Tran, Hrsg., *Artificial Intelligence for Smart Manufacturing: Methods, Applications, and Challenges*. in Springer Series in Reliability Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2023. doi: 10.1007/978-3-031-30510-8.
- [45] E. A. Hartmann, Hrsg., *Digitalisierung souverän gestalten: Innovative Impulse im Maschinenbau*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. doi: 10.1007/978-3-662-62377-0.
- [46] N. Funke, „Predictive Maintenance - Beispiele aus der Praxis - AIM“. <https://www.agileim.de/2022/02/28/predictive-maintenance-beispiele-2/> (zugegriffen 25. August 2023).
- [47] „Studie-Einsatzfelder-KI-im-Produktionsumfeld.pdf“. Zugegriffen: 25. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.i40-bw.de/wp-content/uploads/2020/09/Studie-Einsatzfelder-KI-im-Produktionsumfeld.pdf>
- [48] U. Sendler, *KI-Kompass für Entscheider: künstliche Intelligenz in der Industrie: Strategien - Potenziale - Use Cases*. München: Hanser, 2020.

- [49] „Autonomes High-Speed-Transportfahrzeug für die Logistik von morgen“, *Fraunhofer-Gesellschaft*. <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2021/mar-2021/autonomes-high-speed-transportfahrzeug-fuer-die-logistik-von-morgen.html> (zugegriffen 26. August 2023).
- [50] „How Amazon deploys collaborative robots in its operations to benefit employees and customers“, *US About Amazon*, 26. Juni 2023. <https://www.aboutamazon.com/news/operations/how-amazon-deploys-robots-in-its-operations-facilities> (zugegriffen 26. August 2023).
- [51] P. Wennker, *Künstliche Intelligenz in der Praxis: Anwendung in Unternehmen und Branchen: KI wettbewerbs- und zukunftsorientiert einsetzen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. doi: 10.1007/978-3-658-30480-5.
- [52] V. Gruhn, „KI verändert die Spielregeln: Geschäftsmodelle, Kundenbeziehungen und Produkte neu denken“.
- [53] „Lana Labs GmbH / LANA Process Mining“, *der-prozessmanager.de*. <https://der-prozessmanager.de/unternehmen/details/lana-labs> (zugegriffen 31. August 2023).
- [54] I. LightGuid, „Augmented-Reality-Applications-on-the-Factory-Floor“.
- [55] RAUNHOFER-INSTITUT FÜR ARBEITSWIRTSCHAFT UND ORGANISATION IAO, Hrsg., „POTENZIALE DIGITALER ASSISTENZSYSTEME“.
- [56] D. Bending, K. Lau, J. Schulte, und S. Endriß, „Industrie 5.0 - Die Europäische Kommission auf den Spuren der nächsten industriellen Revolution?“ <https://www.industriemanagement.de/node/492> (zugegriffen 20. Mai 2023).
- [57] European Commission. Directorate General for Research and Innovation., *Industry 5.0: towards a sustainable, human centric and resilient European industry*. LU: Publications Office, 2021. Zugegriffen: 10. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407>
- [58] E. Ulich, „MTO-Konzept im Dorsch Lexikon der Psychologie“, 2022, Zugegriffen: 16. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/mto-konzept>
- [59] „BAuA - Tätigkeiten im digitalen Wandel - Arbeit mit Menschen besser verstehen - Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin“. <https://www.baua.de/DE/Forschung/Schwerpunkt-Digitale-Arbeit/Taetigkeiten-im-digitalen-Wandel/Personenbezogene-Taetigkeiten/Erweitertes-MTO-Konzept.html> (zugegriffen 16. September 2023).
- [60] T. Klemm, „Studie zur Akzeptanz von Künstlicher Intelligenz – DIID – Düsseldorfer Institut für Internet und Demokratie“. <https://diid.hhu.de/nachrichten/studie-zur-akzeptanz-von-kuenstlicher-intelligenz/> (zugegriffen 16. September 2023).
- [61] N. Günther, B. Prell, und J. Reiff-Stephan, „Industrie 5.0 – Von der Vision des menschenzentrierten Ansatzes zu sozio- cyberphysischen Produktionssystemen für die Praxis“, *Open Access.*, 2022.
- [62] P. P. Liggesmeyer*, „Industrie 5.0 – ein begrifflicher Nonsens“, 3. August 2021. <https://www.industry-of-things.de/industrie-50-ein-begrifflicher-nonsens-a-ba86651f658e1a43eacedb7ce4b20e3/> (zugegriffen 9. Juli 2023).

-
- [63] A. Akundi, D. Euresti, S. Luna, W. Ankobiah, A. Lopes, und I. Edinbarough, „State of Industry 5.0—Analysis and Identification of Current Research Trends“, *ASI*, Bd. 5, Nr. 1, S. 27, Feb. 2022, doi: 10.3390/asi5010027.
- [64] F. Hein-Pensel *u. a.*, „Maturity assessment for Industry 5.0: A review of existing maturity models“, *Journal of Manufacturing Systems*, Bd. 66, S. 200–210, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.12.009.
- [65] „Auf welche Akzeptanz stößt der KI-Einsatz in Deutschland? | Bitkom Akademie“. <https://bitkom-akademie.de/news/auf-welche-akzeptanz-stoesst-der-ki-einsatz-deutschland> (zugegriffen 07. September 2023).

8 Anhang

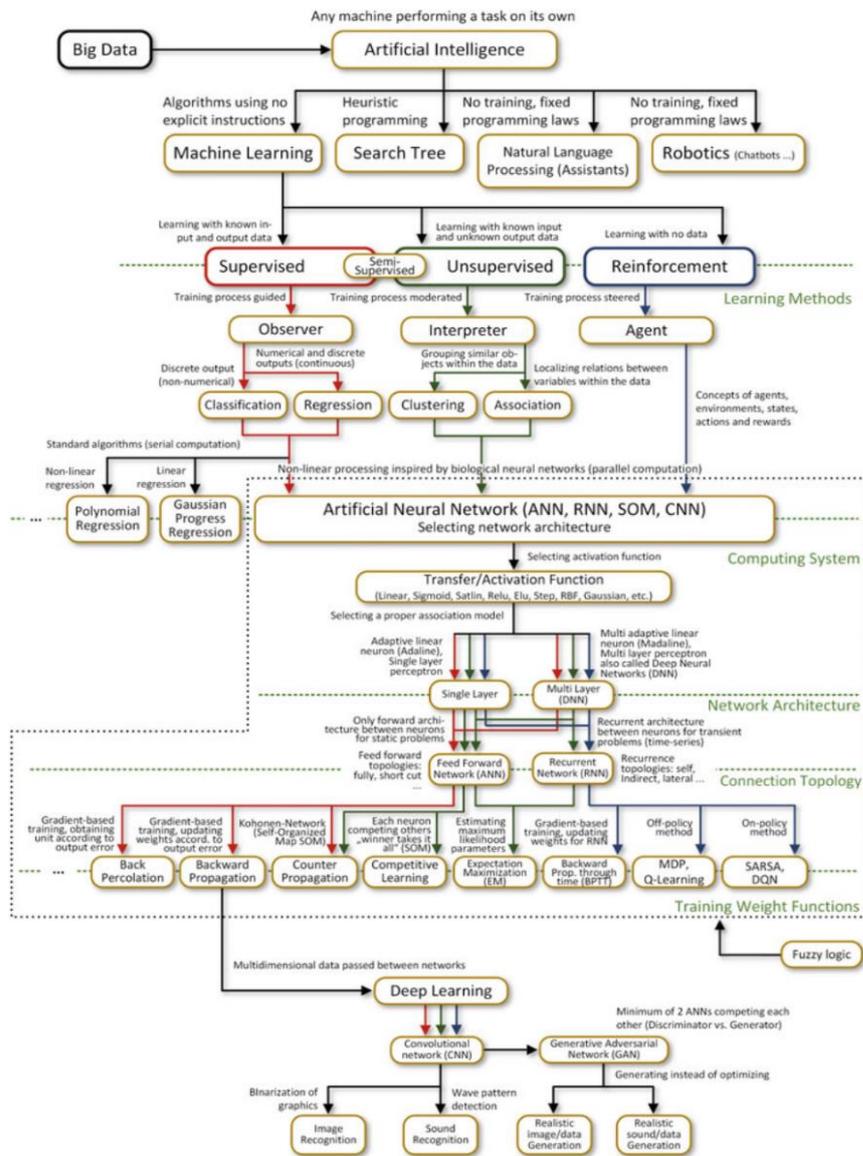


Abbildung 19 Ebenen der Künstlichen Intelligenz [8]

		Acatech Maturity Index	IMPULS Readiness	Inlumia Quick-Check	InAsPro	Assessment 4.0
Mensch(20%)		5%	6%	8%	12%	10%
	Mitarbeiterqualifikation	20%	60%	50%	70%	60%
	Menschliche Werte und Ethik	10%	20%	40%	40%	40%
	Menschenzentriert (Flexibilität)	40%	40%	20%	70%	60%
	Mitbestimmungsrecht/Aktivität	40%	20%	50%	60%	40%
	Wohlergehen/Zufriedenheit	10%	20%	40%	50%	50%
Technik (16%)		7%	8%	4%	7%	10%
	Automatisierung/Digitalisierung	80%	80%	60%	80%	90%
	CPS	20%	30%	10%	40%	70%
	IoT	40%	40%	10%	60%	60%
	KI & ML	20%	40%	10%	20%	50%
	AR & VR	20%	20%	20%	20%	70%
	Additive Fertigung	40%	40%	20%	40%	40%
	Cybersicherheit	50%	60%	20%	30%	40%
	Prozessoptimierung	80%	80%	30%	80%	80%
	Organisation (16%)		8%	9%	4%	10%
Echtzeit-Datenüberwachung		60%	50%	10%	50%	70%
Unternehmensstruktur		60%	70%	20%	60%	40%
Kommunikation		40%	30%	10%	60%	60%
Change-Management		60%	60%	40%	70%	40%
Nachhaltigkeit (16%)	Schulung/Weiterbildung	30%	60%	30%	70%	20%
		3%	2%	2%	2%	1%
	CO2-Neutralität	10%	0%	0%	10%	0%
	Ressourceneffizienz	40%	20%	30%	40%	30%
Resilienz (16%)	Erneubare Energien	10%	10%	10%	10%	0%
	Abfallvermeidung	10%	20%	0%	0%	0%
		5%	6%	3%	9%	4%
	Soziale und ökologische Resilienz	10%	20%	20%	60%	10%
	Organisationale Resilienz	30%	40%	20%	60%	30%
Anwendbarkeit (16%)	Technische Resilienz	50%	60%	20%	60%	40%
	Krisenmanagement	40%	40%	10%	40%	20%
		7%	8%	9%	14%	11%
	Ermittlung des Ist-/Sollzustands	80%	70%	80%	90%	90%
	Ermittlung des Reifegradindex	70%	60%	80%	100%	90%
Gesamt	Zugang/Tool	10%	60%	60%	90%	70%
	Modifizierbarkeit	20%	10%	10%	60%	20%
		35%	39%	29%	54%	43%

Abbildung 20 Vergleichsmatrix der Reifegradmodelle

	Industrie 4.0 Maturity Index	Industrie 4.0 Readiness	Quick-Check Inlunia	InAsPro	Industrie 4.0 Assessment
Aufbau und Kriterien	<ul style="list-style-type: none"> • Gestaltungsfelder <ul style="list-style-type: none"> • Ressourcen • Informationssysteme • Organisationsstruktur • Kultur • Entwicklungsstufen <ul style="list-style-type: none"> • Computerisierung • Konnektivität • Sichtbarkeit • Transparenz • Prognosefähigkeit • Adaptierbarkeit • Ordnungsrahmen Produktion & Management <ul style="list-style-type: none"> • Unternehmensstruktur • Unternehmensprozesse • Unternehmensentwicklung • Funktionsbereiche <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung • Produktion • Logistik • Service • Marketing & Vertrieb 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Strategie und Organisation <ul style="list-style-type: none"> • Strategie • Investitionen • Innovationsmanagement 2. Smart Factory <ul style="list-style-type: none"> • Digitales Abbild • Maschinenpark • Datennutzung • IT-Systeme 3. Smart Operations <ul style="list-style-type: none"> • Cloud-Nutzung • IT-Sicherheit • Autonome Prozesse • Informationsaustausch 4. Smart Products <ul style="list-style-type: none"> • Datenanalyse • Nutzungsphase • IKT-Zusatzfunktionalitäten 5. Data-driven Services <ul style="list-style-type: none"> • Anteil Datennutzung • Umsatzanteil • Datenbasierte Dienstleistungen 6. Mitarbeiter <ul style="list-style-type: none"> • Aufbau von Kompetenzen • Kompetenzen der Mitarbeiter 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Technik <ul style="list-style-type: none"> • Technikorganisation • Engineering • Produktion 2. Produkt 3. Business <ul style="list-style-type: none"> • Strategie • Innovationskultur • Geschäftsmodell • Daten 4. Mensch <ul style="list-style-type: none"> • Arbeitsgestaltung • Qualifikation • Innerbetriebliche Kommunikation • Interaktion 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bestimmung des Digitalisierungsgrad <ul style="list-style-type: none"> • Unternehmen • Entwicklung • Fertigung • Montage • Aftersales 2. Digitalisierungsstrategien 3. Technologieatlas 4. Digitalisierung des Arbeitssystems 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Operation <ul style="list-style-type: none"> • Agile Manufacturing Systems • Monitoring & Decision Systems • Big Data for Production • Production Planning and Control 2. Organization <ul style="list-style-type: none"> • Business Models 4.0 • Innovation Strategy • Strategy 4.0 • Supply Chain Management 4.0 3. Socio-Culture <ul style="list-style-type: none"> • Human Resource 4.0 • Work 4.0 • Culture 4.0 4. Technology <ul style="list-style-type: none"> • Big Data • Communication & Connectivity • Cyber Security • Deep Learning, Machine Learning, Artificial Intelligence • Additive Manufacturing • Maintenance • Robotics & Automation • Product Design and Development • Standards 4.0 • Virtual Reality, Augmented Reality, and Simulation

Abbildung 21 Reifegradmodelle



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Baghdadi

Vorname: Fariborz

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Optimierung der Produktionsprozesse mittels KI in Industrie 5.0

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorarbeit ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

20.09.2023

Datum

