

---

## 1 Einleitung

---

Gliederung für die Einleitung ist identisch zu der Gliederung von Jonathan Klein

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

---

### 1.1 Motivation

---

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

---

### 1.2 Zielsetzung

---

---

### 1.3 Einordnung in das übergeordnete Ziel

---

---

### 1.4 Aufbau der Arbeit

---

---

## 2 Stand der Technik

---

In diesem Kapitel gibt es einen Einblick in die drei Themenbereiche Industrie 4.0, industrielle Fertigung, Mensch-Computer Interaktion und Virtual Reality.

Daher werden wir uns zunächst mit dem Begriff Industrie 4.0 auseinander setzen, den Begriff definieren und auf die Geschichte der Industriellen Revolutionen der vergangenen 260 Jahre sowie auf die Veränderungen in der Informations- und Kommunikationstechnik eingehen. Daraufhin gibt es einen Einblick in die Potentiale und Herausforderungen von Industrie 4.0. Zum Abschluss dieses Abschnittes wird ein Leitfaden zur Umsetzung von Industrie 4.0 für Unternehmen vorgestellt.

Daraufhin gib es einen Einblick in die Ausgangslage der industriellen Fertigung, insbesondere in den Produktlebenszyklus, die Automatisierungspyramide und TODO...

Als nächstes setzen wir uns auseinander mit dem Thema Mensch-Computer Interaktion (HCI). Dazu gibt es einen Einblick in die Geschichte der HCI der Vergangenen [XXX] Jahre, bevor wir aktuelle Entwicklungen in dem Bereich vorgestellt werden.

Zum Schluss wird das Thema Virtual Reality (VR) vorgestellt und es gibt einen Einblick in die Geschichte, den Stand der Technik und technische Herausforderungen von Virtual Reality. Daraufhin werden vielversprechende Entwicklungen für die Zukunft von Virtual Reality vorgestellt.

---

### 2.1 Industrie 4.0

---

Erstmalig tauchte der Begriff Industrie 4.0 auf der Hannover Messe 2011 auf und wurde daraufhin ein zentraler Bestandteil der Hightech-Strategie der deutschen Bundesregierung [8, BDI, Einblick i.d.4.Rev].

Der Begriff Industrie 4.0 „steht für die 4. Industrielle Revolution, einer neuen Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten“ [1, Anderl, Vortrag 2015]. Dies führt zu einer zunehmenden Vernetzung von „Mensch, Maschinen und Werkstücken durch Modernste Informations- und Kommunikationstechnik“ [6, BDI, Was ist Industrie 4.0], zum anderen auch zu einer zunehmenden „Vernetzung der realen mit der virtuellen Welt“ [7, DIN, Def. Ind.4]. Grundlage dieser Wandlung in der Industrie sind sogenannte Cyber-Physische-Systeme (CPS), also moderne Steuerungssysteme mit eingebetteten Softwaresystemen und Anbindung an das Internet (Anderl 2015) [1, Anderl, Vortrag 2015]. Cyber-Physische-Systeme verknüpfen „reale (physische) Objekte und Prozesse mit informationsverarbeitenden (virtuellen) Objekten und Prozessen“ [11, Fraunhofer, CPS]. Die hat eine zunehmende Verschmelzung von Fertigungsprozessen und Informationstechnologie zur Folge [7, DIN, Def. Ind.4].

## 2.1.1 Industrielle Revolution und Informations- und Kommunikationstechnik

Um den Begriff Industrie 4.0 besser nachvollziehen zu können, ist es unumgänglich die Geschichte der industriellen Revolutionen der vergangenen 260 Jahre zu verstehen. Der Begriff Industrie 4.0 „leitet sich aus den großen Industriegeschichtlichen Umbrüchen ab“ [7, DIN, Def. Ind.4] und ist ein Wortspiel aus den Anteilen „Industrie“ und „4.0“. Der Anteil „4.0“ soll zum einen eine Assoziation zum Internet (Web 4.0) herstellen und zum anderen, wie in der heutigen Zeit üblich eine Versionsbezeichnung darstellen, wie man sie aus dem Bereich der Softwareentwicklung kennt [1, Anderl, Vortrag 2015].

Industrie 4.0 wird als „der vierte große Technologische Durchbruch“ [7, DIN, Def. Ind.4] betrachtet. Daher werden im Folgenden die industriellen Revolutionen bis zur Industrie 4.0 und die Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik bis zu Web 4.0 betrachtet.

### Die industriellen Revolutionen

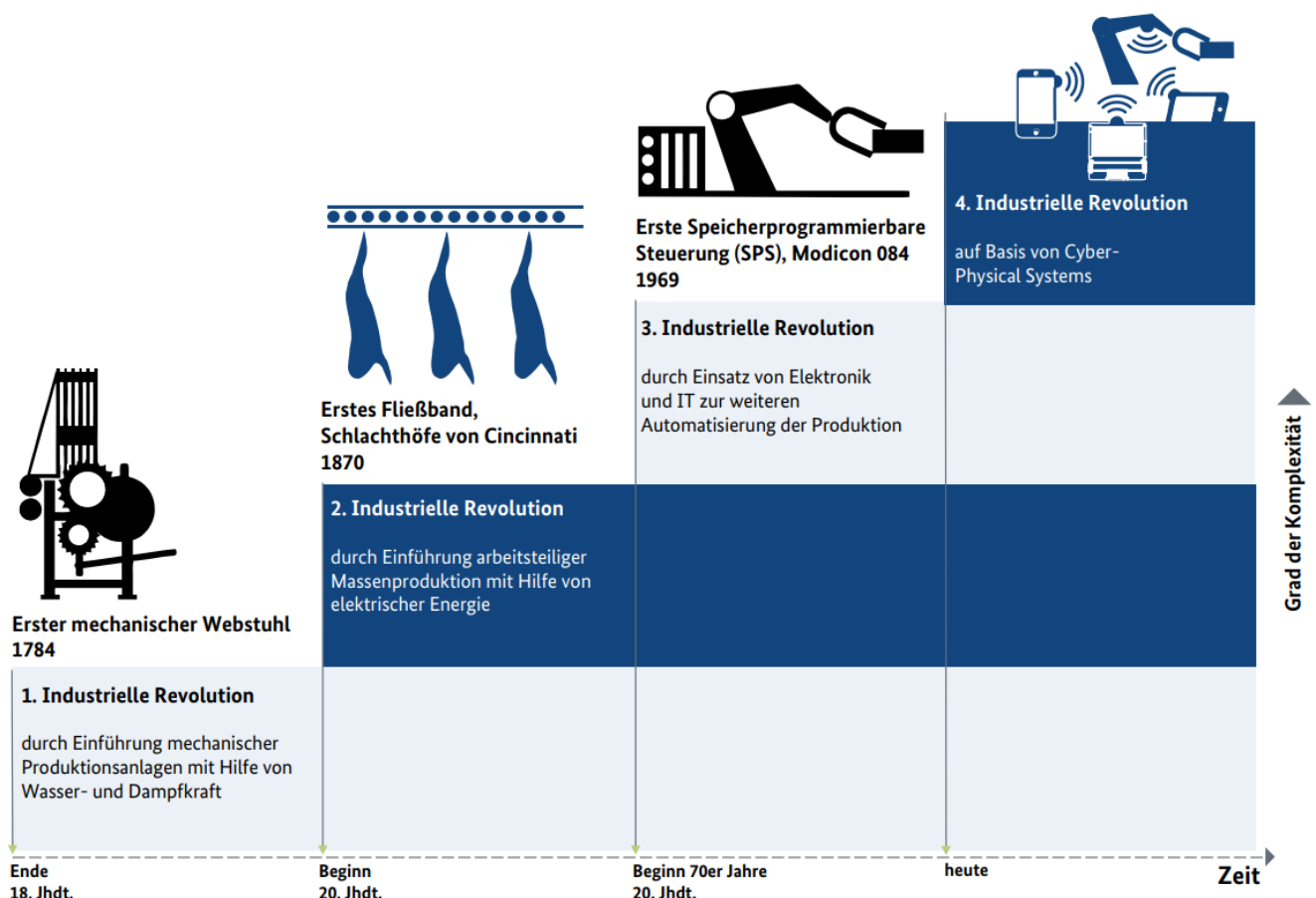


Abbildung 2.1: Die Geschichte der Industriellen Revolutionen [A1, BMWi, S.8]

Die **erste industrielle Revolution** spielte sich Mitte bis Ende des 18. Jahrhunderts ab. Im Fokus standen Wasser- und Dampfkraft, was die Möglichkeit mit sich brachte, Maschinen die vorher noch mit menschlicher Kraft angetrieben wurden, mithilfe von Wasser- und Dampfkraft anzutreiben. Die Menschen erkannten früh, dass sich durch die neuen industriellen Entwicklungen eine große Menge an Arbeitsplätzen schaffen lassen können. [9, Industrie Wegweiser, Ind.Wandel

---

d.Z.]. Neben gesteigerter Produktivität in der Herstellung führte die erste industrielle Revolution dazu, „dass seit dieser Zeit in industriell geprägten Ländern keine strukturell bedingten Hungerkatastrophen mehr entstanden sind“ [B1, Bauernhansl, S.5]. Des Weiteren führte die verbesserte Infrastruktur durch Dampfschiffe und Eisenbahnen zu einer besseren Kleidungs- und Nahrungsversorgung und zu einem enormen Bevölkerungswachstum [B1, Bauernhansl, S.5]. Außerdem gab es große Auswirkungen auf die Gesellschaft, da zwei neue Schichten in der Bevölkerung entstanden: Die Fabrikarbeiterschaft und die Fabrikbesitzer. [B1, Bauernhansl, S.5]. Die Entwicklungen der ersten industriellen Revolution brachten allerdings einige große Probleme mit sich. Dazu gehören Beispielsweise die Ausbeutung der Fabrikmitarbeiter durch schlechte Arbeitsbedingungen und Bezahlung, Kinderarbeit und sogar eine verkürzte Lebenserwartung für die Fabrikmitarbeiter [B1, Bauernhansl, S.5].

Die **zweite industrielle Revolution** zu Beginn des 20. Jahrhunderts „war geprägt durch arbeitsteilige Massenproduktion mit Hilfe elektrischer Energie“ [B1, Bauernhansl, S.5]. Ermöglicht wurde die Massenproduktion unter anderem durch das von Henry Ford entwickelte Fließband, welches bereits 1913 in der Automobilproduktion eingesetzt wurde [10, Spiegel, Industrielle Revolutionen]. Des Weiteren führten die Entwicklungen von elektrischen Antrieben und Verbrennungsmotoren zu einer zunehmenden Dezentralisierung. Dezentralisierung im Kontext der zweiten industriellen Revolution bedeutet, „die Arbeitsmaschinen nicht durch zentrale Kraftmaschinen anzutreiben, sondern dezentral zu betreiben“ [B1, Bauernhansl, S.5]. Ein weiterer „Erfolgsfaktor in der zweiten Industriellen Revolution waren die ersten Schritte der Globalisierung“ [9, Industrie Wegweise, I.i.W.d.Z.] durch die Fortschritte in der Verkehrsinfrastruktur. Dazu gehören Beispielsweise moderne Schiffe, die eine bessere Vernetzung zwischen den Kontinenten ermöglicht haben [9, Industrie Wegweise, I.i.W.d.Z.]. Für die Chemie- und Automobilindustrie wurde Erdöl zu einem wichtigen Rohstoff. „Die Großindustrielle Massenproduktion“ [B1, Bauernhansl, S.5] ermöglichte die Produktion von immer günstigeren (Konsum-)Gütern für die weiterhin wachsende Bevölkerung [B1, Bauernhansl, S.5]. Die Gesellschaft erkannte, dass die Ausbeutung der Fabrikarbeiter nicht weiter gehen kann und Gewerkschaften gewannen stark an Bedeutung. Daher sollten Fabrikarbeiter von nun an besser entlohnt werden, um weitere Soziale Spannungen zu vermeiden [B1, Bauernhansl, S.5]. Im Übergang zwischen der ersten und zweiten industriellen Revolution zum verbreiteten sich die Ideen des Kommunismus und der Sozialdemokratie [B1, Bauernhansl, S.5].

Die **dritte industrielle Revolution** Mitte des 20. Jahrhunderts wurde geprägt zunehmende Automatisierung der Produktionsabläufe durch das Einbinden von Elektronik und Informations- und Kommunikationstechnik [B1, Bauernhansl, S.7]. Durch den Einsatz von programmierbaren Steuerungen, „waren auch in den Fabriken Programmierer gefragt“ [10, Spiegel, Industrielle Revolutionen]. Des Weiteren wurde der Personal-Computer (PC) vermehrt im Büro aber auch im Haushalt eingesetzt [9, Industrie Wegweise, I.i.W.d.Z.]. Die Entwicklungen der dritten industriellen Revolution ermöglichten eine variantenreiche Serienproduktion. Mit dieser Entwicklung veränderten sich aber auch die Erwartungen der Kunden, welche nun vermehrt auf Individualität und Qualität der Produkte achteten [B1, Bauernhansl, S.7].

Die **vierte industrielle Revolution** ist momentan noch im Gange. In Kapitel 2.1.2 und 2.1.3 gibt es einen Einblick in die Potentiale und Herausforderungen von Industrie 4.0. Vorweg lässt sich aber sagen, dass die vierte Industrielle Revolution die Industrie flexibler gestalten soll,

statt ein höheres grad an Automatisierung zu erreichen. Die Wertschöpfung soll durch Cyber-Physische-Systeme verbessert werden. Es ist wichtig zu wissen, dass die Entwicklungen der Industrie 4.0 aus zwei Entwicklungsrichtungen kommen [1, Anderl, Vortrag 2015]:

### 1. Physicalize the Cyber

Aus der Sicht der Informationstechnischen Unternehmen: „Zunehmende Nutzung von Informationstechnik in der Produktion“ [1, Anderl, Vortrag 2015].

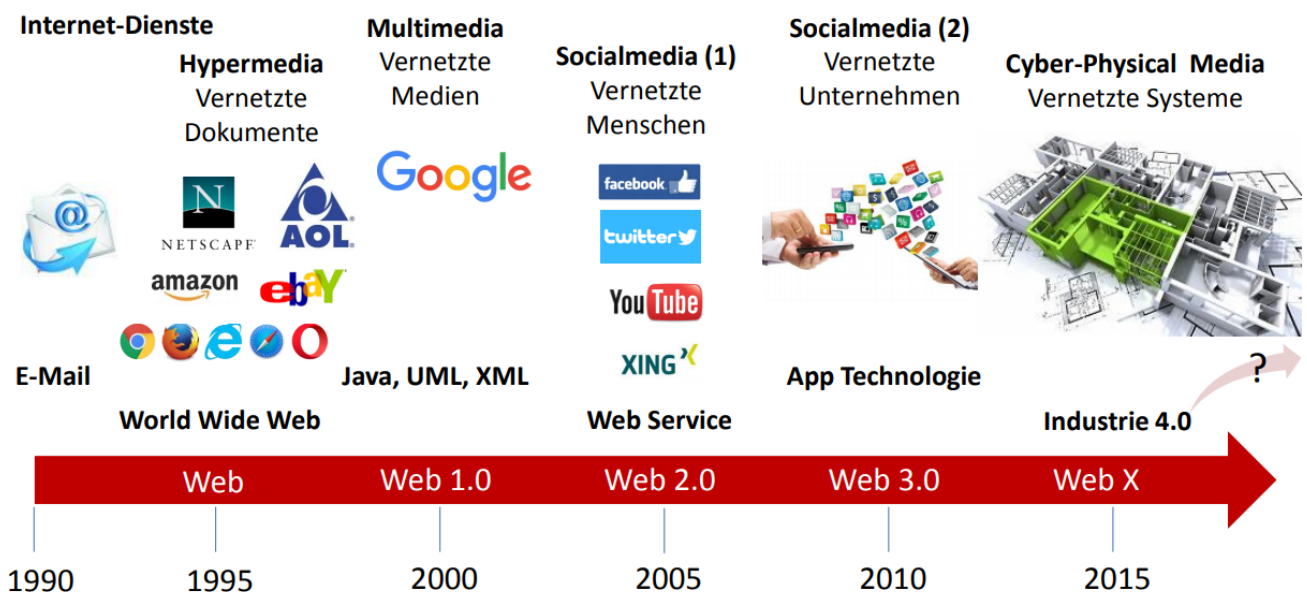
### 2. Cyberize the Physical

Aus der Sicht der Produktionstechnischen Unternehmen: „Anwendungen für Informationstechnik in der Produktion“ [1, Anderl, Vortrag 2015].

---

## Informations- und Kommunikationstechnik

---



**Abbildung 2.2:** Die Entwicklung von Web bis Web 4.0 [A2, Kompet. Dig.Handwerk, S.3]

Genauso wie in der Industrie gab es in der Informations- und Kommunikationstechnik einige technologische Umbrüche. Auffällig ist, dass die sich die Technologien in der Informations- und Kommunikationstechnik im Vergleich zu den Fortschritten in der Industrie sehr schnell weiterentwickeln. Die wichtigsten Umbrüche sind in der Abbildung 2.2 zusammengefasst.

Das wichtigste was man der Abbildung 2.2 entnehmen kann ist, dass in der neuen Entwicklungsstufe von Informations- und Kommunikationstechnik Cyber-Physische Medien im Mittelpunkt stehen.

---

### 2.1.2 Potentiale von Industrie 4.0

---

„Industrie 4.0 macht die Produktion individueller und effizienter“ [6, BDI, Was ist Industrie 4.0], ermöglicht durch das vernetzen von „Mensch, Maschinen und Werkstücken durch modernste Informations- und Kommunikationstechnik“ [6, BDI, Was ist Industrie 4.0]. Dies verspricht

---

dem Wirtschaftsstandort Deutschland Wachstumschancen und sogar Wettbewerbsvorteile bei entsprechender Umsetzung. Laut dem Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) prognostizieren Experten eine Produktivitätssteigerung von bis zu 30 Prozent bis zum Jahr 2025 [6, BDI, Was ist Industrie 4.0].

Mit Industrie 4.0 sollen nicht nur große Unternehmen, sondern gezielt auch der Mittelstand angesprochen werden, um ihm wirtschaftlichen Nutzen bringen, da dieser das Rückgrat der deutschen Industrie bildet. Laut einer Studie der Commerzbank haben 86 Prozent der Unternehmen die Potentiale von Industrie 4.0 erkannt, zögern aber noch mit der Einführung [2, VDMA, Leitfaden, S.4]. Man kann sogar sagen, dass sich dem deutschen Mittelstand durch neuartige und innovative Produkte die Möglichkeit eröffnet, den Wandel zu Industrie 4.0 aktiv mitzugestalten [2, VDMA, Leitfaden, S.8]. Dennoch gibt es viele Unternehmen, denen „der konkrete Nutzen von Lösungsansätzen im Umfeld von Industrie 4.0 nicht ersichtlich“ ist [2, VDMA, Leitfaden, S.7].

Der Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. hat die Unternehmensberatung Roland Berger mit einer „Studie zur digitalen Transformation der Industrie“ [8, BDI] beauftragt [8, BDI]. Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass beim Verpassen der aktuellen Entwicklungen dem Wirtschaftsstandort Deutschland „Einbußen bei der industriellen Wertschöpfung bis 2025 von insgesamt 220 Milliarden Euro“ [8, BDI] drohen [8, BDI]. Europaweit rechnet man sogar mit Einbußen von bis zu 605 Milliarden Euro. Bei einem erfolgreichen Anknüpfen an den Wandel zu Industrie 4.0 „prophezeit die Studie der Automobilindustrie schon im Jahr 2025 ein sattes Wertschöpfungsplus von 35 Milliarden Euro“ [8, BDI] und dem Maschinen- und Anlagebau sogar bis zu 89 Milliarden Euro pro Jahr. Die Studie der Unternehmensberatung Roland Berger kam weiterhin zu dem Ergebnis, dass sich bereits 55 Prozent der befragten Unternehmen „bereits intensiv mit der Digitalen Transformation“ [8, BDI] beschäftigt haben, aber 43 Prozent die Bedeutung der Digitalisierung und des Wandels hauptsächlich in der Kostenreduktion sieht [8, BDI]. Des Weiteren schätzen sich rund ein Drittel der Unternehmen als hoch oder sehr hoch Digitalisiert ein, bei profitablen Unternehmen waren es sogar 62 Prozent.

Im Folgenden sind vielversprechende Potentiale von Industrie 4.0 zusammengefasst:

**1. Individualisierung der Kundenwünsche** [12, BMBF, Umsetz., S.19]

Ermöglicht Rücksicht auf Individuelle Kundenwünsche zu nehmen. Dabei bleibt die Produktion selbst bei Bestellungen von Einzelstücken oder Kleinstmengen (Losgröße 1) effizient und rentabel [12, BMBF, Umsetz., S.19].

**2. Flexibilisierung** [12, BMBF, Umsetz., S.20]

Optimierungen „in unterschiedlichen Dimensionen: Qualität, Zeit, Risiko, Robustheit, Preis, Umweltverträglichkeit, etc.“ ermöglicht es die Produktionsprozesse flexibel zu gestalten, kurzfristig zu verändern und auf unerwartete Ausfälle zu reagieren [12, BMBF, Umsetz., S.20].

**3. Optimierte Entscheidungsfindung** [12, BMBF, Umsetz., S.20]

Durch das Sammeln von produktionstechnisch relevanten Daten in Echtzeit fällt es leichter die (richtigen) Entscheidungen zu treffen, um auf Störungen zu reagieren, „standortübergreifende globale Optimierungen“ durchzuführen und auf dem globalen Markt Wettbewerbsfähig zu bleiben [12, BMBF, Umsetz., S.20]. Daher sollte die Vernetzung der Unternehmen nicht nur firmenintern und lokal, sondern auch Unternehmens übergreifend (z.B. mit Zulieferern/Kunden) stattfinden [6, BDI, Was ist Ind4].



- 
4. **Ressourcenproduktivität und Effizienz** [12, BMBF, Umsetz., S.20]  
„Smart Factorys“, also Fabriken mit Produktionsanlagen die sich eigenständig und in Echtzeit koordinieren und optimieren und somit die Produktion effizienter und flexibler gestalten [6, BDI, Was ist Ind4]. Dabei wird bei gleichbleibendem oder sogar niedrigerem Ressourceneinsatz die Produktionsmenge gesteigert [12, BMBF, Umsetz., S.20].
  5. **Wertschöpfungspotenziale durch neue Dienstleistungen** [12, BMBF, Umsetz., S.20]  
Es eröffnet sich ein neuer Markt für innovative Dienstleistungen, vorangetrieben durch die gesammelten Daten (Big Data) über den gesamten Lebenszyklus von intelligenten Produkten [12, BMBF, Umsetz., S.20]. Durch das „Internet der Dinge“ (Internet of Things, kurz: IOT) werden intelligente Produkte zu Dienstleistungen, sogenannten „Smart Services“, da sie während Ihrer gesamten Lebensdauer mit dem Internet verbunden sind [6, BDI, Was ist Ind4].
  6. **Demografie-sensible Arbeitsgestaltung** [12, BMBF, Umsetz., S.20]  
Die Unternehmen bekommen durch verbesserte Arbeitsbedingungen die Chance auf den demographischen Wandel zu reagieren und sogar davon profitieren zu können [12, BMBF, Umsetz., S.20]. Durch den Fachkräftemangel und die alternde Bevölkerung ist es wichtig „ältere Menschen länger in das Berufsleben einzubinden“ [6, BDI, Was ist Ind4].
  7. **Work-Life-Balance** [12, BMBF, Umsetz., S.20]  
Intelligente Assistenzsysteme helfen dabei, „den Arbeitseinsatz so zu gestalten, dass sowohl den Flexibilitätsbedürfnissen der Betriebe als auch den notwendigen Flexibilitätsspielräumen für den privaten Bereich in neuer Qualität Rechnung getragen werden kann“ [12, BMBF, Umsetz., S.20]. Diese Assistenzsysteme können Unterschiedlich aussehen. Einige Beispiele dafür sind Mobile Geräte wie Tablet Computer oder Virtual/Augmented Reality Brillen [6, BDI, Was ist Ind4].
  8. **Wettbewerbsfähigkeit als Hochlohnstandort** [12, BMBF, Umsetz., S.20]  
Deutschland gilt als ein Hochlohnstandort. Um auf den internationalen Markt Wettbewerbsfähig zu sein müssen die Unternehmen genug erwirtschaften um Profitabel zu sein [12, BMBF, Umsetz., S.20]. Industrie 4.0 gibt Unternehmen die Chance eine Lohnenswerte Produktion im eigenen Land zu betreiben [12, BMBF, Umsetz., S.20].
  9. **Smart Products** [6, BDI, Was ist Ind4]  
Intelligente Produkte mit integrierten Chips (z.B. RFID Chips) liefern selbst alle benötigten Informationen für die Produktion. So kann beispielsweise ein Produkt einer Maschine mitteilen, in welcher Farbe es lackiert werden soll. Des Weiteren liefern diese Chips Daten, die für das virtuelle Abbild des Produktes und der Produktion genutzt werden. [6, BDI, Was ist Ind4].
  10. **Simulation und Überwachung der Produktion** [6, BDI, Was ist Ind4]  
Durch einen digitalen Zwilling und die Sammlung von Daten in Echtzeit kann die gesamte Produktion simuliert und überwacht werden. Dies ermöglicht beispielsweise die Fernsteuerung, Simulation und Überwachung der Produktion in Echtzeit [6, BDI, Was ist Ind4].
  11. **Chancen für IT-Unternehmen** [2, VDMA, Leitf., S.7]  
Es eröffnen sich immer mehr Chancen für Informations- und Kommunikationstechnische

Unternehmen in Produktionstechnisch geprägten Märkten Fuß zu fassen [2, VDMA, Leitf., S.7].

### 2.1.3 Herausforderungen bei der Umsetzung

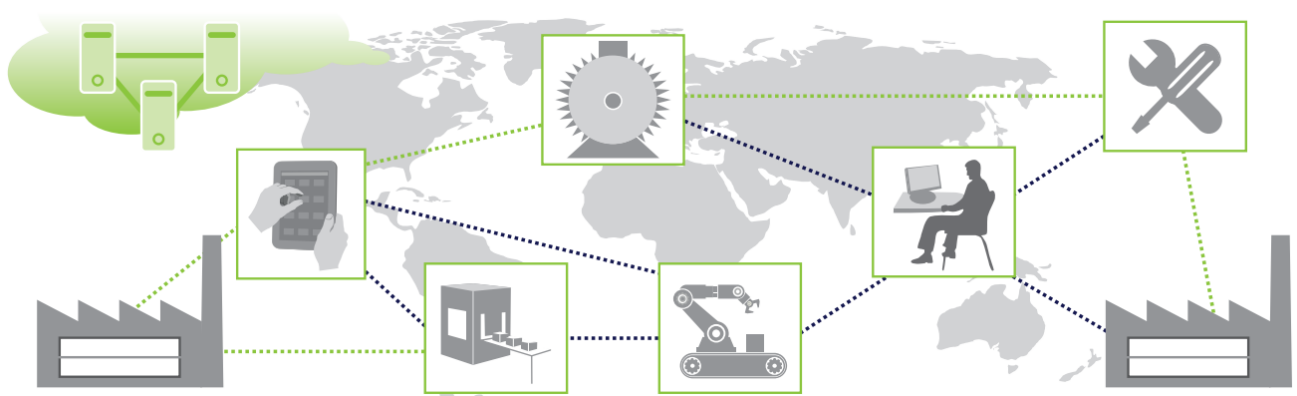
Die Potentiale von Industrie 4.0 bringen viele Herausforderungen mit sich. Für den Wandel zu Industrie 4.0 gibt es jedoch keinen allgemein anwendbaren Lösungsweg. Im Folgenden gibt es einen Einblick in die wichtigsten Herausforderungen die der Wandel zu Industrie 4.0 mit sich bringt. In Abbildung 2.3 gibt es einen Überblick der fünf wichtigsten Herausforderungen.



**Abbildung 2.3:** Herausforderungen von Industrie 4.0, Abbildung nach [14, Einf+Ums, S.37]

#### Horizontale und Vertikale Integration

Die **horizontale Integration** (Abbildung 2.4) in der Produktions- und Automatisierungstechnik und der IT erfordert "die Integration der verschiedenen IT-Systeme für die unterschiedlichen Prozessschritte der Produktion und Unternehmensplanung, zwischen denen ein Material-, Energie- und Informationsfluss verläuft"[12, BMBF, S.24]. Das Ganze muss sowohl unternehmensintern (Logistik, Fertigung, etc.) als auch unternehmensübergreifend (Zulieferer, Produzenten, etc.) stattfinden, um eine durchgängige Lösung zu ermöglichen [12, BMBF, S.24].

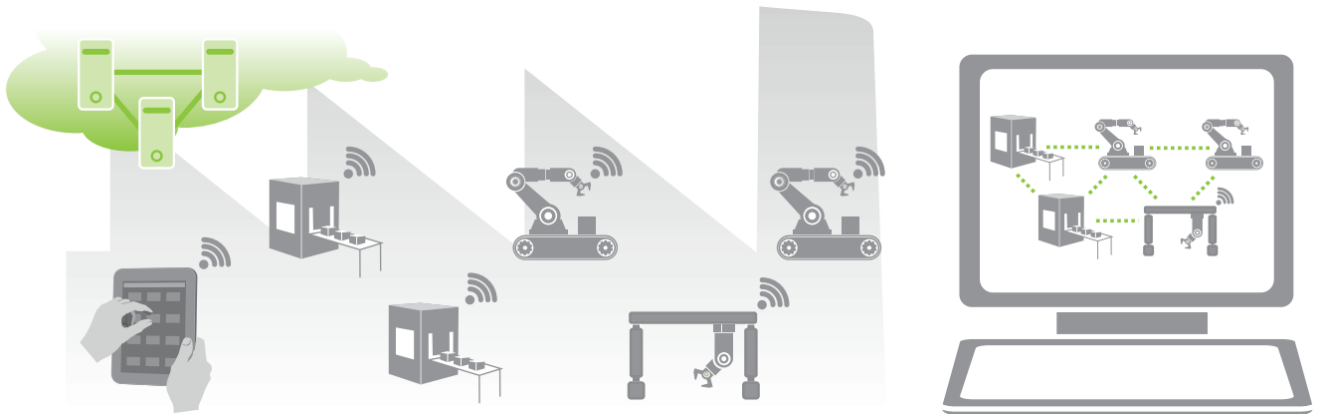


**Abbildung 2.4:** Schaubild horizontale Integration [12, BMBF, S.35]

Die **vertikale Integration** (Abbildung 2.5) in der Produktions- und Automatisierungstechnik und der IT erfordert "die Integration der verschiedenen IT-Systeme auf den unterschiedlichen Hierarchieebenen (beispielsweise die Akteur- und Sensorebene, Steuerungsebene, Produk-



tionsleitebene, Manufacturing and Execution-Ebene, Unternehmensplanungsebene)"[12, BMBF, S.24] um eine durchgängige Lösung zu ermöglichen [12, BMBF, S.24].



**Abbildung 2.5:** Schaubild vertikale Integration [12, BMBF, S.36]

---

### Dezentrale Intelligenz

---

Dezentrale Intelligenz ermöglicht Produktionsmitteln und -anlagen ortsunabhängig die „für den Produktionsprozess relevante Informationen an ein dezentrales Steuerungssystem weitergeben zu können“ [14, EInf.+Ums., S.39]. Daher bildet die dezentrale Intelligenz das Fundament für die dezentrale Steuerung.

Für die Realisierung von dezentraler Intelligenz bedarf es auf der Produktseite Produkte mit eingebetteten RFID-Chips und auf der Produktionsseite Produktionssysteme mit entsprechenden Sensoren und Computersystemen zum Verarbeiten der ausgelesenen Daten [14, EInf.+Ums., S.39].

---

### Dezentrale Steuerung

---

Es findet eine Entwicklung „weg von einer ortsgebundenen, unflexiblen Steuerung“ [14, EInf.+Ums., S.40] statt. Dezentrale Systeme und das Internet der Dinge und Dienste ermöglichen die ortsunabhängige Steuerung von Produktionsanlagen.

Unternehmen stehen vor der Herausforderung ihre Produktions- und Steuerungssysteme in eine Cloud auszulagern, da die klassische Vernetzung durch Verkabelungen den Flexibilitätsansprüchen von Industrie 4.0 nicht gerecht wird und zudem auch noch aufwendig und ineffizient ist [14, EInf.+Ums., S.40].

---

### Durchgängiges digitales Engineering

---

Unter durchgängigem digitalen Engineering kann man sich eine digitale Abbildung des gesamten physischen Produktionsprozesses vorstellen. Kennzeichnend für das durchgängige digitale Engineering ist die nahtlose Verknüpfung der virtuellen und physischen Welt. Des Weiteren werden alle Prozesse des Gesamtprozesses „von der Entwicklung bis zur Produktionsplanung“ [14, EInf.+Ums., S.41] in Echtzeit visualisiert [14, EInf.+Ums., S.41].

---

Die drei wesentlichen Aspekte des durchgängigen digitalen Engineerings sind:

**1. Digitale Fabrik**

Die digitale Fabrik stellt das digitale Abbild der gesamten physischen Produktionsanlage mit Hilfe von Werkzeugen wie CAD (computer-aided design) oder CAM (computer-aided manufacturing) dar [14, Einf. + Ums., S.41].

**2. Virtuelle Fabrik**

Die virtuelle Fabrik stellt eine „dynamische Betrachtung der realen Fabrik“ [14, Einf. + Ums., S.41] dar und entsteht aus der digitalen Fabrik unter der „Einbeziehung der Dimension „Zeit““ [14, Einf. + Ums., S.41].

**3. Datenmanagementsystem**

Ein geeignetes Datenmanagementsystem ermöglicht „echtzeitfähige Abbildungen der realen auf die digitale Welt“ [14, Einf. + Ums., S.41]. Des Weiteren ermöglicht ein Datenmanagementsystem „Prozess-, Materialfluss- und Logistikplanung“ [14, Einf. + Ums., S.41].

---

### Cyber-physisches Produktionssystem (CPPS)

---

Ein Cyber-physisches Produktionssystem besteht zum einen aus den intelligenten Produktionsanlagen mit integrierten Sensoren und Aktoren, die „Daten an Steuerungssysteme weiterleiten“ [14, Einf. + Ums., S.42] können und zum anderen aus den intelligenten Produktionsmitteln welche mit Hilfe von integrierten Chips direkt mit den Produktionsanlagen kommunizieren und somit den Produktionsprozess beeinflussen können.

Durch die Cloud-Anbindung werden die Daten weltweit abrufbar sein, jedoch bedarf es noch an geeigneten Mensch-Maschine-Schnittstellen um den Menschen aktiv in den Steuerungsprozess einbinden zu können.

In Zukunft werden Cyber-Physische Produktionssysteme in der Lage sein anhand der gesammelten Daten eigenständig den Produktionsprozess zu optimieren und auf unerwartete Ausfälle oder Störungen zu reagieren [14, Einf. + Ums., S.42].

---

#### 2.1.4 Leitfaden für Industrie 4.0

---

Da es wie bereits erwähnt keinen allgemein anwendbaren Lösungsweg gibt, haben einige Organisationen einen Leitfaden für den Wandel zu Industrie 4.0 angefertigt. Im Folgenden wird der Leitfaden „Leitfaden Industrie 4.0 – Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand“ vom Verband Deutscher Maschinen- und Anlagebauer (VDMA) und der Leitfaden „Leitbild 2030 für Industrie 4.0 – Digitale Ökosystem global gestalten“ von der Plattform Industrie 4.0 vorgestellt.

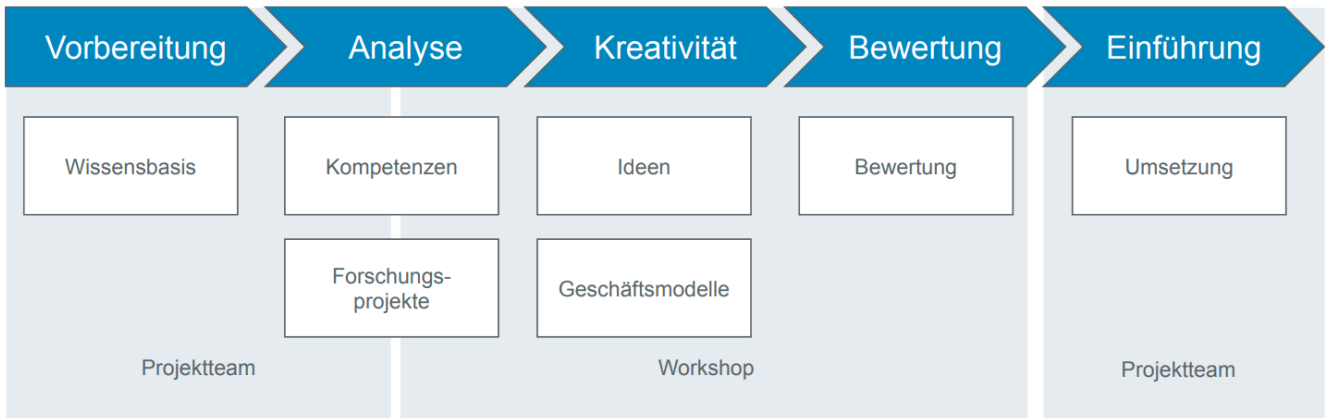
---

#### Leitfaden Industrie 4.0 - Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand

---

Dieser Leitfaden soll mittelständischen Unternehmen einen Werkzeugkasten bieten, der Ihnen bei der Entwicklung „eigenständiger Industrie 4.0 Geschäftsmodelle“ [2, VDMA, leit, S.6] behilflich ist. Des Weiteren soll der Leitfaden keine allgemeingültige Strategie darstellen, sondern die

Unternehmen dabei unterstützen ihre eigenen Stärken und Kompetenzen bei ihrer Weiterentwicklung zu berücksichtigen [2, VDMA, Leitfaden, S.6]. Wie in Abbildung 2.6 zu sehen ist, umfasst der Leitfaden insgesamt fünf Phasen: Vorbereitungs-, Analyse-, Kreativitäts-, Bewertungs- und Einführungsphase [2, VDMA, Leitfaden, S.6].



**Abbildung 2.6:** VDMA - Aufbau des Leitfadens [2, VDMA, S.10]

**1. Vorbereitungsphase:**

In der ersten Phase soll eine Wissensbasis für alle Teilnehmer geschaffen werden. Das Unternehmen soll Kenntnisse über den Markt und über ihr eigenes Produkt aufbauen. Diese grundlegende Wissensbasis ist der „Ausgangspunkt für die Erarbeitung von Produktideen und Verbesserungen in der internen Produktion“ [2, VDMA, Leitfaden, S.10].

**2. Analysephase:**

In der zweiten Phase werden die Kompetenzen des Unternehmen im Bereich von Industrie 4.0 Technologien untersucht. Die Kompetenzen des Unternehmens werden sowohl produktseitig als auch produktionsseitig untersucht. Diese Phase liefert eine „Ausgangsbasis für die spätere Ideengenerierung“ [2, VDMA, Leitfaden, S.10].

**3. Kreativitätsphase:**

In der dritten Phase geht es um die „Generierung neuer Ideen und die anschließende Ausarbeitung von Konzepten für Geschäftsmodelle“, basierend auf dem aufgebauten Wissen der vorherigen zwei Phasen [2, VDMA, Leitfaden, S.10].

**4. Bewertungsphase:**

In der vierten Phase werden die zuvor erarbeiteten Konzepte bewertet um Geschäftsmodelle „mit hohem Potential bei geringen Ressourceneinsatz“ [2, VDMA, Leitfaden, S.10]. zu identifizieren [2, VDMA, Leitfaden, S.10].

**5. Einführungsphase:**

In der fünften und letzten Phase geht es um die Ausarbeitung der gesammelten Konzepte, damit diese „in entsprechende Projekte überführt und vorangetrieben“ [2, VDMA, Leitfaden, S.10] werden können.

Zentrales Element des Leitfadens ist der sogenannte „Werkzeugkasten Industrie 4.0“, der in Abbildung 2.7 zu sehen ist. Der Werkzeugkasten „zeigt Entwicklungsstufen für verschiedene

Anwendungsebenen von Industrie 4.0 auf“ [2, VDMA, Leitfaden, S.11] und soll bei der „schrittweisen Umsetzung innovativer Ideen in kleinen und mittelständischen Unternehmen“ behilflich sein [2, VDMA, Leitfaden, S.11]. Dabei ist der Werkzeugkasten unterteilt in zwei Hälften: Produkte und Produktion. Die einzelnen Entwicklungsstufen auf jeder Anwendungsebene sind in steigender Komplexität von links nach rechts sortiert. Es ist anzumerken, dass der Werkzeugkasten weiterentwickelt werden muss, da „die Entwicklungen der vierte industrielle Revolution noch lange nicht abgeschlossen“ [2, VDMA, Leitfaden, S.11] sind und daher einige „technologische Entwicklungsstufen nicht umfänglich vorausgesagt werden können“ [2, VDMA, Leitfaden, S.11].

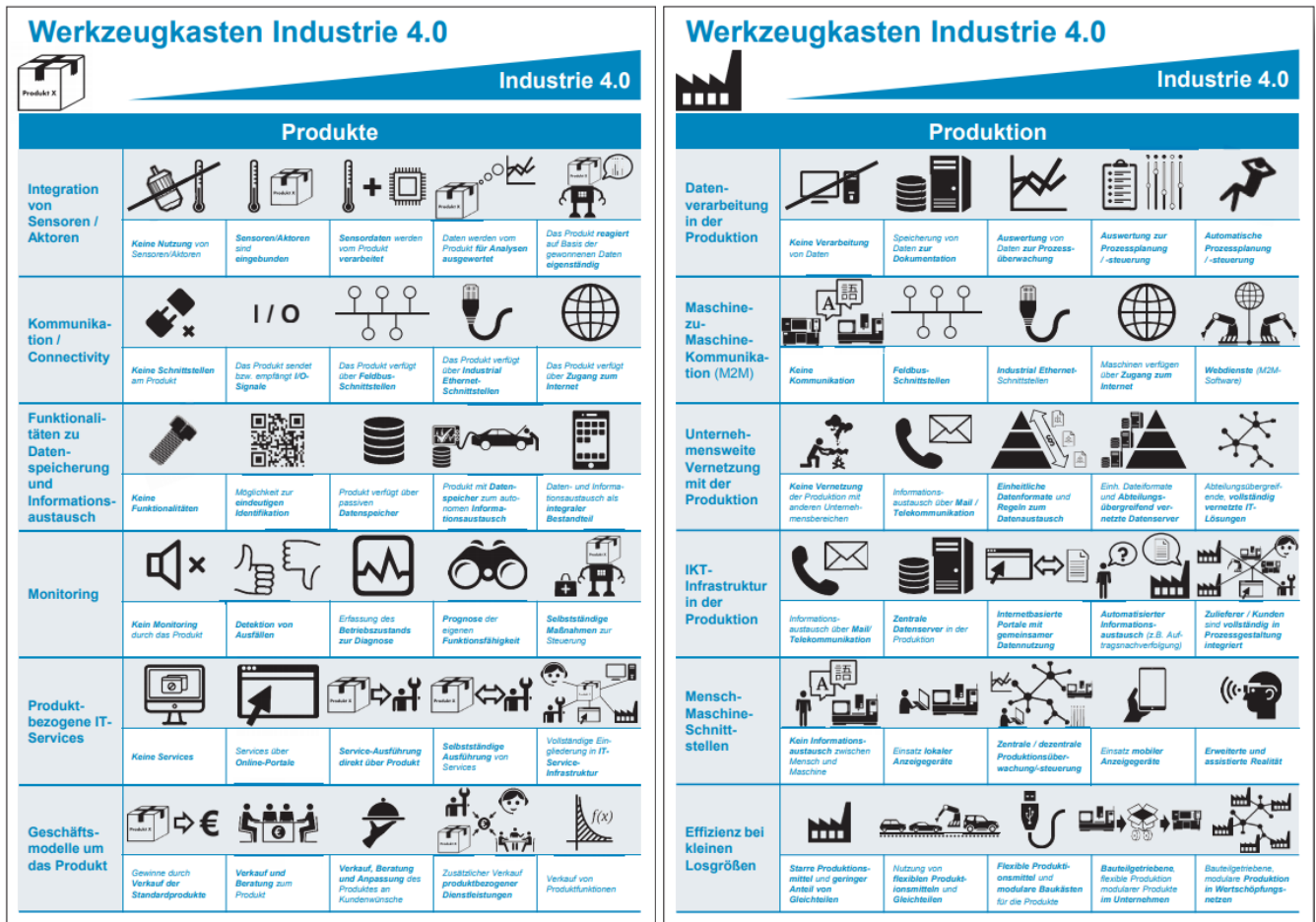


Abbildung 2.7: VDMA - Werkzeugkasten Industrie 4.0 [2, VDMA, S.9]

Der Bereich der Produkte befasst sich mit der Frage, inwiefern sich mit Hilfe von Industrie 4.0 Produkte entwickeln (oder auch weiterentwickeln) lassen können, sodass diese für Kunden einen Mehrwert liefern. Auf der Seite der Produktion umfasst der Werkzeugkasten folgende Anwendungsebenen [2, VDMA, Leitfaden, S.13]:

### 1. Integration von Sensoren und Aktoren:

Die Entwicklungen auf dieser Anwendungsebene reichen von Produkten mit keinen Sensoren/Aktoren, bis hin zu Produkten die auf Basis der gewonnenen Daten eigenständig reagieren und mit den Cyber-Physischen-Systemen kommunizieren können [2, VDMA, Leitfaden, S.13].

---

## **2. Kommunikation und Konnektivität:**

Die Entwicklungen auf dieser Anwendungsebene reichen von Produkten die keine Schnittstelle zur Außenwelt besitzen, bis hin zu Produkten die über eine Anbindung zum Internet verfügen [2, VDMA, Leitfaden, S.13].

## **3. Funktionalitäten zur Datenspeicherung und dem Informationsaustausch:**

Die Entwicklungen auf dieser Anwendungsebene reichen von Produkten die keine Funktionalitäten zur Datenspeicherung und Informationsaustausch besitzen, bis hin zu Produkten bei denen dies ein integraler Bestandteil ist [2, VDMA, Leitfaden, S.13].

## **4. Monitoring:**

Die Entwicklungen auf dieser Anwendungsebene reichen von Produkten die kein eigenständiges Monitoring durchführen können, bis hin zu Produkten die selbstständig Maßnahmen zur Steuerung der Produktion übernehmen können [2, VDMA, Leitfaden, S.13].

## **5. Produktbezogene IT-Services:**

Die Entwicklungen auf dieser Anwendungsebene reichen von Produkten die keine zusätzlichen Dienstleistungen anbieten, bis hin zu Produkten die vollständig eingegliedert sind in eine übergeordnete IT-Service-Infrastruktur [2, VDMA, Leitfaden, S.13].

## **6. Geschäftsmodelle um das Produkt:**

Die Entwicklungen auf dieser Anwendungsebene reichen von Produkte bei denen der Gewinn nur durch den Verkauf der Produkte gemacht wird, bis hin zu Produkten bei denen Gewinn durch den Verkauf zusätzlicher Produktfunktionen (z.B. Dienstleistungen) gesteigert wird [2, VDMA, Leitfaden, S.13].

Im Bereich der Produktion beschäftigt man sich mit der Frage, wie Industrie 4.0 es den Unternehmen ermöglichen kann, dass sowohl Produktionsabläufe optimiert als auch Produktionskosten gesenkt werden. Auf der Seite der Produktion umfasst der Werkzeugkasten folgende Anwendungsebenen [2, VDMA, Leitfaden, S.15]:

### **1. Datenverarbeitung in der Produktion:**

Die Entwicklungen auf dieser Anwendungsebene reichen von Produktionsanlagen die keine Daten verarbeiten, bis hin zu Produktionsanlagen mit automatisierten Prozessplanungen und Steuerungen [2, VDMA, Leitfaden, S.15].

### **2. Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M):**

Die Entwicklungen auf dieser Anwendungsebene reichen von Produktionsanlagen die keine Form von Kommunikation zwischen Maschinen ermöglichen, bis hin zu Produktionsanlagen die durch eine Internet-Schnittstelle eingebunden sind in Webdienste (Cloud) [2, VDMA, Leitfaden, S.15].

### **3. Unternehmensweite Vernetzung mit der Produktion:**

Die Entwicklungen auf dieser Anwendungsebene reichen von Produktionsanlagen bei denen die Produktion nicht mit anderen Unternehmensbereichen vernetzt ist, bis hin zu Unternehmen die eine Abteilungsübergreifende vernetzte IT-Infrastruktur besitzen [2, VDMA, Leitfaden, S.15].

### **4. IKT-Infrastruktur in der Produktion:**

Die Entwicklungen auf dieser Anwendungsebene reichen von Produktionsanlagen bei denen der gesamte Informationsaustausch über Mail oder Telekommunikation stattfindet, bis

---

hin zu Unternehmen bei denen die Zulieferer/Kunden vollständig in der Prozessgestaltung integriert sind [2, VDMA, Leitfaden, S.15].

#### **5. Mensch-Maschine-Schnittstellen:**

Die Entwicklungen auf dieser Anwendungsebene reichen von Produktionsanlagen deren Maschinen keinen direkten Informationsaustausch mit den Menschen ermöglichen, bis hin zu Produktionsanlagen bei denen die Mitarbeiter mit Hilfe von Erweitert und Assistierter Realität direkt Informationen von den Maschinen auslesen können [2, VDMA, Leitfaden, S.15].

#### **6. Effizient bei kleinen Losgrößen:**

Die Entwicklungen auf dieser Anwendungsebene reichen von Produktionsanlagen die nicht dynamisch und somit ineffizient bei kleinen Losgrößen sind, bis hin zu bauteilgetriebenen modularen Produktionen, ermöglicht durch Wertschöpfungsnetze [2, VDMA, Leitfaden, S.15].

Für diese Arbeit ist die Anwendungsebene „Mensch-Maschine-Schnittstelle“ auf der Produktionsseite des Werkzeugkastens am relevantesten, da der Einsatz von erweiterter Realität (Virtual Reality) die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine maßgeblich verändert. Diese Entwicklung ermöglicht einige neue Geschäftsmodelle im Bereich von Industrie 4.0, wie z.B. die standortunabhängige Interaktion mit Produktionsanlagen mit Hilfe von Virtual Reality Brillen.

---

### **Leitbild 2030 für Industrie 4.0 - Digitale Ökosysteme globale gestalten**

---

Dieser Leitfaden stellt im Gegensatz zu dem vorher vorgestellten Leitfaden den Unternehmen keinen Werkzeugkasten zur Verfügung. Stattdessen konzentriert sich der Leitfaden auf die drei Handlungsfelder Souveränität, Interoperabilität und Nachhaltigkeit. Laut den Verfassern dieses Leitfadens sind diese Handlungsfelder eng miteinander Verknüpft und bilden die zentralen und strategischen Bausteine für eine erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0. Des Weiteren sehen die Verfasser die genannten Handlungsfelder als „leitend für die kommende Dekade der anstehenden Skalierung von Industrie 4.0 in Deutschland, Europa und weltweit“ [3, Plattf.Ind., S.3] an.

#### **Souveränität**

Souveränität soll die „Freiheit aller Akteure am Markt selbstbestimmte, unabhängige Entscheidungen zu treffen“ [3, Plattf.I, S.4] und einen fairen Wettbewerbs ermöglichen [3, Plattf.I, S.4]. Souveränität erfordert:

##### **1. Digitale Infrastruktur** [3, Plattf.I, S.4]

Es wird eine über Unternehmensgrenzen hinweg reichende leistungsstarke und souveräne Infrastruktur benötigt. „Diese Infrastruktur muss für alle Teilnehmer gleichermaßen offen zugänglich sein und ohne Einschränkungen zur Verfügung stehen“ [3, Plattf.I, S.4].

##### **2. Sicherheit** [3, Plattf.I, S.4]

„Datenschutz, IT- und Informationssicherheit stellen einen fest etablierten industriellen und gesellschaftlichen Wert dar“ [3, Plattf.I, S.4] und sind somit „eine Grundvoraussetzung für Industrie 4.0 und die Kooperation innerhalb digitaler Ökosysteme“ [3, Plattf.I, S.4].



---

### 3. Technologieentwicklung [3, Plattf.I, S.4]

Der Fortschritt von Industrie 4.0 basiert auf „Forschung, Entwicklung und Innovationen“ [3, Plattf.I, S.4], daher sollen alle Teilnehmer am Wettbewerb „an den technologischen Entwicklungen partizipieren und profitieren“ [3, Plattf.I, S.4].

### Interoperabilität

Ein zentraler Bestandteil der Industrie 4.0 ist die „flexible Vernetzung unterschiedlicher Akteure“ [3, Plattf.I, S.5]. Um eine Vernetzung zwischen vielen verschiedenen Akteuren zu gewährleisten ist die Interoperabilität eine Schlüsselkomponente. Es wird vorausgesetzt, dass alle Teilnehmer sich an die Standards zur Interoperabilität einhalten, aktiv zu der Entwicklung dieser Standards beitragen und somit eine „Vernetzung über Unternehmens- und Branchengrenzen hinweg“ [3, Plattf.I, S.5] ermöglichen [3, Plattf.I, S.5]. Interoperabilität erfordert:

#### 1. Standards und Integration [3, Plattf.I, S.5]

Standards stellen die Basis für die Interoperabilität dar und erleichtern die Integration von neuen Komponenten. Das Entwickeln von branchenübergreifenden Standards und Referenzarchitekturen ist aufwendig [3, Plattf.I, S.5].

#### 2. Regulatorischer Rahmen [3, Plattf.I, S.5]

Ein regulatorischer Rahmen ist notwendig, um „faire und gleiche Bedingungen für alle Akteure sicherzustellen“ [3, Plattf.I, S.5].

#### 3. Dezentrale Systeme und Künstliche Intelligenz [3, Plattf.I, S.5]

Dezentrale Systeme und Künstliche Intelligenz sind für die industrielle Wertschöpfung im B2B-Bereich von wesentlich größerer Bedeutung als im B2C-Bereich. Die Nutzung, Verknüpfung und Auswertung von Maschinen- und Nutzerdaten erfordert ein gut vernetztes Ökosystem. Um Künstliche Intelligenz sinnvoll einsetzen zu können, muss „die Gewinnung und Nutzung von Smart Data“ [3, Plattf.I, S.5] ermöglicht werden. Smart Data sind Daten, die von intelligenten Produkten mit integrierten Chips über die gesamte Lebensdauer des Produktes gesammelt werden.

### Nachhaltigkeit

Nachhaltigkeit ist von zentraler Bedeutung für den Wandel zu Industrie 4.0, denn „ökonomische, ökologische und soziale Nachhaltigkeit stellen einen fundamentalen Eckpfeiler der gesellschaftlichen Wertorientierung dar“ [3, Plattf.I, S.6]. Des Weiteren trägt die Nachhaltigkeit „entscheidend zur Erhaltung des Lebensstandards der Gesellschaft bei“ [3, Plattf.I, S.6]. Nachhaltigkeit erfordert:

#### 1. Gute Arbeit und Bildung [3, Plattf.I, S.6]

Um ein hohes Beschäftigungsniveau zu halten und wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen Weiterbildungsmöglichkeiten geschaffen werden [3, Plattf.I, S.6].

#### 2. Gesellschaftliche Teilhabe [3, Plattf.I, S.6]

Da Industrie 4.0 „einen gesamtgesellschaftlichen Transformationsprozess“ [3, Plattf.I, S.6] darstellt, erfordert der Wandel die Beteiligung und Mitbestimmung aller Akteure [3, Plattf.I, S.6].

---

### 3. Klimaschutz [3, Plattf.I, S.6]

Um den Klimaschutz zu gewährleisten bedarf es einer steigenden Ressourceneffizienz und einem besseren Recycling von Stoffen [3, Plattf.I, S.6].

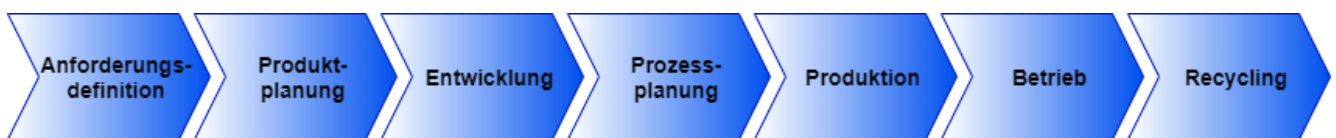
---

## 2.2 Die Ausgangslage der industriellen Fertigung

Dieses Kapitel behandelt aktuelle Standards der industriellen Fertigung. Daher gibt es einen Einblick in den Produktlebenszyklus und die Automatisierungspyramide der industriellen Fertigung.

---

### 2.2.1 Der Produktlebenszyklus



**Abbildung 2.8:** Der Produktlebenszyklus, Abbildung nach [13, Modellbas., S.3]

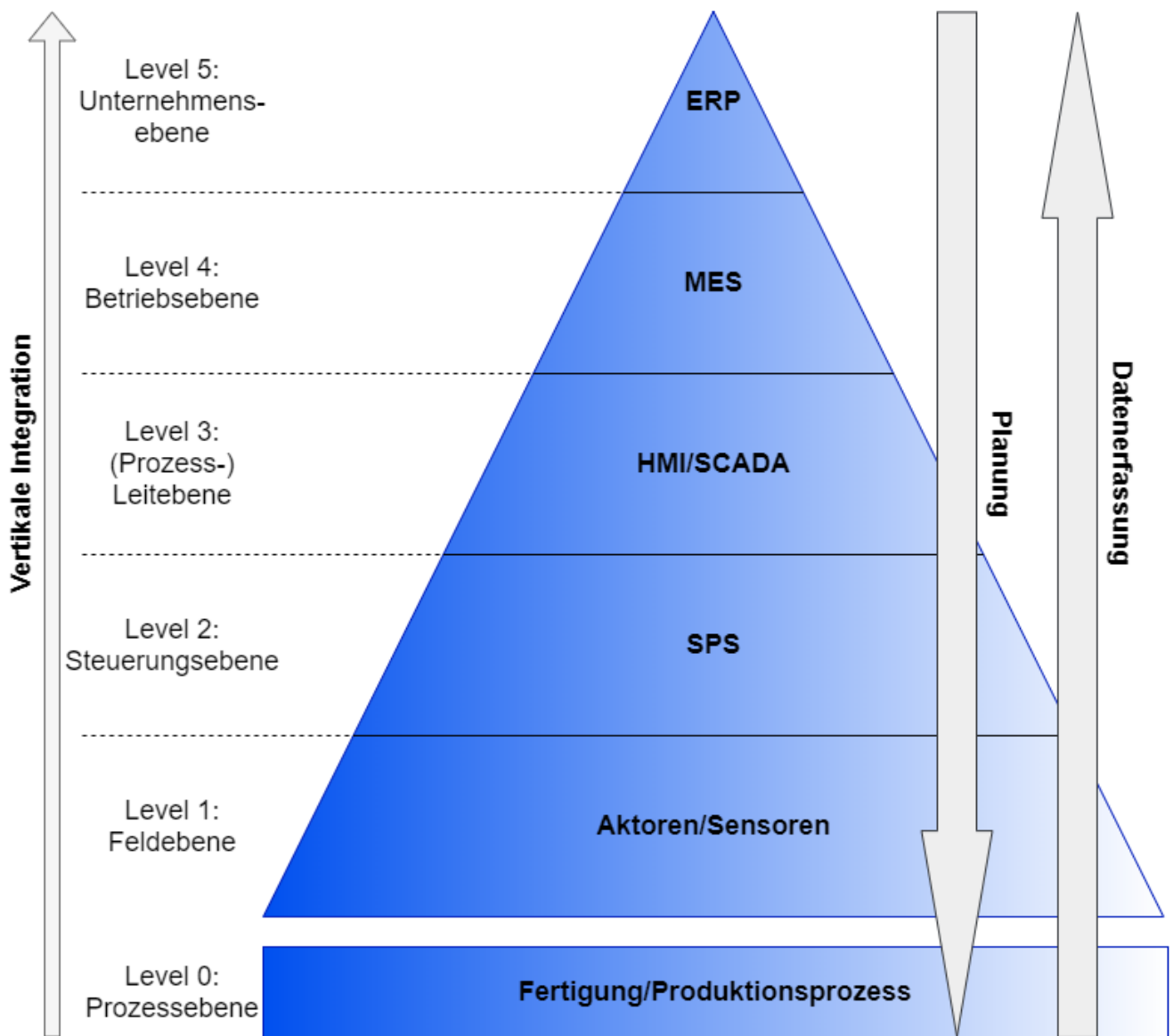
Der Produktlebenszyklus umfasst wie in Abbildung 2.8 zu sehen ist insgesamt sieben Phasen und reicht von der Anforderungsdefinition bis zum Recycling. Auffällig dabei ist, dass der Produktlebenszyklus neben den unternehmensinternen Phasen bis hin zur Produktion auch die Phasen „Betrieb“ und „Recycling“ enthält. Somit ist der Produktlebenszyklus ein interdisziplinärer Prozess und bildet strenggenommen keinen Zyklus, sondern den Lebenslauf eines Produktes ab [13, Modellbas., S.3].

Für diese Arbeit sind die Phasen Prozessplanung und Produktion am relevantesten, da der Einsatz von erweiterter Realität (Virtual Reality) in Verbindung mit einem Menschmodell (steuerbares virtuelles Abbild eines Menschen) neue Geschäftsmodelle in diesem Bereich ermöglichen wird. Dazu gehören beispielsweise die Produktionsplanung oder die Fernsteuerung von Produktionsanlagen über einen virtuellen Zwilling.

---

### 2.2.2 Die Automatisierungspyramide

Die Automatisierungspyramide aus Abbildung 2.9 hat aufgrund der zunehmenden „Automatisierung der Produktion die Aufgabe, die Komplexität der industriellen Fertigung durch die Unterteilung der anfallenden Prozesse, zur Datenerhebung und -verarbeitung, in einzelne Ebenen zu verringern“ [14, Einf.+Ums., S.49]. Sie besteht aus sechs aufeinander aufbauenden Stufen, die „die verschiedenen Ebenen der automatisierten Fertigung in einem Unternehmen“ [14, Einf.+Ums., S.49] darstellen sollen. Es ist anzumerken, dass es zwischen den Siebzigern und Neunzigern einige Veränderungen in der Zusammensetzung der Automatisierungspyramide gab, sodass man auch davon ausgehen kann, dass es in Zukunft durchaus noch einige Veränderungen geben könnte [14, Einf.+Ums., S.49]. Das Ziel der Automatisierungspyramide ist es, eine „leichtverständliche, visuelle Darstellung der industriellen Fertigung“ [14, Einf.+Ums., S.49] zu sein und gleichzeitig die fließenden Übergänge der verschiedenen Ebenen innerhalb der



**Abbildung 2.9:** Die Automatisierungspyramide, Abbildung nach [14, Einf.Ind4., S.49]

Produktion hervorzuheben [14, Einf.+Ums., S.49].

Die einzelnen Ebenen der Automatisierungspyramide lauten:

#### 1. Prozessebene

Die unterste Ebene, die Prozessebene, befasst sich mit der Fertigung und dem eigentlichen Produktionsprozess [14, Einf.+Ums., S.49]. Hier werden Daten, die meistens in Form von binären Signalen vorliegen durch die Maschinen gesammelt [15, Ind.in.Prod, S.405]. Das Sammeln dieser Daten wird durch intelligente Produkte mit integrierten RFID-Chips (Radio Frequency Identification-Chips) ermöglicht [14, Einf.+Ums., S.49].

#### 2. Feldebene

Die Feldebene liefert die Informationen über die Produktionsstätte und beinhaltet Sensoren (z.B. Temperaturfühler, Lichtschranken, etc.). Des Weiteren verfügt diese Ebene über

---

Aktoren (z.B. elektrische Regler, etc.). Zusammengefasst stellt diese Ebene die „technische Schnittstelle zum Produktionsprozess dar“ [15, Ind.in.Prod., S.405]. Die Aufgabe dieser Ebene liegt im Liefern und Verarbeiten von „Daten in Form von Ein- und Ausgangssignalen“ [14, Einf.+Ums., S.50].

### 3. Steuerungsleitebene

Auf der Steuerungsebene findet die Auswertung von Eingangssignalen (Sensordaten) über speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) statt. Des Weiteren werden „entsprechende Ergebnisdaten (Ausgangssignale) an die Feldebene zurück“ [14, Einf.+Ums., S.50] gesendet. Die gesammelten Daten können verarbeitet und in mechanische Bewegungen (z.B. mit Druckluft oder Hydraulik) umgewandelt werden [14, Einf.+Ums., S.50]. Diese Ebene stellt eine Schlüsselkomponente „zur Umsetzung einer dezentral gesteuerten Maschinen- und Anlagesteuerung“ [14, Einf.+Ums., S.50] dar.

### 4. (Prozess-) Leitebene

Zentrales Element der (Prozess-) Leitebene ist das SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Auf der (Prozess-) Leitebene werden die Messwerte der untergeordneten Schichten gesammelt [15, Ind.in.Prod., S.405]. Des Weiteren ist die Ebene zuständig für die „Visualisierung produktionsrelevanter Vorgänge“ [14, Einf.+Ums., S.50] und stellt somit eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) dar. Sie ermöglicht das Monitoring (Bedienen und Beobachten) des ganzen Systems [15, Ind.in.Prod., S.405].

### 5. Betriebsebene

Auf der Betriebsebene übernimmt das MES (Manufacturing Execution System) „die Steuerung, Lenkung und Kontrolle der Produktion“ [14, Einf.+Ums., S.50]. Die Ebene hat die Funktion eines Bindeglieds zwischen der Ebene der Maschinensteuerung und der Unternehmensebene [14, Einf.+Ums., S.50]. Zu den Hauptaufgaben dieser Ebene gehören: Produktionsfeinplanung, Produktionsdatenerfassung und die Weitergabe von Planungsdaten an das ERP-System (Enterprise Resource Planning System) [14, Einf.+Ums., S.50]. Zusätzlich findet auf dieser Ebene die Überwachung der PKIs (Key Performance Indicators) und das Material und Qualitätsmanagement statt [15, Ind.in.Prod., S.405].

### 6. Unternehmensebene

Das vorher erwähnte ERP-System ist Bestandteil der Unternehmensebene, dessen Aufgabe „die Produktionsplanung und Bestellabwicklung der industriellen Fertigung“ [14, Einf.+Ums., S.50] ist. Des Weiteren wird die Unternehmensebene manchmal auch „Topfloor“ genannt [14, Einf.+Ums., S.50].

Zusammenfassend ist es wichtig zu erwähnen, dass die einzelnen Ebenen nur mit direkt benachbarten Ebenen kommunizieren können. Außerdem kommen die Planung und die Datenerfassung aus unterschiedlichen Richtungen. Die Planung fängt ganz oben auf der Unternehmensebene an und geht bis nach ganz unten bis zur Prozessebene. Die Datenerfassung fängt ganz unten auf der Prozessebene an und geht dann über alle Ebenen hinweg bis zur Unternehmensebene [14, Einf.+Ums., S.49]. Ein weiterer maßgeblicher Unterschied zwischen den Ebenen sind die Reaktionszeiten. Die Reaktionszeit auf der Unternehmensebene kann mehrere Monate betragen, während es auf den unteren Ebenen wie der Feldebene oder Prozessebene um Millisekunden geht [16, Ident.und.Autom., S.123].

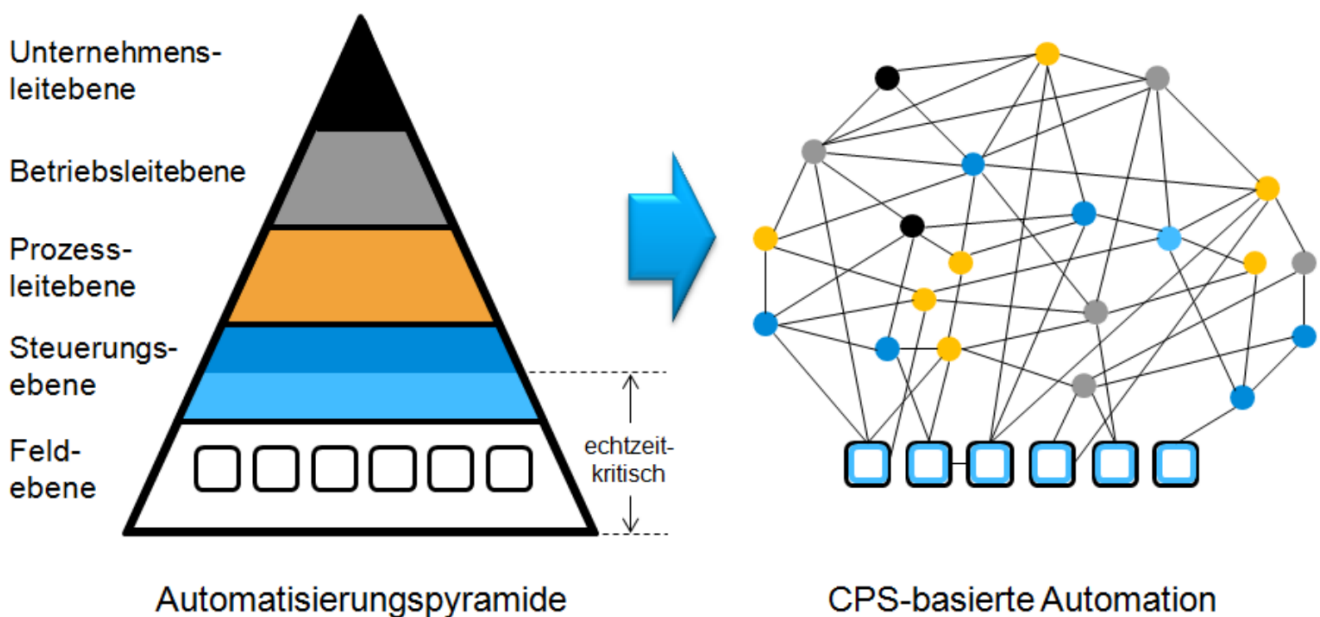
Das Thema dieser Arbeit lässt sich am besten in die Betriebsebene einordnen, da auf dieser Ebene sowohl die Steuerung als auch die Produktionsfeinplanung stattfinden. Zusätzlich ermöglicht der Einsatz von erweiterter Realität (Virtual Reality) und digitalen Zwillingen von Produktionsstätten eine bessere Vernetzung zwischen der Betriebsebene und der Unternehmensebene.

### 2.2.3 Automatisierungspyramide und Industrie 4.0

Durch den Wandel zu Industrie 4.0 werden Cyber-Physical Production Systems (CPPS) zunehmend an Bedeutung gewinnen. CPPS sind gekennzeichnet durch den hohen Vernetzungsgrad und die durchgehende Verfügbarkeit aller Daten. Langfristig werden flexible und selbstorganisierte CPPS die Produktion effizienter, kostengünstiger und ressourcenschonender gestalten [17, VDI-CPS, S.3].

Ein wichtiges Merkmal von CPPS ist die Tatsache, dass durch den Einsatz von CPPS die „Daten, Dienste und Funktionen dort gehalten abgerufen und ausgeführt“ [17, VDI-CPS, S.4] werden, „wo es im Sinne einer flexiblen, effizienten Entwicklung (inkl. Entwurf und Engineering) und Produktion den größten Vorteil bringt“ [17, VDI-CPS, S.4]. In Zukunft werden also die einzelnen Ebenen der Automatisierungspyramide nicht mehr eingehalten werden, da beispielsweise Daten von vereinzelter Ebenen auch in eine Cloud ausgelagert werden könnten [17, VDI-CPS, S.4].

Aufgrund der zunehmenden Auslagerung in die Cloud geht man davon aus, dass sich die klassische Automatisierungspyramide „durch die Einführung von vernetzten, dezentralen Systemen“ [17, VDI-CPS, S.4] in Zukunft Schritt für Schritt auflösen wird, wie es in Abbildung 2.10 illustriert wird. Echtzeitkritische Steuerungen werden aber zunächst weiterhin auf der Feldebene bleiben, sofern es in der Zukunft keine technologischen Fortschritte gibt, die es ermöglichen auch diese Ebene in die Cloud auszulagern [17, VDI-CPS, S.4].



**Abbildung 2.10:** Die Auflösung der Automatisierungspyramide [17, VDI-CPS, S.4]

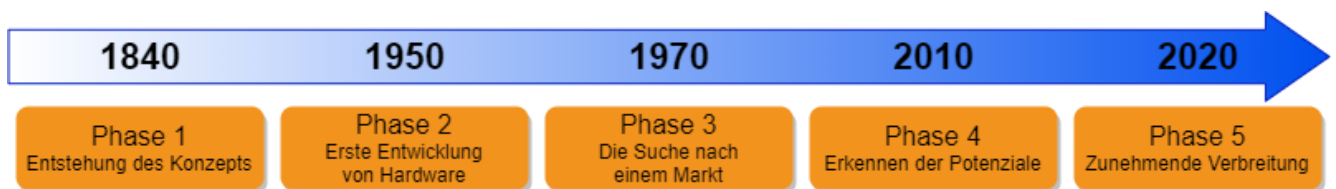
Es ist besonders wichtig hervorzuheben, dass die Bedeutung von Mensch-Maschine-Schnittstellen

zunehmen wird. Relevante Informationen aus dem Netzwerk zu Filtern und den Bedienern in geeigneter Form zu präsentieren wird eine große Herausforderung sein [17, VDI-CPS, S.4].

## 2.3 Virtual Reality

Virtual Reality (deutsch: virtuelle Realität) beschreibt eine computergenerierte virtuelle Realität. Diese durch Computer geschaffene dreidimensionale virtuelle Realität wird auf zweidimensionalen Bildschirmen abgebildet. Es gibt unterschiedliche Arten um virtuelle Realitäten abzubilden, doch die weitverbreitetste Art sind sogenannte Virtual Reality Brillen (kurz: VR-Brillen). VR-Brillen werden im englischen auch abgekürzt durch die Begriffe VR-Headset (Virtual Reality Headset) und HMD (Head-Mounted-Display) [19, Gabler, DefVR].

### 2.3.1 Die Geschichte von Virtual Reality



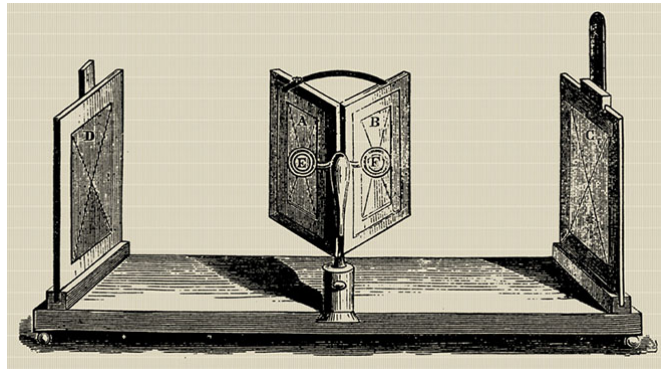
**Abbildung 2.11:** Die Geschichte von Virtual Reality, eigene Abbildung nach [20+21+22+23]

Wie es in Abbildung 2.11 illustriert wird, habe ich nach meiner Recherche die Geschichte von Virtual Reality in fünf Phasen aufgeteilt. Im Folgenden gibt es eine kurze Zusammenfassung der einzelnen Phasen. Es ist anzumerken, dass wir uns noch am Anfang der fünften Phase befinden. Daher ist es nicht möglich alle zukünftigen Entwicklungen vollständig vorherzusehen.

#### Phase 1 - Entstehung des Konzepts

1838 beschrieb Sir Charles Wheatstone als erster das Konzept Stereopsis (räumliches sehen) und erhielt dafür zwei Jahre später sogar eine Auszeichnung von der Royal Society. Seine Forschungen zeigten, dass das Menschliche Gehirn die unterschiedlichen Bilder beider Augen zu einem Bild kombiniert um das räumliche Sehen zu ermöglichen. Aufgrund seiner Forschungen erfand er das Stereoskop (Abbildung 2.12), ein optisches Gerät zum Betrachten räumlicher Bilder. Die Augen des Betrachters werden zentral vor zwei Spiegeln positioniert die jeweils in einem 45 Grad Winkel zum Betrachtungswinkel stehen und Bilder reflektieren die vom Betrachter aus jeweils Links und Rechts auf der Höhe der Spiegel positioniert werden [20, VirtualSpeech]. Einige Jahre Später, im Jahr 1935, veröffentlichte der Amerikanische Science-Fiction Autor Stanley Weinbaum eine Geschichte mit dem Namen „Pygmalion’s Spectacles“. In der Geschichte taucht der Protagonist durch eine Brille in eine fiktionale Welt ein, die nicht von der realen Welt zu unterscheiden ist. Diese Brille ist sogar in der Lage die menschlichen Sinne (Sehen, Hören, Riechen, Schmecken und Fühlen) zu stimulieren. Dies wird von vielen als der Ursprung vom Konzept der Virtual Reality gesehen [20, VirtualSpeech].





**Abbildung 2.12:** Stereoskop von Sir Charles Wheatstone [20, VirtualSpeech]

---

## Phase 2 - Erste Entwicklung von Hardware

---

Im Jahr 1956 entwickelte der Kameramann Morton Heilig das sogenannte „Sensorama“ (Abbildung 2.13). Diese Große Kabine wird als die erste VR-Maschine betrachtet. Das Sensorama war eine große stationäre Maschine, die in der Lage war 3D Video in Farbe und Audio wiederzugeben. Des Weiteren konnte die Maschine sogar Vibrationen, Wind, atmosphärische Effekte und sogar Gerüche simulieren. Heilig sah in dieser Maschine die Zukunft des Kinos und es wurden sogar sechs kurze Filme dafür entwickelt [20, VirtualSpeech].

Vier Jahre später, im Jahr 1960, präsentierte Heilig seine „Telesphere Mask“ (Abbildung 2.13), das erste HMD. Dies war jedoch nur dazu in der Lage stereoskopische 3D-Bilder und Stereo Sound wiederzugeben. Zu dieser Zeit gab es noch kein Motion Tracking in den HMDs [20, VirtualSpeech].

Nur ein Jahr später entwickelten 1961 die Ingenieure Comeau und Bryan der Philco Corporation das erste HMD mit Motion Tracking und sogar Video Wiedergabe. Dieses HMD wurde jedoch nur für militärische Zwecke konzipiert und sollte Soldaten ermöglichen sich mithilfe von Ferngesteuerten Kameras in gefährlichen Gebieten umsehen zu können. Das amerikanische Militär erkannte das Potential von VR und VR-ähnlicher Technologie sehr früh und so wurde bereits 1966 der erste Flugsimulator von Thomas Furness für die Air Force entwickelt [20, VirtualSpeech].

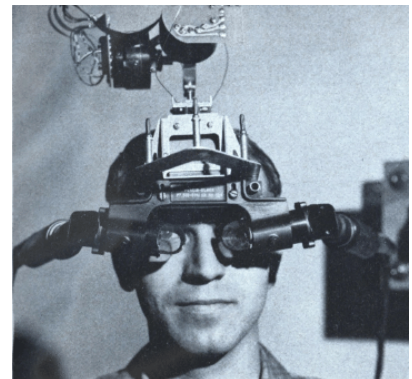
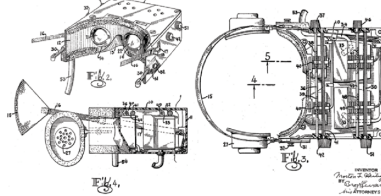
Erst im Jahre 1968 wurde von Ivan Sutherland und seinem Schüler Bob Sproull das erste VR-HMD mit dem Namen „The Sword of Damocles“ (Abbildung 2.13) entwickelt. Das HMD wurde nicht wie bei vorherigen Ansätzen mit einer Kamera, sondern mit einem Computer verbunden. Der Computer berechnete die Anzeige von verschiedenen 3D Modellen und reagierte auf die Kopfbewegungen des Nutzers. Dieses HMD wurde aber nie weiterentwickelt, da es zu schwer, groß und unbequem war und blieb somit nur ein Laborprojekt, welches nie die Öffentlichkeit erreichte [20, VirtualSpeech].

---

## Phase 3 - Die Suche nach einem Markt

---

Über einen ziemlich langen Zeitraum hinweg gab es bis auf den Einsatz in Militärtechnologie keinen richtigen Verwendungszweck für VR-Technologie. Es gab viele verschiedene Ansätze, jedoch konnte sich kein Ansatz durchsetzen. Im Folgenden werden ein paar Ansätze genauer erläutert.



**Abbildung 2.13:** Sensorama | Telesphere Mask | The Sword of Damocles [A14, A15, A16]

Das MIT entwickelte 1977 ein VR-Ähnliches Programm, welches dem Nutzer ermöglichte sich ähnlich wie heutzutage bei Google Street View durch die Straßen von Aspen City in Colorado zu bewegen. Das Erlebnis war jedoch nur VR-Ähnlich, da normale Displays und keine HMDs eingesetzt wurden [20, VirtualSpeech].

Einige Jahre später, im Jahr 1991, veröffentlichte die Virtuality Group die erste VR Arcade Maschine namens „Virtuality“ (Abbildung 2.14) für Spielhallen. Für diese VR Arcade Maschine erschienen neben VR-Versionen von beliebten Spielen wie Pac-Man sogar Spiele mit Multiplayer Funktionalität. Somit waren die VR Arcade Maschinen die ersten VR-Geräte welche in die Massenproduktion gingen und erfolgreich vertrieben wurden [20, VirtualSpeech]. Diesem Trend folgte unter anderem Nintendo und veröffentlichte 1995 mit dem Virtual Boy (Abbildung 2.14) die erste portable Spielekonsole in Form eines VR Headsets. Der Virtual Boy von Nintendo scheiterte jedoch aufgrund seines Schwarz-Weiß Displays und da wenig Software dafür entwickelt wurde. Daher wurde die Produktion nach nur einem Jahr wieder eingestellt [20, VirtualSpeech].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in den Jahren zwischen 1990 und 2000 einige VR-Headsets veröffentlicht wurden, sich jedoch kein Headset durchsetzen konnte. Der hauptsächliche Grund dafür werden höchstwahrscheinlich die Limitierungen der damaligen Hardware sein.



**Abbildung 2.14:** Virtuality | Virtual Boy [20, VirtualSpeech UND A18]

---

## Phase 4 - Erkennen der Potenziale

---

Die aktuellen Entwicklungen im Bereich der VR-Technologie lassen sich zum großen Teil auf das Jahr 2010 zurückführen.

In dem Jahr veröffentlichte Google einen stereoskopischen 3D Modus für Ihre Anwendung Street View. Des Weiteren entwickelte Palmer Luckey, welcher zu dem Zeitpunkt gerade erst 18 Jahre alt war, in diesem seinen Prototyp vom Oculus Rift Headset. Beim Oculus Rift Headset wird die Berechnung der anzuzeigenden Bilder durch einen Computer übernommen. Luckey gründete daraufhin 2012 das Unternehmen Oculus VR und startete eine Crowd-Funding Kampagne über die Plattform Kickstarter, bei der er insgesamt 2,4 Millionen US-Dollar Kapital sammeln konnte. Aufgrund dieser Entwicklungen steigerte sich das öffentliche Interesse für 3D- und VR-Technologie enorm [20, VirtualSpeech].

Als zwei Jahre später im Jahr 2014 der Tech-Gigant Facebook die Firma Oculus VR für insgesamt 2 Milliarden US-Dollar kaufte, weckte dies das Interesse von weiteren Firmen die Ihre eigenen VR-Brillen ankündigten. Diese Entwicklungen gaben dem Markt für VR-Technologien einen weiteren enormen Aufschwung [20, VirtualSpeech].

Zu den Firmen die eigene VR-Brillen ankündigten und/oder herausgebracht haben gehören weitere Tech-Giganten wie Google, HTC, Microsoft, Samsung, Sony und viele weitere [20, VirtualSpeech].

---

## Phase 5 - Zunehmende Verbreitung

---

Wie bereits erwähnt befinden wir uns nach am Anfang der fünften Phase und es ist uns nicht möglich alle zukünftigen Entwicklungen und Einsatzzwecke von VR-Technologien vollständig vorherzusehen. Daher gibt es in Kapitel 2.3.2 einen Einblick in vielversprechende Entwicklungen und Einsatzmöglichkeiten von VR-Technologie.

---

### 2.3.2 Potentiale von Virtual Reality

---

---

### 3 Aufbau des Konzepts

---

In diesem Kapitel wird der Aufbau des Konzepts erklärt. Daher gibt es zuerst einen Einblick in den Digitalisierungsprozess von Produktionseinlagen. Daraufhin wird diese Arbeit in das Gesamtkonzept der Mensch-Maschine Interaktion eingeordnet. Anschließend wird ein Modell mit Hilfe des Functional-Mockup-Interfaces aufgestellt. Schließlich gibt es einen Einblick in die Potenziale.

---

#### 3.1 Von der physischen Produktionsanlage zum virtuellen Klon

---

Um die Produktionsabläufe einer Fabrik in einer virtuellen Welt abzubilden gibt es insgesamt sieben Schritte die befolgt werden müssen.

1. **Scannen der Fabrik**

Im ersten Schritt werden die Produktionsräume inklusive der Produktionsanlagen gescannt. Das Ergebnis dieses Scans ist eine Punktwolke.

2. **Umwandlung des Scans**

Der Scan muss von einer Punktwolke in CAD Modelle umgewandelt werden. Da die CAD Modelle zu groß und daher unpraktikabel für die Entwicklungsumgebung Unity sind, werden diese in das OBJ Format umgewandelt. Die Modelle sind für den späteren Aufbau des virtuellen Klons der echten Produktionsanlage notwendig.

3. **Abbildung: Produktionsanlage → Modell**

Es wird ein physisches Modell zur Darstellung einiger wichtiger Herausforderungen der echten Produktionsanlage gebaut. Dies könnte beispielsweise die Form einer Produktionsstraße mit mehreren Stationen besitzen.

4. **Virtueller Aufbau**

Das physische Modell der echten Produktionsanlage aus Schritt drei wird in der virtuellen Welt abgebildet (virtueller Klon) und mit dem Menschmodell begebar gemacht. Dieser Schritt erlaubt die virtuelle Planung einer Produktionsanlage.

5. **Konnektivität und Kommunikation**

Die Produktionsanlagen des physischen Modells werden mit der Cloud vernetzt um eine bidirektionale Kommunikation zwischen dem physischem Modell und dem virtuellen Klon zu ermöglichen.

6. **Interaktion**

Die Interaktion mit zwischen dem Bediener und den Produktionsanlagen in der virtuellen Welt wird implementiert. Es müssen unter Umständen anwendungsspezifische Benutzeroberflächen implementiert werden.

7. **Skalierung**

Skalierung der Vorgehensweise durch Anwendung von Schritt vier bis sechs auf die echte Produktionsanlage.

---

Durch das Einhalten dieser Schritte erhält man einen virtuellen Klon der echten Produktionsanlage. Diesen virtuellen Klon kann man für viele Zwecke einsetzen, dazu gehören beispielsweise die Produktionsplanung oder das Fernsteuern von Produktionsanlagen. Das Ergebnis dieser Arbeit kommt bei Schritt vier und sechs zum Einsatz [Quelle Yübo?].

---

### 3.2 Mensch-Maschine Interaktion im Kontext dieser Arbeit

---



**Abbildung 3.1:** Mensch-Maschine Interaktion im Kontext dieser Arbeit, eigene Abbildung

Durch die Abbildung der echten Produktionsanlage in der virtuellen Welt findet die Mensch-Maschine-Interaktion in zwei Schritten statt. Im ersten Schritt interagiert der Mensch mit der Software (dem Computer) über VR-Hardware. Dieser Computer interagiert dann über eine Cloud mit der echten Produktionsanlage. Die Kommunikation findet in beiden Schritten bidirektional statt.

Diese Arbeit befasst sich mit dem ersten Schritt der oben erklärten Mensch-Maschine Interaktion. Für den Rest dieser Arbeit werden wir annehmen, dass es bereits eine geeignete Infrastruktur für die Kommunikation zwischen dem Computer und der Produktionsanlage über eine Cloud gibt.

### 3.3 Das Modell der Interaktivität mit einem Menschmodell

---

Basierend auf den im folgenden definierten Anforderungen soll mit Hilfe des Functional-Mockup Interfaces ein Modell aufgebaut werden.

#### 3.3.1 Anforderungen an das Modell

---

Da das Modell aus zwei Teilen besteht, haben beide Teile ihre eigenen Anforderungen. Diese werden im Folgenden erläutert. Das Ziel ist es ein Menschmodell zu schaffen, welches interaktiv mit seiner Umgebung interagieren kann.

---

#### Menschmodell

---

##### 1. Genauigkeit

Die Genauigkeit der Abbildung der Tracking-Daten auf das virtuelle menschliche Abbild ist von zentraler Bedeutung. Vor allem in einem Szenario, bei dem sich mehrere virtuelle menschliche Abbildungen in einem virtuellen Klon einer Produktionsanlage aufhalten ist die möglichst genaue Abbildung unabdingbar, um beispielsweise auf andere Bediener in der virtuellen Welt Rücksicht nehmen zu können.

---

## 2. Echtzeit

Sowohl das Tracking des Bedieners als auch die Abbildung der Tracking-Daten auf das virtuelle menschliche Abbild sind echtzeitkritische Anwendungen. Die Verzögerungen müssen möglichst gering sein um eine gute Nutzbarkeit zu ermöglichen.

## 3. Interoperabilität

Das Menschmodell muss umgebungsunabhängig implementiert werden. Dies bedeutet, dass das Menschmodell in beliebigen Umgebungen (Fabriken, Produktionshallen, etc.) eingesetzt werden kann.

## 4. Modularität

Sowohl einzelne Komponenten als auch das ganze Menschmodell an sich unterliegen der Anforderung der Modularität, um in Zukunft Verbesserungen oder Erweiterungen am Modell durchführen zu können.

---

## Interaktion

---

### 1. Bidirektionalität

Der Informationsaustausch muss bidirektional stattfinden. Das bedeutet, dass der Bediener über geeignete, leicht zu verstehende, optisch ansprechende und vor allem einheitliche Benutzeroberflächen interagieren kann. Einerseits ermöglichen diese Benutzeroberflächen dem Bediener das Interagieren mit Produktionsanlagen, andererseits werden auf diesen Benutzeroberflächen für den Bediener relevante Informationen in geeigneter Form dargestellt.

### 2. Genauigkeit

Auch bei der Interaktion spielt die Genauigkeit eine wichtige Rolle. Der Bediener sollte intuitiv, mit relativ geringen Lernaufwand, schnell und vor allem präzise mit der Umgebung interagieren können.

### 3. Echtzeit

Die Interaktion muss mit einer möglichst geringen Verzögerung stattfinden, um dem Nutzer schnelle Reaktionen und spontane Anpassungen oder Verbesserungen zu ermöglichen.

### 4. Interoperabilität

Die Interaktion muss über eine einheitliche Schnittstelle stattfinden um Interoperabilität zu gewährleisten, sodass sich die Funktionalität auf beliebige Maschinen und Produktionsanlagen übertragen lässt.

### 5. Modularität

Durch das Gewährleisten der Modularität wird sichergestellt, dass die Interaktion in Zukunft auch auf neue VR-Hardware übertragen werden kann ohne dass die gesamte Software neu geschrieben werden muss.

Durch das Einhalten dieser Herausforderungen ergibt sich ein Menschmodell, welches in Echtzeit die Bewegungen des Bedieners auf das virtuelle Menschliche Abbild projiziert. Des Weiteren ermöglicht das Modell dem Bediener in der virtuellen Welt mit dem virtuellen Klon der Produktionsanlage zu interagieren. Da von Anfang an ein Fokus auf Interoperabilität und Modularität gelegt wird, ist das ganze Modell erweiterbar und an verschiedene Hardware und unterschiedliche Einsatzzwecke anpassbar.



---

### 3.3.2 Das Functional-Mockup Interface

---

Das Functional-Mockup Interface (FMI) ist ein ursprünglich von der Daimler AG entwickelter unabhängiger Standard für den Austausch von dynamischen Modellen und Co-Simulation. Zum Einsatz kommt das Functional-Mockup Interface beispielsweise beim Modellaustausch oder der Co-Simulation zwischen Zulieferern und den OEMs (Original Equipment Manufacturer) [24, FMI-Paper, S.1]. Anfang 2010 wurde die erste Version (Version 1.0) des FMI Standards veröffentlicht, welche zunächst nur den Modellaustausch unterstützte. Einige Monate später folgte dann die Unterstützung für Co-Simulation. Mittlerweile gab weitere Nachfolger Versionen. Die aktuellste Version (Version 2.0.1) wurde im Oktober 2019 veröffentlicht, unterscheidet sich aber von der Vorgängerversion (Version 2.0) aus dem Jahr 2014 nur durch einige Bugfixes [2, FMI-Spez, S.2]. Da es neben den anwendungsspezifischen Standards (z.B. Matlab/Simulink: S-Functions) zunächst keinen unabhängigen Standard für den Austausch von Modellen oder die Co-Simulation gab [24, FMI-Paper, S.1], liegt der größte Vorteil des FMI-Standards in seiner Unabhängigkeit.

Wie bereits erwähnt gibt es für den FMI Standard zwei übergeordnete Anwendungsszenarien:

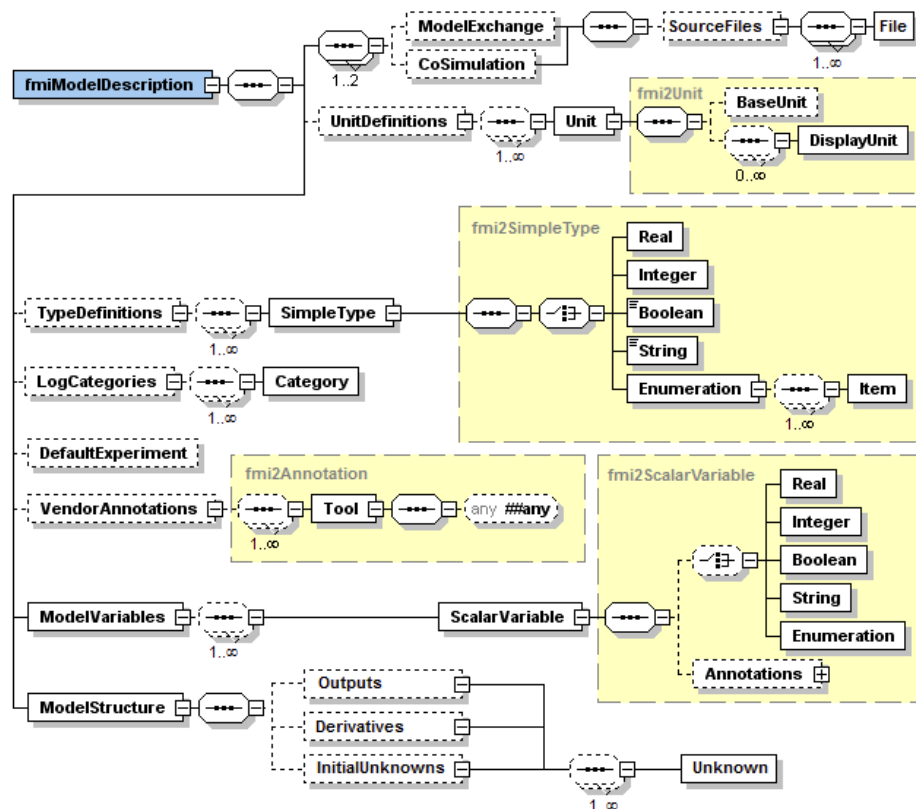
#### 1. Modellaustausch

Der FMI Standard ermöglicht Modellierungsumgebungen ein dynamisches System Modell in C-Code zu repräsentieren, sodass dieses Modell auch in anderen Modellierungsumgebungen genutzt werden kann. Ermöglicht wird dies durch die Darstellung der Modelle mit Hilfe von mathematischen Gleichungen (z.B. Algebraische Gleichungen, Differentialgleichungen oder Diskrete Gleichungen), welche auch Zeit-, Zustands- oder Schritt-Events enthalten können. Es werden große Modelle und sowohl die offline als auch die online Simulation unterstützt [25, FMI-Spez, S.4].

#### 2. Co-Simulation

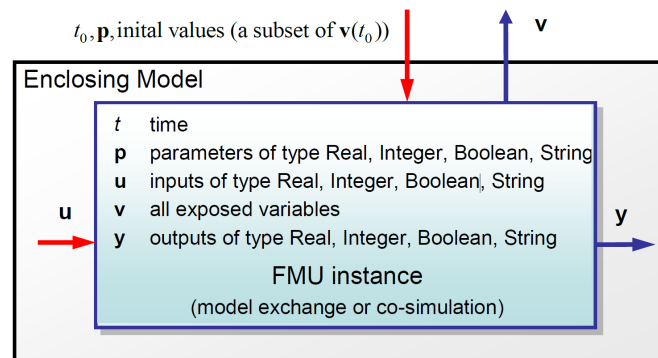
Des Weiteren ermöglicht der FMI Standard das Verbinden von mehreren Subsystem, welche über vordefinierte Kommunikationsschnittstellen kommunizieren und somit eine Co-Simulationsumgebung schaffen. Dabei wird der Datenaustausch und die Synchronisation zwischen den einzelnen Subsystemen durch einen sogenannten Master Algorithmus gesteuert. Bei den Master Algorithmen ist zu beachten, dass diese kein Teil des eigentlichen FMI Standards sind [25, FMI-Spez, S.4]. Daher sind die Master Algorithmen nicht standardisiert und können unterschiedliche zusätzliche Funktionalitäten wie z.B. den Austausch von Variablen unterstützen [24, FMI-Paper, S.1].

Die grundlegenden Komponenten die beim Einsatz des FMI Standards immer zum Einsatz kommen sind das „FMI Application Programming Interface (C)“ und das „FMI Description Schema (XML)“. Ersteres enthält dabei alle benötigten Gleichungen des Modells. Dabei kommt die Programmiersprache C zum Einsatz, da sie portabel ist und auch für den Einsatz in eingebetteten System geeignet ist. Die XML-Datei (vgl. Abbildung 3.2) hingegen enthält die Definitionen aller Variablen in einem standardisierten Format. Diese Variablendefinition ist durchaus eine komplexe Datenstruktur. Die Simulationstools können selber entscheiden wie sie mit diesen Daten umgehen und wie sie die Daten in ihren Programmen repräsentieren möchten. Dieser Ansatz erlaubt das Speichern und Laden der Variablendefinitionen ohne Einbußen bei der Performance in der Programmiersprache der Simulationsumgebung, wie z.B. C# oder Java [25, FMI-Spez, S8].



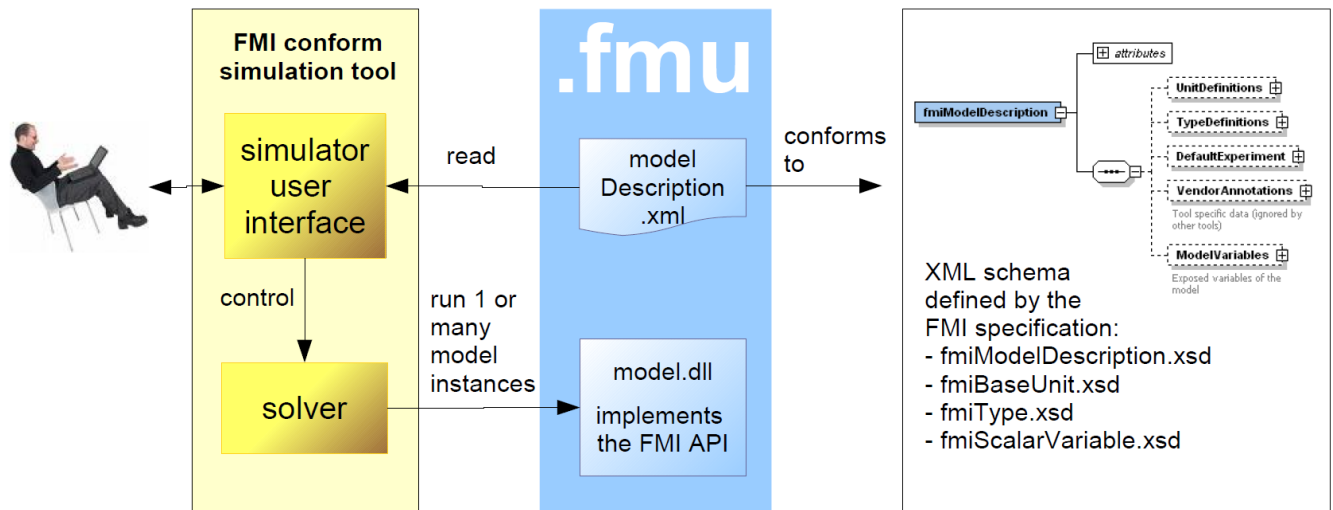
**Abbildung 3.2:** Aufbau der FMI Variablenbeschreibung [25, FMI-Spez, S.30]

Da das FMI nur ein Interface ist wird eine Instanz des Interfaces FMU (Functional-Mockup Unit) genannt. Das FMI Interface soll den Einsatz von FMUs in beliebigen Simulationsumgebungen einfach gestalten. Dafür werden durch die Simulationsumgebung Funktionen des FMI aufgerufen um ein FMU zu generieren. Es ist zusätzlich anzumerken, dass eine FMU beliebig oft und sogar als Teil von anderen Modellen generiert werden kann [25, FMI-Spez., S.8]. Eine FMU wird in einer ZIP-Datei mit der Endung „.fmu“ bereitgestellt und kann neben den bereits angesprochenen Komponenten (C-Code und XML-Datei) zusätzliche Anwendungsspezifische Daten wie Icons oder Dokumentationen enthalten [25, FMI-Spez, S.4+9] In Abbildung 3.3 ist eine Instanz einer FMU illustriert. Eine FMU enthält neben den Eingabeparametern (Rot) und den Ausgabeparametern (Blau) noch interne Werte. Zu den internen Werten gehört die Zeit  $t$ , interne Parameter  $p$  und nach außen sichtbare Variablen  $v$  [25, FMI-Spez, S.8].



**Abbildung 3.3:** FMU Instanz [25, FMI-Spez, S.9]

In der Abbildung 3.4 ist noch einmal dargestellt, wie das Zusammenspiel zwischen der Simulationsumgebung, der FMU und dem FMI aussieht. Die Simulationsumgebung liest Variablendefinition (XML) der FMU, welche dem FMI Standard entspricht. Dies ermöglicht der Simulationsumgebung eine oder mehrere Instanzen der FMU zu generieren. Aufgrund dieser Struktur kann jede Simulationsumgebung eine eigene Benutzeroberfläche einsetzen und selber entscheiden wie die Daten repräsentiert werden.



**Abbildung 3.4:** Funktionsweise der FMU in der Simulationsumgebung [26, QTronic, S.7]

### 3.3.3 Der Aufbau des Models

Um die in Kapitel 3.3.1 erläuterten Herausforderungen umzusetzen soll mit Hilfe des in Kapitel 3.3.2 eingeführten FMI Standards ein theoretisches Modell geschaffen werden, wie ein Menschenmodell mit der Möglichkeit mit der Umgebung zu interagieren aufgebaut sein könnte. Daher wird im Folgenden vorgestellt, wie die Variablendefinition im XML-Format und das eigentliche Modell in C-Code auszusehen hätten.

#### Variablendefinition (XML)

Wie in Abbildung 3.2 dargestellt besteht die XML-Datei aus mehreren Komponenten. Nicht alle Komponenten sind für jeden Einsatzzweck relevant, daher werden im Folgenden die relevanten Komponenten genauer erläutert.

#### Attributes

Neben den in Abbildung 3.2 dargestellten Elementen, enthält die XML-Datei noch das Element „Attributes“. Es gibt insgesamt 12 mögliche Attribute, jedoch sind nur vier zwingend notwendig [25, FMI-Spez, S.33].

##### 1. fmiVersion

Dieses Attribut gibt an, welche Version des FMI Standards bei der Generierung der XML-Datei eingesetzt wurde [25, FMI-Spez, S.33].

---

## 2. **modelName**

Durch dieses Attribut wird dem Modell ein Name zugewiesen [25, FMI-Spez, S.33].

## 3. **guid**

Durch das Attribut „guid“ (Globally Unique Identifier) wird sichergestellt, dass die XML-Datei Kompatibel ist mit den C-Funktionen der FMU. Dafür wird in der Regel eine Art Fingerabdruck generiert und in den C-Funktionen hinterlegt [25, FMI-Spez, S.33].

## 4. **variableNamingConvention**

Dieses Attribut bestimmt ob die Namen der variablen einer bestimmten Konvention unterliegen. Standardmäßig wird hier der Token „flat“ verwendet, wenn alle Variablen in einer Liste von Strings vorliegen [25, FMI-Spez, S.33].

## 5. **description (optional)**

In diesem Attribut kann auf Wunsch eine kurze Beschreibung der FMU hinterlegt werden [25, FMI-Spez, S.33].

## 6. **author (optional)**

Dieses Attribut ermöglicht es Angaben über die Autoren (Entwickler) zu machen [25, FMI-Spez, S.33].

## 7. **version (optional)**

Um einen besseren Überblick über die verschiedenen Versionen einer FMU zu ermöglichen, kann in diesem Attribut die Versionsnummer (z.B. Version 1.0) hinterlegt werden [25, FMI-Spez, S.33].

## 8. **copyright (optional)**

In diesem Attribut können Informationen über das Copyright hinterlegt werden [25, FMI-Spez, S.33].

## 9. **license (optional)**

Es besteht die Möglichkeit durch dieses Attribut Angaben über die Lizenz für die Verwendung der FMU zu machen [25, FMI-Spez, S.33].

## 10. **generationTool (optional)**

In diesem Attribut kann der Name des Tools mit dem die XML-Datei generiert wurde hinterlegt werden [25, FMI-Spez, S.33].

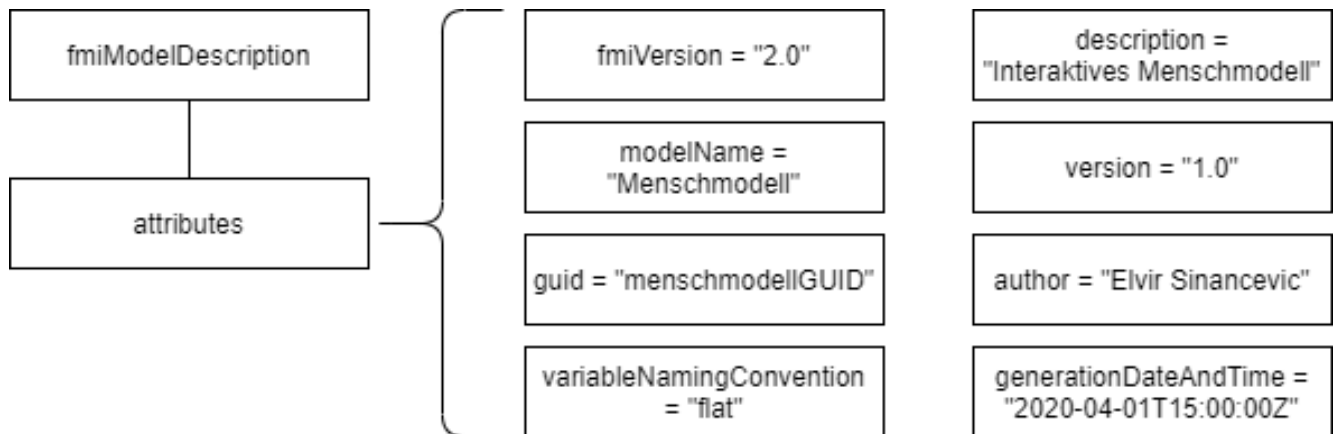
## 11. **generationDateAndTime (optional)**

Dieses Attribut ermöglicht es das Datum und die genaue Uhrzeit der Generierung der XML-Datei zu hinterlegen. Dabei wird das Format „YYYY-MM-DDThh:mm:ssZ“ verwendet. Das „T“ soll lediglich das Datum von der Uhrzeit trennen und das „Z“ steht für die Zeitzone (Greenwich Meantime) [25, FMI-Spez, S.33].

## 12. **numberOfEventIndicators (optional)**

Falls die FMU für Co-Simulation verwendet wird, wird dieses Attribut ausgelassen. Ansonsten wird hier die Anzahl der Indikatoren für Events beim Einsatz der FMU für Modellaustausch hinterlegt [25, FMI-Spez, S.33].

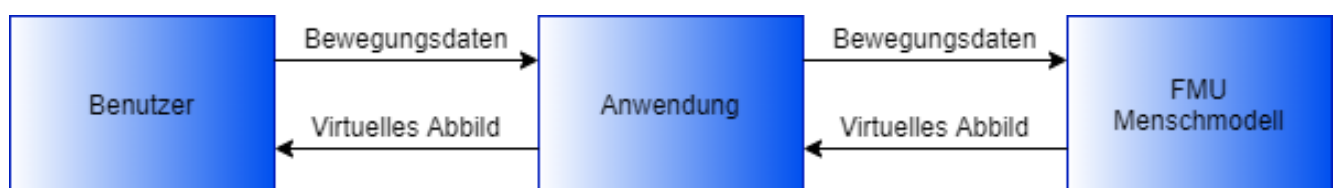
Abbildung 3.5 illustriert, wie die Attribute für die FMU aussehen könnten.



**Abbildung 3.5:** Darstellung der Attribute für das Menschmodell, eigene Abbildung

### ModelExchange / Co-Simulation

Dieses Element gibt an, ob die FMU für Modellaustausch und/oder Co-Simulation ausgelegt ist. Falls das Element „ModelExchange“ vorhanden ist, enthält die FMU entweder selbst das eigentliche Modell oder die Kommunikationsschnittstelle zu einem Tool, welches das Modell enthält. Die Simulationsumgebung kümmert sich dann um die Simulation. Falls jedoch das Element „CoSimulation“ vorhanden ist, enthält die FMU selbst das Modell und kümmert sich selbst um die Simulation, oder enthält die Kommunikationsschnittstelle zu einem Tool welches das Modell enthält und sich selbst um die Simulation kümmert. Die Simulationsumgebung enthält den in Kapitel 3.3.2 bereit angesprochenen Master Algorithmus, um mehrere FMUs gemeinsam in einer Co-Simulationsumgebung einzusetzen [25, FMI-Spez, S.30]. Es ist noch wichtig anzumerken, dass mindestens eins der beiden Elemente vorhanden sein muss, um den Typ der FMU zu definieren [25, FMI-Spez, S.31]. Da das Menschmodell sowohl das Modell enthält als auch die Simulation (hier: Abbildung der Bewegungsdaten auf das virtuelle menschliche Abbild) eigenständig übernimmt, müsste die FMU auf Co-Simulation ausgelegt werden [25, FMI-Spez, S.30]. In Abbildung 3.6 ist illustriert, wie die FMU als Teil einer Anwendung funktionieren würde.



**Abbildung 3.6:** Funktionsweise der FMU als Teil einer Anwendung, eigene Abbildung

### ModelVariables

In dem Bereich „ModelVariables“ sind die öffentlichen Variablen der FMU definiert. Diese Variablen werden unter dem übergeordneten Typ „ScalarVariable“ gespeichert und erhalten alle einen eindeutigen Index. Des Weiteren sind „Scalar Variables“ primitive Variablen, wie z.B. ganze Zahlen (Integer) oder Wahrheitswerte (Boolean) (Vgl. Abbildung 3.2). Zusätzlich zu dem Variablentyp sind noch optionale Annotationen (Vgl. Abbildung 3.2) und Attribute Bestandteil dieser Variablen [25, FMI-Spez, S.45]. Zu den Attributen gehören der Name (name), die sogenannte Wert-Referenz (valueReference), eine optionale Beschreibung (description), die





---

## 4 Umsetzung des Konzepts mit Hilfe der Unity Engine

---

In diesem Kapitel wird die Umsetzung des Menschmodells und der Interaktion in der Entwicklungsumgebung der Unity Engine vorgestellt. Daher gibt es zunächst einen Einblick in die genutzte Hardware und Software, bevor das Menschmodell und die Interaktionsschnittstelle genauer erläutert werden.

---

### 4.1 Eingesetzte Hardware

---

Für die Umsetzung dieses Projektes wurde die Virtual Reality Brille VIVE Pro (Vgl. Abbildung XX) vom Hersteller HTC verwendet, da Sie eine der Leistungsstärksten Brillen auf dem Markt ist. Zu den Stärken dieser Brille gehören das kontrastreiche OLED-Display, die sehr hohe Auflösung von 1440 x 1600 Pixeln pro Auge, eine Bildwiederholrate von 90Hz, ein Sichtfeld von 110 Grad und vor allem die Möglichkeit die Brille mit Hilfe des Vive Wireless Adapter (vgl. Abbildung XX) kabellos zu verwenden. Es ist zusätzlich anzumerken, dass beim kabellosen Verwenden der Brille ein mobiler Akku zum Einsatz kommt, welcher bis zu sechs Stunden lang hält.

Um die Brille zu verwenden bedarf es mindesten zwei der sogenannten SteamVR 2.0 Basisstationen (Vgl. Abbildung XX), welche dem Bediener in Kombination mit des Vive Wireless Adapters eine enorme Bewegungsfreiheit ermöglichen. Beim Einsatz von zwei solcher Basisstationen ist eine Raumgröße von bis zu 5m x 5m, also 25m<sup>2</sup> möglich. Es ist sogar möglich bis zu vier solcher Basisstationen zu Verwenden und somit eine Raumgröße von bis zu 10m x 10m, also 100m<sup>2</sup> zu unterstützen.

Ein weiteres notwendiges Zubehör der Brille sind die beiden Controller (Vgl. Abbildung XX), die es dem Bediener ermöglichen mit der virtuellen Umgebung zu interagieren. Beide Controller werden wie die VR Brille durch die Basisstationen im Raum geortet und liefern Informationen über ihre eigene Position und Ausrichtung im Raum. Zusätzlich verfügen beide Controller über jeweils fünf Tasten, welche man mit eigenen Funktionalitäten versehen kann. Es ist anzumerken, dass die Tasten alle unterschiedlich sind und daher für unterschiedliche Zwecke verwendet werden können.

Auf der Vorderseite der Controller befinden sich insgesamt drei Tasten (Vgl. Abbildung XX).

- Die erste dieser Tasten (ganz unten) ist die Taste um das Hauptmenü aufzurufen. Diese Taste wird in der Regel nicht überschrieben und behält diese Funktionalität bei.
- Die zweite Taste (mittig) ist gleichzeitig ein Berührungsempfindliches Trackpad. Dem Entwickler steht es frei, ob er diese Taste als einfache Taste oder als Trackpad verwenden möchte. Dadurch eröffnen sich viele Anwendungsmöglichkeiten für diese Taste.
- Die dritte Taste (oben) ist wiederum eine ganz einfache Taste und wird in den meisten Anwendungen als eine Menü-Taste verwendet.

Auf der Rückseite und der Außenseite des Controllers befinden sich weitere zwei Tasten (Vgl. Abbildung XX).

- Die Tasten links und rechts an der Außenseite des Controllers bilden eine zusammengehörige Taste, welche ausgelöst wird, wenn der Bediener den Controller fest mit der Hand drückt.

- 
- Die Taste auf der Rückseite hat wie das Trackpad auf der Vorderseite zwei Einsatzmöglichkeiten. Sie kann einerseits als einfache Taste verwendet werden, andererseits als berührungsempfindlicher „Trigger“, da der Entwickler über die Software-Schnittstelle auslesen kann, wie Tief die Taste reingedrückt wurde, ähnlich wie bei einem Gaspedal in einem Auto.

Neben den außerordentlich guten technischen Spezifikationen der HTC VIVE Pro waren die HTC VIVE Tracker (Vgl. Abbildung XX) ein weiterer Grund warum diese VR Brille zur Umsetzung dieser Arbeit ausgewählt wurde. Die VIVE Tracker werden genauso wie die VR Brille und die dazugehörigen Controller von den Basisstationen im raum geortet und liefern ebenfalls Informationen über ihre Position und Ausrichtung im Raum. Durch den kleinen Formfaktor können die Tracker an beliebigen Objekten befestigt werden um die Bewegung dieser Objekte in der virtuellen Welt abzubilden.

Bei dieser Arbeit kamen die Tracker für die Ortung einzelner Körperteile zum Einsatz, da die Hände und der Kopf werden bereits durch die Controller und die VR Brille abgedeckt wurden. Konkret kamen die Tracker für die Ortung der Füße, der Knie, des Beckens und der Ellenbogen zum Einsatz.

Durch das (?) Zoll Schraubgewinde (Vgl. Abbildung XX) auf der Unterseite lassen sich die Tracker einfach befestigen. Für die Befestigungen am Becken und an den Füßen wurde auf fertige Halterungen zurückgegriffen (Vgl. Abbildung XX). Um die Tracker an den Knien und an den Ellenbogen zu befestigen habe ich mir eigene Halterungen gebaut (Vgl. Abbildung XX). Für diese Halterungen habe ich handelsübliche Knie- und Ellenbogenschoner verwendet. Durch diese Gelenkschoner habe ich Löcher gebohrt und (?) Zoll Schrauben mit Hilfe von Muttern fixiert. Durch das Schraubgewinde auf der Unterseite der Tracker ließen sich die Tracker einfach an diesen Schrauben befestigen.