



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

**BMW
GROUP**



Rolls-Royce
Motor Cars Limited

Diplomarbeit

Effiziente Content-Generierung für visuelle Werkerassistenzsysteme mit dem Schwerpunkt „Augmented Reality-basierte Trainings“

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Sebastian Schlund

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Human Centered Cyber Physical Production
and Assembly Systems)

und

Marcel Kress, BMW Group

(TP-S-32, Innovationen und Digitalisierung im Produktionssystem - Netzwerkmanagement)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Johannes Bender

1128281 (E066482)

Sankt-Johann-Gasse 1-5/1/17

1050 Wien

Wien, im Dezember 2018

Johannes Bender



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

**BMW
GROUP**



Rolls-Royce
Motor Cars Limited

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre hiermit am Eide statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Des Weiteren erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Dezember 2018

Johannes Bender

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Diplomarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Sebastian Schlund, der meine Diplomarbeit betreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken. Auch gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Detlef Gerhard für die Zweitkorrektur der Arbeit.

Ein besonderer Dank gilt meinem Mentor Marcel Kress, der mir die Möglichkeit gegeben hat, meine Diplomarbeit in diesem hochspannenden Themenfeld bei der BMW Group schreiben zu können. Ich danke Dir für die konstante Unterstützung und dafür, dass du mich an deinem großen Erfahrungsschatz im Bereich Augmented Reality hast teilhaben lassen.

Ebenso bedanke ich mich bei den agilen AR-IT-Entwicklungskollegen, Linda Salomo und Phuc-Anh Nguyen dafür, dass ich sie ein Stück weit während der Spatial Media Player-Entwicklung begleiten durfte.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Angelika und Michael Bender bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für meine Sorgen hatten. Auch gilt der Dank meiner Freundin Andrea, die jederzeit Rückhalt für mich war.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird der Content-Generierungsprozess verschiedener Anbieter zur Erstellung von Augmented Reality-Erlebnissen im Rahmen eines Benchmarks mit Workshops analysiert und mit einem BMW-internen Augmented Reality Training verglichen. Zudem wird eine qualitative Effizienzbewertung verschiedener Papier-, Video- und AR-basierter Trainingserstellungsansätze durchgeführt.

Auch wenn der Nutzen eines AR-basierten Trainings nachweislich höher ist gegenüber Video- und Papier-basierten Trainings, so ist der Content-Generierungsprozess bei den untersuchten Ansätzen aktuell noch zeitlich und technisch aufwendig, so dass es eine große Diskrepanz zwischen den aktuellen und den notwendigen Fähigkeiten der Trainingsersteller in der Montage gibt. Insbesondere der Umgang mit 3D-Content, wie CAD-Bauteilüberlagerungen und Animationen, ist dabei zeiteinnehmend und bedarf der Kenntnis von 3D-Content-Editoren und Auszeichnungssprachen. Eine Alternative bieten vereinfachte AR-Anwendungen bei denen 2D-Content wie Montagevideos und Textanweisungen direkt vor Ort, hands-free angezeigt werden. Die Erstellung von Videos ist dabei, aus der Perspektive der Content-Generierung, ein vielversprechender Ansatz, da sie vergleichsweise schnell und mit geringen Videobearbeitungskenntnissen umgesetzt werden kann. Durch die zukünftige Eigenentwicklung eines stark vereinfachten Autorentools werden auch die bisherigen Trainingsersteller befähigt, multimediale AR-Trainings zu generieren.

Abstract

In this paper the authoring process of Augmented Reality experiences is benchmarked. Therefore several suppliers of Augmented Reality authoring tools are invited to a workshop and their processes are being analyzed and compared to the BMW-internal solutions. In addition, a qualitative assessment of the authoring processes of paper-based, video-based and Augmented Reality-based Training is conducted. Even though it is already proven that an Augmented Reality-based training has its benefits, the authoring process of the examined solutions is still laborious. There is a big gap between the current and the necessary skillset of the training creator. Especially the handling of 3D-content, like static and dynamic animations of a CAD-model, is time-consuming and requires knowledge of 3D-authoring tools and markup languages. An alternative approach is the use of simple AR-applications that are focused on the hands-free display of 2D-content like assembly videos or textual work instructions at the point of interest. The creation of assembly videos is thereby a promising approach since its creation is comparably quick and only requires basic video editing skills. Through the future development of a browser-based authoring tool, assembly trainers will be enabled to create valuable AR-Training experiences themselves.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziele der Masterarbeit.....	2
1.3	Aufbau der Masterarbeit	2
2	Die industrielle Automobilproduktion	5
2.1	Definition und Bedeutung	5
2.2	Aktuelle Situation und zukünftige Entwicklungen	6
2.3	Herausforderungen und Strategiewandel der BMW Group	9
3	Montage in der Automobilindustrie.....	13
3.1	Definition und Eingliederung in das Produktionssystem	13
3.2	Trends und Herausforderungen	18
3.3	Bedeutung der Mitarbeiterqualifizierung	21
3.3.1	Bedarf und Entwicklung	21
3.3.2	Prozessablauf der Qualifizierung	23
3.3.3	Trainingsdidaktik und inhaltliche Gestaltung.....	29
3.3.4	Einsatz innovativer Assistenzsysteme	33
4	Stand der Technik - Visuelle Werkerassistenzsysteme.....	37
4.1	Überblick über mobile Werkerassistenzsysteme	37
4.2	Augmented Reality (AR).....	39
4.2.1	Technologische Einordnung.....	42
4.2.2	AR-Einsatz in der Industrie (IAR)	45
4.2.3	Chancen und Herausforderungen.....	48
4.3	Prozess Content-Generierung.....	50
4.3.1	Definition von Content.....	51
4.3.2	Der Content Generierungsprozess für ein AR-basiertes Werkerassistenzsystem	52
5	Benchmark verschiedener Autorenprogramme.....	56
5.1	Bewertungsmethodik	56
5.2	Referenz-Use-Case „Mitarbeiterqualifizierung in der Motormontage“.....	62
5.2.1	BMW-interne Entwicklung: BMW AS IS Situation	62
5.2.2	IST-Autorenprozess	66
5.2.3	SOLL-Autorenprozess	72
5.3	Anforderungskriterien	76
5.3.1	Herleitung der Kriterien	76
5.3.2	Erläuterung der Kriterien	78
5.4	Lösungen der Benchmarkteilnehmer.....	79

Inhaltsverzeichnis

5.4.1	Anbieter A	80
5.4.2	Anbieter B	83
5.4.3	Anbieter C	88
5.4.4	Anbieter D	92
5.4.5	Anbieter E	98
5.4.6	Weitere Anbieter	102
5.5	Ergebnisse des Benchmarks	102
5.5.1	Gewichtungsmethodik	102
5.5.2	Detaillierter Vergleich der einzelnen Kategorien	105
5.5.3	Gesamtnutzwert	116
5.5.4	Empfehlung	119
5.5.5	Einschränkungen und Bemerkungen	119
6	Qualitativer Vergleich verschiedener Trainingserstellungsvarianten	121
6.1	Effizienzkriterien	121
6.2	Überblick verschiedener Trainingserstellungsansätze	123
6.2.1	Paper-based-Training (mit Face-to-Face Unterstützung)	124
6.2.2	Video-based Training	126
6.2.3	AR-based Training	132
6.3	Effizienzbewertung und Gegenüberstellung der Varianten	140
6.4	Ergebnisse und Erkenntnisse	151
6.4.1	Strategieempfehlung für das weitere Vorgehen	153
6.4.2	Handlungsfelder	155
7	Zusammenfassung und Ausblick	156
7.1.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	156
7.1.2	Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse	156
7.1.3	Ausblick und weitere Forschungsfelder	157
8	Verzeichnisse	159
8.1	Literaturverzeichnis	159
8.2	Abbildungsverzeichnis	164
8.3	Tabellenverzeichnis	168
8.4	Abkürzungsverzeichnis	170
9	Anhang	172

1 Einleitung

Im ersten Kapitel wird eine kontextuelle Einordnung der Masterarbeit vorgenommen. Nach einer Skizzierung der Ausgangslage, wird auf die erwarteten Ziele dieser Arbeit eingegangen und mit welcher Vorgehensweise sie erreicht werden sollen.

1.1 Motivation

Mobile Augmented-Reality Systeme erleben zurzeit einen Boom im Konsumenten-Markt. Auch für industrielle Anwendungen zeichnen sich vielversprechende Anwendungsfelder dieser Technologie ab, insbesondere zur Unterstützung der Produktionsmitarbeiter in Form von visuellen Werkerassistenzsystemen. Ein besonders großes Nutzenpotenzial wird Smart Glasses und Augmented Reality Head-Mounted-Displays zugeschrieben, da diese Art von Geräten „hands-free“-Arbeiten ermöglichen und daher gut in bestehende Arbeitsprozesse integriert werden könnten, vor allem in Form von geführten Arbeits- und Prüfabläufen mit sogenannten Work-Instructions, die auf dem Gerät angezeigt werden können.

In der Vergangenheit wurden bereits viele solcher Szenarien in Form von Pilotprojekten erprobt, ohne dass jedoch ein wirklich wirksamer Serieneinsatz der Technologie nachgewiesen werden konnte.

Neben ergonomischen Unzulänglichkeiten dieser Smart Devices ist ein wichtiger Grund dafür, dass der Aufwand für die Integration und die Befüllung der Augmented-Reality-Systeme noch zu hoch war und der konkrete Nutznachweis fehlt. Auf Seiten des Nutznachweises finden sich mittlerweile in der Literatur einige Studien, die im Bereich der Mitarbeiterqualifizierung in der Montage, einen konkreten Nutzen für die nachweisen konnten. So wird durch moderne Augmented Reality-basierte Lernassistenzsysteme die Lernqualität erhöht und die Anzahl der Montagefehler reduziert, was zu einer Reduzierung des Nacharbeitsaufwands führt. Insbesondere den Veröffentlichungen von Werrlich et al. (2016-2018) kommen in dem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zu, da sich die durchgeführten Nutzerstudien auf die realen Arbeitsbedingungen in der Montage eines Automobilherstellers beziehen. Auch werden als Probanden primär produktionsnahe Mitarbeiter eingesetzt.

Auf Seiten der Content-Generierung gibt es inzwischen zahlreiche Lösungsanbieter, die sich dem Problem der Integration von Augmented Reality-Systemen verschrieben haben und einfach zu befüllende Autorentools anbieten. Der Erstellungsaufwand ist jedoch stets in Relation zum Nutzen der Anwendung zu bewerten. Eine solche ganzheitliche Betrachtung fehlt heute noch.

1.2 Ziele der Masterarbeit

Im Rahmen dieser Arbeit soll daher eine Analyse der Wirkzusammenhänge und Wirtschaftlichkeit von mobilen visuellen Werkerassistenzsystemen, am Beispiel der Unterstützung für die Mitarbeiterqualifizierung in der Montage, durchgeführt werden. Die Herleitung der Anforderungen soll einerseits aus arbeitsphysiologischen Grundlagen und Erfahrungen aus internen und externen Pilotprojekten erfolgen und andererseits wirtschaftliche und informationstechnische Überlegungen beinhalten. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt dann auf der Bewertung verschiedener Content-Generierungssysteme, um schließlich einen Gesamtprozess ableiten zu können, der den Bogen von der Theorie zum Praxiseinsatz spannt.

1.3 Aufbau der Masterarbeit

Nachdem in der vorangegangenen **Einleitung** auf die Motivation und die Ziele dieser Diplomarbeit eingegangen wurde, wird nun der Aufbau der Arbeit erörtert (siehe Abbildung 1).

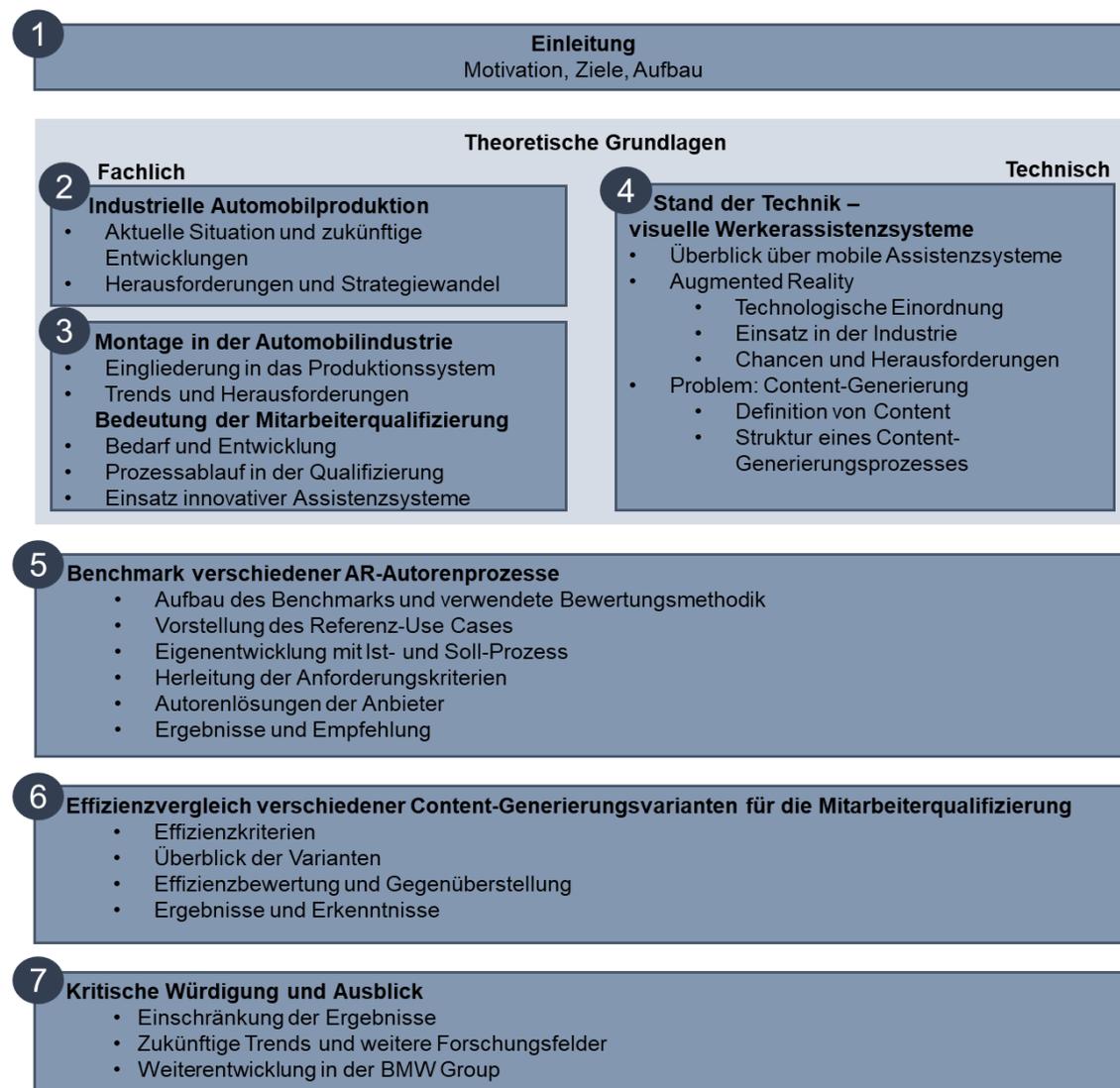


Abbildung 1: Aufbau der Diplomarbeit

Zu Beginn werden die relevanten theoretischen Grundlagen angeführt, welche für einen Überblick sowie ein tiefergehendes Verständnis der Thematik von Bedeutung sind.

In **Kapitel 2 und 3** liegt der Fokus hierbei auf den fachlichen Gegebenheiten und Anforderungen im Produktionsumfeld eines Automobilkonzerns. Ausgehend von der aktuellen Situation und den Herausforderungen der Automobilindustrie, werden die Konsequenzen für ein zukunftsfähiges Produktionssystem abgeleitet. Dabei stehen insbesondere die Montage im Zentrum sowie die Innovationen, die für die Erreichung der Ziele notwendig sind. Der Qualifizierung der Montagemitarbeiter kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, wie in Kapitel 3.3 verdeutlicht wird. Um den erhöhten Bedarf an qualifizierten Mitarbeitern zu decken, bedarf es neuer innovativer Lernansätze, auf die ebenfalls vertieft eingegangen wird. Nach den Kapiteln 2 und 3 ist der Leser über das Umfeld und die Situation der potenziellen „Stakeholder“, die visuelle Werkerassistenzsysteme einsetzen, aufgeklärt.

In **Kapitel 4** werden die relevanten technologischen Aspekte visueller Werkerassistenzsysteme beleuchtet. Beginnend mit einer Übersicht über mobile Werkerassistenzsysteme im Allgemeinen, wird tiefergehend auf den Begriff Augmented Reality und seine Bedeutung eingegangen. Insbesondere die verwendeten Technologien und der Einsatz von Augmented Reality in der Industrie (IAR) stehen hierbei im Vordergrund. Im Anschluss wird vertieft auf den Prozess der Content Generierung für AR-basierte Lernassistenzsysteme eingegangen. Auch wird die Notwendigkeit einer Content-Strukturierung verdeutlicht. Nach diesem Kapitel ist der Leser über den aktuellen Stand der Technik von AR-basierten Assistenzsystemen informiert und zudem mit dem prinzipiellen Aufbau eines Autorenprozesses für AR-basierte Trainings vertraut.

Nachdem alle wichtigen Grundlagen vorgestellt wurden, wird in **Kapitel 5** ein Benchmark verschiedener Autorenprozesse für AR-basierte Anwendungen durchgeführt. Nach der Vorstellung der verwendeten Methodik wird der BMW-interne Referenzprozess für ein AR-basiertes Training vorgestellt, der im Rahmen des Benchmarks simuliert werden soll. Nach der Festlegung geeigneter fachlicher und technischer Anforderungen werden die getesteten Lösungen der Anbieter beschrieben und mittels einer Nutzwertanalyse miteinander verglichen. Im Anschluss wird eine Empfehlung für das weitere Vorgehen im Umgang mit AR-Autorentools gegeben.

In **Kapitel 6** werden ausgewählte Anbieterlösungen des Benchmarks mit alternativen Ansätzen für die Content-Generierung von Mitarbeitertrainings auf Effizienz hin verglichen. Ausgehend von der Erstellung von papier- und video-basierten Lernunterlagen wird der Vergleich zur Generierung von Augmented Reality-basiertem

Trainingscontent gezogen. Dabei stehen sich der Erstellungsaufwand und der Nutzen des Trainings gegenüber. Insbesondere die zeitliche Dauer und die erforderlichen Fähigkeiten zur Erstellung von Trainings dienen hier als Vergleichsparameter. Am Ende des Kapitels werden die Ergebnisse tabellarisch gegenübergestellt um einen qualitativen Vergleich zu ermöglichen.

In **Kapitel 7** werden die gewonnenen Erkenntnisse dieser Diplomarbeit zusammengefasst und kritisch diskutiert. Im Anschluss wird ein Ausblick auf weitere Arbeits- und Forschungsfelder gegeben sowie auf die weitere Entwicklung der Thematik innerhalb der BMW Group.

2 Die industrielle Automobilproduktion

Für ein besseres Verständnis des Arbeitsumfelds werden in diesem Kapitel zunächst die industrielle Produktion allgemein und die Besonderheiten der Automobilproduktion herausgearbeitet. Hierbei liegt der Fokus vor allem auf den strategischen Entwicklungen und Herausforderungen, um den Innovationstrieb der Branche einordnen zu können.

2.1 Definition und Bedeutung

Nach Gutenberg ist die Produktion als Kombination der Elementarfaktoren Arbeit, Material und Maschinen durch die derivativen Faktoren Planung und Organisation zum Zwecke der Leistungserstellung, zu verstehen. (Adam 1998, S. 1). Die Aufgabe der industriellen Produktion ist dabei eine (technologische) Transformation von Einsatzfaktoren (Betriebsmittel, Materialien und menschliche Arbeitsleistung) mittels Faktorkombination in marktfähige Sachgüter (im Gegensatz zu Dienstleistungen) bei räumlicher Konzentration der Einsatzfaktoren (in Fabriken), überwiegender Anwendung maschineller Betriebsmittel und weitgehender Arbeitsteilung (wirtschaftslexikon24.com 2018). Ziel der industriellen Produktion ist es, die Effizienz in technischer (z.B. Produktivität, Flexibilität) sowie aus ökonomischer Hinsicht (z.B. Rentabilität, Profitsteigerung) zu erhöhen.

Koren (2010) zeichnet die abstrahierte Architektur eines produzierendes Unternehmens wie in Abbildung 2 dargestellt. Hierbei stehen die unternehmensinternen Funktionen „Gestalten“ – „Fertigen“ – „Verkaufen“ im Vordergrund und sind gleich bedeutend aneinander gekoppelt. Abhängig vom Geschäftsmodell (Push oder Pull) kann die Reihenfolge jedoch variiert werden.

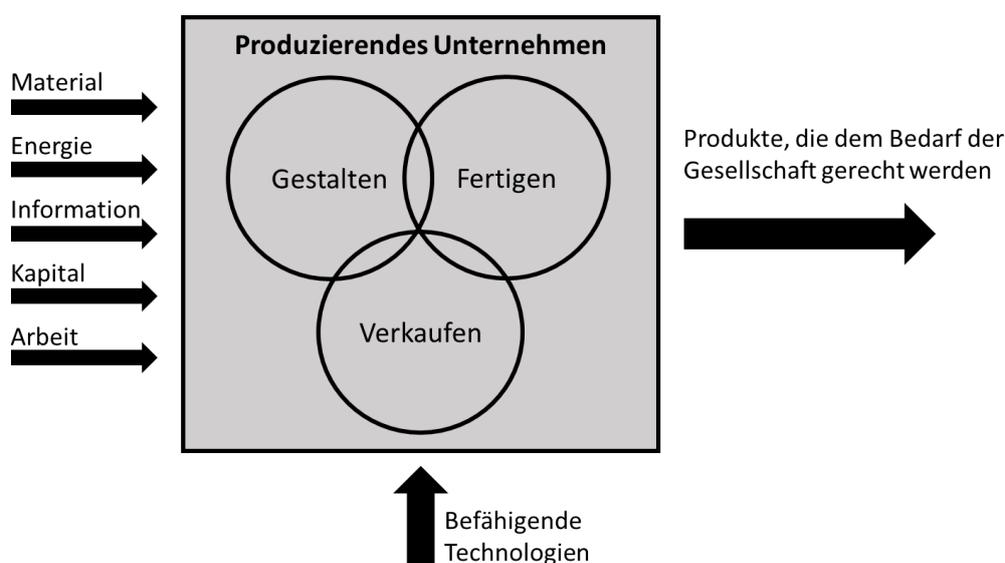


Abbildung 2: Ein produzierendes Unternehmen hat drei Basiselemente: Gestalten, Fertigen und Verkaufen (angelehnt an Koren 2010, S. 24)

So können Produkte zuerst gestaltet und gefertigt und erst im Anschluss verkauft werden. Es können aber auch Produkte verkauft und erst dann gestaltet und gefertigt werden. Erst durch befähigende Technologien ist es möglich, die eingesetzten Ressourcen Material, Arbeit, Kapital, Energie und Informationen zu einem Produkt höherer Wertigkeit zu formen (Koren 2010, S. 36).

2.2 Aktuelle Situation und zukünftige Entwicklungen

Wie keine andere Branche steht die Automobilindustrie für die Industrialisierung unserer Gesellschaft und erschafft seit über 100 Jahren Produkte, die für den menschlichen Fortschritt stehen. Angefangen mit der vorindustriellen Fertigung von Kraftfahrzeugen durch manuelle Handwerkskunst, wurde 1913 mit Henry Fords T-Modell die erste „moving assembly line“ eingeführt, um der großen Nachfrage auf dem amerikanischen Markt nachzukommen und eine wirtschaftliche Fertigung zu ermöglichen. Dies wird als die erste Revolution der Automobilgeschichte gesehen. Auf diesem Wege wurde das Automobil von einem Fortbewegungsmittel für Wohlhabende zum alltäglichen Gebrauchsgegenstand der breiten Bevölkerung.

Den Ausgangspunkt für die zweite Revolutionsstufe der Automobilindustrie bildet das Toyota Produktionssystem (TPS), in der eine stetige Produktivitäts- und Qualitätsverbesserung angestrebt wird. Die darin integrierte Strategie „Lean Production“ und die zugehörigen Methoden, wie die JIT-Produktion, KAIZEN oder Jidoka haben auch heute noch eine hohe Relevanz für Automobilhersteller (Seiwert et al. 2018).

Die dritte Revolution der Automobilindustrie ist geprägt von der Maximierung der Variantenvielfalt und einem stark erhöhten Individualisierungsgrad. Sie hat die heutige Produktion hinsichtlich der Flexibilität bei Kundenwünschen und der Individualität bei der Konfiguration des Fahrzeuges im Vergleich zur Zeit der Anfänge der Automobilproduktion stark verändert. So bieten die OEMs (Original Equipment Manufacturer) ein erweitertes Angebot an optional buchbaren Sonderausstattungen, eine größere Farbauswahl sowie Umsetzung spezieller Sonderwünsche auf Anfrage an. Hieraus resultiert eine Steigerung der Diversität.

In Abbildung 3 ist die Veränderung der Marktanforderungen an die Automobilhersteller im Verlauf der industriellen Entwicklung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass auch in Zukunft eine weitere Personalisierung der Produkte zu erwarten ist und somit auch die Komplexität des Produktionsprozesses steigen wird (Bauernhansl et al. 2014, S. 28).

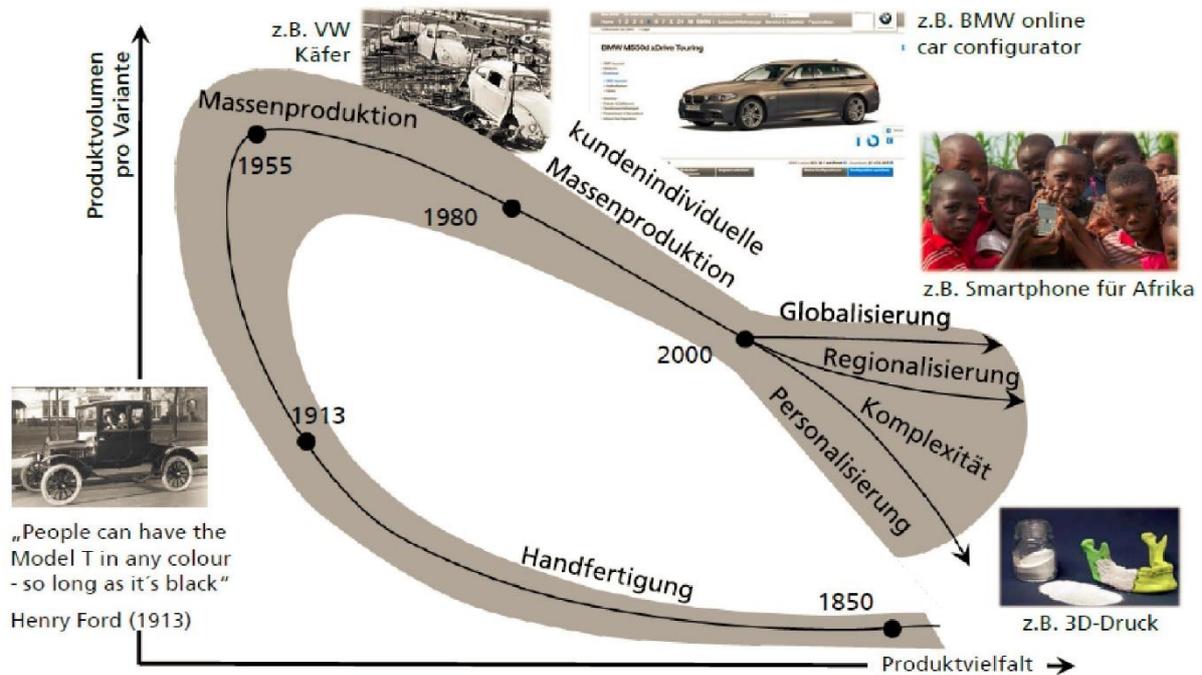


Abbildung 3: Veränderung der Anforderungen des Marktes hin zu individualisierten Produkten (Schlund 2017a, S. 15; in Anlehnung an Koren 2010)

Aktuell befindet sich die Automobilindustrie in der vierten Revolution mit den folgenden Schwerpunkten:

- Digitalisierung: vom Fahrer betriebenes Fahrzeug → vollvernetztes, autonom fahrendes Fahrzeug
- Nachhaltigkeit: Verbrennungsmotor → Elektrifizierung des Antriebes
- Urbanisierung: Besitz eines Fahrzeugs → Mobilitätsplattformen

Wie viele Branchen ist auch die Automobilindustrie einer sich ständig ändernden Umwelt ausgesetzt. Aus diesem Grunde haben Digitalisierung und Innovationen eine hohe Priorität. In Abbildung 4 sind die Veränderungen der Innovationsausgaben verschiedener Industrien der letzten drei Jahre (2015-2017) dargestellt. Der Fahrzeugbau sticht hier durch seine stark steigenden Ausgaben hervor. Die Investitionsausgaben erhöhten sich 2017 um 7 Milliarden Euro gegenüber 2016. Die EDV/Telekommunikationsbranche ist mit einer Veränderung von 3,8 Mrd. Euro die zweit-innovationsfreudigste Branche. Die Werte für 2017 beruhen allerdings auf einer Expertenbefragung von Unternehmensmitarbeitern.

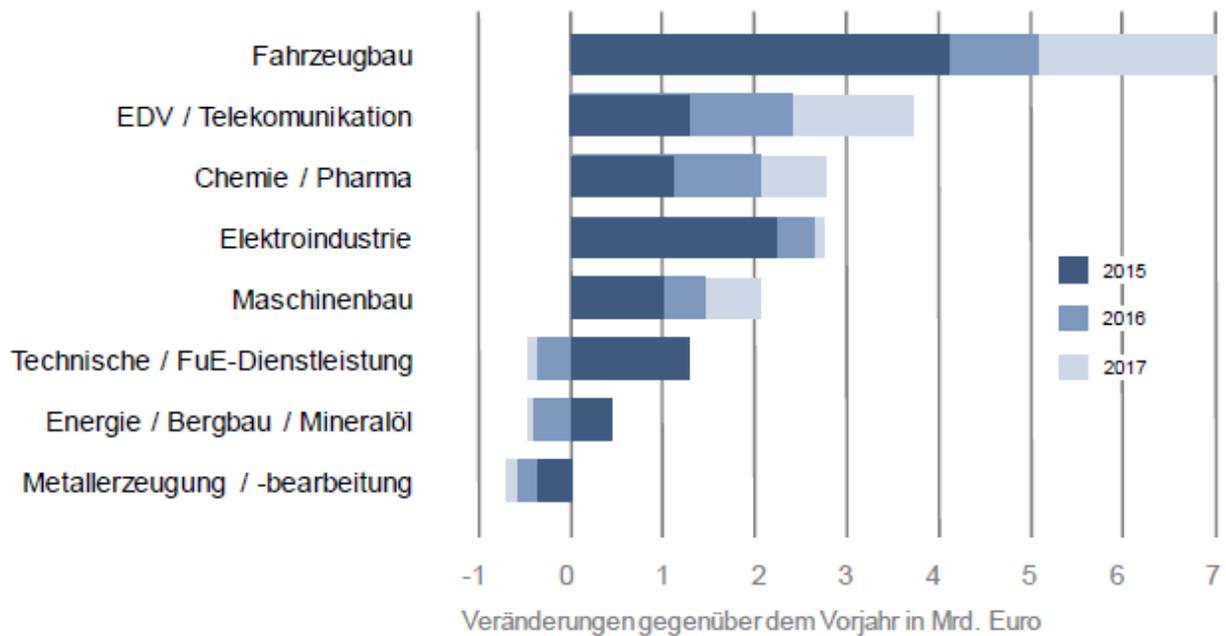


Abbildung 4: Veränderung der Innovationsausgaben in verschiedenen Industriesektoren (Schneider 2017)

Es ist zu erkennen, dass die Automobilindustrie einen erhöhten Bedarf an Forschung und Innovation sieht um für die zukünftigen Entwicklungen gut aufgestellt zu sein. In Abbildung 5 sind die wichtigsten Trends der Automobilbranche im Zeitverlauf von 2014-2018 dargestellt. Insbesondere Themen wie die Entwicklung von alternativen Antriebssystemen, zum Beispiel brennstoffzellen- und batteriebetriebene Fahrzeuge, gewinnen seit 2016 massiv an Zuspruch. Die Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren hingegen nimmt deutlich ab (von Platz 2 auf 10 zwischen 2015 und 2018). Vieles davon ist auf den „Dieselskandal“ und den darauf folgenden Regulierungen sowie dem entstandenen Imageschaden der gesamten Automobilbranche zurückzuführen. Zwei Trends in Abbildung 5, die 2015 mit aufgeführt wurden, „OEM captive financing and leasing“ (#5) und „innovative urban vehicle design concepts“ (#8) fielen 2016 aus den zehn Trends heraus.

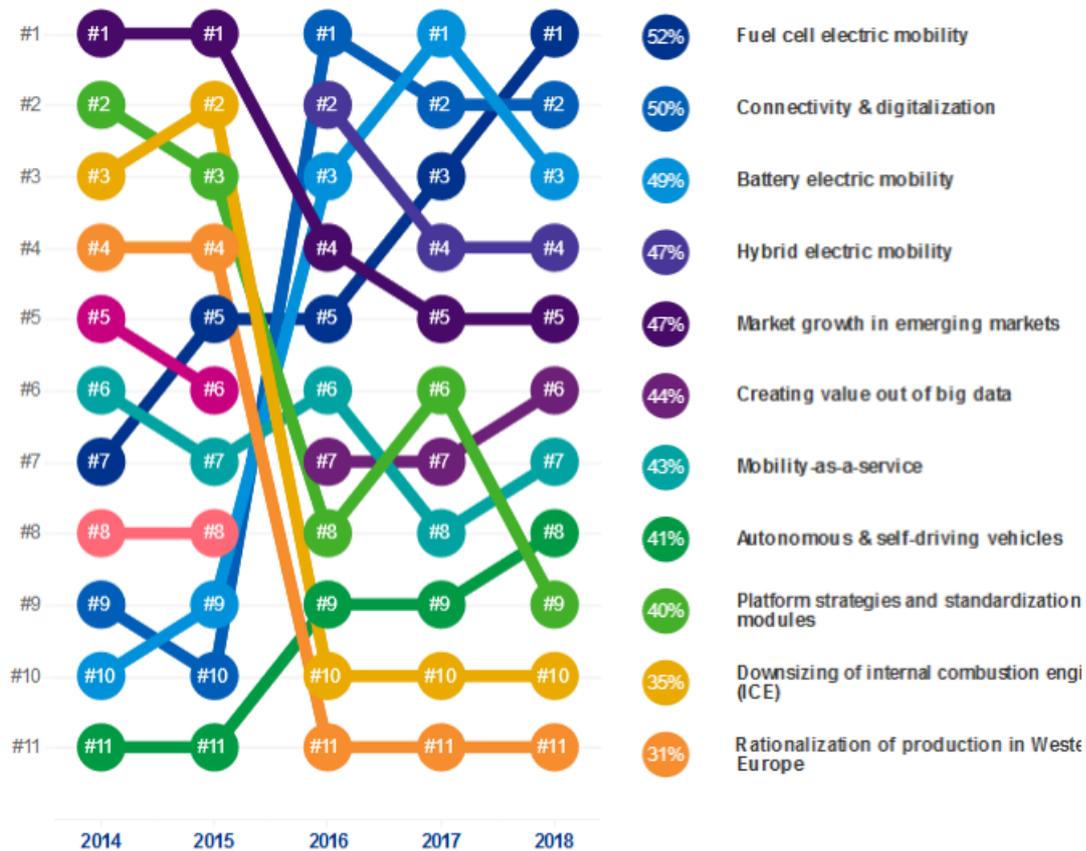


Abbildung 5: Die wichtigsten Trends bis 2025 laut der Global Automotive Executive Survey (KPMG 2018)

Generell kam es zwischen 2015 und 2016 zu einer deutlichen Änderung der prognostizierten Schlüsseltrends. So gewinnt neben der Vernetzung und Digitalisierung auch die Nutzung von Big Data an Bedeutung. Dies lässt darauf schließen, dass in diesem Zeitraum viele Automobilhersteller einen rapiden Strategiewechsel vollzogen haben, dessen Wandel sich noch bis heute zeigt.

2.3 Herausforderungen und Strategiewandel der BMW Group

Auch für den Premiumautomobilhersteller BMW treffen die oben genannten Entwicklungen zu. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, sind die Produktionsstandorte des Konzerns auf der ganzen Welt verteilt und gliedern sich in Fahrzeug-, Montage- und Auftragswerke sowie Joint-Ventures mit anderen Unternehmen. Dies schafft zum einen Hürden, zum Beispiel durch den zusätzlichen Logistik- und Organisationsaufwand, diversifiziert auf der anderen Seite jedoch das unternehmerische Risiko bei regionalen Problemen und ermöglicht den Eintritt in neue Märkte.



Abbildung 6: BMW Produktionsstandorte weltweit (BMW Group 2017a)

Als aktuell größte Herausforderungen aus der Umwelt werden in einem Strategiebericht folgende übergreifende Punkte genannt (BMW Group 2018c):

- Deutlicher Imageverlust der deutschen Automobilindustrie
- Kritische Bewertung der Dieselmotortechnologie
- Deutliche Verschärfung der gesetzlichen Regularien
- Zunehmende Regionalisierung der Bedürfnisse und Anforderungen
- Internationale Verschärfung von Handelsbarrieren
- Deutlicher Ausbau des Angebots von elektrifizierten Fahrzeugen
- Besetzung des Autos als „3rd Living Space“ neben Haus und Arbeitsplatz durch Internetfirmen
- Bildung von „Tech Stacks“ (Kombination von Softwareprodukten) zur Entwicklung von autonomen Fahren
- Zunahme an Partnerschaften zur Realisierung von Car/Ride-Sharing

Als Reaktion auf diese dynamischen Änderungen der Umwelt, die sich unmittelbar auf das Kerngeschäft sowie auf Zukunftsthemen auswirken, gilt seit 2016 die konzernweite Strategie, die als Ziel die Sicherstellung des Erfolgs und der Unabhängigkeit der BMW Group definiert. Sie ist die Grundlage für langfristiges, nachhaltiges und zielorientiertes Handeln (BMW Group 2017a). In Abbildung 7 ist das Strategieleitbild des Konzerns dargestellt. Die vier Facetten der Strategie sind Zielbild, Wettbewerbsvorteil, Strategische Stoßrichtungen und Kultur. Diese Facetten müssen für jedes Ressort (Konzern, Vertrieb, Entwicklung, Finanzen, Produktion) einzeln interpretiert und integriert werden.



Abbildung 7: Leitbild: Strategie Number One - NEXT (BMW Group 2018c)

Als Beispiel zur konkreten Umsetzung dieses Leitbildes sollen 25 elektrifizierte Fahrzeuge bis 2025, davon zwölf rein elektrisch betriebene Fahrzeuge (BEVs) in das Produktportfolio aufgenommen werden (BMW Group 2018c). Dadurch ergeben sich, besonders für die Produktion große Herausforderungen, da BMW den Ansatz verfolgt in den einzelnen Werken möglichst alle Derivate auf einer Montagelinie zu produzieren. So werden im Werk Dingolfing auf zwei Montagebändern zurzeit 14 verschiedene Derivate produziert. Auch der iNext, das Leit-BEV des Konzerns, soll auf der gleichen Montagelinie wie die Derivate der 6er, 7er und 8er-BMWs produziert werden. Gleiches gilt für die anderen Werke in denen BEVs in Zukunft produziert werden. Dies ist ein Novum, da die bisherigen Elektromodelle i3 und i8 (Hybrid) im Werk Leipzig auf separaten Bändern, abseits der anderen Derivate, gefertigt werden, da die Montageumfänge sich deutlich von herkömmlichen Fahrzeugen unterscheiden. Es ist abzusehen, dass damit neben der steigenden Variantenvielfalt eine weitere, technologiebasierte Komplexitätserhöhung einhergeht.

Für das Produktionsressort werden im Rahmen der Unternehmensstrategie folgende Top-Ziele bis 2025 festgelegt (siehe Abbildung 8):



Abbildung 8: Top-Ziele des BMW-Produktionsressorts (BMW Group 2017a)

Das Produktionssystem muss so reaktionsfähig und flexibel werden, dass innerhalb von 18 Monaten die maximale Kapazität um mindestens 25% gesteigert oder reduziert

werden kann. Zusätzlich sind die Kosten pro Einheit pro Jahr um 5% zu reduzieren und auch die Durchlaufzeit eines Fahrzeuges soll auf 35 Stunden reduziert werden. Aus qualitativen Gesichtspunkten ist der Produktionsprozess so zu optimieren, dass die durchschnittliche Nacharbeit pro Fahrzeug nur 15 Minuten beträgt.

Zur Erfüllung dieser Ziele gibt es im Produktionssystem einige Stellhebel, welche sowohl in der Produktion in den Werken als auch im Produktionsentwicklungsprozess ansetzen. In dieser Arbeit wird aus Gründen der Relevanz lediglich auf die Potenziale in der Montage, insbesondere durch innovative Anlernprozesse der Mitarbeiter, eingegangen.

Ein Kern der neuen Strategie bildet das wertschöpfende Produktionssystem (WPS) bei der jeder Mitarbeiter dazu angehalten wird, zu einer Verbesserung des bestehenden Systems beizutragen und seine Arbeitsweise zu reflektieren. In Abbildung 9 sind die zehn WPS-Grundsätze dargestellt.

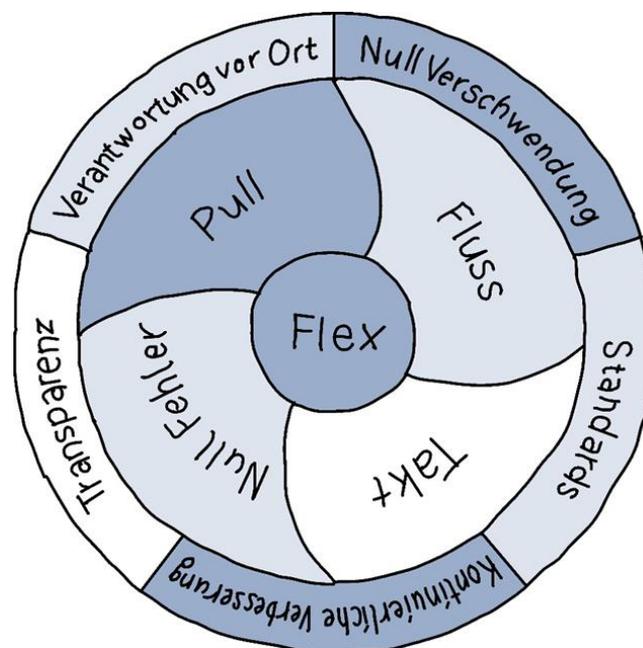


Abbildung 9: Das WPS-Rad - Außen: Verhaltensgrundsätze; Mitte: Prozessgrundsätze; Zentrum: Flexibilität (BMW Group 2017a, S. 26)

Der äußere Kreis steht hierbei für Verhaltensgrundsätze, die jeder Mitarbeiter, der aktiv an der Wertschöpfung beteiligt ist, verinnerlichen muss: Transparenz, Verantwortung vor Ort, Null Verschwendung, Einhalten von Standards und die Kontinuierliche Verbesserung. Im mittleren Kreis sind die Prozessgrundsätze Fluss, Takt, Null Fehler und Pull dargestellt. Sie bilden die Grundlage der Produktion und werden bei jeder Tätigkeit hinterfragt. Im Zentrum des Kreises steht das Feld Flex, welches für Flexibilität und Wandlungsfähigkeit steht und sich auf alle Ebenen bezieht (BMW Group 2017a, S. 26).

3 Montage in der Automobilindustrie

Im folgenden Abschnitt wird auf die Montage in der industriellen Automobilproduktion eingegangen. Hierfür werden zunächst die allgemeinen Grundlagen der Montage in der industriellen Produktion herausgearbeitet. Darauf aufbauend wird anschließend die Einordnung der Montage in den Produktionsprozess vorgenommen. Nach einer kurzen Erläuterung aktueller Trends und Herausforderungen wird der Fokus auf die Qualifizierung der Montagemitarbeiter gelegt, die weiterhin im Zentrum eines modernen Montagesystems stehen.

3.1 Definition und Eingliederung in das Produktionssystem

Industrieprodukte bestehen im Allgemeinen aus einer Vielzahl von Einzelteilen, die mit unterschiedlichen Verfahren zu verschiedenen Zeitpunkten hergestellt werden. Aufgabe der Montage ist es, diese Teile zu einem Produkt höherer Komplexität zusammenzuführen (Lotter und Wiendahl 2012, S. 7). Es handelt sich dabei also um einen separaten Produktionsabschnitt. Durch das schnelle Wachsen der Automobilindustrie in den USA Anfang des 20. Jahrhunderts und dem Zwang einer wirtschaftlichen Montage sowie dem Fehlen qualifizierter Facharbeiter entstand das Prinzip der extremen Arbeitsteilung. In Folge dessen wurde das Montieren in der Automobilindustrie vorrangig zur Hilfsarbeitertätigkeit. Dies ist im Prinzip auch heute im Bereich der manuellen Montage noch der Fall. Lediglich durch verbesserte Fließbandsysteme, mechanisierte Werkzeuge und die mechanische Unterstützung kraftaufwändiger Vorgänge sowie die Gestaltung ergonomischer Arbeitsplätze wurde die Arbeit in der Montage erleichtert (Warnecke 1995, S. 6).

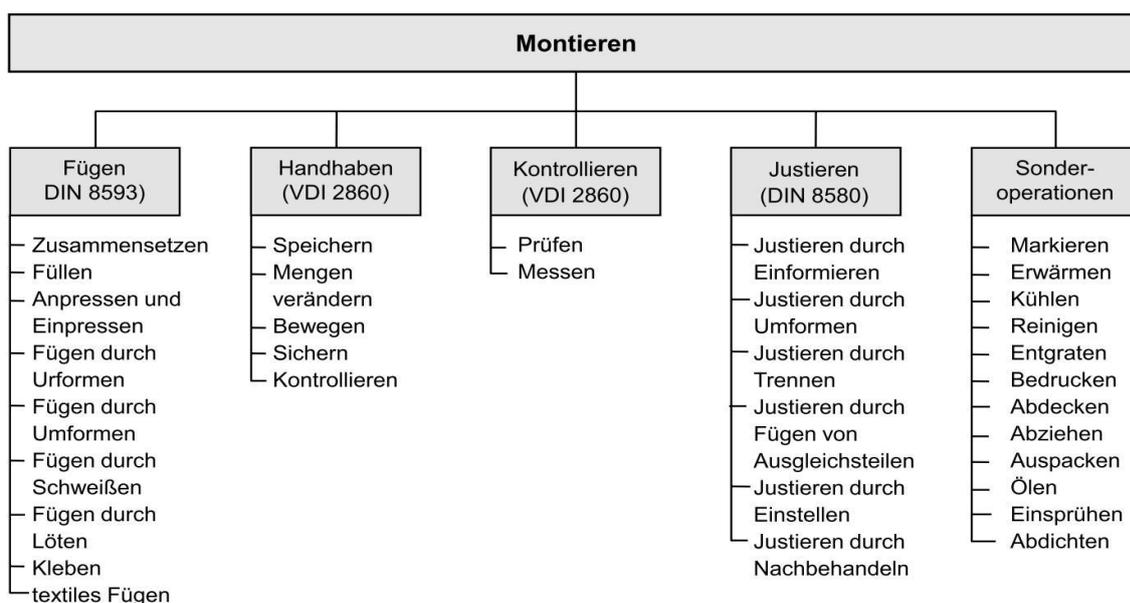


Abbildung 10: Funktionen der Montage (Lotter und Wiendahl 2012, S. 2)

Laut VDI-Richtlinie 2860 ist Montieren die Gesamtheit aller Vorgänge, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dient. Der Montageprozess lässt sich dabei in die Vorgänge bzw. Funktionen Fügen, Handhaben, Kontrollieren, Justieren und Sonderoperationen untergliedern (siehe Abbildung 10).

Aus Unternehmensperspektive ist die Montage sehr zeitintensiv und beansprucht je nach Produkt 15-70% der Gesamtfertigungszeit. Im Fahrzeugbau beträgt sie 30-50%, abhängig von der Fertigungstiefe (Lotter und Wiendahl 2012, S. 3). Der höchste Montagezeitanteil findet sich mit 40-70% in der Elektro- und Feintechnik (VDI 1992). Auch verursacht die Montage im Vergleich zu den anderen Unternehmensbereichen mit 70% mit Abstand die meisten Kosten, wie in Abbildung 11 zu sehen ist.

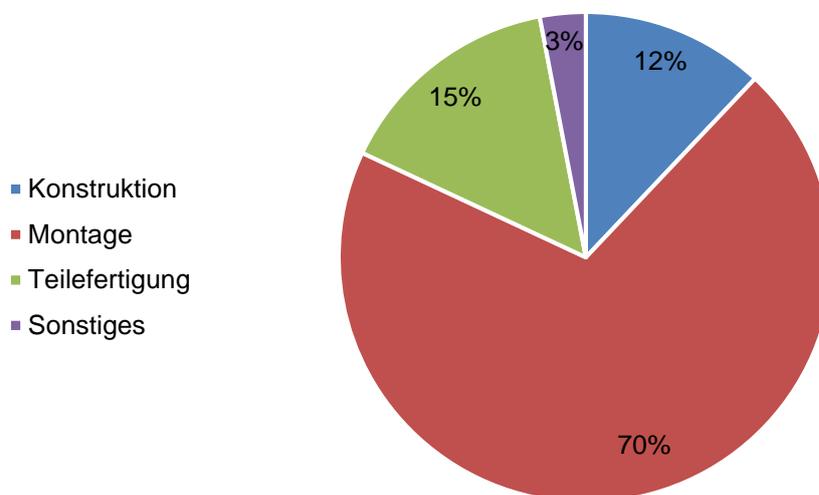


Abbildung 11: Branchenübergreifende Kostenverursachung der wichtigsten Unternehmensbereiche (angelehnt an Lotter und Wiendahl 2012, S. 12)

Für die Gestaltung eines möglichst effizienten Montagesystems muss abgewogen werden, welche Bedürfnisse des Unternehmens im Vordergrund stehen. In Abhängigkeit der Losgröße, des Investments und dem gewünschten Flexibilisierungsgrad kann die Produktion einen unterschiedlichen Automatisierungsgrad erreichen. Generell ergeben sich folgende Szenarien (siehe Abbildung 12):

1. **Automatische Montage** – kleine Variantenvielfalt, geringe Flexibilität, dafür ergibt sich eine hohe Produktivität und eine hohe Losgröße. Die Investitionskosten sind hoch.
2. **Manuelle Montage** – Produktivität und Losgröße sind gering, dafür ist eine hohe Variantenvielfalt und Flexibilität gegeben. Die Investitionskosten sind gering.
3. **Hybride Montage** – Ein Trade-off zwischen manueller und automatischer Montage, bei der sich Vor- und Nachteile der beiden Montagesysteme die Waage halten.

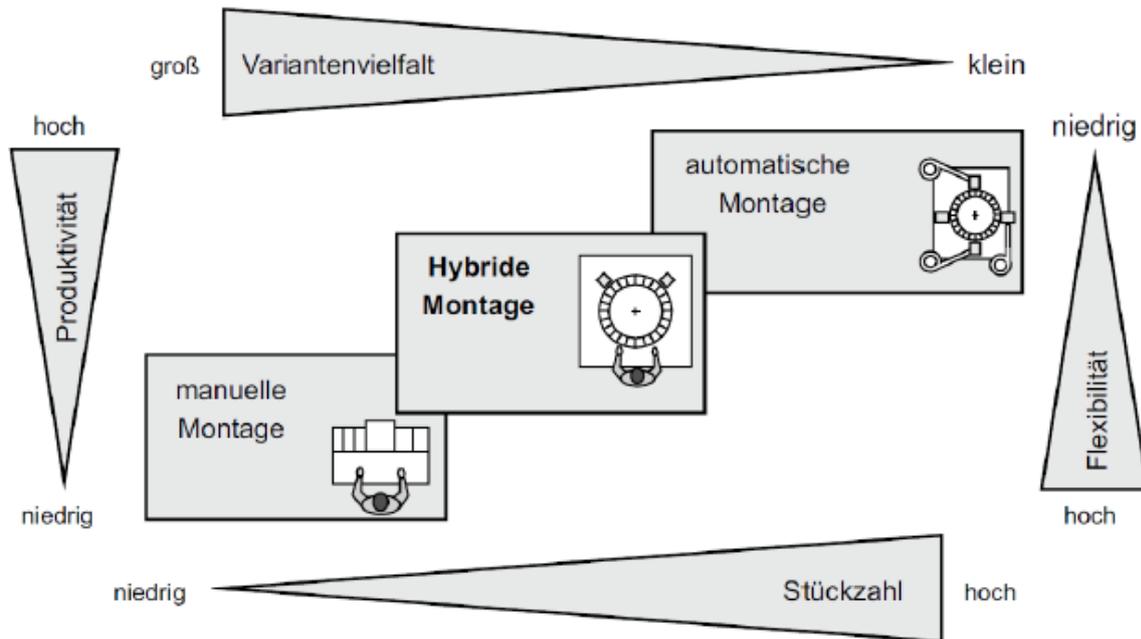


Abbildung 12: Auswahlkriterien für Montagesysteme (Lotter und Wiendahl 2012, S. 9)

In der Automobilindustrie hat sich eine hybride Montagestruktur etabliert. Insbesondere bei den Premiumherstellern, die mit einer hohen Variantenvielfalt umgehen müssen, ist der Anteil manueller Montagetätigkeiten dabei höher als bei den Fahrzeugherstellern im Klein- und Mittelklassensegment, bei denen die Losgrößen deutlich höher sind. Der überwiegende Anteil der Montagemitarbeiter arbeitet in der manuellen Montage (Warnecke 1995, S. 6).

Eingliederung in das Produktionssystem

Zur Übersicht wird die Montage eines Automobilherstellers, am Beispiel von BMW, in Abbildung 13 in einem Produktionssystem dargestellt. Die Montage folgt als finaler Schritt im Fertigungsprozess. Zuvor werden noch drei andere Bereiche durchlaufen. Insgesamt lässt sich der Hauptprozess in die Bereiche Presswerk (Umformen), Karosseriebau, Lackiererei und Montage (inklusive Prüffeld) unterteilen.



Abbildung 13: Eingliederung der Montage in das BMW-Produktionssystem (BMW Group 2018b)

1. **Presswerk:** Schwere Stahl und Aluminiumrollen („Coils“) werden zugeschnitten und in mechanischen Prozessstraßen umgeformt. So entstehen große Teile der Karosserie, z.B. Seitenschweller, Türen, etc.
2. **Karosseriebau:** Im Karosseriebau werden die Blechteile aus dem Presswerk zur Rohkarosserie zusammengefügt.
3. **Lackiererei:** Fünf Schichten schützen vor Umwelteinflüssen und verleihen den Fahrzeugen dauerhaften Glanz- oder Mattlack.
4. **Montage:** In der Montage werden die lackierten Karosserien mit dem Antriebsstrang, Achsen und Interieur komplettiert und zu fertigen Fahrzeugen endmontiert.
 - Prüffeld und Fahrzeugfinish: Programmierung der Steuergeräte, erster Fahrzeugstart, Prüfung Interieur, Exterieur und Systeme

In Abbildung 13 steht die Kundenorientierung im Fokus. Der Kundenprozess Idea to Offer (ItO) steht hierbei für „Realisiert ein attraktives Marktangebot“ und Order to Delivery (OtD) für „Stellt Produkte für Kunden bereit“. Zu Beginn steht der ItO-Prozess im Rahmen des Produktentstehungsprozesses im Vordergrund. Mit zunehmender Wertschöpfung übernimmt dann der OtD-Prozess die Führung, bei der die ordnungsgemäße Bereitstellung des Fahrzeugs zur richtigen Zeit, am richtigen Ort, in bester Qualität gefordert wird (BMW Group 2017a). Die WPS Grundsätze, hier in Form des WPS-Rads, gelten entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Als unterliegende Prozesse sind Antriebs- und Komponentenfertigung für die Fertigung benötigter Einzelteile und Module zuständig, die den einzelnen Hauptprozessschritten zugesteuert werden. Eine Ebene darunter finden sich Anlagen- und Werkzeugbau, welche das Fundament des technischen Montagesystems stellen, vom Presswerkzeug bis zum Werkstückträger in der Vormontage, wieder. Die Logistik ist für den übergreifenden Materialfluss von den Herstellern bis hin zur Bereitstellung am Montageband zuständig. Als Basis von allem ist die Informationstechnologie anzusiedeln. Sie steuert den Informationsfluss. All diese Komponenten sind essentiell und können nicht vernachlässigt werden.

Die Montage in einem Automobilunternehmen lässt sich generell in folgende Bereiche differenzieren:

1. **Endmontage** – Hauptband auf dem, ausgehend von der lackierten Karosserie, alle weiteren Baugruppen und –teile hinzugefügt werden bis zum fertigen Produkt.
2. **Vormontage** – Antriebsstrang (Motor, Getriebe), Hochvoltspeicher, Frontend und Heckend, Türen, Cockpit, Sitze und weitere Module
 - Untervormontagen kleinerer Umfänge, wie das Verklipsen von Sensoren in Bauteilen

3. Komponentenfertigung – einzelne Komponenten, wie zum Beispiel Stoßfänger werden separat gefertigt und an die Vormontage-/Endmontagebänder geliefert.

Der größte Anteil der Montagearbeit findet in der Endmontage auf dem Hauptband statt, wo weitgehend eine getaktete Fließmontage verwendet wird. Das heißt, die Taktzeit ist an jedem Arbeitsplatz gleich. Abhängig von den Werken und Fahrzeugmodellen kann die Taktzeit stark schwanken. So sind in Werk Dingolfing auf einer Montagelinie aktuell 54 Sekunden Taktzeit üblich (auf der zweiten Montagelinie 83 Sekunden), während auf dem Montageband des i3 im Werk Leipzig Taktzeiten von 15 Minuten üblich sind. Im Rolls Royce Werk in Goodwood sind sogar Taktzeiten von 45 Minuten die Regel.

Parallel zur Endmontage finden Vormontagen einzelner Module und Baugruppen, wie zum Beispiel des Frontends statt, welche ebenfalls im gleichen Takt zum Hauptband fließen und an geeigneter Stelle zugesteuert werden. Zusätzlich dazu gibt es Untervormontagen (UVMs), die abseits des Bandes unabhängig der Taktzeit durch manuelle Tätigkeiten ausgeführt und dem Vormontageprozess zugefügt werden.

Ein exemplarischer Montageprozess ist in Abbildung 14 abgebildet. Es ist zu sehen, an welchen Takten zusätzliche Module angeliefert und integriert werden.

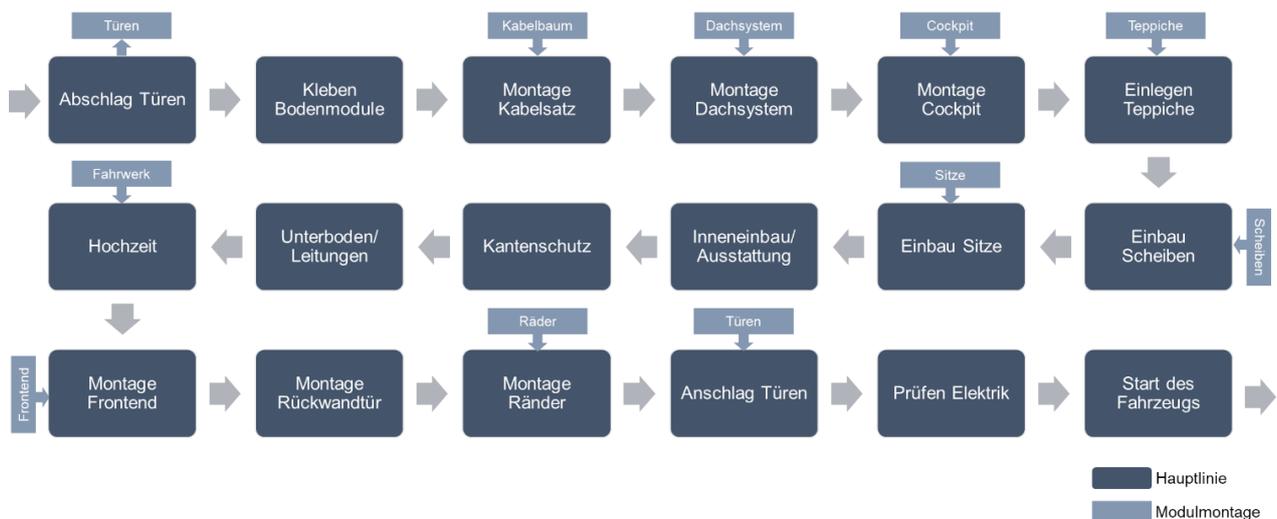


Abbildung 14: Exemplarischer Aufbau einer Montagelinie

In den Montagewerken des erweiterten Produktionsnetzwerkes der BMW Group, wie zum Beispiel in Thailand oder Brasilien, wird eine CKD/SKD-Strategie verfolgt, in der nur die nötigste Wertschöpfung in dem Land stattfindet. Hier ist der Anteil an Modulen noch höher, so dass der Endmontageprozess auf ein Minimum reduziert werden kann. Ein Großteil der Wertschöpfung findet dementsprechend in der Vormontage statt.

Eine weitere Rolle in der Montage kommt der Komponentenfertigung zu. Hier werden Bauteile gefertigt, die in verschiedenen Werken benötigt und unabhängig von der Taktzeit der Endmontage gefertigt werden. Auch sie werden weitestgehend in manueller Tätigkeit montiert.

3.2 Trends und Herausforderungen

Durch die sich verändernden Markt- und Umweltbedingungen (u.a. vom Anbietermarkt zum Kundenmarkt; globalisierter Wettbewerb) ergeben sich auch für die Montage neue Anforderungen, auf die reagiert werden muss, um einen effizienten Betrieb zu ermöglichen.

Laut Lotter und Wiendahl lassen sich folgende Trends für die Montage feststellen (Lotter und Wiendahl 2012, S. 9):

- Weitere Verkürzung der Produktlebensdauer
- Anstieg der Produktvarianten → Reduzierung der Losgrößen
- Just-in-Time/Just-in-Sequence Anlieferung gewinnt noch mehr an Bedeutung
- Erhöhung der Qualitätsanforderungen
- Reduzierung der Produktions- und damit auch Montagekosten

Für die Montage ergeben sich dadurch zusammengefasst folgende Herausforderungen:

- Steigende Variantenvielfalt
- Sicherung der Produkt- und Prozessqualität
- Wachsende Anforderungen an die Mitarbeiter
- Kosteneinsparungen
- Reduzierung der Nacharbeit

Insbesondere die Variantenvielfalt stellt große Herausforderungen an das Produktionskonzept, vor allem aber an die Mitarbeiter. In der Automobilindustrie wird Vielfalt unter anderem in Form von Fahrzeuglinien, Derivaten und Ausstattungsformen angeboten.

Unter einer **Fahrzeuglinie** wird ein Modell verstanden, das mehrere Karosserieformen haben kann. Beispiele hierfür sind die A-Klasse von Mercedes-Benz oder der 3er von BMW. Unter einem **Derivat** versteht man unterschiedliche Karosserieformen einer Fahrzeugklasse. So ist beispielsweise der 3er BMW in den Karosserieformen Limousine, Limousine CN (lange Bauform für den chinesischen Markt), Touring und Gran Turismo erhältlich (BMW Group 2017a). In Abbildung 15 ist die Anzahl der von BMW produzierten Derivate im Verlauf von 40 Jahren dargestellt. Die Anzahl hat sich in diesem Zeitraum mehr als verzehnfacht. Während der Kunde in den 70er Jahren zwischen fünf Derivaten wählen konnte, standen 1985 bereits acht Derivate zur Auswahl. In den 1990er Jahren kamen zu den Derivaten Limousine, Coupé, Touring und Cabrio noch Roadster und Sports Activity Vehicle (SAV, z.B. BMW X2) hinzu. Seit 2000 ist ein enormer Zuwachs auch bei den verschiedenen Fahrzeuglinien in der BMW Group zu erkennen. So kamen die Fahrzeuglinien „Kleinwagen“ (z.B. Mini) aber auch

„Super Luxus“ (Rolls Royce) zu der bestehenden Modellpalette hinzu (BMW Group 2017a). Im Jahr 2015 konnte der Kunde zwischen 55 verschiedenen Derivaten wählen.

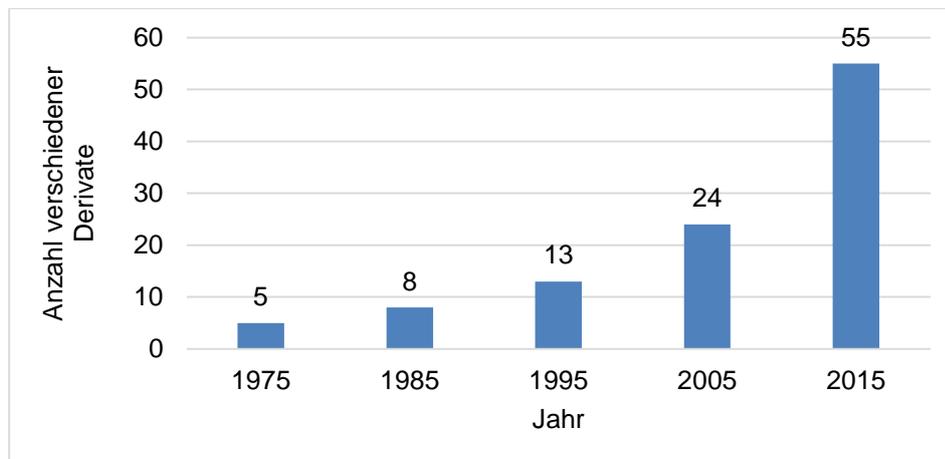


Abbildung 15: Entwicklung der Anzahl verschiedener Derivate in der BMW Group (angelehnt an Treichel 2018, S. 1)

Die einzelnen Derivate bieten eine Vielzahl an **Ausstattungsdetails**. Die Möglichkeiten erstrecken sich dabei von verschiedener Motorisierung, über Farb- und Stoffkombinationen, bis hin zu einer Vielzahl weiterer Optionen und Sonderausstattungen. So kann beim 7er BMW zwischen insgesamt 19 Motorisierungen (inklusive Allrad und Getriebe), einer großen Auswahl an Lackierungen, 15 Polsterfarben und acht Felgenvarianten gewählt werden. Zusätzlich stehen dem Kunden unzählige zusätzlich buchbare Pakete und Sonderausstattungen zur Verfügung, bei denen Farbe und Ausführung individuell bestimmt werden können. Unter Berücksichtigung der Ausstattungsmöglichkeiten ergeben sich somit bis zu 10^{23} Konfigurationsmöglichkeiten (BMW Group 2018a).

Natürlich kann in dem Rahmen noch nicht von einer Losgröße 1 gesprochen werden, da weiterhin viele Bauteile des Fahrzeugs identisch bleiben und manche Konfigurationen sehr selten vorkommen.

Eine weitere Herausforderung, die sich durch die zunehmende Vernetzung und Digitalisierung von Fahrzeugen ergibt, ist der Anstieg der erforderlichen Netzleistung und der damit verbundenen Infrastruktur. Diese wird durch eine Weiterentwicklung der Bustechnologie (von CAN und LIN bis hin zu Ethernet) realisiert. In Abbildung 16 ist die Entwicklung der Netzwerkknoten pro Jahr im Zeitraum von 1994 bis 2022 dargestellt. Als zusätzliche Information ist in der Abbildung auch die Größe eines Autonetzes dargestellt (Stand 2017). Es besteht aus über 350 Komponenten und wiegt insgesamt 30 Kilogramm. Die Länge aller verbauten Kabel beträgt zwei Kilometer. In Zukunft ist ein weiterer Anstieg der Kommunikationssysteme in einem Fahrzeug und damit der erforderlichen Hardware zu erwarten (Winkelhake 2017, S. 14).

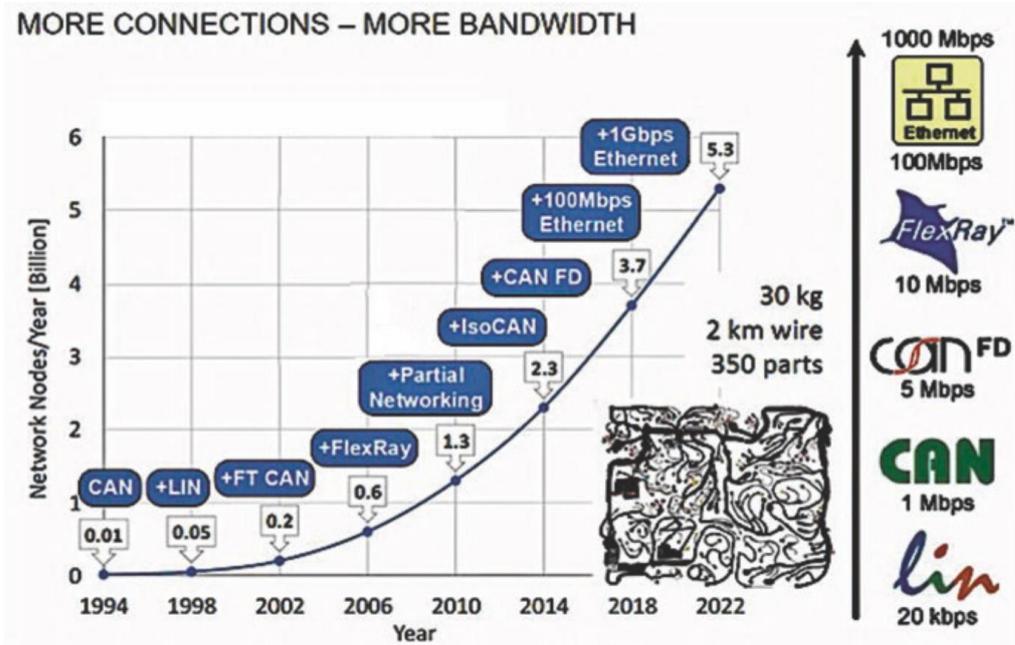


Abbildung 16: Entwicklung der internen Netzleistung bei Anpassung der Bustechnologie in Fahrzeugen (Winkelhake 2017, S. 15)

Für die Mitarbeiter, welche stets im Zentrum des Montagesystems stehen, ergeben sich dadurch laut Berthold 2017 folgende Herausforderungen (Berthold 2017):

- „Stark **steigende Variantenzahl** zu montierender Produkte
- Stark **steigende Anzahl von Variantenteilen** am Montagearbeitsplatz
- Lange **Anlernzeiten** für Montagestationen mit immer komplexeren Arbeitsinhalten
- **Mehr Arbeitsschritte** und längere Dauer bei der Montage
- Mehr **Sonderhinweise** zu unterschiedlichsten Konfigurationen von Montagevarianten
- Anstieg der notwendigen **Papierdokumentation**
- Unverhältnismäßiger Aufwand in der **Bereitstellung und Pflege von Papierdokumenten**
- Steigende **Fehlerrate** bei Montage- und manuellen Dokumentationstätigkeiten
- Massiv steigende Dokumentationsanforderungen
- Steigende Qualitätsprobleme durch **Prozesse, die für den Werker unüberschaubar sind**
- **Schlechte Nachverfolgbarkeit** von Werkzeugen, Materialien und Problemteilen innerhalb der Fabrik
- **Mangelnde Transparenz** über Auftragsfortschritte und Eskalationsprozesse“

Dies verdeutlicht, dass zunehmend innovative Lösungskonzepte und digitale Assistenzsysteme notwendig werden, um auf diese Herausforderungen reagieren zu

können. Dies trifft auch auf Schulungskonzepte für die Mitarbeiter zu. Darauf wird im nun folgenden Abschnitt eingegangen.

3.3 Bedeutung der Mitarbeiterqualifizierung

Um den Anforderungen der steigenden Komplexität und Variantenvielfalt gerecht zu werden, ist eine hinreichende Qualifizierung des Montagepersonals unabdingbar. Nach einer kurzen Beschreibung des Qualifizierungsbedarfs und der -entwicklung in der Automobilindustrie werden mögliche Trainingssituationen vorgestellt. So kann das Training zum Anlernen neuer Mitarbeiter sowie bei der Einführung neuer Derivate zum Einsatz kommen. Ebenso sind Qualitätsschulungen bei ausgewählten Themen, zum Beispiel bei besonders fehleranfälligen Montagevorgängen, notwendig. Des Weiteren wird auf Methoden der Trainingsgestaltung und -didaktik eingegangen, die zum einen bereits in der Industrie praktiziert werden und zum anderen neue Ansätze, wie die Gamification, berücksichtigen. Im Anschluss wird auf den Einsatz innovativer Assistenzsysteme zu Schulungszwecken eingegangen.

3.3.1 Bedarf und Entwicklung

Um den Umfang der Lerninhalte der Bandmitarbeiter zu erfassen, ist es notwendig, den generellen Aufbau und Prozessablauf in der Automobilmontage zu verstehen. Die Montage eines Werkes gliedert sich in Montagelinien, welche meistens in eigenen Hallen und mehreren Stockwerken untergebracht sind. Eine Montagelinie enthält mehrere Bänder (circa 20), die zum Beispiel über Förderbänder miteinander verbunden sind. Die einzelnen Bänder gliedern sich in Karosentakte, in denen sich jeweils eine Karosserie befindet. In einem Karosentakt können mehrere Mitarbeiter arbeiten, die verschiedene Aufgaben erledigen (siehe Abbildung 17). Die kleinste prozessuale Einheit sind die Teilevorgänge (TVGs), in denen der genaue Arbeitsumfang festgelegt ist. Dieser setzt sich aus einzelnen, vordefinierten Tätigkeiten zusammen, die bereits mit Tätigkeitszeiten verbunden sind. Diese Zeiten basieren auf standardisierten Methoden der Arbeitszeitermittlung (MTM/REFA). Die Tätigkeiten innerhalb eines TVGs sind logisch miteinander verknüpft und in fester, unveränderlicher Reihenfolge. Jeder TVG hat eine spezifische Nummer, die sich aus mehreren Komponenten zusammensetzt (zum Beispiel: K 1234 567 89R A 01).

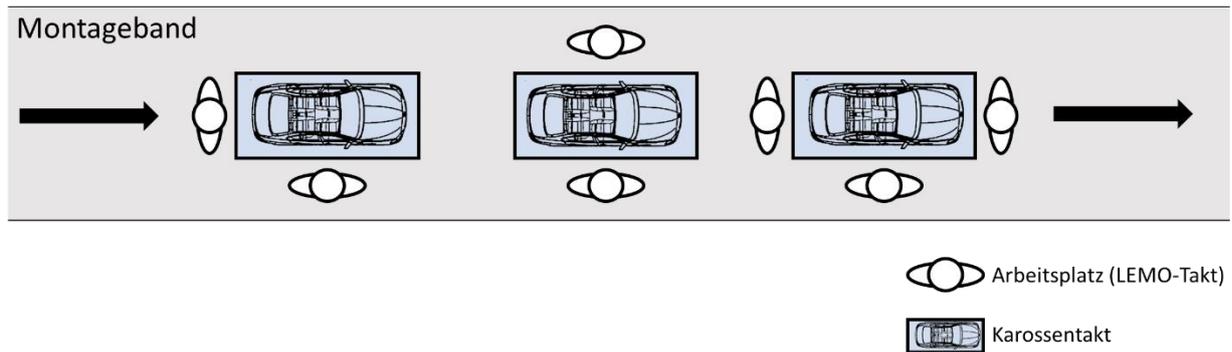


Abbildung 17: Exemplarischer Aufbau mehrerer Karosentakte und den zugehörigen Arbeitsplätzen am Montageband

Im Rahmen der Abtaktung werden die einzelnen TVGs so auf die einzelnen Arbeitsplätze verteilt, dass die vorgegebene Taktzeit so weit wie möglich genutzt wird. Bei einer Taktzeit von einer Minute werden von einem Mitarbeiter in einem Takt im Schnitt fünf bis zehn TVGs ausgeführt.

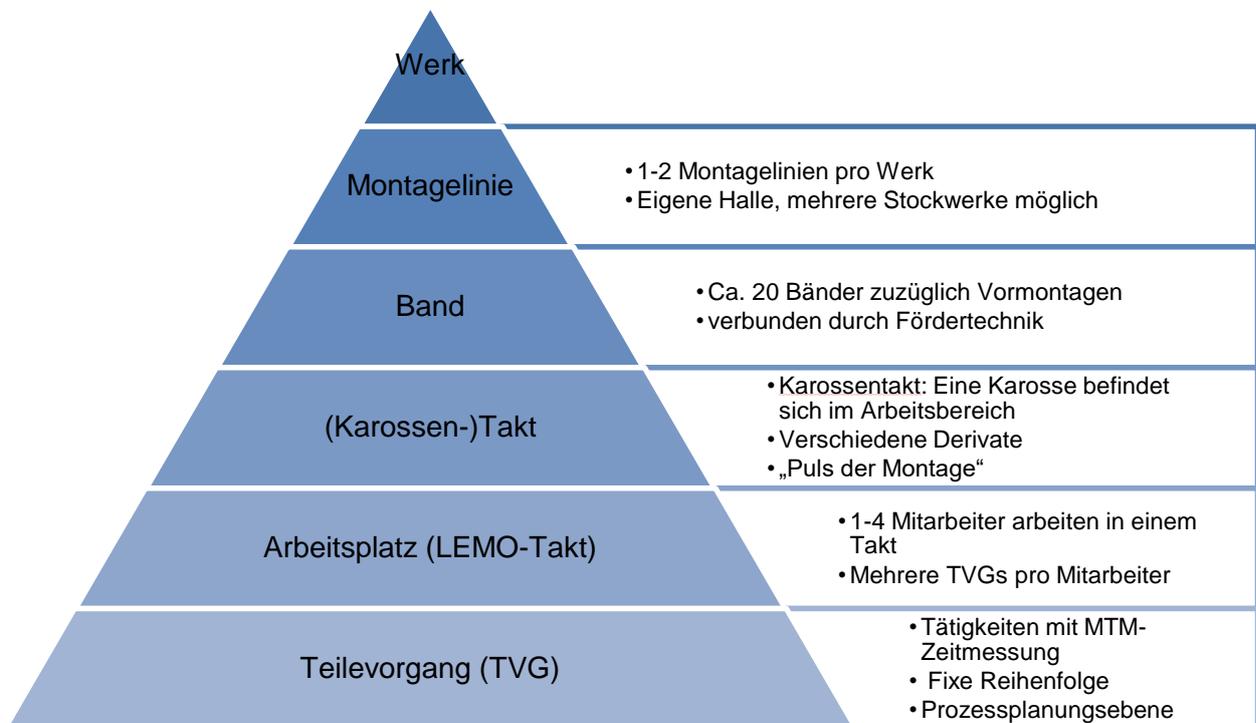


Abbildung 18: Struktur und Eingliederung der Montageinformationen

Neben dem Arbeitsplatz ändern sich für einen Mitarbeiter die Montageinhalte zusätzlich für die verschiedenen Derivate, die auf einer Montagelinie gefertigt werden. Jedes Derivat wird vor und während der Anlaufphase neu „eingetaktet“ und die Mitarbeiter müssen an einem Arbeitsplatz die Inhalte aller Derivate beherrschen. Somit belaufen sich die Montageinhalte bei acht Derivaten auf einem Montageband auf 40-80 TVGs pro Mitarbeiter. Allerdings sind einige Montageschritte bei den verschiedenen Derivaten identisch.

Zusätzlich erhöht sich der Montageaufwand durch diverse Exterieur- und Interieurgestaltungsoptionen und Sonderausstattungen. Diese werden jedoch nicht

alle in extra Trainings angelehrt, sondern lediglich von erfahrenen Mitarbeitern während des Montagebetriebs vermittelt.

Aus Gründen der Ergonomie und mentalen Belastung rotieren die Mitarbeiter in gewissen Perioden, meistens wochenweise, in ihren Arbeitsplätzen. Dies erhöht die Flexibilität im Produktionsbetrieb, da die Mitarbeiter mehrere Takte beherrschen, erhöht jedoch auch den Qualifizierungsaufwand.

Aus organisatorischer Sicht ist der Fertigungsbereich, wie in Abbildung 19 dargestellt, gegliedert. Je nach Länge des Bandes, wird es in mehrere Meisterbereiche (z.B. Meisterei A, B, C) unterteilt. Einem Meisterbereich sind mehrere Takte mit ca. 80-100 Mitarbeitern unterstellt. Die Schale 1 ist dem Montageband physisch am Nächsten. Hier arbeitet das Kernteam, welches aus den Bandmitarbeitern, Anlagenführern und Vorarbeitern besteht. Die Vorarbeiter werden im Betrieb durch „Springer“ unterstützt, die besonders produktionserfahren sind und sehr flexibel eingesetzt werden können. In Schale 2 befindet sich der Meister, der für die einzelnen Takte verantwortlich ist und durch produktionsfernere Bereiche, wie Logistik und Produktionsplanung, unterstützt wird.



Abbildung 19: Grundstruktur der BMW Arbeitsorganisation im personalintensiven Bereich (BMW Group 2015, S. 18)

Neben der Sicherstellung eines reibungsfreien Produktionsprozesses sind die Meister ebenso für die Qualifizierung ihrer Mitarbeiter verantwortlich. Operativ werden die Trainingsinhalte jedoch von den Vorarbeitern beziehungsweise Trainingspaten erstellt. Trainingspaten sind, wie die Springer, erfahrene Produktionsmitarbeiter, die für den Anlauf neuer Derivate im Werk schon früh in den Entwicklungsprozess mit eingebunden werden, um eine realistische „Eintaktung“ zu ermöglichen.

3.3.2 Prozessablauf der Qualifizierung

Der Prozessablauf der Qualifizierung unterscheidet sich abhängig von den Trainingsinhalten und -konsumenten. In dieser Arbeit werden die drei Szenarien

Anlernen neuer Mitarbeiter, Anlernen aller Mitarbeiter für neue Derivate und spezielle Qualitätsschulungen für komplexe Montagevorgänge vorgestellt.

1. Anlernen neuer Mitarbeiter

Aufgrund der aufkommenden Fluktuation der Mitarbeiter ist eine schnelle und effiziente Einarbeitung neuer Mitarbeiter erforderlich. Viele Mitarbeiter werden über externe Zeitarbeitsfirmen angeworben und verfügen zu Beginn über keine oder nur geringe Produktionskenntnisse. Ebenso gibt es teilweise sprachliche und kognitive Barrieren, die im Trainingsablauf berücksichtigt werden müssen. So gibt es Mitarbeiter, die nach ein paar Wiederholungen die Montageschritte fehlerfrei beherrschen und wiederum Andere, die dafür mehrere Tage benötigen.

Der Anlernprozess zur Einarbeitung neuer Mitarbeiter im Werk München ist in Abbildung 20 skizziert.

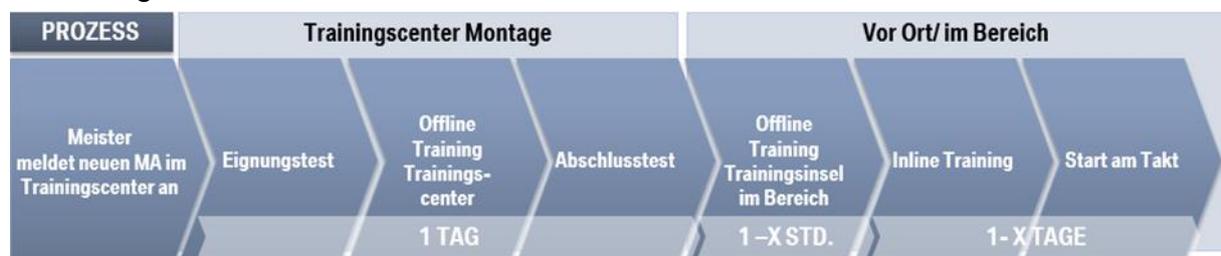


Abbildung 20: Anlernprozess neuer Mitarbeiter (BMW Group 2015, S. 18)

Räumlich wird bei den Trainings zwischen Offline-Training, Trainingsinsel und Inline-Training unterschieden. Offline ist hierbei ein Ort außerhalb der Produktionsumgebung. Hier werden die „Basics“ erklärt und die Takte in Theorie und Praxis erprobt. Bei der Trainingsinsel handelt es sich ebenfalls um ein Offline-Training. Sie ist jedoch in unmittelbarer Nähe zum Band im Produktionsumfeld angesiedelt. Dies hat den Vorteil, dass die Mitarbeiter direkt vor Ort sind und auch die Vorarbeiter und Trainingspaten kürzere Wege haben. Das Inlinetraining bildet den Abschluss des Trainings. Hier werden die Schritte am Montageband erlernt und verinnerlicht. Der neue Mitarbeiter untersteht solange der Verantwortung der Vorarbeiter/Trainingspaten, bis er alle Trainingsinhalte beherrscht. In der Anlerndokumentation wird festgehalten, welcher Mitarbeiter welche Takte beherrscht.

Die **Trainingsgestaltung** erfolgt primär über Vorarbeiter und Trainer, welche erfahrene Mitarbeiter sind und zur Schulung von Mitarbeitern befähigt wurden. Sie erhalten pädagogische und didaktische Schulungen um die Qualität der Trainings sicherzustellen. Ausgangspunkt der Trainingsdokumentation ist die Anlernmappe, in der alle relevanten Qualifizierungsunterlagen eines Taktes aufbewahrt werden. Der Aufbau einer Anlernmappe (ALM) ist in Abbildung 21 dargestellt. In ihr ist der aktuell gültige Standard zur Arbeit vor Ort für den jeweiligen Arbeitsplatz dokumentiert. Sie beinhaltet alle notwendigen Informationen pro Arbeitsplatz und wird im Bedarfsfall aktualisiert und angepasst.

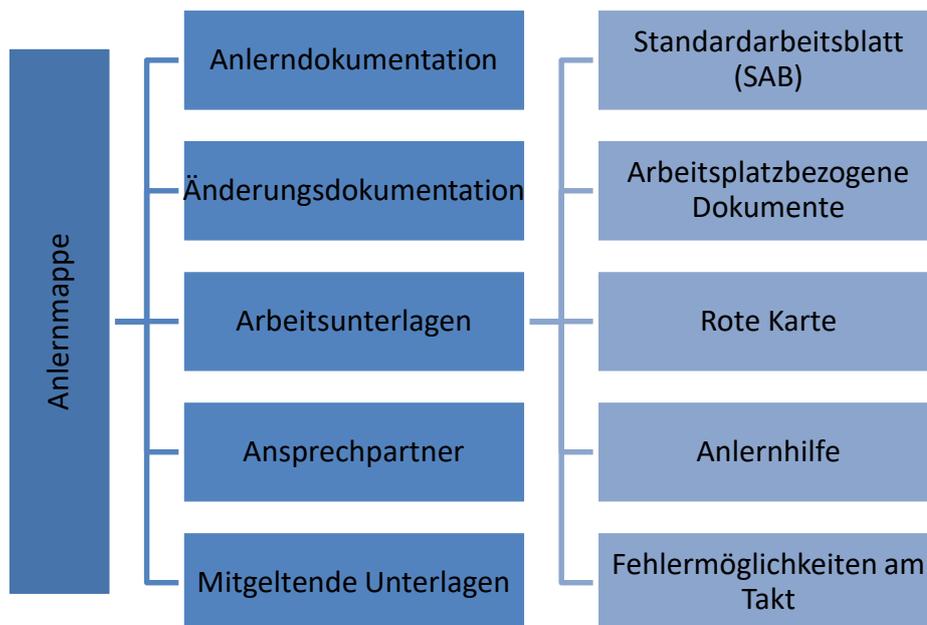


Abbildung 21: Inhalte einer Anlernmappe (BMW Group 2016a)

Die **Arbeitsunterlagen** sind das Kernelement der Anlernmappe und beinhalten die essentiellen Montagevorgangsinformationen. In dem Standardarbeitsblatt (SAB) sind die auszuführenden Arbeitsschritte in der richtigen Montagereihenfolge sowie die zur Verfügung stehende Zeit dokumentiert (basierend auf dem Abtaktungsmodul aus LEMO/TaktIQ). Das **SAB** ist wesentlicher Bestandteil für Anlernen, Prozessbeobachtung und -bestätigung. Pro Takt/Arbeitsplatz ist ein SAB zu erstellen. Derivatspezifische Montageumfänge werden eindeutig gekennzeichnet oder es wird ein separates SAB erstellt (BMW Group 2016b, S. 3).

Hinzukommen arbeitsplatzbezogene Dokumente, wie Arbeits- und Prüfanweisungen oder Notstrategien. Die „Rote Karte“ enthält qualitätskritische Themen und ermöglicht die standardisierte Meldung von auftretenden Qualitätsproblemen.

Die Anlernhilfe beschreibt detailliert die Montageschritte in Form von Bildern und kurzer Textinformation. Die Bilder werden dabei durch Symbole, wie Pfeile oder Kreise, ergänzt. Basis der Anlernhilfe ist das SAB. Ein Auszug ist in Abbildung 22 zu sehen.

F30 / F31 / F32 / F82							
7							
	<table border="1"> <tr> <td style="background-color: #cccccc;">Was</td> <td>Blitzband vom EPS-Kabel entfernen.</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #cccccc;">Wie</td> <td>in position halten</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #cccccc;">Warum</td> <td>nicht fallen lassen stecker beschädigungen.</td> </tr> </table>	Was	Blitzband vom EPS-Kabel entfernen.	Wie	in position halten	Warum	nicht fallen lassen stecker beschädigungen.
Was	Blitzband vom EPS-Kabel entfernen.						
Wie	in position halten						
Warum	nicht fallen lassen stecker beschädigungen.						

Abbildung 22: Auszug aus der Anlernhilfe, die zur Unterstützung des Anlernprozesses dient. Oben sind die Derivatsbezeichnungen abgebildet, auf die dieser Montageschritt zutrifft (BMW Group 2016a)

Zusätzlich zur Anlernhilfe wird eine Auswahl an Fehlermöglichkeiten im Takt festgehalten. Sie werden regelmäßig, abhängig von der Häufigkeit wiederkehrender Fehler sowie der BI-Bewertung, überprüft und erneuert. Die BI-Bewertung ist ein Bewertungsindex, der als geltender Standard für die Fahrzeugbeurteilung verwendet wird (BMW Group 2016b, S. 4).

2. Anlernen aller Mitarbeiter für neue Derivate (Produktinhalte)

Bei der Einführung neuer Produkte in das bestehende Montagesystem müssen die Mitarbeiter rechtzeitig mit den neuen Montageumfängen vertraut gemacht werden. Es unterscheidet sich vom ersten Szenario insofern, als dass eine hohe Anzahl an Mitarbeitern in sehr kurzer Zeit angelernt werden muss. Allerdings sind die Mitarbeiter schon produktionserfahren und können die neuen Inhalte schnell memorieren, da bereits auf vorhandenes Wissen aufgebaut werden kann.

Für Anläufe werden ausgewählte Produktionsmitarbeiter, auch **Anlauftrainer** oder Anlaufmechaniker genannt, sehr früh in den Produktentstehungsprozess mit einbezogen. Damit soll gewährleistet werden, dass sie bereits wichtigen Input aus der Fertigungssicht beisteuern. Die Anlauftrainer haben die Aufgabe die neuen Montageinhalte in ihrem Fachbereich einzuführen und die Mitarbeiter dementsprechend zu schulen. In Abbildung 23 ist ein beispielhafter Anlauf eines neuen Derivats dargestellt. Es ist zu sehen, dass nach den Anlauftrainern zuerst Vorarbeiter und Springer (hier Multiplikatoren) angelernt werden. Darauf folgen die regulären Bandmitarbeiter und im Anschluss Mitarbeiter aus dem Nacharbeitsbereich. Innerhalb von drei Monaten werden die meisten Bandarbeiter angelernt. Im unteren Bereich der Abbildung sind exemplarisch die Anlaufphasen skizziert.

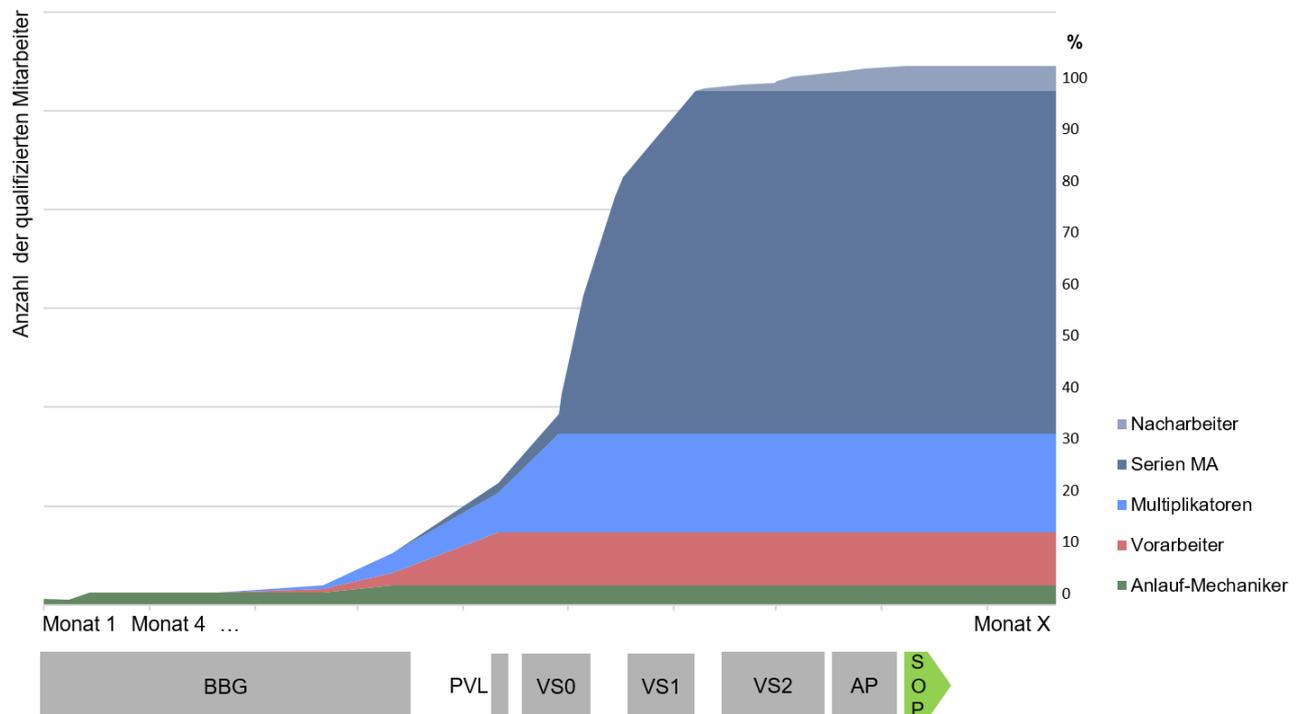


Abbildung 23: Exemplarischer Anlauf eines neuen Fahrzeuges: Anzahl der qualifizierten Mitarbeiter im Zeitverlauf

- BBG** Baugruppenbestätigung – Fahrzeug wird offline im Entwicklungszentrum (Werk 0) montiert, die Bauteile sind dabei noch nicht den finalen Stand
- PVL** Prozessvorläufer (Vorserienfahrzeug) wird offline im Werk montiert
- VS0 bis VS2** Vorserienfahrzeuge, die inline gebaut werden. Mit steigender Nummer nimmt die Anzahl der Fahrzeuge zu, Durchführung von Leistungstests am Montageband
- AP** Anlaufproduktion – Einstieg in die Serienproduktion, Start der Anlaufkurve ca. 2 Monate vor Produktionsstart
- SOP** Produktionsstart, Serieneinsatz, Anlauf abgeschlossen

Da sich die Derivate zum Teil stark ähneln, zum Beispiel die 5er Limousine und der 5er Touring, werden die Trainingsinhalte, wenn möglich parallel gelehrt und eine Anlernmappe mit allen Derivatsunterlagen erstellt.

Auch gibt es den Fall, dass ein Fahrzeug in mehreren Werken produziert wird. So wird der neue 3er BMW in Deutschland, Mexiko und China produziert. Hier können Schulungsunterlagen teilweise übernommen werden, müssen jedoch noch in die jeweilige Sprache übersetzt werden.

3. Qualitätsschulungen für besonders komplexe Montagevorgänge (zum Beispiel die Montage des Kabelbaums)

Wenn im Laufe der Produktion bestimmte Verbaufehler häufig auftreten und sich dies in einem erhöhten Nacharbeitsbedarf ausdrückt, sind Nachschulungen der Mitarbeiter notwendig, in denen komplexere Montageschritte ausführlich vermittelt werden. Als Teil der „Null-Fehler Strategie“ muss jeder Mitarbeiter dafür sensibilisiert werden, dass er für seinen Arbeitsplatz verantwortlich ist und jeden Fehler beseitigt bevor das Fahrzeug den nächsten Takt erreicht (siehe Kapitel 2.3, Abbildung 9). Da die Kosten der Fehlerbehebung mit zunehmender Wertschöpfung stark steigen, sollen sie bereits vor der Entstehung verhindert werden. Als Beispiel dient die Montage des Kabelbaumes, welcher früh im Montageprozess in der Karosse verlegt wird. Bei einer fehlerhaften Fixierung einer Steckverbindung durch verbogene Kontaktpins, kann es leicht zu Störungen der Bordelektronik kommen. Um den Fehler zu beheben ist dann in der Nacharbeit eine Demontage des Fahrzeuges notwendig, die sehr kostspielig ist.

Neben der bloßen Vermittlung von Montageschritten werden in diesem Rahmen auch sogenannte Mindset-Schulungen durchgeführt, in denen die gewünschten Qualitätsstandards vermittelt werden. Zum Beispiel, dass man seinen Schutzmantel geschlossen trägt um die Verkratzung der Fahrzeuge durch Hosen- und Hemdknöpfe zu vermeiden.

Weitere Mindset-Themen sind das 4-Augen-Prinzip zur Prozessabsicherung, Ergonomie-Sensibilisierung, Arbeitssicherheit und Kundenrückmeldungen (BMW Group 2017b).

Entwicklung

Da die demografische Entwicklung der Bevölkerung auch vor den Unternehmen und ihren Mitarbeitern nicht Halt macht, wird sich auch der Bandmitarbeiter der Zukunft ändern und neue Anforderungen mitbringen. Ebenso muss die Frage gestellt werden, wie der zukünftige Arbeitsplatz am Band aussehen wird. Der Trend geht in die Richtung, dass einfache repetitive Aufgaben automatisiert ausgeführt werden, auf der anderen Seite jedoch auch komplexere vorbereitende oder prozessbegleitende Aufgaben an der Schnittstelle zwischen Mensch und Technik entstehen (Senderek und Geisler 2015, S. 37) (Lotter und Wiendahl 2012, S. 398).

Nicht zuletzt muss zur erfolgreichen Integration von Assistenzsystemen, ebenso der Umgang damit den Mitarbeitern gelehrt werden, um die Potenziale neuer Technologien auch nutzen zu können (Hirsch-Kreinsen et al. 2015, S. 109).

Aufgrund der steigenden Qualifikationsanforderungen und dem Fachkräftemangel muss zusätzlich das Feld der potenziellen Arbeitskräfte erweitert werden. Damit nimmt die Vielfalt der Mitarbeiter in vielerlei Hinsicht zu und es muss ein Trainingskonzept

geschaffen werden, welches Aspekte wie Alter, Bildungshintergrund, Kulturkreis, Sprache und Motivation berücksichtigt.

Eine weitere Entwicklung ist im Bereich der Mitarbeiterflexibilität zu erwarten. Ein umfassendes Training, bei dem ein methodisch korrekter Ablauf der Bewegungen im Gedächtnis fest verankert wird und auch die Gründe und Konsequenzen des Vorgangs erklärt werden, ermöglicht, dass Mitarbeiter flexibler bei Abweichungen vom normalen Montageprozess reagieren können (Lotter und Wiendahl 2012, S. 401). Damit kommt es bei einer kleinen Störung, wie zum Beispiel einer Abweichung der Qualität der Montageteile nicht direkt zu einem Montagefehler, sondern es kann individuell eine Handlungsalternative gewählt werden. Dies verringert auch die Belastung der Vorarbeiter und Meister, da diese wirklich nur bei entscheidenden Problemen informiert werden. Die Werker erhalten somit eine erhöhte Autonomie.

3.3.3 Trainingsdidaktik und inhaltliche Gestaltung

Die inhaltliche Gestaltung eines Trainings sowie die gewählte Methodik sind abhängig von der Komplexität der zu vermittelnden Inhalte (siehe Abbildung 24). Bullinger und Witzgall 2002 empfehlen für definierte Aufgaben, wie die Vermittlung von Montageinhalten das klassische Anlernen oder die Unterweisung durch einen erfahrenen Mitarbeiter. Mit steigendem Komplexitätsgrad wird der Einsatz von visuell- und sprachgestütztem Training sinnvoll. Bei weiter steigender Aufgabenkomplexität wird zur Problemlösung oder Prozessverbesserung der Ansatz der Gruppenarbeit empfohlen.

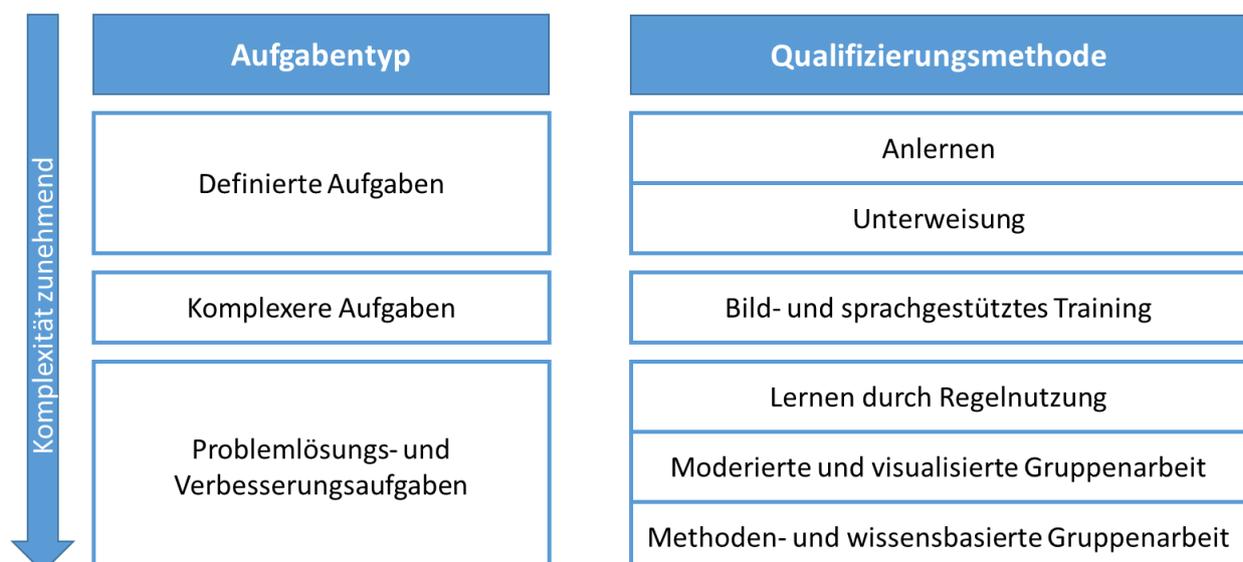


Abbildung 24: Qualifizierungsmethoden in Abhängigkeit von der Komplexität der Arbeitsaufgabe (angelehnt an Lotter und Wiendahl 2012, S. 402)

Generell gilt: „Je komplexer und variantenreicher die Arbeitsaufgabe ist, desto mehr ist ein methodischer Ansatz bei der Qualifizierungsvorbereitung notwendig“ (Lotter und Wiendahl 2012, S. 400).

3.3.3.1 Die REFA 4-Stufen Methode

Da der Erfolg eines Trainings zu einem großen Teil von der Lehrperson abhängig ist und die didaktische Kompetenz der Anlauftrainer stark schwankt, sind verschiedene Ansätze entwickelt worden um den Qualifizierungsprozess zu standardisieren und häufige Grundfehler des Anlernens zu vermeiden. Einer dieser Ansätze ist die REFA-4-Stufen-Methode (REFA 1989, S. 133). Sie basiert prinzipiell auf Charles Allens 4 Punkte-Methode, die im Rahmen des Programms TWI „Training within Industry“, welches im zweiten Weltkrieg durch das Militär der USA entwickelt wurde, ihren Weg nach Europa fand (Association for Manufacturing Excellence, S. 7).

In Abbildung 25 sind die vier Stufen und ihre Bedeutung dargestellt. Nach einer gemeinsamen Vorbereitungszeit, in der ein angenehmes Arbeitsklima geschaffen und die Arbeitsaufgabe erläutert wird, und der Vorführung des Arbeitsschrittes, praktiziert der Schüler, auch Trainee genannt, in der dritten Phase den Schritt selbstständig und erklärt dem Trainer sein Handeln. In der vierten Phase wird der Arbeitsschritt selbstständig ausgeführt und die Unterweisung kann beendet werden.

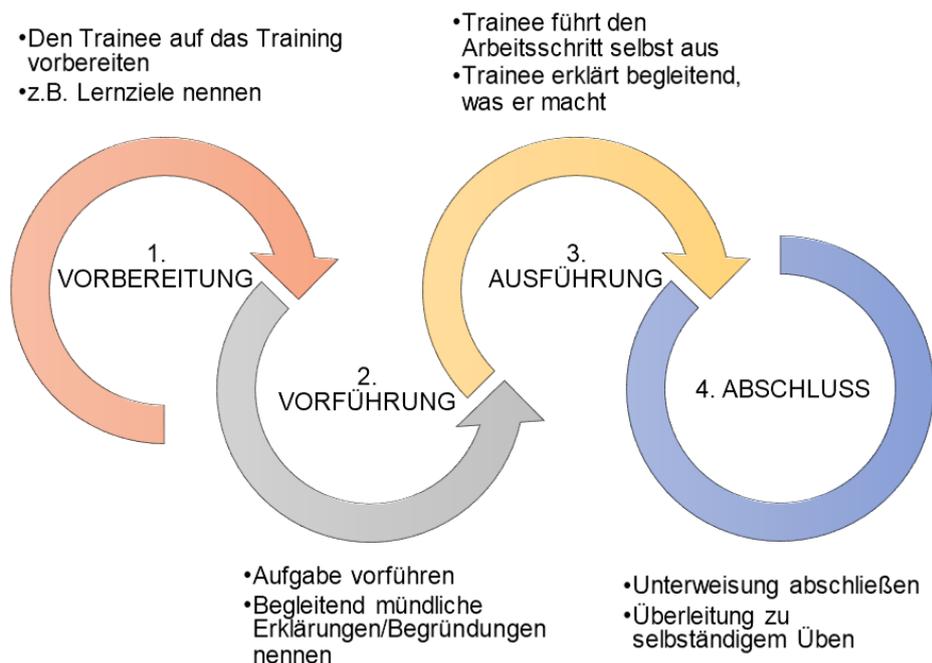


Abbildung 25: REFA 4-Stufen Methode (angelehnt an REFA 1989, S. 133)

Vor der Erstellung des Trainings muss sich der Trainingsersteller mit folgenden Fragen auseinandersetzen (Lotter und Wiendahl 2012, S. 399):

- „Wozu soll gelernt werden?
- Was soll gelernt werden?
- Wie soll gelernt werden?
- In welchen Schritten soll gelernt werden?

- In welcher Weise soll die Erreichung der Lernziele kontrolliert werden?“

Bei komplexeren Aufgaben sind diese Fragen jedoch nicht ausreichend. Hacker 2005 empfiehlt deshalb alternativ diese W-Fragen zu beantworten (Lotter und Wiendahl 2012, S. 401):

- „Was geschieht? (Ziel und Bezeichnung des jeweiligen Arbeitsschrittes)
- Wie ist vorzugehen?
- Warum ist der Schritt notwendig und in dieser Weise durchzuführen?
- Wo und mit Wem ist der Schritt durchzuführen?
- Wenn? (Bedingungen und Art und Weise von Alternativen)“

Neben der 4-Stufen Methode, die eher trainerzentriert ist, existieren weitere handlungsorientierte Ansätze, bei der der Lernende im Fokus steht. Als Beispiel sei die Leittextmethode genannt, bei der die Schüler durch schriftliche Anweisungen geleitet werden. Die Methode entstand in den 70er Jahren aus der Kritik an der 4-Stufen-Methode, da bestimmte Schlüsselqualifikationen nicht ausreichend vermittelt werden konnten (Riedl und Schelten 1997, S. 2). Die Methode setzt auf eine erhöhte Eigenständigkeit der Trainees, die selbstständig im Rahmen der schriftlichen Anweisung die Arbeitsschritte ausführen und somit besser verinnerlichen können. Dieses pädagogische Konzept hat jedoch auch Nachteile. Zum Beispiel, wenn sich der Schüler ohne Ansprechpartner überfordert fühlt und ohne zusätzliche Anweisungen orientierungslos ist. Auch wird eventuell Grundlagenwissen durch den handlungszielbezogenen Leitgedanken nicht intensiv genug aufgearbeitet (Riedl und Schelten 1997, S. 5).

Für eine tiefere Recherche im Bereich existierender Lerntheorien sei auf Zandler et al. 2018, S. 143 verwiesen. Hier wird ein umfassender Überblick über verschiedene Lerntheorien, die in der Industrie und im Schulunterricht Anwendung finden, gegeben.

3.3.3.2 Zunehmende Bedeutung der Gamification

Gamification bezeichnet im Allgemeinen die Verwendung spieltypischer Elemente in einer spielfremden Anwendung (Strahinger und Leyh 2017, S. 165). Zu diesen Elementen zählen beispielsweise Highscores, Erfahrungspunkte, Fortschrittsbalken, Auszeichnungen oder virtuelle Güter (Korn et al. 2015, S. 84). Als Begriff hat sich in dem Zusammenhang „Serious Games“ etabliert. Dies sind Spiele, die neben dem spielerischen Aspekt primär Informationen und Lerninhalte vermitteln sollen.

Nicht zuletzt durch die voranschreitende Digitalisierung ändern sich die Anforderungen der Bandmitglieder an ihren Arbeitsplatz und damit auch den Qualifizierungsmethoden. Immer mehr „Digital Natives“, welche mit dem Internet aufgewachsen sind, werden eingestellt und erwarten eine Umgebung, in der sie sich

wohlfühlen (Winkelhake 2017, S. 30). Im Kontext des Trainings wird dem Ansatz der Gamifizierung eine große Bedeutung beigemessen. Sie erhöht die Aufmerksamkeit der Schüler und lockert die Lernatmosphäre auf. Das Training ist keine reine Wissensvermittlung mehr, sondern spannt die Schüler interaktiv in das Erlebnis mit ein. Korn et al. (2015) führt eine Studie mit Werkern in einer Behindertenwerkstatt durch. Dort implementiert er Gamification-Elemente in Form eines Serious Games in ein AR-basiertes System zur Montageunterstützung. Die Montageanweisung wird in einem Versuchsaufbau durch eine spielerische Fortschrittsanzeige erweitert und im anderen weggelassen. Das Ergebnis ist eine deutliche Steigerung des persönlichen Glückgefühls sowie eine erhöhte Motivation zur Leistungserbringung (Korn et al. 2015, S. 84). Allerdings stellt sich die Frage, ob die Studienergebnisse auch eine Aussagekraft für ein normales Produktionsumfeld haben.

Gamification-Ansätze sind vielzählig und finden vor allem im Bereich von Videospiele und mobilen Applikationen Anwendung. Bloch (2016) nennt als beste Gamifizierungspraktiken Applikationen wie **Duolingo**, eine Lernplattform für die selbstständige Aneignung von Fremdsprachen. Als Gamification-Merkmale werden folgende Punkte genannt (Bloch 2016):

- Freischalten neuer Lektionen als Belohnung
- Lernkurve als Grafik
- Motivation durch „Auffrischungsanzeige“

Auch andere Applikationen verfolgen ähnliche Ansätze:

Trello – Eine App zur Organisation von Arbeitsinhalten, To-Do-Listen

- Kanban inspiriert
- Erfolgsgefühl durch Darstellung erledigter Aufgaben
- Belohnung durch Farben

Nike+ – „digitaler Coach“, Tracking von Sportaktivitäten

- Abzeichen als Belohnung
- Motivation durch Fuel Points

Reddit – Informationsplattform, Soziale Medien

- Vergeben von Karma-Punkten bei besonderem Engagement in einer Community durch Aktivitäten wie Kommentare schreiben
- Up-Vote/Down-Vote Funktion für Kommentare

Kiip – mobiles Werbenetzwerk für eine Vielzahl von Applikationen z.B. Fitness Apps wie Runkeeper

- Reale Belohnung für das Nutzen virtueller Angebote (z.B. Coupons/Gutscheine bei Kauf eines Produktes)
- Precision Moment Targeting: Algorithmus, der anhand von Nutzerdaten (Geographisch, Demographisch), besondere Momente erfasst, die Nutzer mit ihren mobilen Geräten erleben. Die Belohnung berücksichtigt dann die persönlichen Präferenzen der einzelnen Nutzer.

Ein weiteres erwähnenswertes Schulungskonzept ist das sogenannte G-Learning, welches seit 2013 von **SAP** entwickelt und für interne Schulungen genutzt wird. Es kombiniert eine Vielzahl von Gamification-Ansätzen und soll einen nachhaltigen Lernerfolg der Mitarbeiter sichern (Strahinger und Leyh 2017, S. 82). Die Kurse richten sich bisher allerdings nur an IT-Experten, können aber im Prinzip auf andere Zielgruppen und Trainingsinhalte übertragen werden. Um eine möglichst breite Anzahl an Nutzern anzusprechen, wurde das Gamification-Design vielseitig angelegt und bietet jedem Nutzertyp entscheidende Anreize. Basis dafür war die Arbeit von Bartle (1996), in der die vier Spielertypen, „Achiever, Explorer, Socialiser und Killer“, identifiziert werden, die alle verschiedene Motivationsstrategien verfolgen. Zusätzlich werden kurz- und langfristige Motivationselemente, wie das Sammeln von Münzen, verwendet (Strahinger und Leyh 2017, S. 85).

3.3.4 Einsatz innovativer Assistenzsysteme

Wie im oberen Abschnitt erläutert, müssen die didaktischen Konzepte neugestaltet werden um den Qualifizierungs- und Nutzeranforderungen zu genügen. Eine große Bedeutung wird zudem der technischen Unterstützung der Qualifizierung durch digitale Assistenzsysteme beigemessen.

So kann während eines Trainings mit Hilfe einer Tiefenkamera, wie der Xbox Kinect, beispielsweise eine Live-Ergonomiebewertung der Trainees durchgeführt werden, um direkt auf Haltungsfehler während des Montagetrainings hinzuweisen. Die Kamera registriert dabei die Extremitäten einer Person und verfolgt diese während des Trainings. Bei ungesunder Körperhaltung werden die entsprechenden Körperteile rot dargestellt. Dies schafft bei den Mitarbeitern eine erhöhte Aufmerksamkeit für eine gesunde Körperhaltung.

Das größte Potenzial wird der visuellen Unterstützung beigemessen, da mit ihr verfügbare Informationen zusammengeführt, gefiltert und bedarfsgerecht aufbereitet werden können. Insbesondere Head-Mounted Displays (HMDs) eignen sich zur Trainingsunterstützung, da sie ein freihändiges Arbeiten ermöglichen und kontextbezogene Informationen in der realen Umgebung darstellen können. Zudem können externe Experten hinzugezogen werden (Senderek und Geisler 2015). So haben erste Forschungsergebnisse gezeigt, dass durch visuelle Assistenz ungelernete, so wie erfahrende Arbeitskräfte neue Aufgaben um 30-40% schneller ausführen

können (Hartbrich 2014). Auch Werrlich et al. (2017) konnte nachweisen, dass sich durch ein AR-basiertes Assistenzsystem die Zahl der Sequenzfehler um 79% verringert und auch die Lernqualität zunimmt (Werrlich et al. 2017b).

Generell lassen sich bei den modernen, visuellen Lernassistenzsystemen die Ansätze VR-basiertes Training, virtuelles 3D-Training und AR-basiertes Training unterscheiden.

1.) VR-basiertes Training

Das Training findet in einem virtuellen Raum statt, in dem die Trainingsumgebung dem realen Umfeld nachempfunden ist. Mit einer VR-Brille auf dem Kopf und Controllern in den Händen kann der Trainee virtuell die Bauteile inspizieren und an die richtige Stelle montieren. Dies macht zum Beispiel im Karosseriebau Sinn, wo auf Grund der teuren und schweren Anlagen in der Regel nur ein Inline-Training durchgeführt wird, wo ein erfahrener Mitarbeiter den Trainee solange betreut, bis dieser eigenständig arbeiten kann. Durch die virtuelle Unterstützung kann sich der Trainee bereits vorab mit den Prozessen vertraut machen und die Inline-Betreuungszeit wird verkürzt.

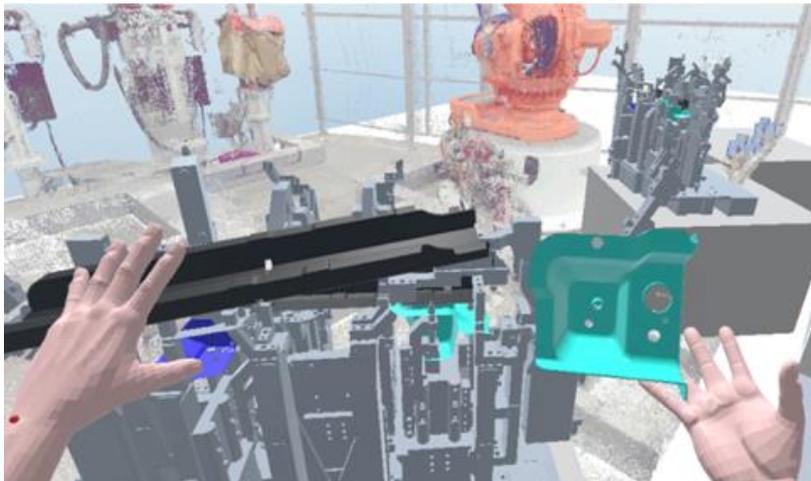


Abbildung 26: Beispiel für VR-Training (Quelle: BMW 2018)

2.) Virtuelles 3D-Training

Der Montageprozess des gesamten Fahrzeuges wird anhand eines 3D-Modells visualisiert und animiert. In einem Simulationsspiel führt der Trainee die gewünschten Montageschritte an einem Computer aus. Dabei gibt es spielerische Elemente. So muss der Trainee zum Beispiel aus einer Palette das richtige Werkzeug und Bauteil auswählen und in die richtige Position schieben. Mit zunehmendem Schwierigkeitsgrad nimmt die visuelle Hilfestellung ab. Somit können die Montageinhalte schon vorab in einer produktionsfernen Umgebung erprobt werden. Insbesondere bei Derivaten, die in mehreren Werken gefertigt werden, hat dieser Ansatz seine Vorteile, da eine große Anzahl von Mitarbeitern mit verschiedenen

Sprachen angelernt werden müssen. Durch die 3D-Visualisierung ist keine Abstraktion durch Sprache notwendig.

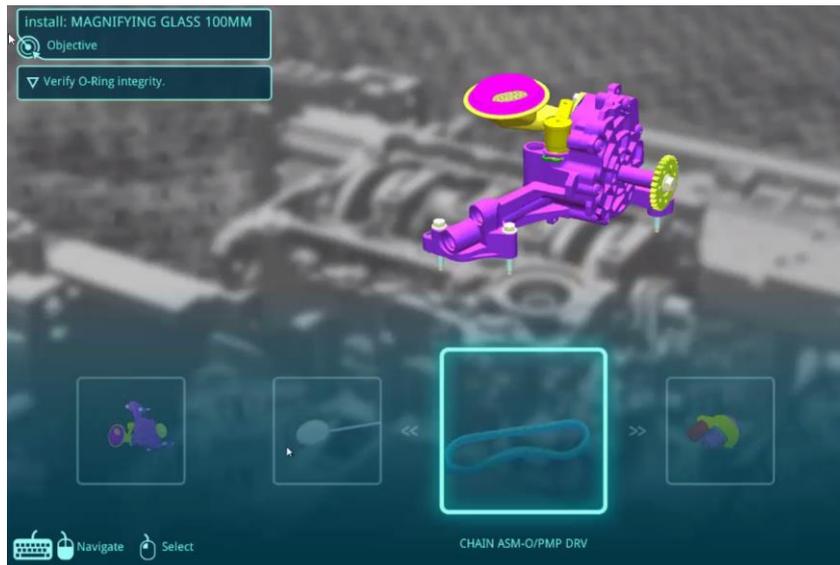


Abbildung 27: Beispiel eines desktop-basierten virtuellen Trainings (Quelle: BMW 2018)

3.) AR-basiertes Training

Das Training in der realen Umgebung wird durch zusätzlichen, virtuell eingeblendeten Content erweitert. Dabei können dem Trainee, abhängig vom didaktischen Konzept, eine strikte Anleitung oder nur ein paar kleinere Hinweise gegeben werden. Neben freihändigen HMDs können auch tragbare Geräte, wie Tablets verwendet werden. Diese Methode hat den großen Vorteil, dass das Training direkt in der realen Umgebung stattfindet und die Montageschritte mit realen Teilen erprobt werden können. Somit wird direkt die Haptik der Bauteile und Werkzeuge vermittelt. Durch die Integration geeigneter Trainingskonzepte, werden die Trainer entlastet und nur noch als Experte bei auftretenden Unklarheiten und Fragen sowie der abschließenden Überprüfung benötigt.



Abbildung 28: Beispiel AR-basiertes Training (Werrlich et al. 2017a, S. 1074)

All diese Anforderungen und Entwicklungen beeinflussen die Struktur der Trainingsinhalte und erhöhen damit auch den Aufwand der Trainingserstellung. Bei der Einführung neuer Assistenzsysteme zur Lernunterstützung muss auch der Erstellungsaufwand berücksichtigt werden und nicht nur der Nutzen durch eine höhere Trainingsqualität im Fokus stehen.

Nachdem in diesem Abschnitt die fachliche Motivation für den Einsatz von visuellen Assistenzsystemen tiefergehend erläutert wurde, ist deutlich, dass für eine erfolgreiche Implementierung neuartiger Assistenzsysteme in die Arbeits- und Anlernprozesse nicht nur eine reine Versorgung der Mitarbeiter mit Instruktionen ausreichend ist. Zusätzlich wird ein umfassendes Lernkonzept benötigt, mit dem neues Wissen generiert werden kann. Dadurch werden auch bildungsferne und lernungewohnte Mitarbeiter befähigt, komplexere Tätigkeiten auszuführen (Senderek und Geisler 2015, S. 39). Ebenso muss auf die Anforderungen der Trainingsersteller und –verantwortlichen eingegangen werden. Konzepte für den Einsatz visueller Assistenzsysteme sollten dies berücksichtigen um die Akzeptanz bei allen involvierten Mitarbeitern zu erhöhen.

4 Stand der Technik - Visuelle Werkerassistenzsysteme

Im folgenden Abschnitt wird der Stand der Technik von visuellen Werkerassistenzsystemen betrachtet. Beginnend mit einer Übersicht über mobile Werkerassistenzsysteme, wird tiefergehend auf den Begriff Augmented Reality und seine Bedeutung eingegangen. Insbesondere die technischen Entwicklungen und der Einsatz in der Industrie stehen hierbei im Vordergrund. Der daran anschließende Abschnitt befasst sich mit dem Prozess der Content Generierung für die Befüllung von AR-basierten, visuellen Assistenzsystemen.

4.1 Überblick über mobile Werkerassistenzsysteme

In der Produktion wird bereits eine Vielzahl an Assistenzsystemen eingesetzt. Sie unterstützen die Mitarbeiter bei der Durchführung ihrer Tätigkeiten. Diese Unterstützung kann zum einen physisch oder informativ erfolgen. Ein klassisches Beispiel für die **physische** Unterstützung sind Handlings-Assistenten, die bei dem Einfügen von schweren Modulen in das Endprodukt (wie bei der Cockpitmontage eines Fahrzeuges), die Traglast übernehmen und von dem Mitarbeiter an die richtige Position geschoben werden. Ein anderes Beispiel, welches besonders im Rahmen von Industrie 4.0 erprobt wird, sind Mensch-Roboter-Kollaborationen (MRK), bei denen Mensch und Industrieroboter gemeinsam an einem Arbeitsplatz arbeiten ohne durch eine physische Grenze, wie einen Käfig, voneinander getrennt zu sein. So werden in der Automobilbranche bei der Montage eines Differentialgetriebes die Kegelräder sensitiv durch einen Roboterarm gefügt. Dabei werden die leichteren Bauteile, wie Dichtungen und Sicherungsringe, durch einen Werker manuell eingesetzt. Dann wird das schwere Differential durch den Industrieroboter mit Hilfe von Sensoren passgenau gefügt. Im Anschluss wird die zweite Gehäusehälfte durch den Werker verschraubt. MRK führt somit zu einer Entlastung der Mitarbeiter und zu einem optimierten Arbeitsablauf.

Ein **informatives** Assistenzsystem hingegen entlastet die Mitarbeiter kognitiv, organisatorisch oder kommunikativ durch eine vereinfachte Versorgung mit relevanten Informationen, beziehungsweise einem vereinfachten Informationsaustausch (Schlund 2017b). Dies kann **visuell**, durch Einblenden von Informationen auf einem Bildschirm am Arbeitsplatz oder im Sichtfeld durch eine Datenbrille, erfolgen, oder **auditiv** durch Signale. Ebenso können Informationen **haptisch**, zum Beispiel durch die Vibration einer Smart Watch am Armgelenk erfolgen. Auch ist eine Kombination der Varianten möglich. Ein Beispiel für ein audiovisuelles Assistenzsystem ist eine Datenbrille mit integrierten Lautsprechern.

Mobile Werkerassistenzsysteme zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht stationär sind, sondern von den Mitarbeitern leicht transportiert werden können. In Abbildung 29 sind die für die Produktion relevantesten Vertreter aufgelistet. Sie werden in „Hand-held Devices“ und „Hands-free-Devices“ eingeteilt. Gerade die hand-freien Geräte genießen große Vorteile in der Produktion, da sie sich gut in den Produktionsprozess integrieren lassen.

Die Entwicklung der mobilen Assistenzsysteme hat in den letzten Jahren enorm Zuwachs erhalten, so dass heute viele Geräte und Technologien zur Auswahl stehen, deren Einsatz innerhalb der Produktion aufgrund von Robustheit, Bedienhilfen, Akkukapazitäten oder ergonomischer Zertifizierung möglich ist.



Abbildung 29: Übersicht mobiler Werkerassistenzsysteme

Da der visuelle Sinneskanal für die große Mehrheit der Menschen der Wichtigste für die Informationsaufnahme ist, werden auch in Zukunft vor allem visuelle Darstellungen eine hohe Bedeutung behalten (Zühlke 2011, S. 231). Aus diesem Grund werden Entwicklungen in dem Bereich mit großem Interesse verfolgt und vorangetrieben. Insbesondere die Begriffe Mixed-, Augmented- und Virtual Reality werden in diesem Zusammenhang häufig genannt. Im folgenden Abschnitt werden die Grundlagen dieser Konzepte sowie ihre technische Umsetzung erläutert. Auch wird auf die potenziellen Einsatzmöglichkeiten im Industriefeld, insbesondere in der Automobilindustrie, eingegangen.

4.2 Augmented Reality (AR)

Im Allgemeinen existiert keine einheitliche Definition des Begriffes Augmented Reality, im Deutschen erweiterte Realität genannt. AR beschreibt im weitesten Sinne ein Medium, in dem die physische Welt mit zusätzlichen Informationen überlagert wird (Craig 2013a, S. 15). Dieses Medium wird durch eine Vielzahl an Technologien ermöglicht, auf die im folgenden Kapitel weiter eingegangen wird.

Azuma (1997) ordnet der AR folgende Charakteristika zu (Azuma 1997, S. 356):

- Kombination von virtueller Realität und realer Umgebung mit teilweiser Überlagerung,
- Interaktion in Echtzeit,
- dreidimensionaler Bezug virtueller und realer Objekte.

Im Gegensatz zur AR wird in der virtuellen Realität (VR), das reale Erlebnis nicht mit zusätzlichen Informationen angereichert sondern durch ein virtuelles Erlebnis ersetzt. Dabei taucht die Person komplett in die virtuelle Welt ein, ein Prozess der auch Immersion genannt wird.

Milgram et al. (1995) beschreibt den Zusammenhang in seinem Modell des Realitäts-Virtualitäts-Kontinuums, in dem der immersive Übergang zwischen der realen und der virtuellen Welt dargestellt ist (siehe Abbildung 30). Zusätzlich definiert Milgram die „Mixed Reality“ (MR), in der eine Vermischung der beiden Welten stattfindet. Abhängig davon, ob der reale oder virtuelle Anteil überwiegt, wird zwischen erweiterter Realität und erweiterter Virtualität (AV) unterschieden.



Abbildung 30: Das Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum beschreibt das Spektrum der Realität von vollkommen real bis vollkommen virtuell (Milgram et al. 1995, S. 283)

In der Literatur wird der Begriff AR häufig synonym für die AV verwendet. Auf Grund der Vielzahl an Ansätzen und den stetig neuen Technologien, ist es notwendig auch innerhalb der Mixed Reality weiter zu differenzieren. In Abbildung 31 ist eine Übersicht der verschiedenen Konzepte dargestellt. In der MR wird in dieser Modellerweiterung die Art der Informationsdarstellung unterschieden. Assisted Reality bietet dem Anwender primär **statische** Informationen, die im Sichtfeld immer an derselben Stelle eingeblendet werden. Sie erfüllt also nicht alle, von Azuma (1997) definierten Kriterien, da kein dreidimensionaler Bezug virtueller und realer Objekte erfolgt. Ein Beispiel für Assisted Reality ist das Head-Up-Display (HUD) in einem Fahrzeug, bei der

Navigationsanweisungen sowie die Geschwindigkeitsanzeige auf die Frontscheibe, im unteren Sichtfeld des Fahrers, projiziert wird. In der Augmented Reality hingegen werden Informationen **kontaktanalog** dargestellt, das heißt, die angezeigten Elemente werden so in das Sichtfeld eingeblendet, dass die Illusion entsteht, sie seien fester Bestandteil der realen Umwelt. Auf diese Weise können auch Hologramme in einem realen Raum dargestellt werden (Tönnis 2010, S. 144).

In Abbildung 31 ist zusätzlich eine Auswahl an aktueller Brillen-Hardware dargestellt, die den jeweiligen Immersionsgraden (Assisted – Augmented – Virtual) zugeordnet sind. Im Bereich der Assisted Reality kommen primär Datenbrillen zum Einsatz, die sich durch ihre gute Ergonomie auszeichnen. Hier wird zusätzlich zwischen einer monokularen und binokularen Architektur unterschieden. Bei der monokularen Variante werden die virtuellen Informationen nur auf einem Auge dargestellt. Bei dem binokularen Ansatz ist eine Informationsdarstellung auf beiden Augen möglich. Damit können Informationen zum einen in ein größeres Sichtfeld projiziert werden, zum anderen handelt es sich dann um ein stereoskopisches Display, mit dem ein 3D-Eindruck erzeugt werden kann (Tönnis 2010, S. 25). Namhafte Vertreter der Klasse von Datenbrillen sind neben der Google Glass die Anbieter Vuzix, Realware, Epson und ODG. Es gibt jedoch eine Vielzahl weiterer Datenbrillenhersteller.

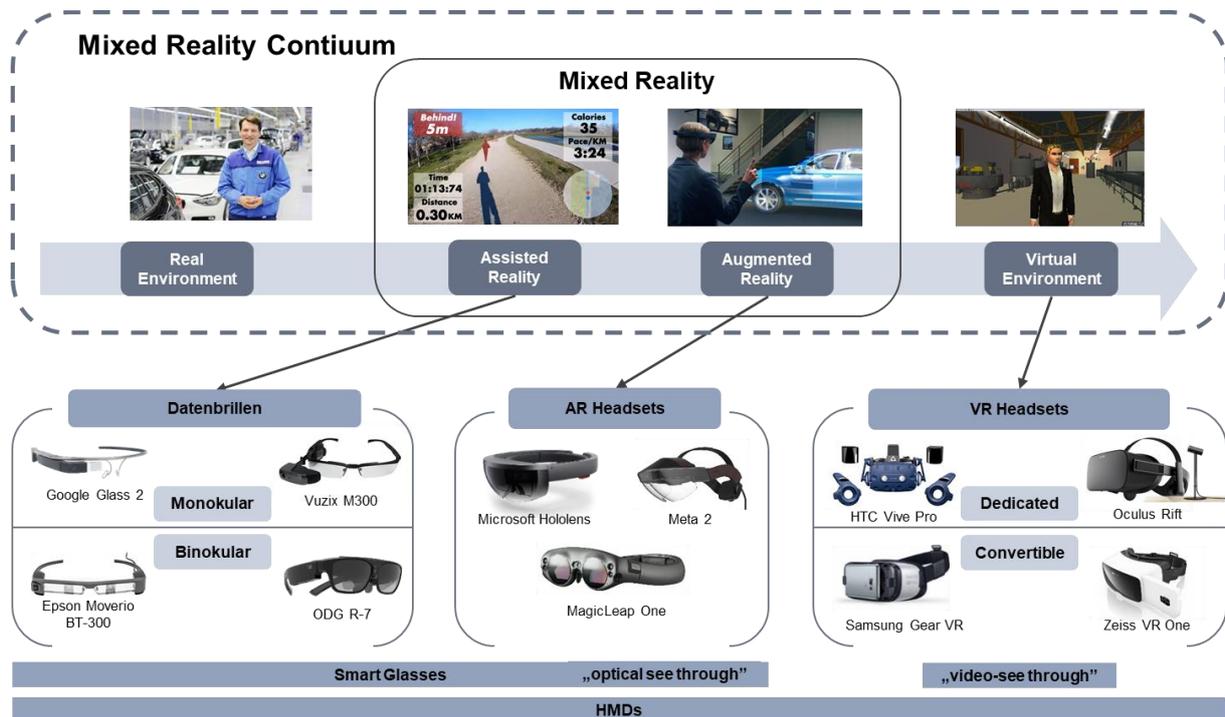


Abbildung 31: Mixed Reality Kontinuum: Immersion in die Virtualität und Verortung aktueller visueller Assistenzsysteme (angelehnt an Milgram et al. 1995, S. 283; BMW 2016; Bildquellen: BMW 2016, Techcrunch 2018, Webseiten der Brillenhersteller)

Augmented Reality wird durch sogenannte AR-Headsets, einer Untergruppe der Head-Mounted Displays (HMDs), ermöglicht. Diese Klasse von Brillen zeichnet sich durch eine erheblich aufwendigere Technik aus, da die kontaktanaloge Darstellung von

Informationen mehr Sensoren, Kameras und eine höhere Rechenleistung erfordert. Dementsprechend rar ist die Auswahl an Herstellern.

Der momentane „Platzhirsch“ auf dem Gebiet der AR-Glasses ist die Microsoft HoloLens, die 2016 erschien und seitdem bereits in vielen Industrieunternehmen zum Einsatz kommt. Sie ist ein optisches „see-through“-HMD mit einem Sichtfeld von $30 \times 17^\circ$ und verfügt über einen eingebauten Computer mit einer CPU, GPU und einer HPU (Holographic Processing Unit), die speziell für die Verarbeitung räumlicher Daten entwickelt wurde. Mit einem Gewicht von 579g ist sie eher schwer und ermöglicht eine Tragzeit von circa einer Stunde. Die Akkuleistung wird mit 2-3 Stunden angegeben (Fraga-Lamas et al. 2018, S. 8). Verschiedene Sensoren nehmen durchgängig Informationen aus der Umwelt auf und synchronisieren die reale Welt mit den virtuellen Informationen (Werrlich et al. 2016, S. 7). In Abbildung 32 ist die Frontansicht der HoloLens inklusive der verbauten Sensorik dargestellt.

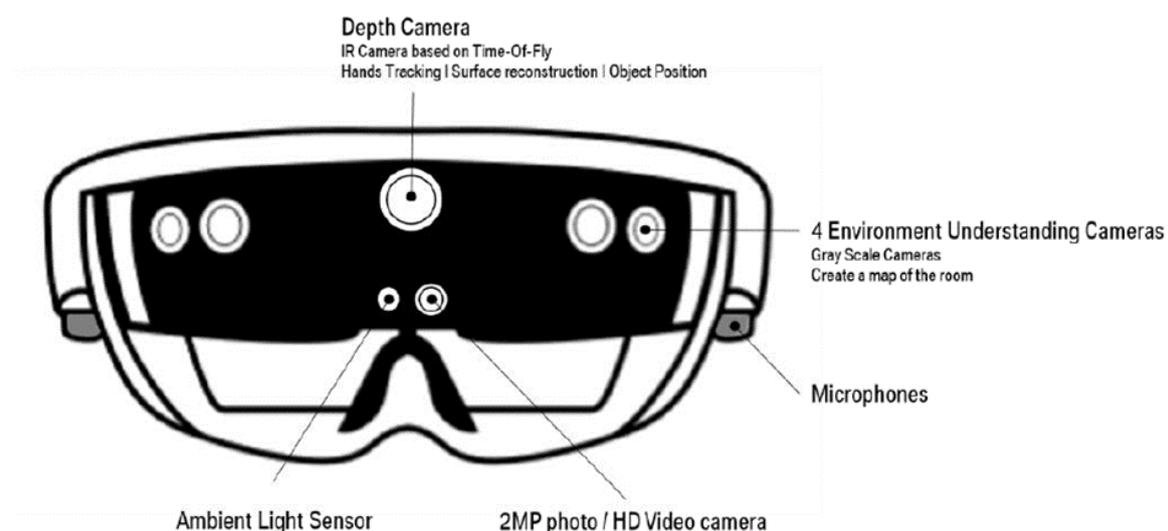


Abbildung 32: Sensoren und Kameras einer Microsoft HoloLens (Werrlich et al. 2016, S. 7)

Die Inertial Measuring Unit (IMU) misst Beschleunigung, Geschwindigkeit, Lage und Orientierung der HoloLens. Sie besteht aus einem Kreiselkompass (Gyroskop), einem Beschleunigungssensor und einem Magnetometer. Die Tiefenkamera auf der Frontseite wird für die Verfolgung der Gesten eingesetzt und ermöglicht eine Interaktion durch Gestensteuerung. Vier weitere Kameras, zwei auf jeder Seite der Brille, sammeln Informationen über den realen Raum (siehe Abschnitt Tracking). Der Ambient Light Sensor misst die Lichtintensität der Umgebung und passt die Helligkeit der HoloLens-Projektion dementsprechend an. Eine zusätzliche Kamera ermöglicht die Aufnahme von Fotos und Videos. Durch die zwei, seitlich angebrachten, Mikrofone werden die Sprachanweisungen des Nutzers aufgenommen und eine Sprachsteuerung ermöglicht (Chen und Fragomeni 2018, S. 468).

Im ersten Quartal 2019 wird die Nachfolgeversion „Microsoft HoloLens 2“ erwartet. Insbesondere in den Bereichen Ergonomie, Akkulaufzeit und des Sichtfeldes sollen sich deutliche Verbesserungen ergeben (Socher 2018).

Ein anderes AR-Headset ist die MagicLeap One des gleichnamigen Startups MagicLeap, welche 2018 erschien. Die Batterie und der Prozessor sind in Form eines „Lightpacks“ ausgelagert, das an einem Gürtel oder am Hosenbund eingehängt wird. Dadurch ist das Gewicht, des am Kopf getragenen HMDs, mit 325 Gramm, geringer als bei der HoloLens (Schwan 2018). Jedoch ergeben sich durch die Kabelverbindung zwischen HMD und „Lightpack“ ebenso andere ergonomische Probleme, die einen Einsatz in der Industrie erschweren. Auch ist die Brille nicht für Brillenträger geeignet.

Eine weitere Klasse von HMDs bilden die VR-Headsets, die eine komplette Immersion in die virtuelle Welt ermöglichen. Sie werden in „fully dedicated-devices“ und „convertible devices“ unterteilt. Erstere sind Geräte, die nur zu diesem Zweck entwickelt wurden und deren Technologie darauf ausgelegt ist, das bestmögliche VR-Erlebnis zu generieren. Namhafte Vertreter sind die HTC Vive und die Oculus Rift. Bei Convertible Devices handelt es sich um HMD-Vorrichtungen, die die Integration eines Smartphones ermöglichen. Sie sind wesentlich kostengünstiger, ermöglichen jedoch nicht die gleiche Qualität der Immersion. Durch integrierte Kameras sind VR-Headsets im Prinzip auch AR-tauglich. Dabei blickt der Nutzer durch die Kameralinse auf die reale Umgebung und kann mit dieser interagieren (video-see through).

Es wird deutlich, dass die Grenzen zwischen den verschiedenen Brillen- und Headset-Kategorien durchaus verschwimmen und nicht klar definiert werden können. Nichtsdestotrotz ist eine Differenzierung für das bessere Verständnis sinnvoll.

4.2.1 Technologische Einordnung

Die Darstellung von AR-Erlebnissen basiert auf einer Vielzahl von Technologien und Komponenten. Die Kernelemente, die ein AR-System ausmachen, sind dabei die Folgenden (Fraga-Lamas et al. 2018, S. 13359):

- Ein **Kamera-System** zur Videoaufnahme. Die Live-Bildinformationen werden durch Systeme, wie eine Tiefenkamera, Stereokamera oder Charge-Coupled Devices (CCD-Sensoren) eingefangen.
- Ein **Display** zur Darstellung der virtuellen Informationen auf den aufgenommenen Bilddaten. Die Display-Technologien werden in die zwei Kategorien unterteilt: „optical see through“, bei der die virtuellen Informationen live auf das reale Bild projiziert werden, und „video-see through“, bei der das Bild der Kamera im Displayhintergrund angezeigt wird und die virtuellen Objekte überlagert werden (Tönnis 2010, S. 23).

- Als Hardware für diese Display-Technologien kommen Hand-Held-Displays (HHDs), HMDs, räumliche Displays (Projektions-basiert) oder bewegliche Displays in Frage
- Eine **Prozessoreinheit**, die die Bildinformationen verarbeitet und die virtuellen Inhalte ausgibt, die auf das Display projiziert werden
- **Aktivierende Elemente** (zum Beispiel Bilder, GPS Positionen, Marker, interne Sensorinformationen), die die Darstellung von virtuellen Informationen auslösen

In Abbildung 33 sind die funktionalen Komponenten einer AR-Pipeline dargestellt, die die interne Logik bei der Verarbeitung von Informationen wiedergeben.

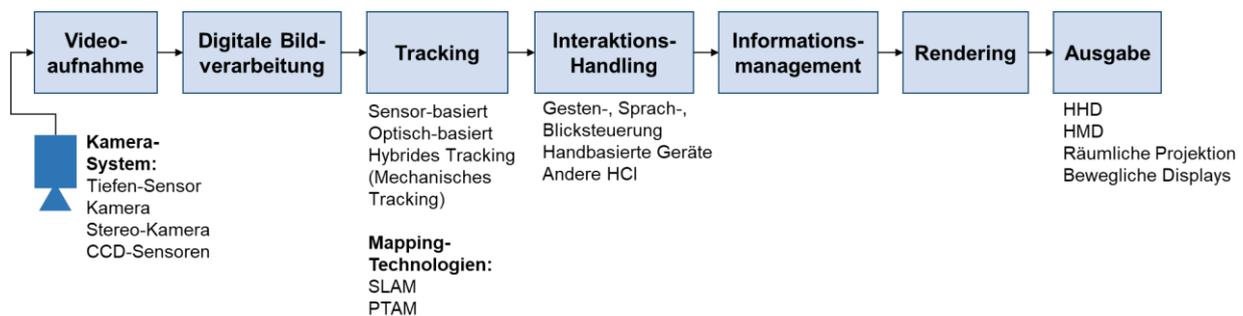


Abbildung 33: Vereinfachter Aufbau einer AR-Pipeline (angelehnt an Fraga-Lamas et al. 2018)

Zu Beginn wird das Kamerabild im Sichtfeld aufgenommen, welches dann durch eine AR-Software verarbeitet wird, um die Position in Bezug auf einen Referenzpunkt zu ermitteln (zum Beispiel ein Marker).

Für die Festlegung des Referenzsystems und der Verortung im Raum ist das **Tracking** verantwortlich. Es lässt sich in sensor-basiertes Tracking, optisch-basiertes Tracking und hybrides Tracking unterteilen. Zusätzlich sei mechanisches Tracking erwähnt, dass jedoch bei AR-System kaum relevant ist.

Das sensor-basierte Tracking basiert primär auf internen Sensoren wie der IMU, Magnetkompassen, GPS, Tiefenkameras, etc. und kann ausgehend von einem Referenzpunkt die Position und Orientierung des Endgerätes bestimmen (Palmarini et al. 2018, S. 224).

Das optisch-basierte Tracking ist der am häufigsten verwendete und meist zitierte Tracking-Ansatz (Wang et al. 2016, S. 14). Er gliedert sich im Kern in die zwei Varianten marker-basiertes und markerloses Tracking.

Marker-basiertes Tracking:

Es werden künstliche Muster in Form eines Bildes oder eines QR-Codes an dem zu trackenden Objekt oder in der Umgebung angebracht, die von dem bildverarbeitenden Programm erkannt werden. In dem registrierten Bild werden die Charakteristika erkannt und die genaue Position und Orientierung des Nutzers kann ermittelt werden (Tönnis 2010, S. 45).

Markerloses Tracking:

Bei diesen Verfahren sind keine künstlichen Marker notwendig, vielmehr wird auf die Informationen der natürlichen Umgebung zurückgegriffen. In der Literatur wird häufig zwischen merkmals- und modell-basiertem Tracking unterschieden (Palmarini et al. 2018, S. 224).

- **Merkmals-basiertes Tracking:** Es werden natürliche Merkmale (Features) an dem Objekt oder in der Umgebung genutzt. Durch Methoden der Bildverarbeitung werden sogenannte „Feature-points“ gefunden, zum Beispiel Kontrast- oder Farbunterschiede, mit deren Hilfe die Perspektive der Kamera ermittelt werden kann (Tönnis 2010, S. 51).
- **Modell-basiertes Tracking:** Ähnlich wie beim Merkmals-basierten Tracking werden markante Punkte, wie Kanten und Ecken verwendet. Ausgangspunkt ist jedoch ein 3D-Modell des zu trackenden Objektes, welches zuvor kalibriert werden muss, damit es das System als internes Modell verwenden kann.

Es gibt eine Vielzahl verschiedener Ansätze für ein markerloses Tracking. Es ist technisch deutlich anspruchsvoller als marker-basiertes Tracking, da die Systeme sehr stark vom Umgebungslicht, insbesondere der Helligkeit und Richtung des Lichteinfalls, abhängig sind. Auch müssen im erfassten Bild genug Merkmale zu finden sein. Eine weiße Wand oder eine große, leere Halle (ohne Texturen) bieten dem System nicht genug Charakteristika um virtuelle Objekte zu verorten. Ein weiteres Problem ergibt sich bei der Formänderung eines Objektes, zum Beispiel bei einem Baum im Wind. Durch die höhere Komplexität erhöht sich auch der Rechenaufwand in der Prozessoreinheit, was zu einer verzögerten Bildübertragung führen kann. Fraga-Lamas et al. und Palmarini et al. schreiben, dass ein stabiles Tracking in der AR-Pipeline eine der größten technologischen Herausforderung ist (Palmarini et al. 2018, S. 226; Fraga-Lamas et al. 2018, S. 13360).

Hybrides Tracking

Bei diesem Ansatz werden sensor- und optisch-basierte Tracking-Systeme miteinander kombiniert. Dadurch werden die Daten aus verschiedenen Quellen zusammengeführt und es lassen sich die Schwächen der jeweiligen Ansätze vermindern. Somit steigt die Tracking-Qualität und der Prozess wird robuster. Meistens werden dafür IMU oder GPS-Sensoren mit dem optischen Input durch Kamera-Systeme kombiniert. Hybrides Tracking ist ein vielversprechender Ansatz und gewinnt als Alternative zu den einfachen Tracking-Varianten immer mehr an Bedeutung, was sich auch in der aktuellen Forschung widerspiegelt (Kim et al. 2018).

Mapping

Eine weitere, bedeutende Technologie, die Tracking teilweise erst ermöglicht, ist das sogenannte Mapping. Dabei wird die reale Umgebung in Echtzeit durch die Kameras

erfasst und ein digitales Abbild der Oberflächen geschaffen. Dadurch wird eine virtuelle Registrierung erst ermöglicht. Im Gegensatz zu den Tracking-Verfahren, sind dafür keine Vorabinformationen notwendig und ein Abbild der Umwelt wird „ad-hoc“ erstellt (Palmarini et al. 2018, S. 224). Die bekanntesten Verfahren dafür sind SLAM (Simultaneous Location and Mapping) und PTAM (Parallel Tracking and Mapping). Dabei werden gleichzeitig Veränderungen der Raumumgebung sowie der Position im Raum selbst registriert. Das Mapping ist besonders zur Initialisierung des AR-Systems, im Rahmen der virtuellen Registrierung, und bei Versagen des Trackings während der Anwendung von Bedeutung (Kim et al. 2018, S. 4; Klein und Murray 2007).

Nach dem Tracking ist das **Interaktionshandling** der nächste Schritt in der AR-Pipeline (Abbildung 33). Hier hat der Nutzer die Möglichkeit mit dem System zu interagieren. Als Input kommen Sprach- und Gestensteuerung, aber auch eine klassische Bedienung mit handgetragenen Geräten, wie einem Clicker oder einer Tastatur, in Frage. In der **Informationsmanagement**-Einheit werden die virtuellen Informationen, seien sie lokal auf dem Gerät vorhanden oder remote eingeschleust, verarbeitet und der AR-Pipeline hinzugefügt. Im Anschluss wird das eingefangene Bild mit den virtuellen Informationen an die richtige Position gerendert und auf dem Display des **Ausgabegerätes** dargestellt.

4.2.2 AR-Einsatz in der Industrie (IAR)

Der Begriff IAR beschreibt den Einsatz von Augmented Reality in der Industrie, genauer, um einen industriellen Prozess zu unterstützen (Fite-Georgel 2011, S. 201). Auch wenn der Ursprung der AR auf die visionären Experimente von Ivan Sutherland in den 1960er Jahren zurückzuführen ist, kam die Idee der IAR erst in den frühen 1990er auf, als Caudell und Mizell einen HUD vorstellten, mit dem im Sichtfeld eines Maschinenführers aufgabenrelevante Informationen eingeblendet werden konnten (Caudell und Mizell 1992 - 1992). Auch in Deutschland bekam IAR, durch das Förderprojekt ARVIKA, einen Entwicklungsschub. In dem Projekt waren viele Industrieunternehmen, wie BMW, Airbus (damals EADS) oder Ford vertreten und es konnten Fortschritte im Bereich möglicher Anwendungsgebiete gemacht werden. Das Folgeprojekt ARTESAS wurde 2006 ins Leben gerufen und fokussiert sich auf Instandhaltungs-Anwendungen innerhalb der Luftfahrt- und Automobilbranche. Auch wenn die ersten IAR-Systeme eher experimentell waren, sind sie mittlerweile branchenübergreifend in zahlreichen Unternehmen zu finden. In Abbildung 34 sind vielversprechende Anwendungsfelder entlang der gesamten Wertschöpfungskette, von der Entwicklung über die Fertigung bis zum Vertrieb, dargestellt, zu denen es bereits mehrere Veröffentlichungen gibt. Bei tiefergehendem Interesse sei auf die jeweiligen Forschungsarbeiten verwiesen, die in dem Übersichtsbeitrag von Fraga-Lamas et al. (2018) zusammengefasst sind (Fraga-Lamas et al. 2018, S. 13361).

SERVICE	PRODUKTION	MARKETING	DESIGN	OPERATIONS	TRAINING
Anleitungen und Anweisungen	Arbeitsanweisungen für die Montage	Produktpräsentation und Demos	Gemeinschaftliches Konstruieren	Heads-up Displays	Aufgabenspezifisches Training
Inspektions- und Prüfservice	Arbeitsanweisungen für die Instandhaltung	Logistik, Verkaufsflächen-optimierung	Inspektion digitaler Prototypen	Digitale Produktkontrolle	Sicherheitsschulungen
Führung durch entfernten Experten	Performance Dashboards	Augmentiertes Markenerlebnis	Augmentierte Benutzeroberflächen	Anweisungen für Anlagenführer	Expertencoaching
Verbesserter Service und Self-Service	Qualitätssicherung	Augmentierte Werbung	Fehlerdiagnose	Augmentierte Benutzeroberflächen	

Abbildung 34: Gewinnbringender Einsatz von IAR entlang der Wertschöpfungskette mit Beispielprojekten (angelehnt an Fraga-Lamas et al. 2018, S. 13361; ANBIETER D 2018a, S. 8)

Eine der meist verbreiteten Anwendungen ist die Unterstützung von Arbeitern bei Instandhaltungs-, Reparatur- und Qualitätskontrollarbeiten mit Hilfe von textuellen, visuellen und auditiven Anweisungen. Auch können diese Arbeiten bei steigender Komplexität durch entfernte Spezialisten (Remote Assistance) unterstützt werden, die Live-Anweisungen geben.

Gleiches gilt für die Produktion, wo den Mitarbeitern Montageanweisungen angezeigt werden können. Durch die Anzeige von den richtigen Informationen zur richtigen Zeit werden Montagefehler drastisch reduziert und somit wird die Produktivität gesteigert. Über Performance Dashboards können wichtige Prozesskennzahlen für die Qualitätssicherung angezeigt werden.

Auch im Marketing und Vertrieb gibt es zahlreiche Anwendungen. Hier stehen vor allem die Produktpräsentation und das innovative Markenerlebnis im Vordergrund. Mittlerweile gibt es auch augmentierte Werbung, zum Beispiel auf Lebensmittelverpackungen oder Magazinartikel, die mit Hilfe eines Smartphones „zum Leben erweckt werden“ (ANBIETER D 2018a, S. 28).

Im Design steht vor allem die Kollaboration mehrerer Personen an einem digitalen Model im Vordergrund. Die AR-Brillen sind dabei miteinander verbunden und die AR-Inhalte werden gemeinsam erlebt und manipuliert.

Im operativen Bereich, wie der Logistik, sind besonders Datenbrillen im Einsatz, die beim Picking-Prozess die Lagermitarbeiter unterstützen und direkt im Sichtfeld Live-Daten, wie Nummer und Standort eines gesuchten Paketes, darstellen.

Im Bereich Training liegt das größte Potenzial bei der Unterstützung von aufgabenspezifischen Trainings und Schulungen im Arbeitssicherheitsbereich. Auch das Coaching durch räumlich entfernte Experten kann durch AR erleichtert werden. In der Literatur gibt es bereits zahlreiche Nutznachweise für AR-basierte Trainingsansätze. Insbesondere in der Montage konnten bereits einige Vorteile gegenüber traditionellen Ansätzen, wie papier-basiertem oder video-basiertem Training, nachgewiesen werden. Für tiefergehende Literatur sei auf den Übersichtsbeitrag von Werrlich et al. (2017) hingewiesen, in dem eine aktuelle

Literatursammlung zu dem Thema AR-Einsatz für Montagetrainings, zu finden ist (Werrlich et al. 2017a, S. 1075).

All diese Anwendungen stellen sehr unterschiedliche Anforderungen an ein AR-System und die zu vermittelnden Inhalte und müssen deshalb differenziert betrachtet werden. In Abbildung 35 wird eine Auswahl an Anwendungsfällen mit den funktionalen Komponenten eines AR-Systems abgeglichen und in Form eines Netzdiagrammes dargestellt. Dabei steigen die Anforderungen an das System mit zunehmender Entfernung zum Netzmittelpunkt.

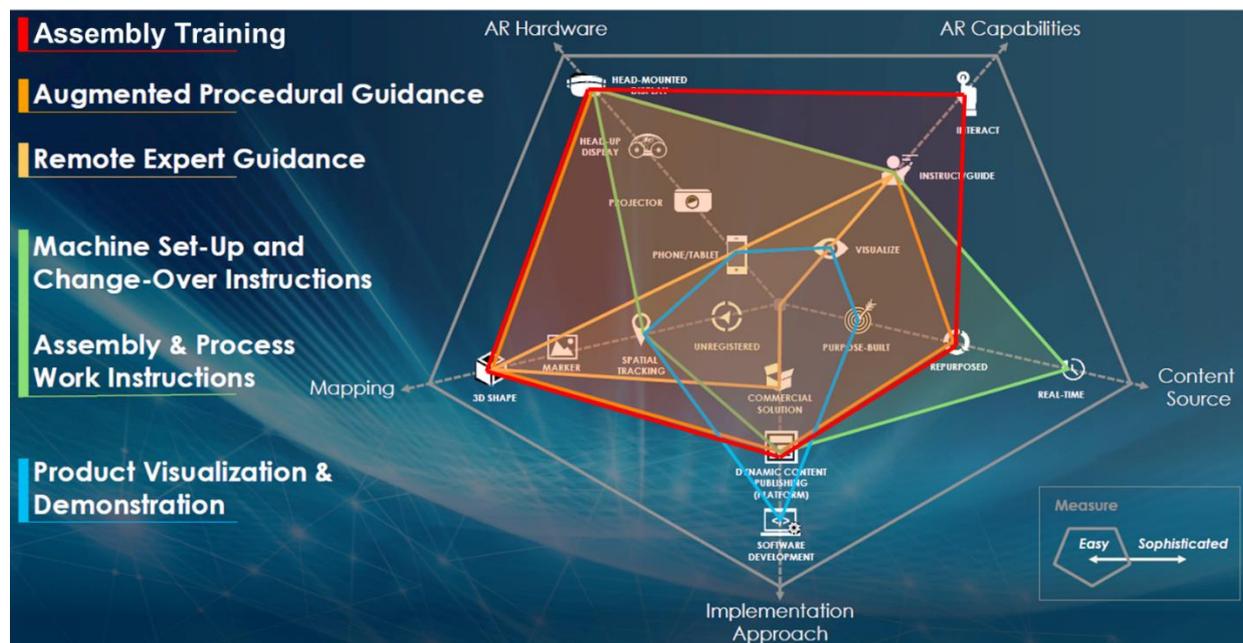


Abbildung 35: Überlagerung ausgewählter Anwendungsfelder mit den Komponenten eines AR-Systems. Innen: geringer Aufwand; außen: hoher Aufwand (angelehnt an ANBIETER D 2018a, S. 15; um Assembly Training erweitert)

Die Erstellung eines Show-Cases zu Marketingzwecken erfordert einen hohen Implementierungsaufwand durch einen Experten. Der Content wird dabei speziell für die Anwendung gebaut und muss nicht flexibel erneuert werden. Als AR Hardware ist lediglich eine Visualisierung über ein Smartphone/Tablet notwendig, da möglichst viele Kunden erreicht werden sollen und diese Geräte bereits weitverbreitet sind.

Für die hier vorliegende Arbeit ist besonders die Aufwandserstellung eines Trainings für Montagemitarbeiter interessant. Ausgangspunkt des hier dargestellten Anwendungsfalls (Rote Spinne) sind getroffene Annahmen des Autors, die auf den später, in Abschnitt 5.3.1, behandelten Anforderungskriterien beruhen. Als AR-Hardware ist ein AR-Headset, wie die Microsoft HoloLens notwendig. Die AR-Fähigkeiten, müssen eine Interaktion zwischen realer und virtueller Welt ermöglichen, damit zum Beispiel die Aufnahme von realen Bauteilen registriert und ein virtuelles Feedback gegeben werden kann. Die Quelle für die Daten der Trainingsinhalte sind,

wie in Abschnitt 3.3.1 erwähnt, Montageprozessinformationen sowie 3D-Modelle aus einem CAD-Programm. Die Implementierung ermöglicht eine Plattform, mit der neue Inhalte durch das jeweilige Fachpersonal leicht eingepflegt und veröffentlicht werden können. Da im Produktionsumfeld meistens konstante Lichtverhältnisse herrschen und Marker leicht verdreht oder beschädigt werden, ist ein markerloser Tracking-Ansatz, wie das modell-basierte Tracking, vorzuziehen.

4.2.3 Chancen und Herausforderungen

Aus den oben beschriebenen Anwendungen innerhalb der Industrie, dem hohen Nutzen und der kontinuierlichen Leistungsverbesserung der Lösungen, lässt sich schnell erkennen, dass dem Markt für AR-Technologien ein großes Wachstumspotenzial zugeschrieben wird. Digility 2016 prognostiziert für den AR/VR-Markt einen Wachstum von ca. 2 Mrd. Dollar im Jahr 2016 auf ein Marktvolumen von 150 Mrd. Dollar im Jahr 2020. Davon entfallen 120 Mrd. Dollar auf AR-Lösungen und 30 Mrd. \$ auf VR-Lösungen (Winkelhake 2017, S. 71). Dies liegt vor allem an dem höheren Technologieaufwand der AR und den damit verbundenen Kosten. Auch spielt VR eher im Konsumentenmarkt eine Rolle, wo hingegen AR vor allem in Unternehmen zur Prozessoptimierung eingesetzt wird.

Auch wenn AR zurzeit deutliche technologische Fortschritte macht, ist die Entwicklung schwer prognostizierbar. In Abbildung 36 sind die Technologieprognosen der letzten 13 Jahre auf dem Gartner Hype-Zyklus dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bereits 2005 eine Marktreife in 5-10 Jahren vorhergesagt wurde. Im Zeitverlauf wurde diese Prognose immer erneuert, so dass auch im Jahr 2018 ein produktiver Einsatz erst in 5-10 Jahren prognostiziert wird. Zum Vergleich sei erwähnt, dass VR 2018 bereits das Plateau der Produktivität erreicht hat.

Gartner Hype-Cycle für Augmented Reality:

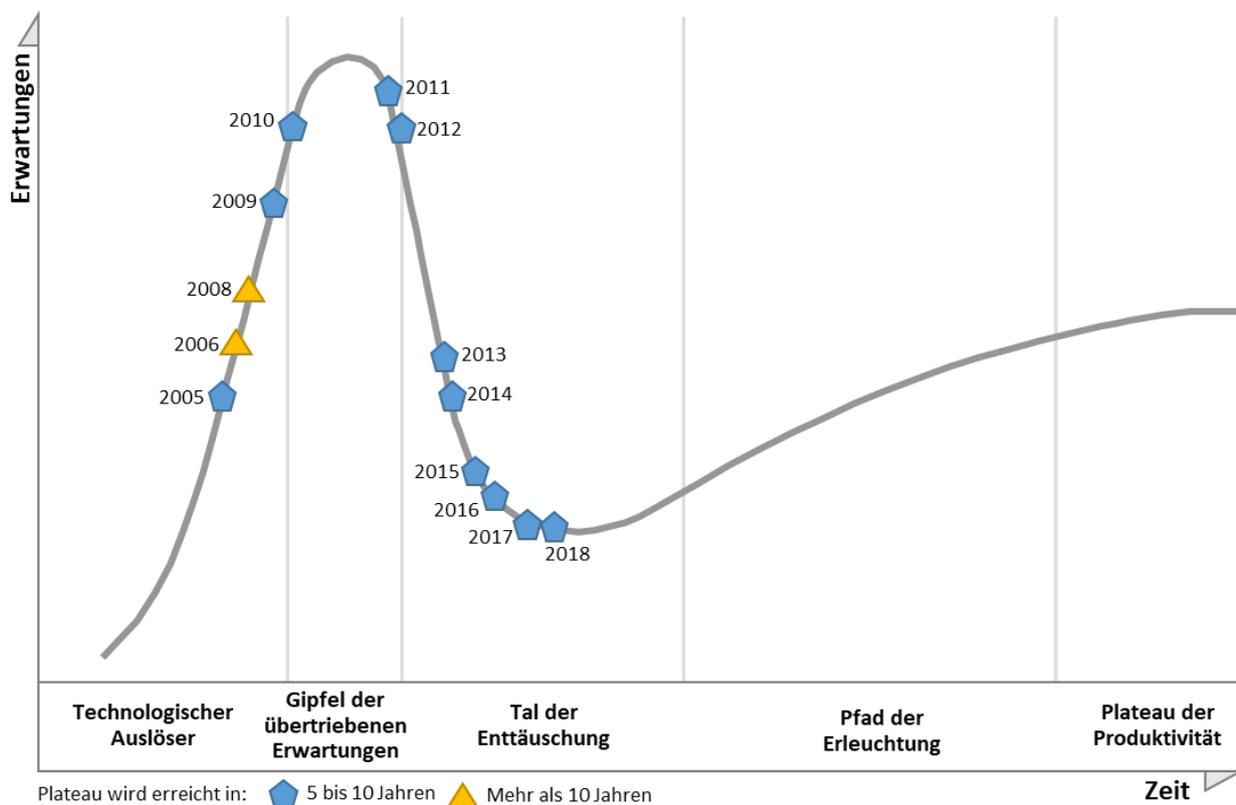


Abbildung 36: Gartner Hype Cycle - Entwicklung der Technologieprognose für Augmented Reality zwischen 2005 und 2018 (angelehnt an Gartner 2018)

Palamari et al. (2018) unterteilt die größten Herausforderungen der AR in die folgenden Kategorien (Palmarini et al. 2018, S. 226):

- **Hardware** – Ergonomie, eingeschränktes Sichtfeld, Verzerrung von 3D-Bildern, Generell sind Energieverbrauch, Prozessorleistung, Speicherplatz sowie die Auflösung der Kamera problematisch
- **Tracking-Algorithmen** – insbesondere markerloses Tracking ist noch nicht robust und zuverlässig genug für einen industriellen Einsatz; Abhängigkeit von Umweltfaktoren, wie Licht, Materialien, Verdeckungen
- **Interaktion der Nutzer mit dem AR-System** – Die Fähigkeiten zur Bedienung eines AR-Systems sind noch zu anspruchsvoll (Programmieren, Modellieren, Animieren, Wissensmanagement). Für einen industriellen Einsatz muss das AR-System einfach aufrechtzuerhalten sein. Folgende Punkte stehen in dem Zusammenhang im Zentrum:
 - Geeignete Autorentools
 - Content Management Systeme
 - Visualisierung und Ergonomie der User Interfaces

Insbesondere die Content-Generierung über Autorentools spielt in dem Zusammenhang eine tragende Rolle. Sie ist das verknüpfende Element zwischen den

technologischen Möglichkeiten und den fachlichen Anforderungen aus der Industrie. Erst bei einem sinnvollen Einsatz und der Möglichkeit, Inhalte für ein AR-System schnell und unkompliziert zu erstellen, wird sich die Industrie für den AR-Markt öffnen. Auch wenn es bereits Content-Generierungsumgebungen gibt, die den Content-Entwicklungsprozess vereinfachen, so benötigt die Erstellung von AR-Content weiterhin viel Zeit und besondere Fähigkeiten (Craig 2013c, S. 257).

4.3 Prozess Content-Generierung

Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel auf den Prozess der Content-Generierung vertieft eingegangen. Zu Beginn wird eine allgemeine Definition von Content gegeben und dessen Bedeutung für digitale Assistenzsysteme zur Mitarbeiterunterstützung erläutert. Dann wird ein Beispielprozess für die Content-Generierung für visuelle Werkerassistenzsysteme vorgestellt um auf die wichtigsten Komponenten einzugehen.

Bisher beschäftigen sich wenige wissenschaftliche Abhandlungen mit der Content-Generierung für AR-Systeme. Bei vielen wissenschaftlichen Studien im IAR-Umfeld liegt vor allem die Nutzenbewertung im Fokus. Die Inhalte werden dabei nur für diesen Zweck durch einen Experten erstellt und so aufbereitet, dass sie für die AR-Anwendung genutzt werden können. In Abbildung 37 ist die jährliche Anzahl an Publikationen auf der Wissenschaftsplattform ScienceDirect des Elsevier-Verlages zu den Suchbegriffen „Augmented Reality“ und „Augmented Reality AND Content Generation“ im Zeitraum 1995 bis 2018 dargestellt.

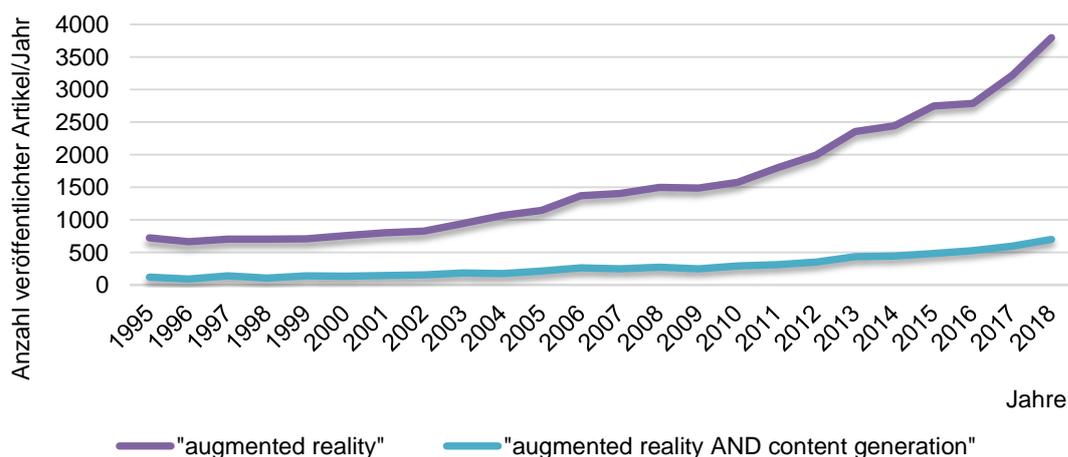


Abbildung 37: Steigendes Interesse der Forschungsgemeinschaft im Zeitraum 1995-2018 zu den Themen "Augmented Reality" und "Augmented Reality AND Content Generation". Repräsentativ ausgedrückt durch die Anzahl der Veröffentlichungen auf der Wissensplattform ScienceDirect

Das steigende Interesse der Forschungsgemeinschaft an der Thematik Augmented Reality wird in dieser Grafik deutlich. Die Anzahl an Veröffentlichungen, die sich mit

der Content Generierung beschäftigen, steigt erst in den letzten Jahren, ist jedoch weiterhin deutlich geringer als die Anzahl der Gesamtpublikationen zur AR. Daraus lässt sich schließen, dass die Thematik zunehmend, wenn auch langsam, in den Fokus rückt, auch wenn noch viele andere Forschungsfelder wie Ergonomie und Tracking die AR-Veröffentlichungen dominieren.

4.3.1 Definition von Content

Als Anglizismus findet der Begriff Content auch in der deutschen Sprache Verwendung. Er wird dabei synonym zu dem Begriff Inhalt verwendet. In Bezug auf Medien sind damit alle Medieninhalte, wie Textinformationen oder Videos gemeint, die kommuniziert werden. Im weitesten Sinne ist jede Information, die über ein Medium transportiert wird, Content (GS Lexikon 2018). Generell können diese Inhalte über alle fünf menschlichen Sinne (Sehen, Hören, Riechen, Fühlen und Schmecken) transportiert und aufgenommen werden. Im Zusammenhang mit Medien werden jedoch meistens nur der visuelle und auditive Sinn adressiert (Mazuryk und Gervautz 1996, S. 15).

Auf Augmented Reality übertragen sind dies alle Elemente der virtuellen Welt und alle Elemente der erweiterten, realen Welt, die für die AR-Anwendung eine Rolle spielen (Craig 2013b, S. 152). Diese Elemente können herkömmliche 2D-Inhalte, wie Text-, Bild- und Videoinformationen sein, sowie zusätzliche 3D-Inhalte, wie 3D-Objekte oder Animationen.

Das primäre Ziel von Content ist es, eine Idee zu transportieren (Craig 2013b, S. 154). Dies kann auf vielfältige Art und Weise geschehen. So kann ein Buch mit Textinhalten auch verfilmt und über das Medium Film verbreitet werden oder als Hörbuch vertont werden. Dabei werden die Informationen so gebündelt und aufbereitet, dass sie eine Geschichte erzählen und einen höheren Zweck als die simple Informationsdarstellung erfüllen. In Abbildung 38 ist die Wissenstreppe nach North dargestellt. Sie beschreibt die Verkettung zwischen den kleinsten Datenelementen, wie einzelne Zeichen, die ohne Struktur keinen Sinn ergeben, und dem übergeordneten Ziel von strukturiertem Wissensmanagement. Die unstrukturierten Zeichen werden erst durch eine Syntax zu verwertbaren Daten, welche wiederum erst im richtigen Kontext und mit einer Zweckorientierung zu einer relevanten Information für einen Einzelfall werden können. Sie sind die Grundlage für Entscheidungen. Um die Informationen eines Einzelfalls zu konservieren und auf andere Fälle zu übertragen, ist eine Vernetzung und Speicherung verschiedener Informationen notwendig. Das daraus gewonnene Wissen kann in einem anderen Zusammenhang verwendet werden und somit Menschen und Organisationen befähigen. Das Modell der Wissenstreppe verdeutlicht, dass Daten, Informationen und das daraus gewonnene Wissen in einem Unternehmen die Wettbewerbsfähigkeit steigern können (North 2016, S. 37).

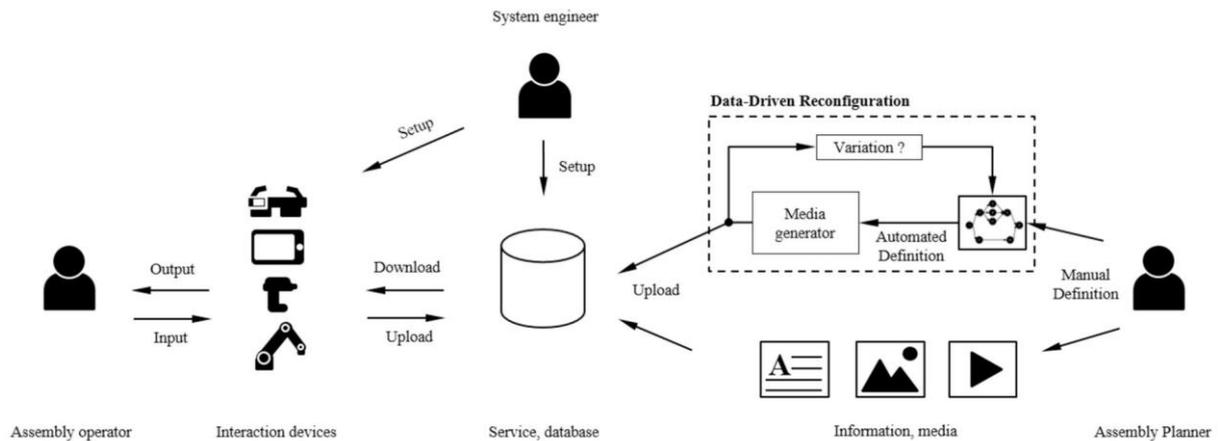


Abbildung 39: Schematische Struktur eines digitalen Assistenzsystems (Reisinger et al. 2018, S. 102)

Der Montageplaner stellt hierbei manuell zum einen die Workflow-Struktur ein, also die Montagereihenfolge, und selektiert zum anderen die erforderlichen Medien, die auf den Server geladen werden. Ein automatisierter Medien Generator verknüpft dann die Medien mit den jeweiligen Workflow-Schritten.

Insbesondere der Prozess der Medienbereitstellung ist hierbei sehr zeiteinnehmend. Auch muss der Workflow bei geänderten Arbeitsinhalten neu angepasst werden (Reisinger et al. 2018, S. 103). In Abhängigkeit des Contents kann dies schnell oder langsam erfolgen. So ist eine textuelle Änderung auf einer Arbeitsanweisung deutlich schneller zu editieren als die Änderung eines CAD-Modells, welches neu importiert und aufbereitet werden muss.

In Abbildung 40 ist der Content-Generierungsprozess für AR-basierte Werkerassistenzsysteme zur Erstellung von Trainings skizziert. Auch hier sind drei Personengruppen involviert. Ein Content-Ersteller in der Rolle des Trainingserstellers und Trainers, der alle relevanten Montageprozessinformationen besitzt und die Trainingsinhalte definiert. Ein AR-Experte, der den Trainingsersteller technisch unterstützt und Spezialist auf dem Gebiet der 3D-Datenvisualisierung, Animationserstellung und des Trackings ist. Die Trainees sind die Konsumenten des AR-Contents und nutzen zur Wiedergabe die AR Clients, wie HHDs oder HMDs.

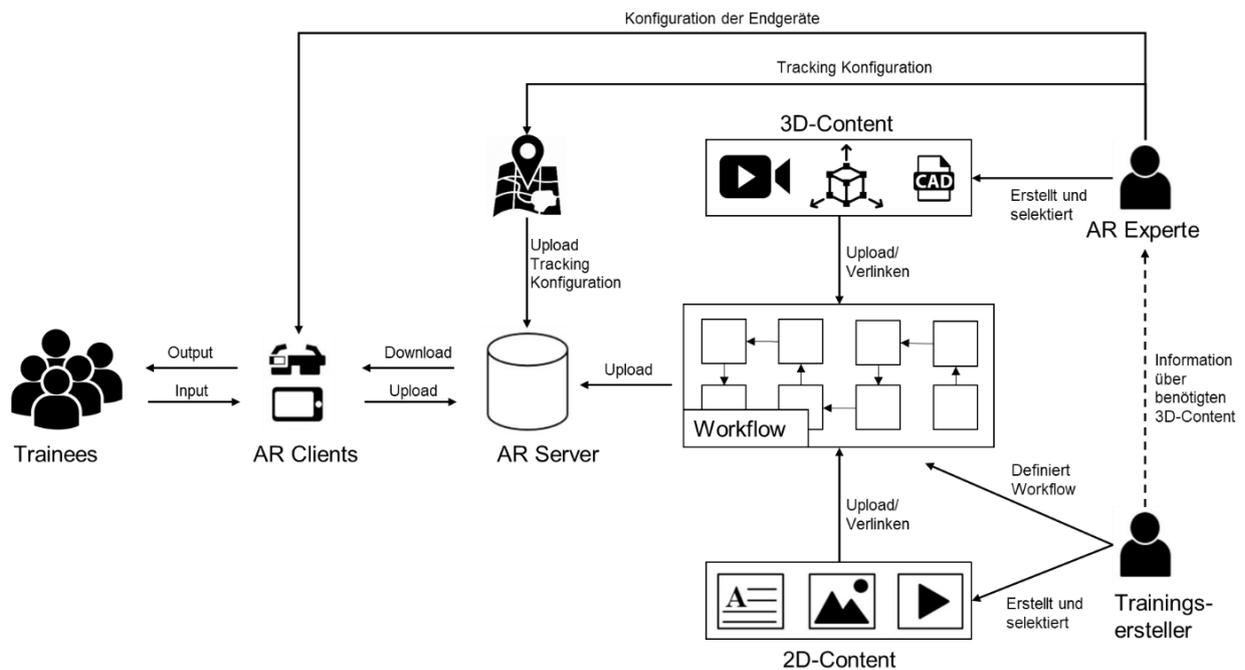


Abbildung 40: Content-Generierungsprozess für ein AR-basiertes Werkerassistenzsystem zur Lernunterstützung

Bei einer Änderung der Trainingsinhalte muss der Trainingsersteller den AR Experten informieren und die erforderlichen Medien aufbereiten, beziehungsweise den Workflow neustrukturieren. Da es in der Praxis mit hohen Kosten einhergeht, für die Aktualisierung von Montagetrainings einen zusätzlichen Mitarbeiter als AR Experten einzustellen, muss der Prozess vereinfacht werden. In Abbildung 41 ist ein alternativer Autorenprozess dargestellt, der dies berücksichtigt. Hier wird der Content-Ersteller befähigt, die Trainings eigenständig zu erstellen und zu strukturieren. Der 3D-Content wird ihm dabei, wie der 2D-Content zuvor, zur Verfügung gestellt und die Festlegung des Trackings ist soweit automatisiert, dass in dem Modell nur das Tracking-Modell ausgewählt werden muss.

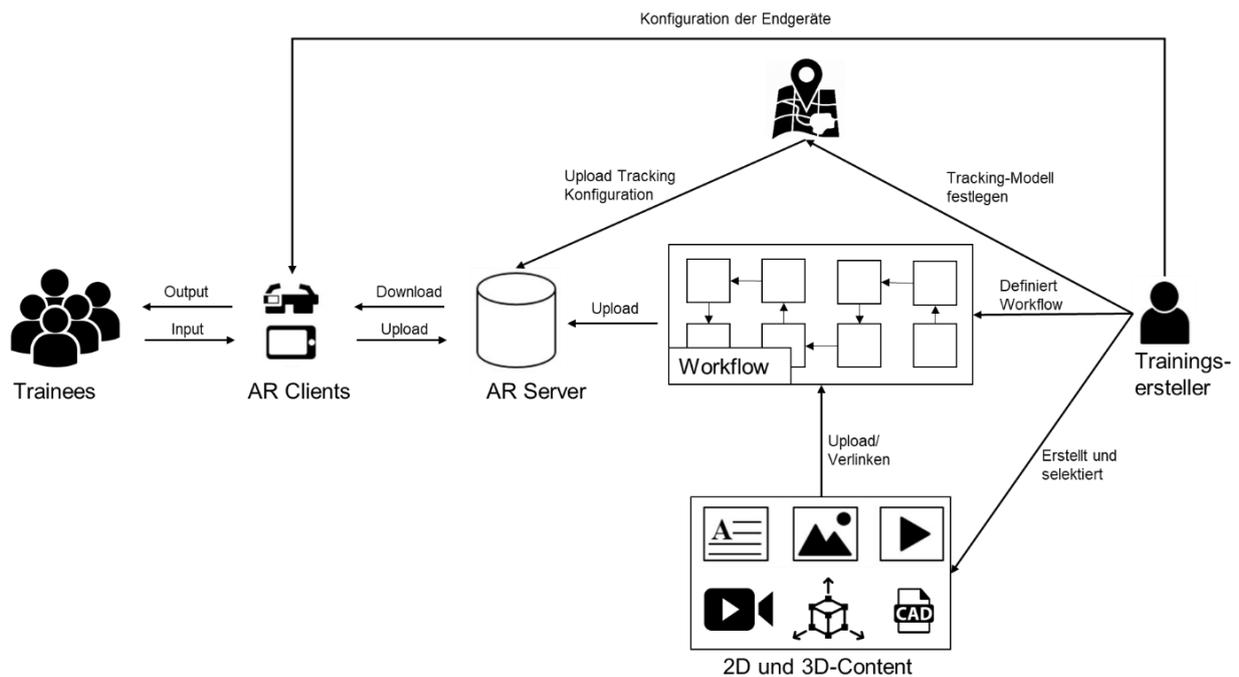


Abbildung 41: Vereinfachter Content-Generierungsprozess, bei dem der Trainer die Aufgaben des AR Experten übernehmen kann

Auch wenn die Workflow-Erstellung und Content-Befüllung soweit vereinfacht werden, dass ein AR-unerfahrener Trainingsersteller diese ausführen kann, ist es immer noch eine große Herausforderung, die 2D- und 3D-Inhalte in geforderter Qualität und Aktualität zur Verfügung zu stellen. Dabei spielen Schnittstellen zu anderen Softwareprodukten, wie zum Beispiel dem CAD-System CATIA oder Prozessplanungstools, eine zentrale Rolle. Bei einer automatisierten Content-Bereitstellung würde dem Trainer viel Arbeit abgenommen und der Content-Generierungsprozess könnte sogar simpler werden als die Erstellung einer papierbasierten Anlernmappe.

5 Benchmark verschiedener Autorenprogramme

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln ein theoretisches Verständnis über die Struktur und das dynamische Umfeld in der Montage eines Automobilherstellers auf der einen Seite und die technischen Möglichkeiten und Herausforderungen visueller Werkerassistenzsysteme auf der anderen Seite gegeben wurde, beginnt ab diesem Kapitel der praktische Teil der Arbeit. Hier werden die Workflows verschiedener Anbieter für die Erstellung von AR-basierten Erlebnissen analysiert und miteinander verglichen.

Da das Problem der Content-Generierung bereits seit Beginn der IAR bekannt ist und der Markt für industrielle Anwendungen immer größer wird (siehe Kapitel 4.2.2), bieten bereits zahlreiche Anbieter, nach eigener Auskunft, einfache Autorentools zur Erstellung von AR-Szenarien an. Jedoch gibt es eine Diskrepanz zwischen den inszenierten Show-Cases der Anbieter für Marketingzwecke und der tatsächlichen, pragmatischen Umsetzung in einem industriellen Anwendungsfall. Dies lässt sich anhand der geringen Anzahl an serienreifer Anwendungen belegen (siehe Kapitel 4.2.3). Ebenso besteht auf BMW-Seite Interesse, mehr über bereits existierende Lösungsansätze und dem aktuellen Stand der Technik zu erfahren.

Aus diesem Grund werden verschiedene, auf dem Markt erhältliche Lösungen untersucht und die vielversprechendsten Anbieter zu einem Workshop eingeladen, um einen realen Anwendungsfall bei BMW konzeptionell aufzubauen. Dies ermöglicht einen mehrseitigen Erfahrungsaustausch, da auch die Anbieter einen Einblick in die Bedürfnisse und Anforderungen eines produzierenden Unternehmens erhalten.

Im Rahmen eines Benchmarks wird ein Vergleich der Autorenlösungen verschiedener Anbieter durchgeführt. Dies dient zum einen der Einordnung der eigenen BMW-internen Lösungen, als auch dem Wissensgewinn in Bezug auf die Möglichkeiten und Restriktionen einer Kollaboration mit externen Anbietern. Neben den fachlichen Anforderungen aus der Montageplanung und Fertigung spielen ebenso technische und wirtschaftliche Anforderungen, wie zum Beispiel die notwendige Integration in die BMW IT-Systemlandschaft, eine Rolle.

Im Anschluss soll eine Empfehlung über das weitere Vorgehen im Umgang mit AR-unterstützten Anwendungsfällen, insbesondere im Bereich der Mitarbeiterqualifizierung gegeben werden.

5.1 Bewertungsmethodik

Vor der Durchführung des Benchmarks gilt es zu definieren, welche *Art* von Benchmark durchzuführen ist, was das *Ziel* ist und *wer* als Benchmarkteilnehmer in Frage kommt.

Eine Differenzierung der bekanntesten Benchmark-Verfahren ist in Abbildung 42 dargestellt. Je nach Fokus wird zwischen Objekt, Vergleichspartner, Inhalt,

Zeithorizont und Zielsetzung unterschieden. Ein Unternehmen kann also extern, über die Unternehmensgrenze hinweg, mit anderen Unternehmen quantitativ, über Kennzahlen oder Kosten, verglichen werden. Andererseits können zum Beispiel unternehmensinterne Prozesse qualitativ auf Stärken oder Schwächen hin untersucht werden (Becker 2008, S. 193).

Objekt	Vergleichspartner	Inhalt	Zeithorizont	Zielsetzung
Produkt	Intern	Qualitativ	Strategie	Kosten
Dienstleistung	Extern	Quantitativ	Taktik	Leistung
Prozess			Operative Ergebnisse	Qualität

Abbildung 42: Benchmarking - Möglichkeiten der Differenzierung (Bergauer 2009, S. 63)

In Abbildung 43 sind verschiedene Benchmarking-Varianten dargestellt. Da in dem hier behandelten Fall der Content-Generierungsprozess im Fokus steht und die Lösungen der verschiedenen Anbieter verglichen werden, handelt es sich um ein *branchenunabhängiges Benchmarking*. Dies ist mit die allgemeinste Form eines Benchmarks da Anbieter branchenübergreifend miteinbezogen werden. Jedoch ist Zahl der Anbieter aufgrund der Neuheit des Marktes eingeschränkt.

Ein marktbezogenes Benchmarking wäre beispielsweise ein Vergleich zwischen den Implementierungsmethoden der Automobil-OEMs. Da es bei dieser Technologie bisher kaum Einsätze in Serie gibt und die Anwendungsfälle sehr unterschiedlich sein können, ist diese Art von Benchmark zu diesem Zeitpunkt auszuschließen. Jedoch wird in der Zukunft ein marktbezogener Erfahrungsaustausch auf dem Gebiet sicherlich einen Mehrwert generieren.

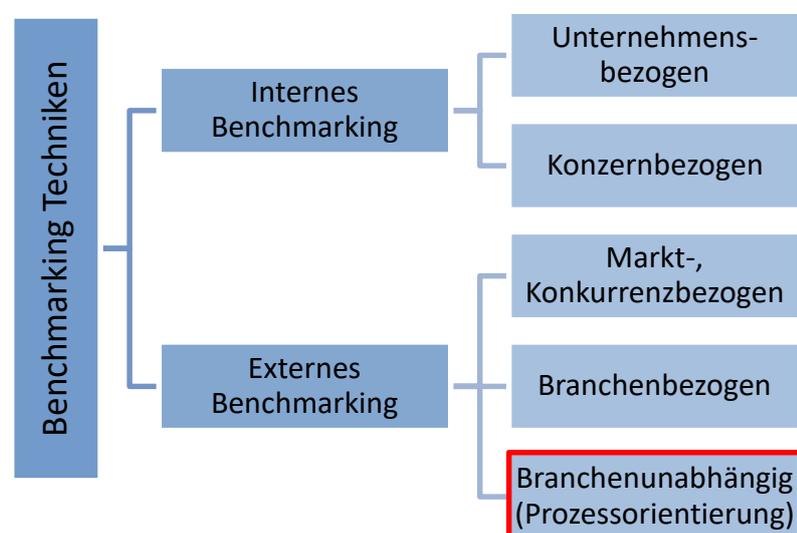


Abbildung 43: Arten des Benchmarking klassifiziert nach Vergleichspartner (Töpfer 1997, S. 79)

In der Literatur finden sich über 60 verschiedene Benchmark-Modelle, welche sich alle abhängig von Benchmarkziel, der Benchmarkumgebung und der Branche unterscheiden (Anand und Kodali 2008). Das weltweit meistzitierte und damit vermutlich auch meistgenutzte Modell ist der XEROX-Benchmarkprozess. Das Modell umfasst zehn Schritte, welche in Abbildung 44 dargestellt sind (Anand und Kodali 2008).

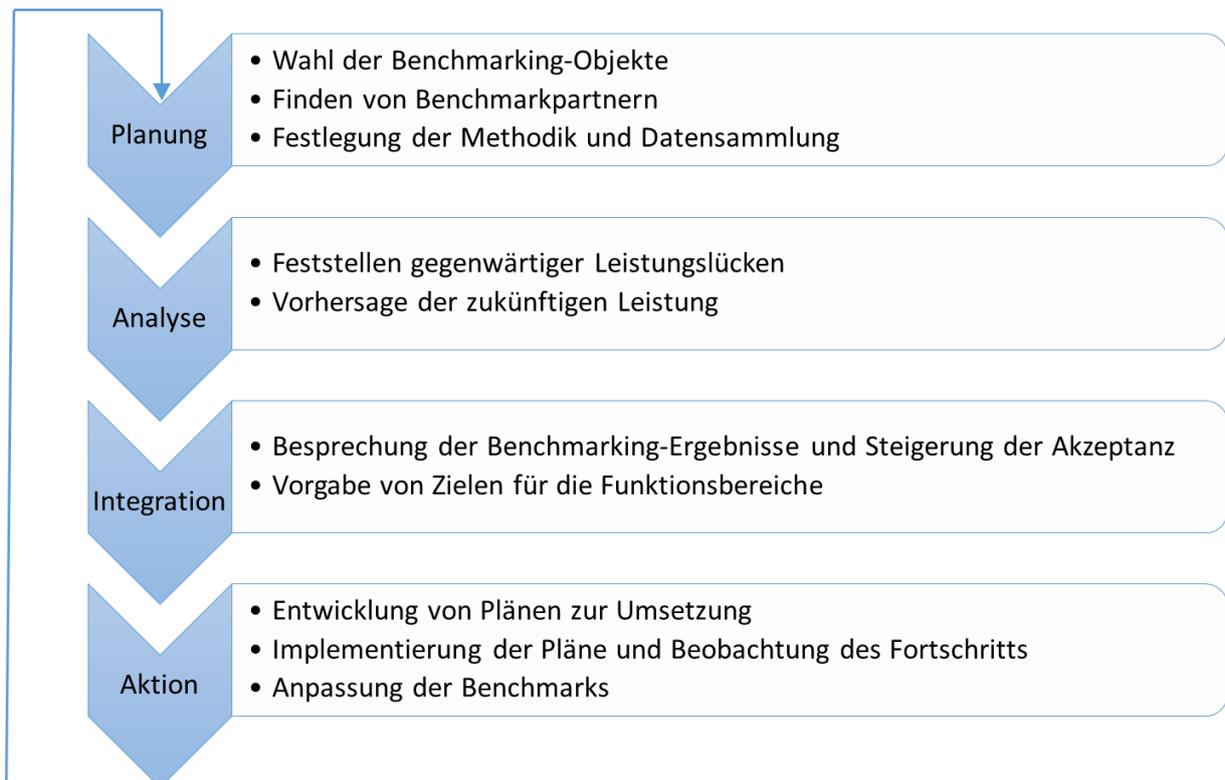


Abbildung 44: Das XEROX-Benchmark Modell (angelehnt an Anand und Kodali 2008)

Für den hier vorliegenden Anwendungsfall ist das Modell jedoch nicht komplett umsetzbar, da nach der Planung und Analyse noch keine direkte Implementierung der besten Lösung vorgenommen wird. Es wird deshalb auf ein vereinfachtes Modell zurückgegriffen, welches modifiziert die Vorgehensweise und Struktur dieses Benchmarks darstellt (siehe Abbildung 45). Hierbei handelt es sich um ein Modell, welches die Kerntechniken zur Durchführung eines Benchmarks erfasst. Dies basiert auf den Schnittmengen, die bei vielen Benchmark-Methoden verwendet werden und unabhängig vom Benchmarktyp oder -objekt gültig sind (Dragolea und Cotirlea 2009).

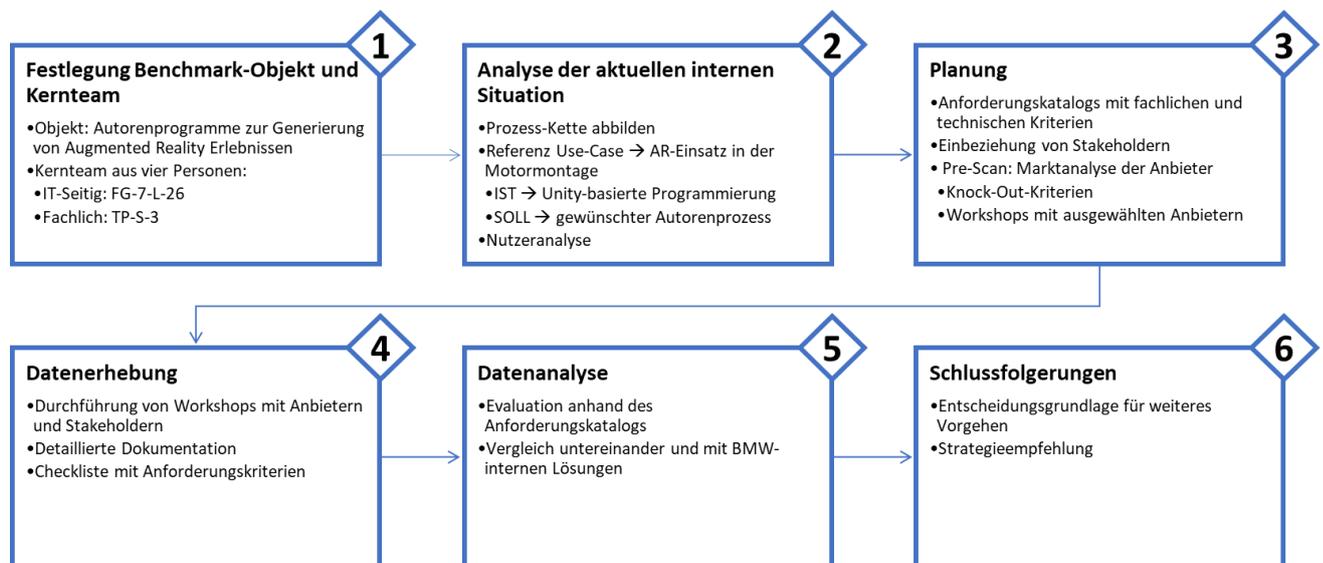


Abbildung 45: Ablauf des Benchmarking, angelehnt an dem Kernthemen-Modell von Dragolea und Cotirlea (2009)

1. Festlegung des Benchmark-Objektes und des Kernteams

Ziel dieses Benchmarks ist es ein Autorentool zu finden, welches folgender Vision gerecht wird:

„Mit AR-unterstützten Trainings erhalten die direkten Mitarbeiter in der Produktion eine moderne, attraktive und effiziente Möglichkeit, Arbeitsfolgen und Arbeitsprinzipien selbstständig und praxisnah zu lernen. Im Fokus stehen deshalb hands-free Lösungen, wie Head-Mounted-Displays und Smart-Glasses. Mitarbeiter sollen Trainings-Inhalte auch selbst aufbauen und schnell und einfach modifizieren können.“

Marcel Kress, Product Owner für AR, BMW Group (BMW Group 2016b)

Das Benchmark-Kernteam besteht aus vier Personen:

- IT-Entwicklungsteam: Zwei Mitarbeiter; sie sind dem IT-Ressort für Innovationen im Bereich Shop Floor/Logistics zugeordnet und technische Experten auf dem Gebiet Augmented Reality
- Fachlich (Product Owner): Zwei Mitarbeiter, einschließlich des Verfassers dieser Arbeit, sind dem Bereich Digitalisierung und Innovationen im Produktionssystem zugeordnet. Ihre Aufgabe ist es, die fachlichen Anforderungen aus den verschiedenen Abteilungen zu bündeln und in den Benchmark einfließen zu lassen.

Hinzu kommen die Stakeholder der verschiedenen Fachbereiche, die im nächsten Punkt weiter erläutert werden.

2. Analyse der aktuellen internen Situation

In diesem Schritt wird der Prozessablauf der bisherigen Lösung abgebildet und als Referenz für den Benchmark verwendet. Dabei handelt es sich um eine eigenprogrammierte Unity-basierte AR-Anwendung, die bereits für BMW-interne Nutzerstudien herangezogen wurde. Im Nachgang wird ein „SOLL“-Prozess generiert, welcher unter Einbeziehung der fachlichen Anforderungen das gewünschte Ziel umsetzt.

In einer Nutzeranalyse werden die Vorstellungen und Wünsche der Mitarbeiter, die im Endeffekt den Autorenprozess durchführen, erfasst und als fachliche Kriterien dem Anforderungskatalog hinzugefügt. Auch werden Stakeholder ermittelt, die ebenfalls an den Workshops teilnehmen und sich aktiv in den Benchmarkprozess einbringen und als fachliche Vertreter agieren. Dies sind primär methodenplanende Mitarbeiter aus folgenden Fachbereichen (siehe Kapitel 5.3.1):

- Antriebsfertigung, München/Dingolfing (TA-E-10/22/43, TA-248)
- Produktionsakademie/ WPS Center (TP-S-2*)
- Produktionsnetzwerk 2/ CKD-Werke (TV-413)
- Endmontage G20, Werk München (TM-40)
- Endmontage RollsRoyce, Werk Goodwood (TP-4-R)
- Endmontage, Werk Regensburg (TR-44)
- Produktions- (TL-314) und Qualitätsverbesserung (MK-404), Werk Leipzig
- Innovationen in der Komponentenfertigung, Landshut (MK-5-I)

3. Planung

Nachdem die internen Prozesse der Content-Generierung und der möglichen Anwendungsfälle genauer analysiert wurden, werden nun die gesammelten Informationen verwendet um einen Kriterienkatalog zu erstellen, welcher alle Anforderungen umfassend abdeckt.

Im ersten Schritt werden KO-Kriterien bestimmt, welche zur Auswahl relevanter Anbieter dienen. Im zweiten Schritt wird eine internetbasierte Marktanalyse durchgeführt, welche alle relevanten Anbieter auflistet. In einem Markt-Screening werden die Anbieter kontaktiert und darum gebeten, eine Vorab-Checkliste auszufüllen, mit der die wichtigsten Kriterien abgefragt werden.

Im nächsten Schritt werden die geeigneten Anbieter zu einem zwei-tägigen Hands-on Workshop eingeladen, in dem gemeinsam ein Trainingsszenario, ähnlich dem des Referenz-Use-Cases, aufgebaut werden soll. Zur Vorbereitung werden den Anbietern die CAD-Dateien eines Motormodells, sowie eine Dokumentation über den gewünschten Autorenprozess, zur Verfügung gestellt.

4. Datenerhebung

Während der Durchführung der Workshops mit den Anbietern wird eine detaillierte Dokumentation der Autorenlösungen mit Screenshots, Bildern und Videos vorgenommen. Als Leitfaden für den Workshop dient der Anforderungskatalog, der in ausgedruckter Form jedem Mitglied des Kernteams vorliegt und Workshop-begleitend ausgefüllt wird (siehe Kapitel 5.3).

Teilnehmer der Workshops sind neben der BMW-internen Belegschaft, bestehend aus Kernteam und Stakeholdern, auf der Anbieterseite Vertriebsmitarbeiter, technische Spezialisten sowie bei kleineren Unternehmen die Unternehmensgründer.

Der Ablauf des Workshops lässt sich in zwei Abschnitte einteilen:

Im ersten Abschnitt stellen die Anbieter ihre Lösungen und Produkte vor und BMW stellt die bisherige unternehmensinterne Situation und die eigenen Erwartungen genauer dar. Im Anschluss wird der Prozess der Content-Generierung anhand des Referenz-Projektes gemeinsam durchgeführt und anfallende Fragen werden geklärt. Im zweiten Abschnitt wird der gemeinsam aufgebaute Workflow vor Ort an einem Motor im WPS-Trainingscenter getestet und das Ergebnis evaluiert. Dies ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung des Autorenprozesses bis hin zur Qualität der Endanwendung, mit der die Mitarbeiter trainiert werden sollen.

5. Datenanalyse

Nach jedem durchgeführten Workshop werden die gesammelten Daten anhand des Anforderungskataloges im Kernteam verglichen und gemeinsam mit den Stakeholdern eine Beurteilung über die Performance und Effizienz der Anbieterlösungen erarbeitet. Nach Abschluss aller Workshops werden die Anbieter miteinander verglichen und somit ein „Best-in-Class“ Anbieter bestimmt. Auch werden die Ergebnisse der Anbieter mit dem BMW-internen Referenz-Prozess verglichen, um somit die eigene Leistung besser bewerten zu können.

Neben der Evaluierung der einzelnen Kriterien wird anhand einer Nutzwertanalyse ein Gesamtnutzwert ermittelt, welcher als Vergleichsindikator dient und für die Entscheidung bezüglich der Zusammenarbeit mit einem der Anbieter herangezogen werden kann (siehe Absatz 5.5.3).

6. Schlussfolgerungen

Als Resultat dieses Benchmarks liegt eine fundierte Kenntnis über die aktuellen Fähigkeiten und Probleme der Hersteller am Markt vor. Als Entscheidungsgrundlage kann so das weitere Vorgehen im Bereich der AR-Autorentools bestimmt werden. Neben einer klassischen Make-or-Buy-Entscheidung besteht ebenso die Möglichkeit einzelne Aspekte, die besonders positiv aufgefallen sind, in die eigene Entwicklung zu implementieren. Dafür können einzelne Module, wie zum Beispiel das modell-basierte Tracking eines Anbieters, eingekauft werden (siehe Absatz 5.5.4).

5.2 Referenz-Use-Case „Mitarbeiterqualifizierung in der Motormontage“

Um die Basis für den Benchmarkprozess zu legen, ist es notwendig einen Blick auf die aktuellen Anwendungsfälle zu werfen und einen internen Prozess zu bestimmen, welcher als Vergleichs- und Referenzprozess für die externen Benchmarkteilnehmer gilt.

Aufgrund der Komplexität der Technologie und der noch großen Hürden für einen Inline-Einsatz am Montageband, wird hierfür ein Szenario eines Offline-Mitarbeitertrainings herangezogen. Im Rahmen eines laufenden BMW-internen Forschungsprojektes wurde in der Motor- und Hochvolt-Speicherfertigung eine AR-unterstützte Anwendung nutzerfreundlich konzipiert, welche als Pilotprojekt ausführlich getestet wurde und bereits erste Nutznachweise liefert. So wird eine Steigerung der Lernqualität gegenüber Face-to-Face-Trainings in Form eines längerfristigen Lerneffekts festgestellt. Ebenso ergab sich eine Senkung der Montage- und Picking-Fehler um 5-10%. Dadurch reduziert sich der Nacharbeitsaufwand um 60%. (Werrlich et al. 2016, S. 14). Auch die Zufriedenheit der Studienteilnehmer im Umgang mit der AR-basierten Trainingsvariante ist hoch (Werrlich et al. 2016, S. 2). Der Aufbau der Applikation, hinsichtlich der Contentgestaltung und –einbindung, wird im folgenden Abschnitt detaillierter beschrieben.

5.2.1 BMW-interne Entwicklung: BMW AS IS Situation

Die Gestaltung der AR-basierten Mitarbeiterschulung geht auf eine Nachfrageanalyse unter Einbeziehung der produktionsnahen Mitarbeiter zurück, welche zum einen geschult werden und zum anderen für die Trainingserstellung verantwortlich sind (Werrlich et al. 2017c, S. 416). Im Folgenden wird der Fokus auf den Anwendungsfall Qualifizierung in der Motormontage gelegt. Hier sind insgesamt 15 Montageschritte hinterlegt, welche die Mitarbeiter verinnerlichen müssen, um sie in Taktzeit anzuwenden.

In Abbildung 46 ist das User Interface (UI) mit der Übersicht aller Montageschritte dargestellt. Es ist farblich hervorgehoben, in welchem Schritt man sich gerade befindet (gelb) und welche bereits erfolgreich abgeschlossen wurden (grün). Durch Klicken des inneren Kreises auf dem UI kann die Montageschrittübersicht wieder geschlossen werden.

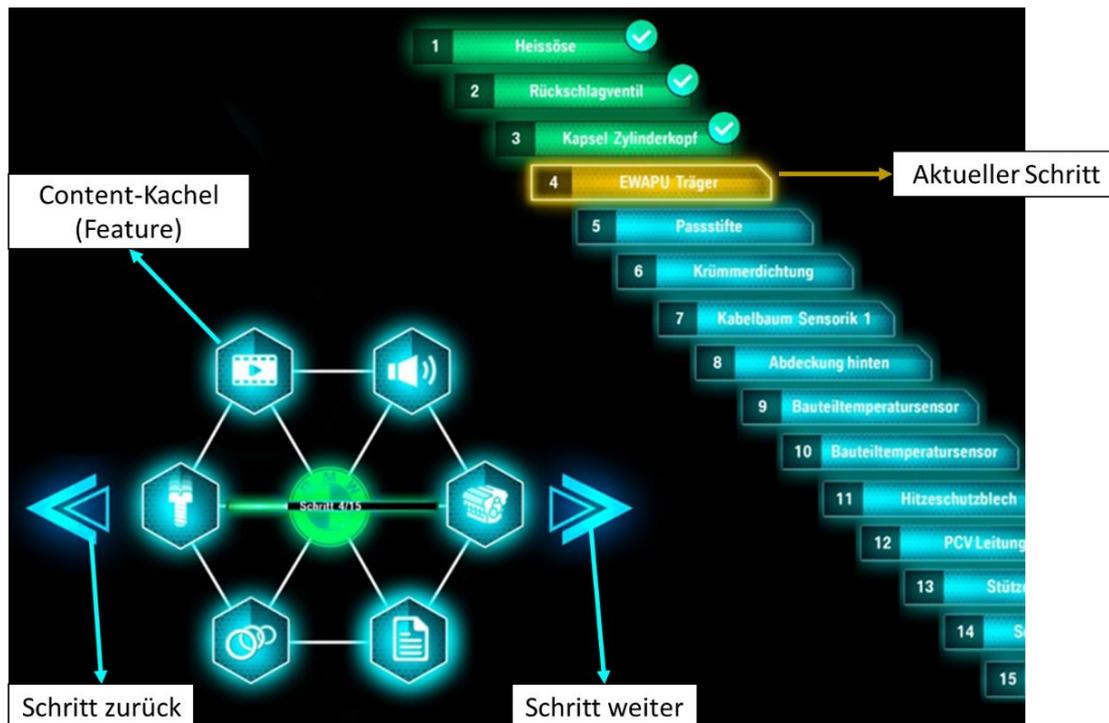


Abbildung 46: Exemplarisches UI der Anwendung mit geöffneter Montageschrittübersicht mit 15 Schritten (Nguyen 2018, S. 12)

Nach der Initialisierung des Trackings mittels Marker wird das UI über dem realen Motorblock eingeblendet (siehe Abbildung 47).

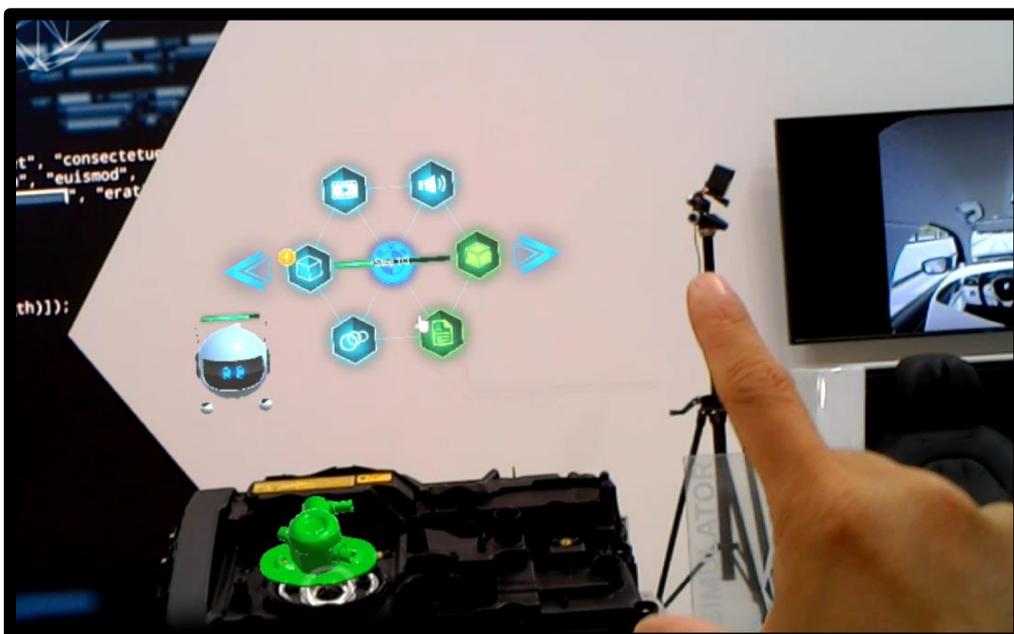


Abbildung 47: Position des UI in der realen Welt, der Avatar Embly und ein eingeblendetes 3D-Objekt (Eigener Screenshot)

Der Nutzer hat die Möglichkeit mit einem Klick auf die einzelnen Kacheln via Gestensteuerung verschiedene Inhalte nach Belieben aufzurufen. Insgesamt werden pro Arbeitsschritt sechs verschiedene Contentoptionen, auch Features genannt,

angeboten. Als Ergänzung zum UI wird ebenso ein Avatar namens „Embly“ links des Menüs angezeigt. Er ist ein Gamifizierungselement für das Szenario und soll den Lernprozess angenehmer gestalten (siehe Kapitel 3.3.3.2).

In Abbildung 48 werden die interaktiven Kacheln und ihre hinterlegten Funktionen genauer beschrieben. Insgesamt werden sechs verschiedene Content-Arten in das Training integriert. Dadurch soll jedem Trainee ermöglicht werden, seine bevorzugte Lernmethode (auditiv, haptisch, visuell) eigenständig wählen zu können.

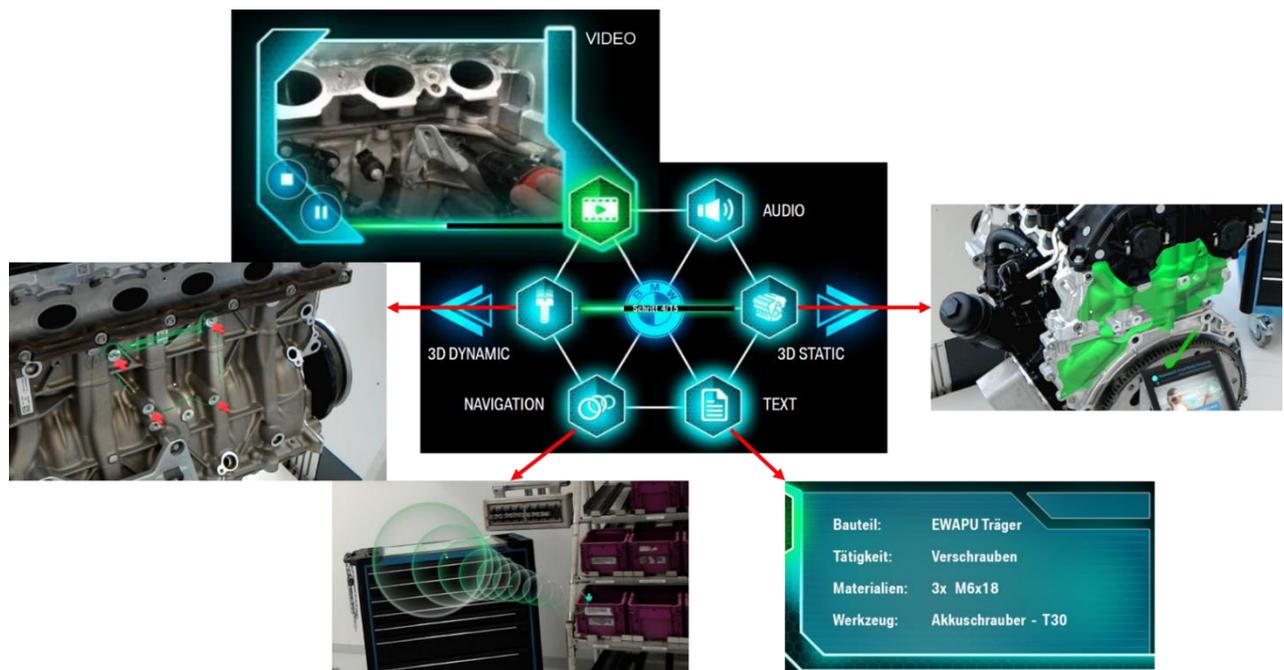


Abbildung 48: Die sechs Features der Anwendungsapplikation im Überblick (angelehnt an Nguyen 2018, S. 6)

Die Kacheln sind mit folgenden Inhalten verknüpft:

Text: Textuelle Informationen über das verwendete Bauteil, die Tätigkeit sowie die notwendigen Betriebsmittel und Werkzeuge.

Video: Video des Montagevorgangs oder wichtiger Bewegungsabläufe.

Audio: Die Beschreibung des Montagevorgangs wird vorgelesen.

3D-Static: Überlagerung des realen Objektes mit einem 3D-Modell.

3D-Dynamic: Animation des 3D-Bauteils und weiteren Hilfsobjekten, wie zum Beispiel Pfeile, die auf wichtige Punkte zeigen.

Navigation: Navigationstunnel zu den Bauteilen und Werkzeugen, die für die Durchführung des Montageschrittes benötigt werden.

Als zusätzlicher Komplexitätsgrad des Contents wird ein mehrstufiges Training in die Applikation integriert (siehe Kapitel 3.3.3). Der Nutzer beginnt bei der erstmaligen Bedienung mit dem Tutorial-Level, um sich an Aufbau und Bedienung der Applikation zu gewöhnen. Nach erfolgreicher Absolvierung des Tutorials beginnt das eigentliche Training. Aufbauend auf dem Beginner-Level, wird der Trainee nacheinander die Level

Intermediate und Expert durchlaufen (Abbildung 49). Mit zunehmendem Schwierigkeitsgrad werden immer mehr Kacheln „gesperrt“ und der Schüler muss mit abnehmender visueller Assistenz die Montageschritte aus dem Gedächtnis heraus ausführen.

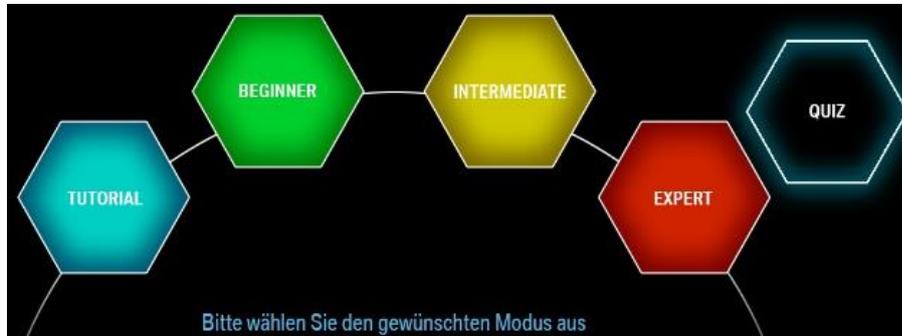


Abbildung 49: Das 4-stufige Trainingsmodell mit zusätzlichem Quizlevel zur Lernzielkontrolle (angelehnt an Werrlich et al. 2017b, S. 2)

Nach erfolgreicher Absolvierung des Expert-Levels wird der Lernvorgang im Quizlevel überprüft (siehe Abbildung 50).



Abbildung 50: Augmentiertes Sichtfeld während des Quizlevels (Werrlich et al. 2017b, S. 3)

Hier müssen die zu montierenden Teile den einzelnen Arbeitsschritten in der richtigen Reihenfolge zugewiesen werden. Erst wenn alle Teile erfolgreich zugeordnet werden können, ist der Lernvorgang abgeschlossen und eine finale Überprüfung der Fähigkeiten durch einen Trainer folgt. Durch die Einbindung der Trainingsmodi inklusive des Quizlevels als Lernzielkontrolle wurde in Nutzerstudien die Sequenzfehleranzahl um 79% gesenkt (Werrlich et al. 2017b, S. 5).

Der in diesem Szenario gewählte, multimodale Trainingsansatz verfügt also über eine komplexe Content-Struktur, in dem der Trainee explorativ lernt und seine bevorzugten Medieninhalte selbst wählt. Mit zunehmendem Lernfortschritt werden immer mehr Inhalte gesperrt, was die Abhängigkeit von der visuellen Assistenz reduziert. Durch eine abschließende Lernzielkontrolle wird der Gedächtniseffekt vergrößert, so dass auch nach einer längeren Zeit die Montageschritte noch präsent sind.

5.2.2 IST-Autorenprozess

Zur Erstellung des im vorherigen Kapitel dargestellten Trainingsszenarios ist ein erheblicher Vorbereitungsaufwand auf Seiten eines IT-Spezialisten (technischen Autors) notwendig. Da dieser vorbereitende Teil des Prozesses in dieser Arbeit nicht im Fokus steht, wird er nur kurz erwähnt. Vor der eigentlichen Trainingserstellung muss zum Beispiel erst das User Interface sowohl funktional als auch gestalterisch geschaffen werden. Ebenso muss das vierstufige Trainingsmodell vorher implementiert werden. Die Gestaltung des UIs und der Popup-Fenster erfolgt in Adobe Photoshop. Die Animationen, wie zum Beispiel das Öffnen der Fenster und die Bewegung des Avatars sowie die Verknüpfung der Schaltflächen wird in Adobe After Effects, Unity3D und Visual Studio festgelegt.

Auf dieser Vorarbeit baut der hier beschriebene IST-Prozess auf. Es existiert also eine Projektvorlage nach den Gestaltungsrichtlinien von Werrlich et al. (2017), welches an neue Trainingsszenarien angepasst werden kann. So kann ein Teil des bereits investierten Erstellungsaufwandes wiederverwendet werden und es muss nicht komplett neu aufgebaut werden.

Nichtsdestotrotz ist der Aufwand für fachliche Autoren, welche nicht über Unity-Kenntnisse verfügen, hoch. In Abbildung 51 ist der gesamte Content-Generierungsprozess dargestellt. Der Übersicht halber wurden einige Prozessschritte zusammengefasst. In Anhang B befindet sich eine ausführlichere Beschreibung für die Erstellung eines Montagetrainings.

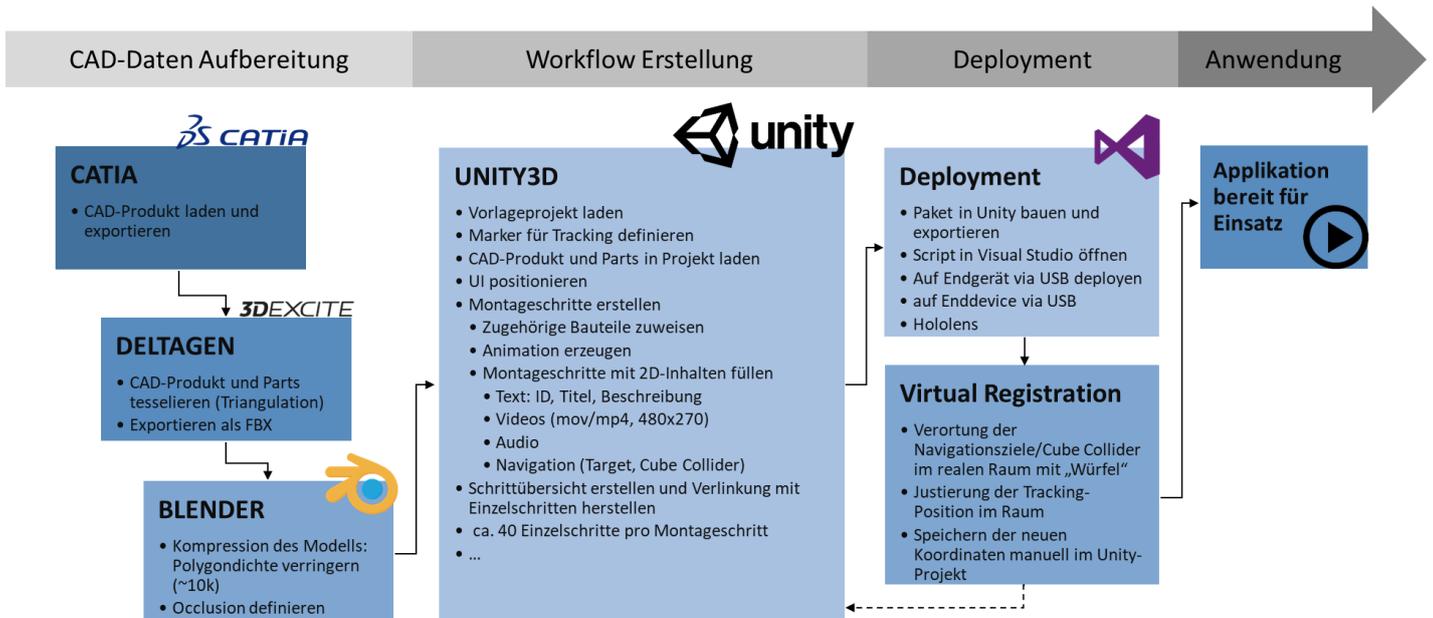


Abbildung 51: Vereinfachte Darstellung des IST-Autorenprozesses basierend auf Unity3D

Da bei BMW durchgängig das CAD-System CATIA im Einsatz ist, müssen von dort die relevanten CAD-Daten entnommen werden. Jedoch ist für die AR-Projektion von CAD-Teilen nicht die gleiche Detailgüte notwendig, wie dies zum Beispiel für Entwicklungsingenieure in der Konstruktion der Fall ist.

Um eine gute Performance der Endgeräte zu erhalten und den Rendering-Aufwand während der Workflow-Erstellung so gering wie möglich zu halten, gilt es deshalb die CAD-Daten soweit wie möglich zu komprimieren und lediglich die relevanten Teilegruppen, welche zum Beispiel aktiv im Training verbaut werden, in erhöhter Qualität bereit zu stellen. Passive CAD-Teile einer Baugruppe, die während des gesamten Trainings nicht zu sehen sind, da sie durch andere Bauteile verdeckt werden, können entweder komplett gelöscht oder sehr stark komprimiert werden.

Da CATIA über keine integrierte Komprimierfunktion verfügt, bei der die Baumstruktur erhalten bleibt, ist es notwendig die CAD-Daten im Modelloptimierer 3DEXCITE DELTAGEN zu optimieren. Hierzu zählen das automatische Suchen und Löschen von überflüssigen Teilegruppen und die Reduzierung der Tiefe von Szenebäumen. Auch können Objekte mit identischen Materialwerten zusammengefasst werden. Dies führt zu geringeren Hardwareanforderungen und somit zu einer deutlichen Steigerung der Performance. Besondere Baugruppen und Teile, welche für das Training relevant sind, sollten von der automatischen Optimierung ausgeschlossen werden. Nach Durchlauf der Modelloptimierung kann die Dateigröße deutlich verringert werden. Der Motorblock, welcher für den Use-Case verwendet wird, hat als komprimiertes CAD-Produkt eine Größe von zwei Gigabyte. Nach der Optimierung beträgt die Größe circa 500 Megabyte.

Im nächsten Schritt wird das CAD-Modell mittels des Animationsprogrammes BLENDER weiter optimiert um eine bessere Visualisierung zu erhalten. Das Programm ist frei erhältlich und verfügt über einen guten Polygondenzimierer, mit dem die Anzahl

der Polygone im Modell deutlich reduziert werden kann, ohne dass die optische Qualität beeinträchtigt wird. Dieser Schritt erhöht vor allem die Darstellungsgenauigkeit wichtiger Bauteile, beziehungsweise markanter Stellen, wie Nuten und Löcher. Zusätzlich wird ein Occlusion-Modell definiert, welches später als transparente Überlagerung auf den realen Motorblock gelegt wird, um eine realistische Ansicht der 3D-Objekte zu ermöglichen. So erscheinen zum Beispiel virtuelle Schrauben in dem realen Motor zu verschwinden und das eingeschraubte Gewinde der Schrauben ist nicht mehr sichtbar.

In Abbildung 52 ist die Polygonreduzierung anhand eines Kuh-Modells dargestellt. Im Falle des Motorblocks wird die Polygon-Anzahl von ca. 500.000 auf ca. 10.000 Polygone verringert. Besondere Points-of-Interest (POIs), wie zum Beispiel Nuten, Löcher und Schrauben werden größtenteils automatisch erkannt und weniger stark reduziert als große, ebene Flächen. Es kann zusätzlich manuell nachbearbeitet werden. Insgesamt wird die Größe des CAD-Modells auf 1/10 der Ausgangsgröße reduziert.

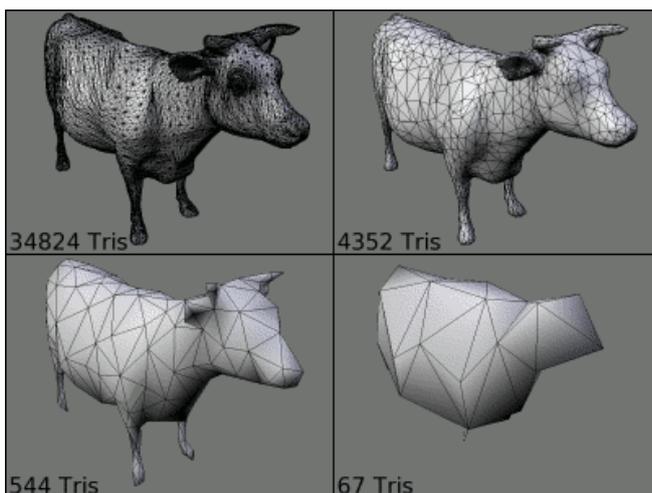


Abbildung 52: Polygonreduktion am Beispiel einer Kuh (Blender3D 2006)

Nachdem nun die CAD-Daten aufbereitet sind, wird das Projekt als FBX-Datei exportiert und es kann mit der Workflow-Erstellung in Unity3D begonnen werden.

Unity3D ist eine Laufzeit- und Entwicklungsumgebung für Spiele (Game-Engine), welche neben dem Computerspielmarkt auch Anwendungen in VR und AR ermöglicht. Insbesondere Kooperationen mit Hardware Anbietern wie Microsoft, HTC oder Oculus führen dazu, dass Unity neben Unreal die führende Game-Engine zur Erstellung von AR/VR-Erlebnissen ist. Der Unity-Editor ist wie die gängigen 3D-Animationsprogramme aufgebaut. Wie in Abbildung 53 zu sehen ist, enthält das Hauptfenster fünf Panels, welche hier kurz beschrieben werden. Die **Szene** ist das Kernstück des Editors, in der die virtuelle Umgebung inklusive der geladenen 2D/3D-Objekte dargestellt wird. Mit dem Cursor können die Objekte manipuliert werden, ohne dass eine Programmierung in C# notwendig ist. Links befindet sich die **Baumstruktur**

des Projekts, in dem alle Objekte, die in der Szene verwendet werden, hierarchisch (Eltern-Kind-Beziehungen) aufgeführt werden. Im **Inspector**-Fenster auf der rechten Seite sind die relevanten Einstellungsmöglichkeiten aufgelistet. Die angezeigte Auswahl ist hierbei kontextsensitiv, und ändert sich somit in Abhängigkeit des selektierten Objektes, welches bearbeitet werden soll. Dazu gehören zum Beispiel Position, Rotation und Skalierung des Objektes sowie Collider, mit denen Interaktionen mit der realen Welt ermöglicht werden können. Im **Projektpanel** sind alle „Assets“ aufgelistet, die in dem AR-Szenario vorkommen. Neben 3D-Daten gehören dazu alle anderen Formen von Content, wie zum Beispiel Video- und Audio-Dateien. Auch gibt es einen Asset Store, aus dem vorgefertigte Objekte, wie Pfeile und Kreise, heruntergeladen werden können. Die Toolbar bietet darüber hinaus, ähnlich der Adobe Suite oder Microsoft Office, eine Palette, die weitere Funktionen, wie Animationen ermöglicht (Suvak 2014, S. 22).

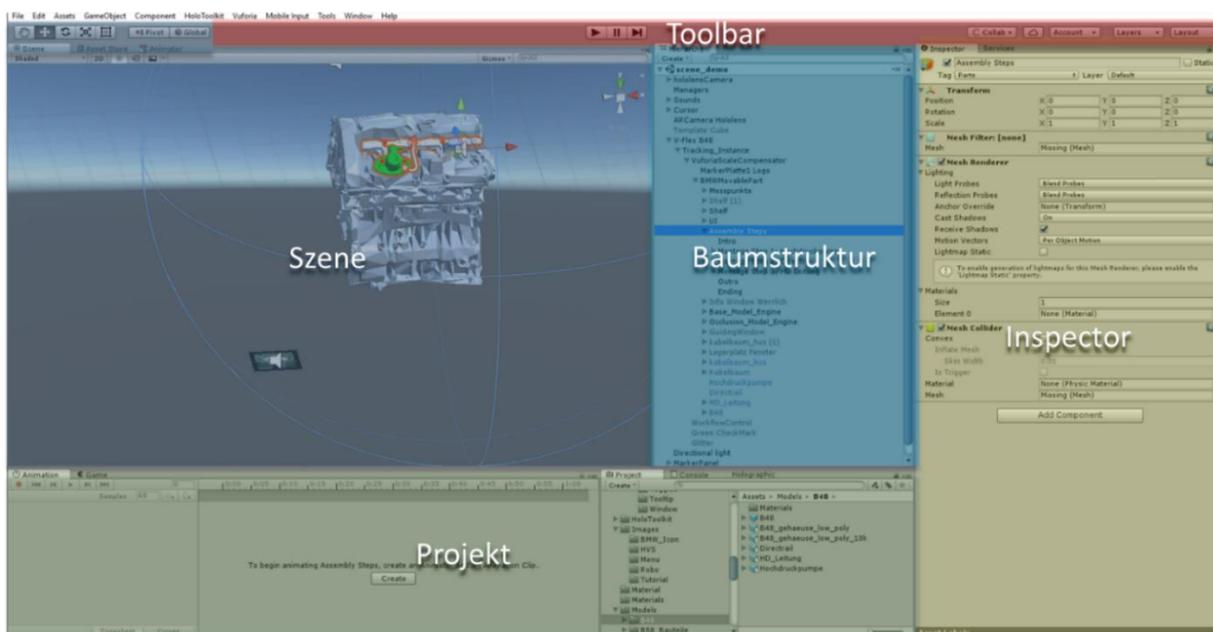


Abbildung 53: Oberfläche des Unity3D-Editors (Quelle: Screenshot BMW 2018)

Im nächsten Schritt wird das Vorlageprojekt mit dem Beginner-Trainingsmodus geladen. Die anderen Trainingsmodi werden darauf aufbauend, durch ein zuvor programmiertes C#-Script automatisch generiert. Das aufbereitete CAD-Modell im FBX-Format wird in das Projekt mit einem Skalierungsfaktor von 0,1 geladen. Das Modell wird in „Base Model Engine“ umbenannt und an die richtige Position in der Baumstruktur eingefügt. Dies ist wichtig, da sonst die bereits bestehenden Funktionen und Beziehungen aus dem Vorlageprojekt verloren gehen.

Das in der Szene bereits integrierte Markerbild, welches für das Marker-basierte Tracking notwendig ist, wird zunächst nur ungefähr in die gewünschte Position, in Bezug auf das 3D-Modell, geschoben. Es ist wichtig, dass der Abstand des Markers

zum virtuellen 3D-Modell in der Szene, dem Abstand des ausgedruckten Markers mit dem realen Modell entspricht. Dies geschieht im Rahmen der virtuellen Registrierung, bei der die exakten Koordinaten ermittelt und in das Unity-Projekt zurückgespielt werden. Der verwendete Tracking-Algorithmus ist eine Lösung des Anbieters Anbieter D. Sie ist für Entwickler aus dem Anbieter D Developer Portal erhältlich. Dort lassen sich eigene Markerbilder generieren, die heruntergeladen und in Unity importiert werden können.

Nachdem das Modell korrekt platziert wurde, muss eine Kopie für ein Occlusion Model angelegt werden. Dieses dient dazu, die Verdeckung von animierten Teilen durch die reale Umgebung zu ermöglichen. Dies macht das Augmented Reality-Erlebnis realistischer. Zum Beispiel sieht man bei festgezogenen Schrauben nur den Schraubkopf und nicht mehr das im Bauteil versenkte Gewinde.

Nun kann das UI mit den sechs Kacheln über den Motorblock verschoben werden.

Im nächsten Schritt werden die einzelnen Bauteile, die in dem Montagetraining verbaut werden sollen, in das Projekt importiert, skaliert und an der richtigen Stelle auf das 3D-Modell positioniert.

Dann werden die einzelnen Montageschritte eingefügt und definiert. Hierbei können entweder alle zusammen erstellt und erst im Nachgang mit Content befüllt werden, oder jeder Schritt einzeln erstellt und direkt mit Content befüllt werden. Um die Animationen der 3D-Bauteile zu erstellen, muss ein Animator mit Hilfe einer Zeitschiene erstellt werden. Hier gibt es einen Anfangs- und Endzustand sowie eine Transformationsbahn, die sich durch die Veränderung der Zustände ergibt.

Videos werden als .MOV/MP4-Dateien importiert und von der Ausgangsauflösung, zum Beispiel 1920x1080 Pixel (Full HD), auf 480x270 Pixel (Quarter Resolution) reduziert um eine reibungslose Wiedergabe auf der HoloLens zu ermöglichen. Audiodateien werden in den Formaten .MP3 oder .WAV importiert.

Zur Erstellung des Navigationsfeatures muss das virtuelle Regal angepasst werden. Hier sind die Bauteile, Betriebsmittel und Werkzeuge abgelegt, welche adressiert werden müssen. Die Position der Teile in der realen Welt muss im Nachgang während der virtuellen Registrierung angepasst werden. Dazu existiert eine vorprogrammierte Würfelfunktion („Movable Cube“), die es ermöglicht via Drag&Drop einen Platzhalter-Würfel im Raum zu verschieben und somit die gewünschte Position in x-y-z-Koordinaten zu erhalten. Diese müssen dann manuell in dem Projekt ergänzt werden, um eine exakte Überlagerung der Realität mit der Virtualität zu ermöglichen. Durch sogenannte „Cube Collider“ kann eine Interaktion mit dem Anwender ermöglicht werden, wenn er mit der Hand in den Würfel greift. Dies ermöglicht zum Beispiel eine Feedbackmeldung, wenn der Trainee das richtige Werkzeug aufgenommen hat. In Abbildung 54 sind die einzelnen Cube Collider eines Regales mit mehreren Fächern

dargestellt. Die Koordinaten der Cube Collider sind zugleich die Ziele der Navigationstunnel.

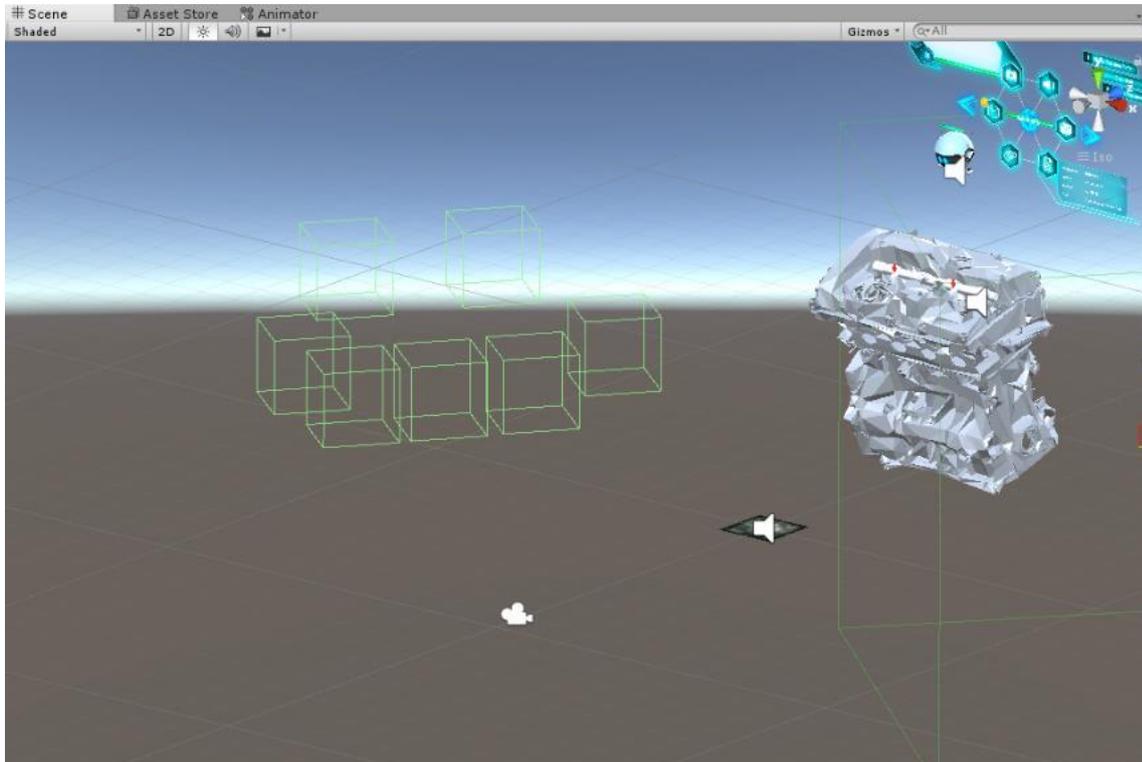


Abbildung 54: Grüne Würfel sind „Cube Collider“, die jeweils einem Bauteil/Werkzeug zugeordnet sind (Quelle: Screenshot BMW 2018).

Jetzt wird die Arbeitsschrittbeschreibung bearbeitet und mit Inhalten wie der WorkstepID, einem Vorgangstitel, einer Textinformation, Links zu Audio- und Videodateien und den vorerst geschätzten Tunnelzielkoordinaten befüllt. In der Montageschrittübersicht muss die Montageschrittbezeichnung zusätzlich eingegeben werden.

Nachdem alle Montageschritte erfolgreich erstellt und mit allen Inhalten befüllt worden sind, wird das Projekt als Paket „gebündelt“ und lokal abgespeichert. Das dabei entstehende C#-Skript wird mit Visual Studio geöffnet. Hier kann das Projekt auf das gewünschte Endgerät gespielt werden, welches über USB mit dem Arbeitscomputer verbunden ist. In diesem Fall ist das gewünschte Endgerät die Microsoft HoloLens.

Nun kann die Applikation auf der HoloLens geöffnet werden. Um das AR-Erlebnis zu starten wird das Markerbild mit der Tracking-Kamera fokussiert. Im Rahmen der ersten Anwendung ist es notwendig die **virtuelle Registrierung** durchzuführen. Dabei wird die Überlagerung der 3D-Bauteile mit dem realen Objekt angepasst. Ebenso werden die genauen Ziele der Navigationstunnel definiert. Dazu sei auf den Abschnitt (Erstellung des Navigationsfeatures) weiter oben verwiesen.

Nachdem das Training durchgespielt und alle eventuell auftretenden Fehler beseitigt wurden, ist die Trainingsapplikation einsatzbereit und kann für die

Mitarbeiterqualifikation verwendet werden. Es ist wichtig, dass der Marker stets in der festgelegten Position zum realen Objekt fixiert ist und auch die Struktur des Arbeitsplatzes erhalten bleibt, zum Beispiel die Position des Regals mit den Bauteilen.

5.2.3 SOLL-Autorenprozess

Nachdem der IST-Prozess genauer dargestellt wurde, wird nun der gewünschte Autorenprozess dargestellt. Hierbei steht die Anwenderfreundlichkeit für die Autoren im Vordergrund.

In Abbildung 55 ist der SOLL-Prozess grafisch dargestellt. Bei der Anlegung eines neuen Trainings wird das CAD-Modell durch den Autor direkt aus CATIA exportiert und in das Autorenprogramm geladen. Die Modelloptimierung und Komprimierung des Modells erfolgt hierbei automatisiert, lediglich der Grad der Komprimierung (Polygonreduktion) kann über eine einfache Schaltfläche gesteuert werden.



Abbildung 55: Vereinfachte Darstellung des SOLL-Autorenprozesses

Abhängig von den Wünschen des Autors kann zwischen modell-basiertem Tracking und marker-basiertem Tracking ausgewählt werden. Bei Auswahl des modell-basierten Trackings kann ein Bauteil bzw. das ganze 3D-Modell als Tracking-Modell definiert werden.

Bei der Wahl eines marker-basierten Trackings kann eine vorgefertigte Bildvorlage durch den Autor gewählt, zum Beispiel ein BMW-Bild oder ein QR-Code, und an dem CAD-Modell platziert werden.

Das Autorenprogramm enthält nur die nötigsten Features und ermöglicht einen schlanken Autorenprozess. Das UI enthält auf der rechten Seite die Szene, in der die virtuelle Umgebung und das 3D-Modell dargestellt werden. Es wird ebenso eine

Baumstruktur angezeigt um konkrete Bauteile direkt adressieren zu können. Das Panel auf der linken Seite gleicht dem UI der Endanwendung. Der Autor erhält mit einem Klick auf die einzelnen Kacheln kontextsensitive Zusatzfunktionen eingeblendet, die für den jeweiligen Inhalt relevant sind. So werden bei einem Klick auf die Animationskachel mögliche vordefinierte Animationspfade vorgeschlagen (z.B. Demontage, Montage).

Mit einem Klick auf das Plus-Symbol, wie in Abbildung 56 dargestellt, können neue Montageschritte hinzugefügt werden. Die Beschreibung des einzelnen Schrittes wird in das rot markierte Feld darunter eingetragen. Die Statusbar in der Mitte des UI bietet den Autoren eine Auskunft über die Anzahl der bereits bearbeiteten Schritte und wie viele noch bearbeitet werden müssen.



Abbildung 56: UI des gewünschten Autorenprogrammes (Nguyen 2018)

Für jeden Arbeitsschritt kann das UI nun mit Inhalten befüllt werden. Die bereits befüllten Kacheln werden farblich hervorgehoben, damit der Autor die fehlenden Inhalte erkennt.

1. **Text:** vordefinierte Textfelder, die manuell ausgefüllt werden (Bauteil, Tätigkeitsbeschreibung, Betriebsmittel, Werkzeug).
2. **Audio:** Es können entweder Audio-Daten via Drag & Drop in das Feld gezogen oder die Option Text-to-Speech ausgewählt werden, mit der die Tätigkeitsbeschreibung automatisch verbalisiert wird.
3. **Video:** Videos können über Drag & Drop in die Kachel geschoben oder aus einem Browsermenü gewählt werden. Das importierte Video wird automatisch komprimiert und in die gewünschte Auflösung reduziert.

4. **3D-Teil Visualisierung:** 3D-Bauteile, die im Arbeitsschritt eingeblendet werden sollen, können in der Szene via Click oder über die Baumstruktur adressiert werden. Durch Ziehen der Teile auf die 3D-Static-Kachel werden die Bauteile zugewiesen.
5. **Animationen:** Bei einem Klick auf die Animationskachel öffnet sich eine standardisierte Animationspalette. Es werden die zu animierenden Bauteile und die durchzuführende Animation ausgewählt (zum Beispiel Translation eines Bauteils aus dem freien Raum an den Ort der Verbauung). Die Dauer und Geschwindigkeit der Animation wird in der Timeline festgelegt (siehe Abbildung 57).
6. **Navigation:** Bei einem Klick auf die Navigationskachel wird die Anzahl der benötigten Navigationsziele definiert. Diese umfassen alle Bauteile, Werkzeuge, und Betriebsmittel, z.B. Schrauben und weitere Hilfsmittel, die während des Montageschrittes aufgenommen werden müssen. Nach Erstellung des Trainingsprojektes müssen die genauen Positionen durch den Autoren im Rahmen der virtuellen Registrierung noch exakt definiert werden.



Abbildung 57: Generierung einer Animation in dem Autorenprogramm mit Einblendung einer Animationspalette und Timeline (Nguyen 2018)

Nachdem alle Kacheln eines Montageschrittes mit Inhalt befüllt wurden, wird mit einem Klick auf den Next-Button der nächste Arbeitsschritt aufgerufen (siehe Abbildung 58).

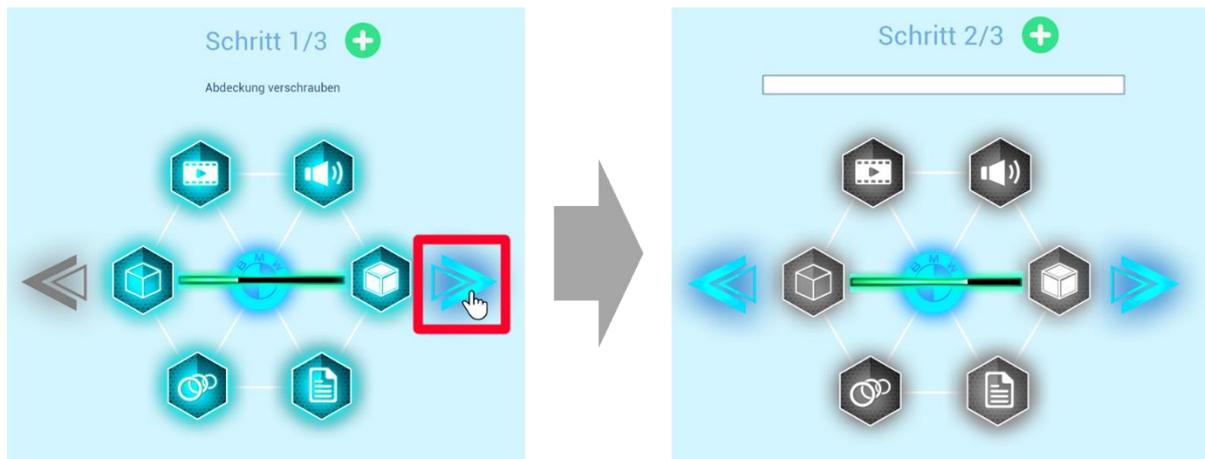


Abbildung 58: Wechsel zwischen einem abgeschlossenen und einem neuen Arbeitsschritt (Nguyen 2018)

Neben der detaillierten Ansicht gibt es die Möglichkeit in eine tabellarische Übersicht zu wechseln. Hier sind alle Arbeitsschritte inklusive der Inhalte aufgelistet und es können fehlende Elemente schnell erkannt werden. Auch kann die Reihenfolge der Arbeitsschritte schnell getauscht werden (siehe Abbildung 59).



Abbildung 59: Tabellarische Übersicht der Arbeitsschritte und exemplarische Vertauschung der Schritte 1 und 2 (Nguyen 2018).

Nach dem das Projekt erfolgreich erstellt wurde, wird es auf einen zentralen Server publiziert. Dieser dient als **Content Management System (CMS)** für fertige Trainingsprojekte und kann von allen berechtigten Autoren aufgerufen werden. Dies ermöglicht beispielsweise die Wiederverwertung von bereits existierenden Trainings als Vorlage für ähnliche Projekte. Zum Beispiel, wenn das gleiche Derivat in einem ausländischen Werk gebaut wird und lediglich die Sprache verändert werden muss

oder wenn ein nahe verwandtes Derivat über die gleichen Inhalte verfügt, wie zum Beispiel die 5er BMW Produktlinie mit Limousine, Touring und GT (G30-32).

Auf dem Endgerät wird eine Klienten-Applikation installiert, mit der auf den zentralen Server zugegriffen werden kann. In einem passwortgeschützten Administratormodus kann der Trainingsersteller oder Trainer auf das Trainingsprojekt zugreifen und diese lokal auf das Endgerät laden. Im Rahmen der virtuellen Registration wird das Tracking-Modell gescannt und die Navigationsziele werden via Gestensteuerung festgelegt. Dazu werden virtuelle „Dummy“-Objekte an die richtigen Stellen verschoben (siehe Abbildung 60).

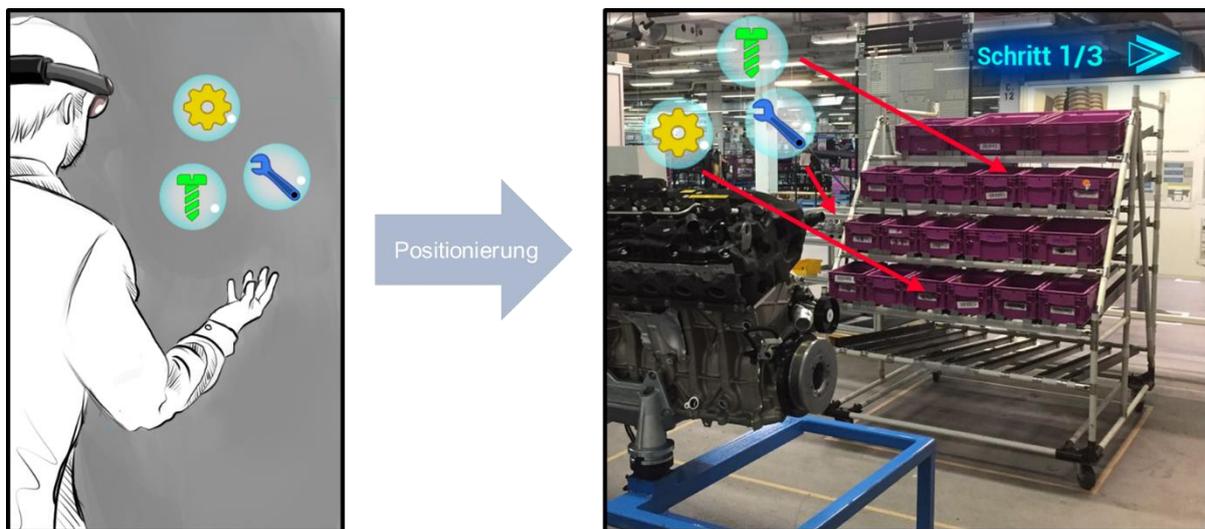


Abbildung 60: Virtuelle Registrierung und Festlegung der Tunnelziele (Nguyen 2018, S. 45)

Nachdem alle Navigationsziele festgelegt wurden, werden die Positionsdaten lokal auf dem Endgerät und ebenso in dem Projekt auf dem CMS gespeichert.

Nun ist die Applikation bereit für den Einsatz in der Qualifizierung. Bei einer Änderung der Trainingsumgebung muss der Trainer erneut in den Administratormodus auf dem Endgerät wechseln und die Navigationsziele anpassen.

5.3 Anforderungskriterien

Für einen fundierten Vergleich der Autorenlösungen externer Anbieter ist der Anforderungskatalog von großer Bedeutung. Ausgehend von den BMW-internen Lösungen und dem gewünschten Autorenprozess werden die Anforderungen zusammen mit den Fachbereichen definiert, die im Benchmark als Leitfaden dienen.

5.3.1 Herleitung der Kriterien

Um einen repräsentativen Anforderungskatalog zu erhalten, ist es notwendig die prozessbeteiligten Mitarbeiter zu konsultieren und ihre Perspektiven und Anforderungen mit in die Bewertung einfließen zu lassen. Aufbauend auf den

Nutzerstudien von Werrlich et al. (2017c), in denen eine Applikation entwickelt wurde, die auf ein möglichst effektives Trainingserlebnis der Trainees zielt, muss der Aufwand für die Erstellung dieser Erlebnisse ebenso berücksichtigt werden.

Dazu muss geklärt werden, wer letztlich der Autor ist und welche fachlichen und technischen Kenntnisse er besitzen sollte.

Abhängig von den Fachbereichen sind dies überwiegend produktionsnahe Mitarbeiter aus der Fertigung, Qualitätsspezialisten, Produktionsspezialisten oder Montageplaner, welche in ihrem Tagesgeschäft primär operativen Aufgaben nachgehen (siehe Abschnitt 3.3.2). Da die Mitarbeiterqualifizierung meistens in Intervallen stattfindet, wenn zum Beispiel ein neues Fahrzeug im Werk anläuft, ist die Erstellung von Trainings eher eine exotische Aufgabe, die in längeren Zyklen stattfindet. Es sind keine Mitarbeiter ausschließlich für die Erstellung von Trainings vorgesehen. Zugleich müssen auch neue Mitarbeiter mit wenig Produktionskenntnissen regelmäßig und fachspezifisch antrainiert werden. Dies geschieht meistens nur kurz offline mit Hilfe der Anlernmappe und der Anweisung eines Trainers sowie inline mit Unterstützung der Vorarbeiter und Springer. Auch müssen komplexere Takte, wie zum Beispiel Kabelbaummontagen, bei denen die Fehlerhäufigkeit besonders groß ist, in gezielten Qualitätsschulungen verinnerlicht werden.

In der Fahrzeugendmontage und Motor- und Aggregatefertigung sind die einzelnen Meistereien für die Qualifizierung der eigenen Mitarbeiter zuständig. Am Hauptband umfasst eine Meisterei ca. 10 Vorarbeiter und 100 Bandmitarbeiter, 5 davon Springer, die bei mehreren Takten aushelfen können (siehe Abschnitt 3.3.2).

Für den Anlauf neuer Derivate werden Anlaufspezialisten, auch Paten genannt, früh im Entstehungsprozess mit einbezogen und verfügen so über eine große Fachkenntnis für die Montageumfänge. Sie erstellen die Schulungsunterlagen für die anderen Mitarbeiter und sind als Trainer auch für das Anlernen zuständig.

Folgende Punkte sind deshalb aus fachlicher Ebene besonders zu beachten:

- Zusätzlichen Arbeitsaufwand für die Autoren/Trainer so gering wie möglich
 - o „Aufwand so groß wie die Erstellung einer PowerPoint oder eines Word-Dokumentes“
- Anzahl der Autorenprogramme so gering wie möglich und die Funktionalität auf das Nötigste beschränken, kein Programmieraufwand
- Aufgrund der hohen Umfänge (ca. 2000-3000 TVGs pro neuem Derivat) sollten so viele Montageinformationen wie möglich aus den Planungstools übernommen werden
- Zeitersparnis:
 - o Wiederverwendbarkeit alter Trainings ermöglichen
 - o Leichte Änderungen/Anpassungen von Montagesequenzen und Produktinhalten
- Hardware darf nicht hinderlich sein (Ergonomie/Gewicht der Smart Glasses, Überkopf- Motorraum oder Kabelbaummontagen)

- Keine permanente Wifi-Anbindung im Produktionsumfeld
- AR-Training muss den Lerneffekt verbessern und den Trainees gefallen

Auf **Planungs- und Methodenseite** sind vor allem diese Punkte von Bedeutung:

- Skalierbarkeit
 - o Standardisierter Qualifizierungsprozess
 - o Viele Autoren und viele Endanwender in einem Werk
 - o Werksübergreifender Einsatz
- Content Management der Trainingsinhalte und Trainingsprojekte
 - o Leichter Zugriff auf die Inhalte (Videos/CAD-Daten/Fertige Trainingsprojekte) in den verschiedenen Werken
 - o Anbindung an Produktions- und Prozessplanungstools (TaktIQ und MAPP) für eine automatische Integration von Montageprozessdaten in das Trainingserlebnis
 - o Content soll kabellos auf Endgeräte kommen

→ Der Vorgang muss so automatisiert wie möglich ablaufen

Aus **IT-Sicht** sind folgende Punkte wichtig:

- gute Integration in die Softwarelandschaft von BMW (Einsatz von Standardtools, die bereits freigeschaltet sind, Nutzen interner Server, Möglichkeit von Schnittstellen zu hauseigenen Prozess- und Produktionsplanungstools
- Durchgängige CAD-Pipeline aus CATIA bis zur AR-Anwendung
- Technisch leicht realisierbare Tracking-Lösung, die stabil funktioniert
- Skalierbarkeit der Lösungen
- Sicherheit der Montage- und Produktdaten (Hardware mit Kameras, Cloudlösungen, Zugriffsberechtigungen, Datenerhebung)

All diese Informationen werden bei der Erstellung des Anforderungskataloges berücksichtigt und im Kernteam diskutiert.

5.3.2 Erläuterung der Kriterien

Aus den Expertenmeinungen und Mitarbeiterbefragungen haben sich folgende Kernkriterien ergeben, die jeweils über einige Unterpunkte verfügen:

Tabelle 1: Hauptkriterien des Anforderungskatalogs mit stichpunktartiger Erläuterung der wichtigsten Inhalte

1	CAD-Pipeline automated processing, tree view, visualization in editor, integrated compression for HoloLens
2	Functions in Editor Workflow creation, -modification, Features (3D, Audio, Video, Animations, Text), Preview
3	User Experience Editor Design, Functionality, Guidance
4	Deployment Content (Server/local), Output Devices
5	Functions of Client (Player) Admin role, Training concept, Gamification, Virtual registration
6	User Experience Player Design, Functionality
7	Tracking Editor: define model, model-based, image-based, Player: stability, accuracy
8	Software operation & integration in BMW landscape scalability, performance, reusability, interfaces, flexibility, experience
9	Costs/ License models licenses, support, customizing, training

Der gesamte Anforderungskatalog mit allen Unterpunkten befindet sich im Anhang (siehe Anhang C) Insgesamt umfasst der Katalog drei Ebenen:

- 9 Hauptkategorien
- 35 Kategorien
- 60 Unterkriterien

Alle dieser Punkte werden im Rahmen des Benchmarks abgefragt und die Lösungen der Anbieter evaluiert.

5.4 Lösungen der Benchmarkteilnehmer

Die Auswahl der Benchmarkteilnehmer erfolgt durch ein Pre-Screening und einer Abfrage von „Knock-Out“ (KO)-Kriterien, die erfüllt sein müssen und im Folgenden beschrieben sind:

Teilnehmer verfügen über eine **CAD-Pipeline**, ein eigenständiges **Autorenprogramm/Editor** (Kein reines Software Development Kit), eine integrierte **Tracking-Lösung** und ein Deployment auf die AR-Brille **Microsoft HoloLens** muss möglich sein.

Insgesamt wurden auf diesem Wege 17 Anbieter recherchiert und diejenigen kontaktiert, die die KO-Kriterien weitestgehend erfüllen. Eine Liste aller Anbieter mit Zusatzinformationen befindet sich im digitalen Anhang. Die Anbieter werden

aufgefordert eine erste Checkliste auszufüllen, die im Groben dem Anforderungskatalog entspricht. Danach verkleinert sich das Feld auf vier Anbieter, wobei einer davon nur über ein Editor-Plugin für das SDK Unity3D verfügt, mit dem Trainingsinhalte erstellt werden können.

Als „Early Adapter“ mit einem alternativen Trainingserstellungsansatz, wird das Startup-Unternehmen Anbieter E noch mit in den Benchmark genommen, obwohl sie über keine CAD-Pipeline verfügen und der Autorenprozess direkt auf der HoloLens stattfindet. Jedoch bieten Sie eine Trainingsgestaltung an, die den fachlichen Anforderungen nahe kommt und eine einfache in-situ Trainingserstellung verspricht.

Im Folgenden werden die Lösungen der Benchmarkteilnehmer erläutert und mithilfe des Anforderungskataloges analysiert

5.4.1 Anbieter A

Anbieter A ist eine französische Firma, die schon seit über 10 Jahren AR-Lösungen vertreibt und vor allem in der Luftfahrtbranche (Dassault Aviation, Airbus, Safran) Erfahrungen sammeln konnte. Seit kurzem expandieren sie auch nach Deutschland und haben unter anderem mit Volkswagen bereits Use-Cases im Bereich der Instandhaltung aufgebaut. Die vorgestellten Projekte sind jedoch größtenteils custom-build und für die Erstellung von AR-Erlebnissen ist eine intensive Betreuung seitens Anbieter A notwendig. Anbieter A verfügt über eine eigene model-based Tracking Lösung, die auf Kantentracking beruht und durch einen Lernalgorithmus stabilisiert wird.

Mit Anbieter A Connect bieten Sie einen Plug-In-Editor für Unity an, in dem Arbeitsschritte definiert und mit Content gefüllt werden können. Der dazugehörige Player auf der HoloLens heißt Anbieter A Player und ermöglicht neben dem Unity-basierten Anbieter A Connect einen Datenaustausch direkt mit Catia Composer oder Teamcenter.

Bevor mit der Workflowerstellung gestartet werden kann, muss das CAD-Modell im Modelloptimierungstool 3DJuump optimiert und die Anzahl der Polygone reduziert werden. Auch wird das Tracking-Modell separat komprimiert, da es eine hohe Qualität für die Kantenerkennung des Trackingalgorithmus benötigt. In dem Tool gibt es fünf vordefinierte Kompressionsstufen, wobei die Stufe 1 die größte Stufe ist und Stufe 5 die feinste. Im Workshop wird die Stufe 2 mit einer Reduktion der Polygonanzahl von 5:1 gewählt (siehe Abbildung 61).

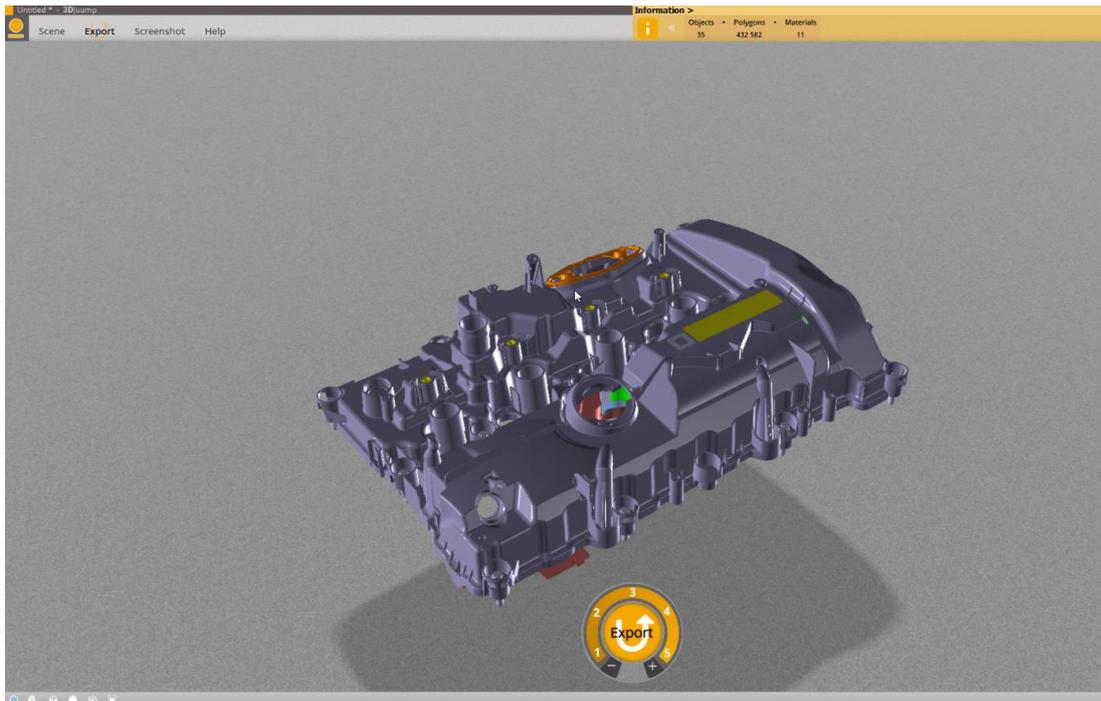


Abbildung 61: UI des Modelloptimierers 3DJuump und die Kompressionsauswahlstufen für den Export (unten) (Quelle: Screenshot Workshop)

Der ganze Prozess der Content-Generierung ist in Abbildung 62 dargestellt. Nach der Aufbereitung wird das CAD-Modell in Unity importiert. Nun wird das Plug-In von Anbieter A aufgerufen, welches den Projekt-Editor bereitstellt. Hier können die einzelnen Arbeitsschritte erstellt und mit Inhalten befüllt werden.

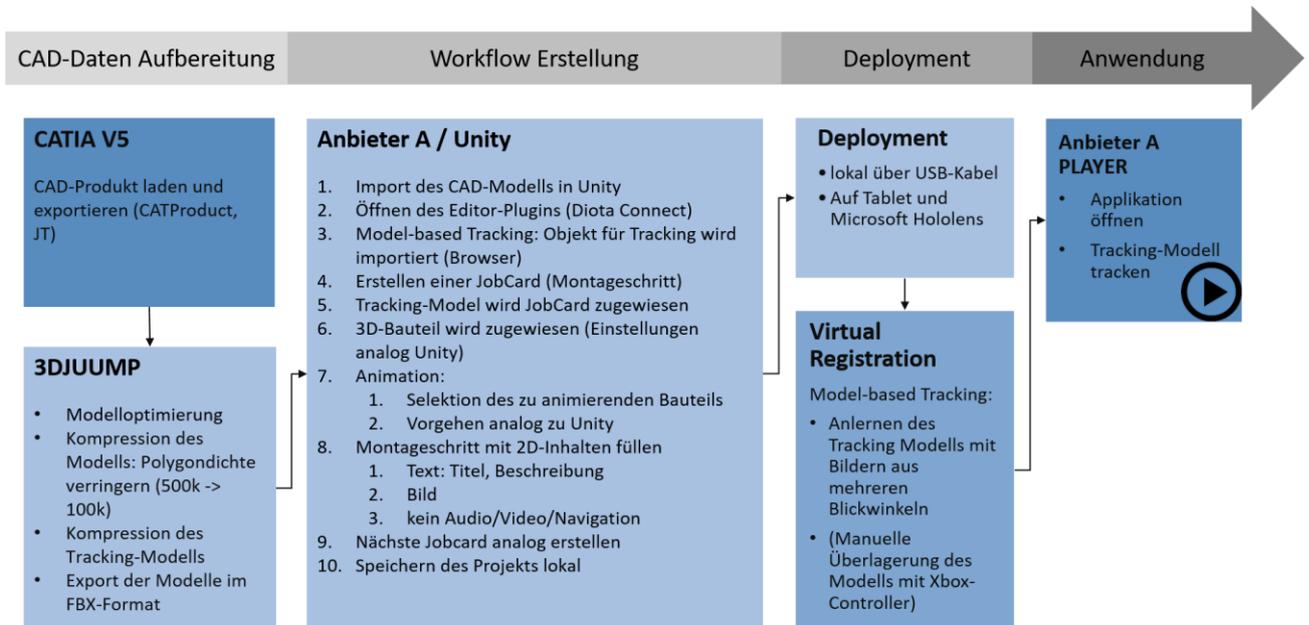


Abbildung 62: Der Autorenprozess mit Anbieter A und Unity

In Abbildung 63 ist das UI des Editorfensters dargestellt, wo der Content eingefügt wird. Es können leicht neue „Job Cards“ (Arbeitsschritte) angelegt werden. Es gibt

jedoch keine Übersicht über alle angelegten Arbeitsschritte. Auch ist bemerkenswert, dass für jede Job Card das Tracking-Modell definiert werden muss. Dies hat den Vorteil, dass bei einem veränderten Arbeitsbereich ein besser sichtbares Objekt für das Tracking verwendet werden kann. Ein Nachteil ist, dass bei jedem Arbeitsschritt neu getrackt werden muss, falls das Tracking-Modell geändert wird. Nach Angabe der Anbieter A-Mitarbeiter geht dies auf eine Anforderung eines Kunden aus der Luftfahrtbranche zurück, da dort die Arbeitsbereiche räumlich teilweise weit auseinanderliegen.

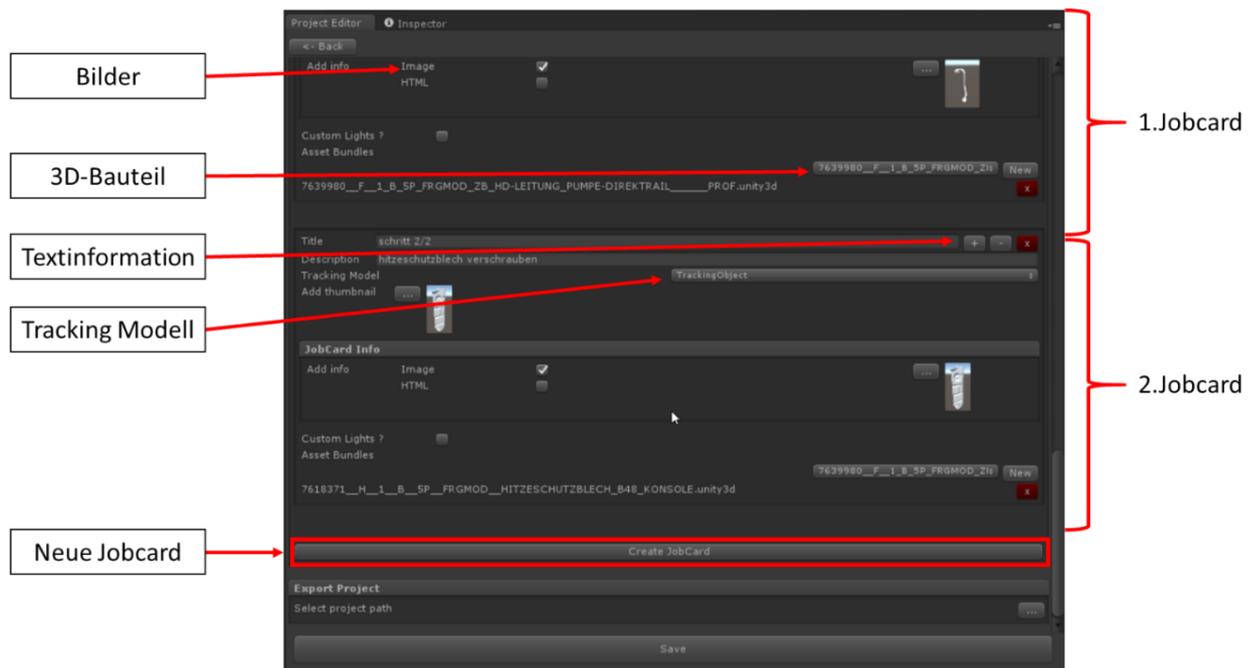


Abbildung 63: Projekt Editor zur Erstellung der Job Cards; Befüllung eines Arbeitsschrittes mit Content (Quelle: Screenshot Workshop)

Im Workshop war es nicht möglich Videos und Audio-Daten einzufügen. Das Einfügen von Bildern und Textfeldern ist hingegen möglich. Die Erstellung von Animationen und die Anzeige von 3D-Bauteilen erfolgt analog zum Unity-Standardvorgehen (siehe BMW AS-IS). Das Einfügen des Navigationsfeatures wurde aufgrund des zeitlichen Aufwandes nicht weiter verfolgt.

Nach dem Speichern wird das Projekt über USB auf die HoloLens gespielt. In der Virtual Registration wird das modell-basierte Tracking durch einen Anlernprozess stabilisiert, bei dem das reale Tracking-Modell aus verschiedenen Perspektiven aufgenommen und mit dem 3D-Trackingmodell überlagert wird. Jedoch gab es im Workshop bei dem modell-basierten Tracking erhebliche Probleme, so dass die Lösung nicht genau evaluiert werden kann. Alternativ wurde das Modell mit einem Xbox-Controller grob über das reale Modell geschoben. Ein späterer Tracking-Test mit einem Surface-Tablet lief erfolgreich. Allerdings ist für eine akkurate und stabile Lösung der Einsatz einer zusätzlichen Halterung mit Spezialkeralinse notwendig.

Der Versuch mit der eingebauten Kamera des Tablets führte zum Absturz der Applikation.

Der Anbieter A Player ist die Applikation auf dem Endgerät, auf die das Trainingsszenario gespielt wird. Es besitzt ein charakteristisches User Interface, welches nur bedingt verändert werden kann (siehe Abbildung 64).



Abbildung 64: UI des Anbieter A Players auf dem Tablet; Rechts sind die Job Cards abgebildet, links werden zusätzliche Funktionen, wie zum Beispiel der Tracking Anlernmodus dargestellt (ANBIETER A 2018)

Im Workshop konnte Anbieter A nur begrenzt die Möglichkeiten aufzeigen, die in der Firmenpräsentation vorgestellt wurden. Allerdings gab es anfangs Probleme mit dem zur Verfügung gestellten CAD-Produkt, da die einzelnen Bauteile des Produktes eine fehlerhafte Orientierung hatten und erst manuell an die richtige Position geschoben werden mussten. Da der Editor Anbieter A Connect auf Unity basiert, sind noch viele Funktionen eines SDKs vorhanden, die für den hier vorliegenden Anwendungsfall zu komplex sind.

5.4.2 Anbieter B

Das Unternehmen Anbieter B besitzt mit der Common Augmented Reality Plattform (CAP) ebenso eine eigene Lösung zur Erstellung und Verwaltung von AR-Erlebnissen. Durch konzerninterne Anwendungsfälle und viele Projekte mit OEMs konnten Sie schon einige Erfahrung im Konzernumfeld sammeln und haben ihr Portfolio auf industrielle Kunden maßgeschneidert. Das ganze CAP-Softwareumfeld basiert auf den drei Komponenten „Authoring, Delivery und Runtime“ (Anbieter B 2018, S. 16). Für das Tracking und den 3D-Autorenprozess werden die Lösungen von Drittanbietern, wie RE'FLEKT und Siemens Cortona3D, integriert. Der gesamte Autorenprozess ist in Abbildung 65 dargestellt.

Die CAD-Daten aus Catia werden exportiert und in Cortona3D RapidAuthor importiert. Beim Import kann bereits eine automatische Komprimierung und eine Reduzierung der Polygonanzahl eingestellt werden. Nun können Animationen erstellt oder besondere POIs am CAD-Modell markiert werden, wenn der Workflow bereits bekannt ist. Da dies im Workshop noch nicht der Fall ist, wird zuerst im XML-Editor die Workflowstruktur festgelegt und die einzelnen Arbeitsschritte mit 2D-Inhalten, wie Montageschrittinformationen, Bildern oder Videos befüllt. Ebenso werden im XML-Code bereits Referenzpunkte zum Einfügen der Animationen und 3D-Bauteilüberlagerungen festgelegt. Die eigentliche Verlinkung findet im Anschluss im Project Planner statt. Der Autor benötigt für die Erstellung des Workflows XML-Kenntnisse, jedoch gibt es auch die Möglichkeit eine Maske über den XML-Text zu legen und somit eine gewöhnliche Textbearbeitungsfläche, ähnlich einem Worddokument, bereitzustellen. Im Rahmen des Workshops war eine Erstellung einer solchen Maske aufgrund des Aufwandes jedoch nicht möglich.

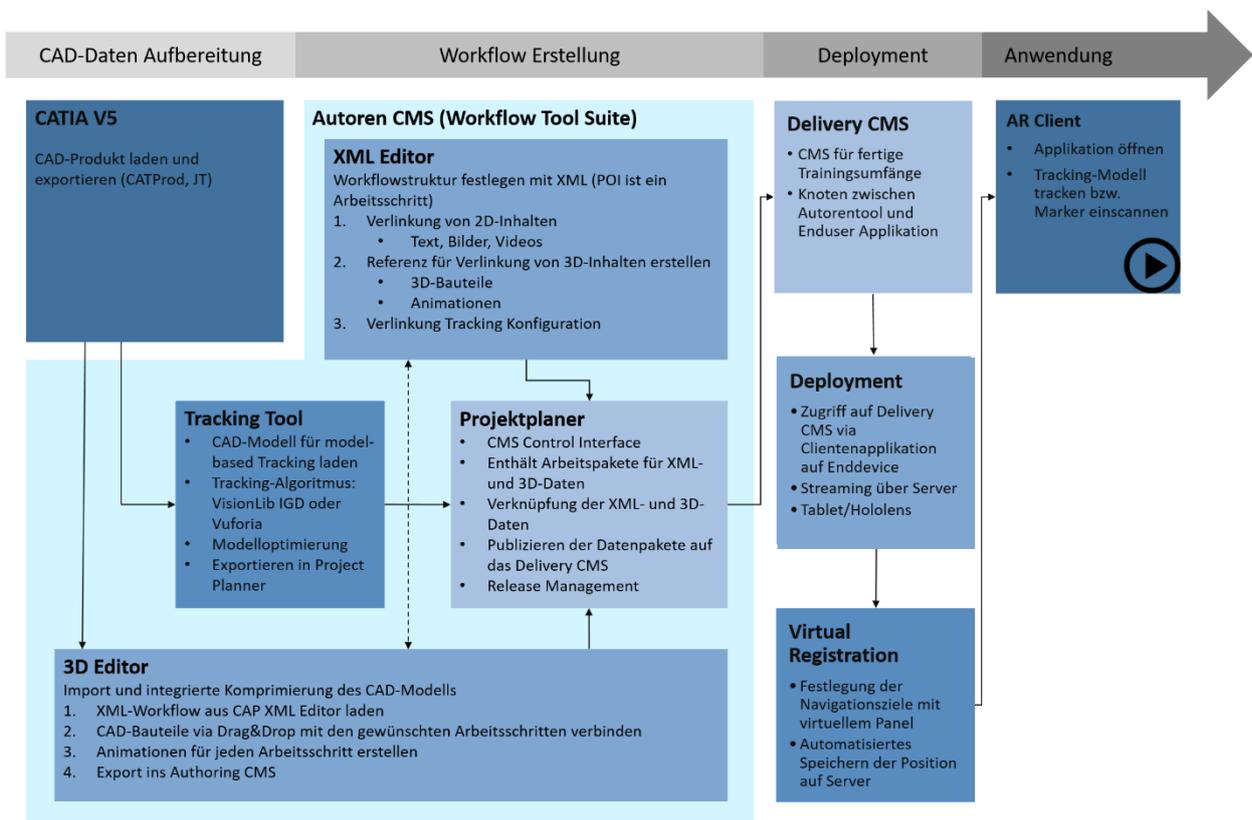


Abbildung 65: Der Autorenprozess der Anbieter B

In Cortona3D werden die Animationen mit Hilfe einer Timeline koordiniert. So kann das Animieren der Bauteile und Schrauben etc. zeitlich gesteuert werden. Es ist hierbei eine schnelle und intuitive Animationserstellung möglich, jedoch ebenfalls eine gewisse Eingewöhnungszeit notwendig (siehe Abbildung 66).

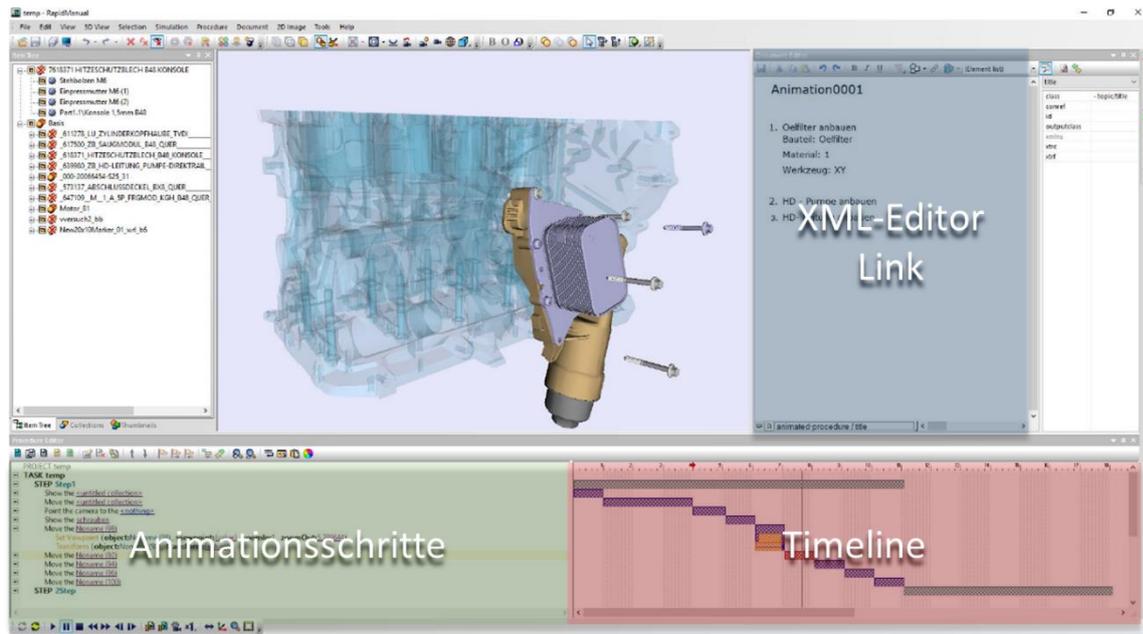


Abbildung 66: Oberfläche der 3D-Autorensoftware Cortona3D RapidAuthor (Quelle: Workshop ANBIETER B)

Neben der Erstellung von Animationen, können in Cortona3D auch POIs am CAD-Modell definiert werden. An einem POI findet ein Arbeitsschritt statt und es werden die zugehörigen 2D-Informationen angezeigt, die zuvor im XML-Editor definiert wurden. Nachdem das Montagetraining inhaltlich vollständig ist, findet die finale Verlinkung des Inhalts im Project Planner statt. Hier werden die Platzhalter als XML-Code mit den Links zu den Animationsdaten, POI-Daten und dem Tracking-Modell hergestellt. Ein CAP-Szenario besteht aus folgenden Elementen:

1. XML-Datei mit allen 2D-Inhalten wie Textinformationen, Verlinkung zu Bildern oder Videos
2. 3D-Objekt
3. Tracking-Konfiguration

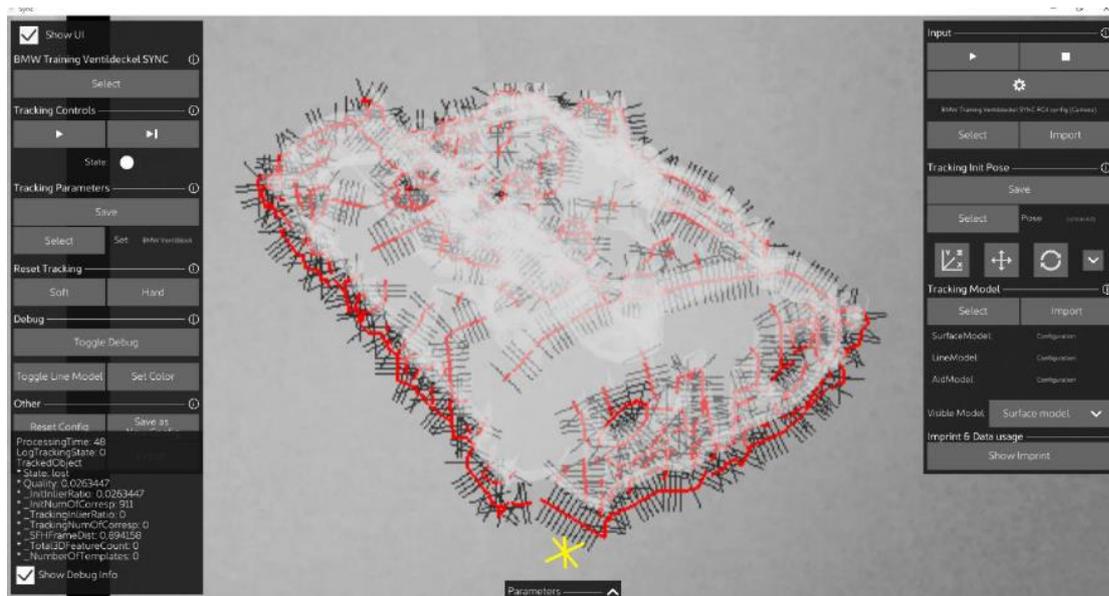


Abbildung 68: Das UI des Tracking Tools (Anbieter B 2018)

Nachdem der Workflow erfolgreich erstellt wurde, wird das Trainingsprojekt auf dem Delivery CMS veröffentlicht. Bei einer Änderung vorhandener Trainings wird mit Release-Nummern gearbeitet, so dass jede Änderung und der verursachende Autor dokumentiert wird. Das Delivery CMS ist ein zentraler Server, der entweder bei ANBIETER B oder beim Kunden steht. Er dient als Runtime Server für die Klientenapplikationen, die auf den einzelnen Endgeräten installiert sind. Mit Ihnen werden die AR-Erlebnisse direkt über den Runtime Server gestreamt, ohne dass eine lokale Kopie auf dem Endgerät gespeichert werden muss. Dies hat den Vorteil, dass die Rechenleistung durch den Server zur Verfügung gestellt wird und das Endgerät weniger Leistung benötigt. Auf der anderen Seite ergibt sich der Nachteil, dass jederzeit eine WLAN-Verbindung notwendig ist, die einen ausreichenden Datenstrom ermöglicht, um ein Trainingsprojekt zu streamen. Auch muss der Server bei höherer Klientenanzahl entsprechend leistungsstark sein. Laut Anbieter B ist eine Speicherung einer lokalen Kopie eines Trainings jedoch theoretisch leicht konfigurierbar. In Abbildung 69 ist das UI der Klientenapplikation auf einem Endgerät dargestellt.

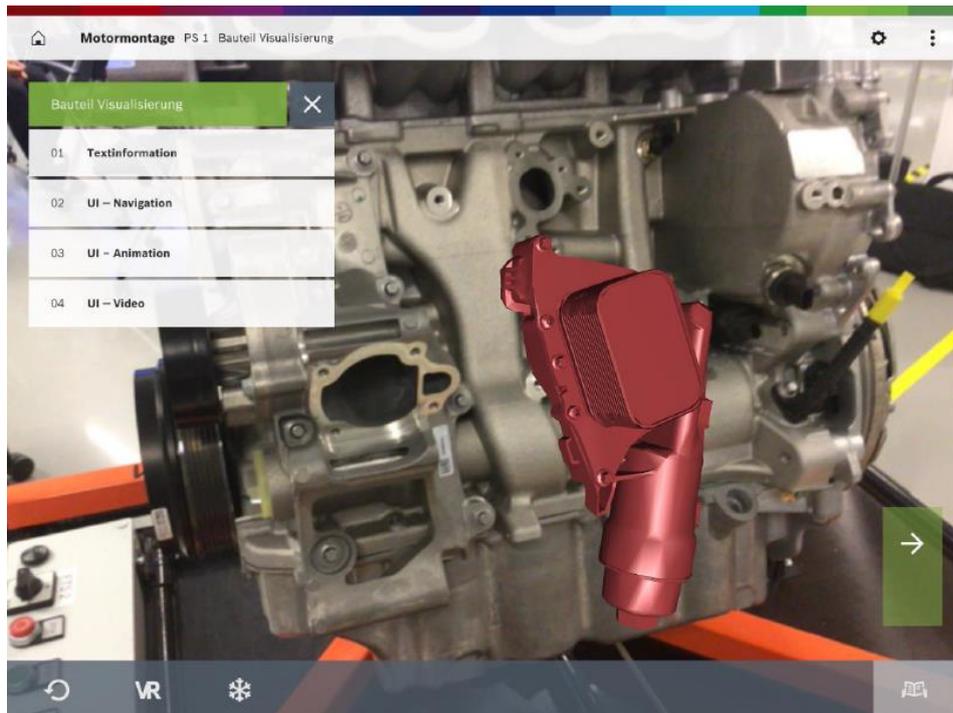


Abbildung 69: AR Client auf einem Tablet mit angepasstem UI (Anbieter B 2018)

Es ist zu erkennen, dass die Schaltflächen des UI den Anforderungen von BMW nachempfunden sind. Die einzelnen Schaltflächen enthalten die jeweiligen Content-Informationen. Mit einem Klick auf den VR-Button, unten links in der Leiste, wird das AR-Szenario unabhängig von der realen Umgebung visualisiert, es sind also nur die virtuellen Komponenten sichtbar.

5.4.3 Anbieter C

ANBIETER C ist ein Startup aus München, welches sich auf die Erstellung von AR-Erlebnissen für Industriekunden in den Bereichen Produktion, Qualitätssicherung, Wartung, Reparatur, Installation und Schulung spezialisiert hat. Ihre Kernprodukte bilden die beiden Autorenprogramme STEPS und PINS. Ersteres dient der leichten Erstellung von 3D-Animationen mit CAD-Daten ohne große Vorkenntnisse zu besitzen. Letzteres verspricht einen erleichterten Autorenprozess, da der Umgang mit CAD-Daten minimiert wird und eine Visualisierung von 3D-Modellen und Animationen nicht vorgesehen ist. Stattdessen werden nur 2D-Inhalte an definierten POIs dargestellt. Strategisches Ziel des Unternehmens ist es, die beiden Programme zu kombinieren um eine ganzheitliche Lösung anbieten zu können. Zur Zeit des Workshops war diese Lösung noch nicht verfügbar, weshalb der Fokus vor allem auf der Anwendung von PINS liegt, da diese auf der HoloLens dargestellt werden kann. Der Prozess der Animationserstellung mit STEPS wird dennoch berücksichtigt.



Abbildung 70: Der Autorenprozess mit ANBIETER C

In Abbildung 70 ist ein Überblick über den Autorenprozess von ANBIETER C dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Prozess mit nur zwei Anwendungen auskommt. STEPS und PINS verfügen über einen integrierten Polygondeszimierer und 3D-Modelloptimierer, so dass die CAD-Daten ohne weiteres aus CATIA direkt importiert werden können. Ein CAD-Modell mit der Dateigröße von 1000 MB wird so komprimiert, dass es auf der Endanwendung nur noch 50 MB groß ist. Trotz der Komprimierung von 1:20 ist die Qualität des Modells hinreichend. Es wird im FBX-Format importiert. Zwar werden in PINS keine CAD-Daten zur finalen Visualisierung verwendet, jedoch sind sie zur Platzierung der Pins in der Autorensoftware notwendig. Nachdem das Modell in PINS importiert und automatisch komprimiert wurde, wird der Marker für das image-based Tracking an dem 3D-Modell angeheftet. Dies ist für die virtuelle Registrierung beim Start der Endanwendung notwendig. Die Stelle kann frei am Objekt gewählt, jedoch nicht frei im Raum, losgelöst vom Objekt platziert werden. Als Tracking-Algorithmus können die Lösungen verschiedener Anbieter wie Anbieter D oder Fraunhofer IGD VisionLib verwendet werden. Hier wird das Tracking von Anbieter D bevorzugt.

Nachdem die Tracking Konfiguration abgeschlossen ist, wird die erste Stecknadel (Pin) an dem 3D-Modell angebracht. Der Pin ist ein POI und kann mit 2D-Inhalten wie Montageanweisungen, Bildern und Videos befüllt werden. Nachdem alle relevanten Informationen verlinkt und eingegeben sind, kann ein weiterer Pin gesetzt und befüllt werden. Innerhalb eines Montageschrittes können mehrere Pins gesetzt werden. Um einen neuen Schritt zu erstellen muss auf „Next Section“ geklickt werden und es erscheint eine neue, Pin-freie Arbeitsfläche (siehe Abbildung 71).

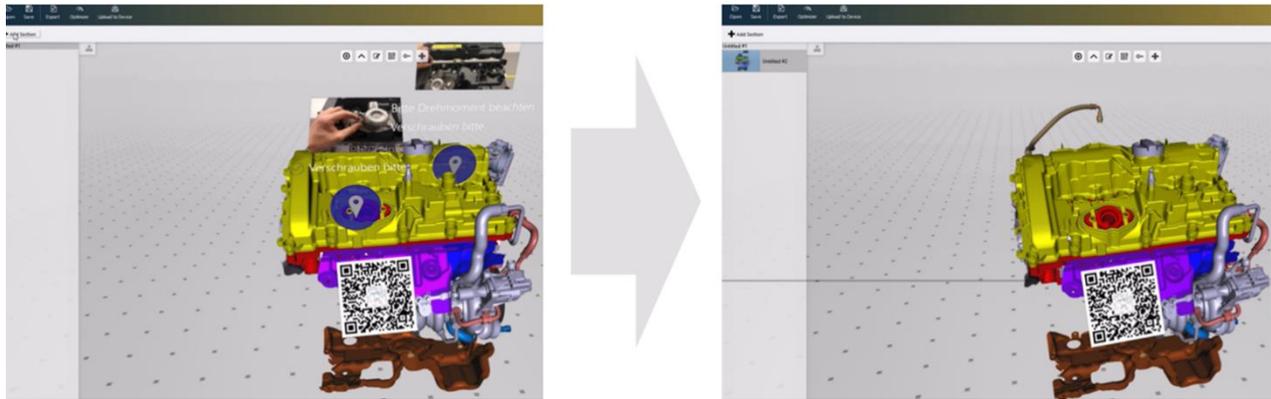


Abbildung 71: PINS - Erstellen eines neuen Arbeitsschrittes; links: Bereits befüllter Arbeitsschritt mit zwei POIs; rechts: Neuer ungefüllter Arbeitsschritt (Quelle: Workshop ANBIETER C)

Nach erfolgreicher Erstellung des Montagetrainings, wird das Projekt mit einem Klick auf Export auf das Endgerät gespielt und kann direkt verwendet werden. Die virtuelle Registrierung entfällt bei diesem Prozess, da es keine Navigationstunnelziele zu setzen gibt und auch die Pins nicht nachjustiert werden. Die „Registrierung“ findet nur am virtuellen Objekt am Desktop-Arbeitsplatz statt.

Auf der Endanwendung gibt es zwei Modi: Den Trainee-Modus in dem das Training ausgeführt und den Beobachter-Modus in dem das Sichtfeld eines anderen Trainees mit eigenem HMD eingeblendet wird. Dies ermöglicht eine vereinfachte Kommunikation zwischen Beobachter und Trainee, da das AR-Erlebnis über den identischen Point-of-View gesehen wird.

In STEPS werden die Animationen erstellt. Hierbei wird das CAD-Modell analog zu PINS in das Programm geladen und automatisch komprimiert. Zur Erstellung eines Animationsschrittes müssen nun die zu animierenden Bauteile ausgewählt werden. Dies kann über die Visualisierung im Szenenfenster erfolgen oder über die Baumstruktur des CAD-Modells. Nachdem alle relevanten Bauteile selektiert wurden, kann aus drei Animationsvorlagen die passende gewählt werden (siehe Abbildung 72):

1. Assembly Interaction: Das Bauteil wird manuell von der richtigen Position verschoben und bewegt sich wieder auf die Nullposition zu (Translatorische Bewegung entlang einer Hauptachse im Raum)
2. Disassembly Interaction: Das Bauteil bewegt sich von der Nullposition auf einen entfernten Punkt (Translatorische Bewegung entlang einer Hauptachse im Raum)
3. Move Interaction: Diese Animation besteht aus einem Rotations- und einem Translationsanteil und kann frei definiert werden (anhand eines Hauptachsenpanels)

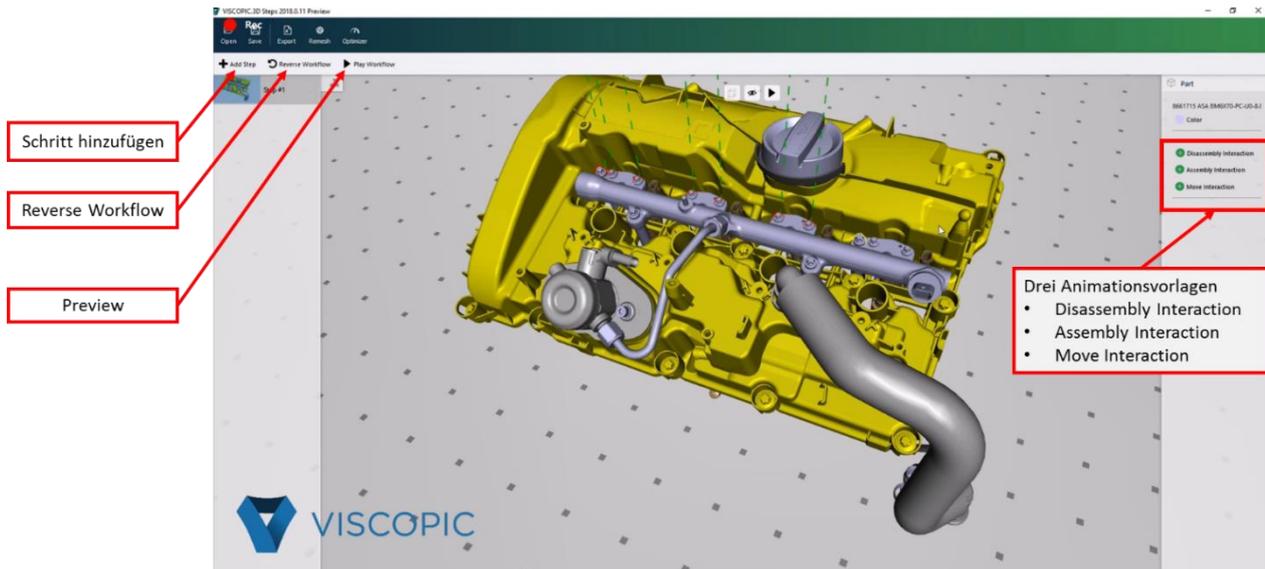


Abbildung 72: UI des Programms STEPS; links die Schrittübersicht und die Optionsfelder, rechts die Animationsvorlagen (Quelle: Workshop ANBIETER C)

Nachdem der Arbeitsschritt vollständig animiert wurde, kann der nächste Arbeitsschritt erstellt werden. Die Ausgangssituation des vorherigen Schrittes bleibt dabei erhalten. Im Workshop wurden alle Schritte mit der „Disassembly Interaktion“ erstellt und anschließend mit dem Befehl „Reverse Workflow“ umgekehrt um den Montagevorgang in der richtigen Reihenfolge darzustellen.

Die Arbeitsschritte werden dabei ebenfalls vertauscht. Es ist also wichtig, dass der Workflow anfangs in umgekehrter Reihenfolge erstellt wird (Abbildung 73). Ein nachträgliches Vertauschen der Arbeitsschritte ist ebenfalls möglich, jedoch muss dabei auf die logische Verbaureihenfolge geachtet werden, da sonst eventuell Bauteile ausgeblendet sind, die zu sehen sein sollten.

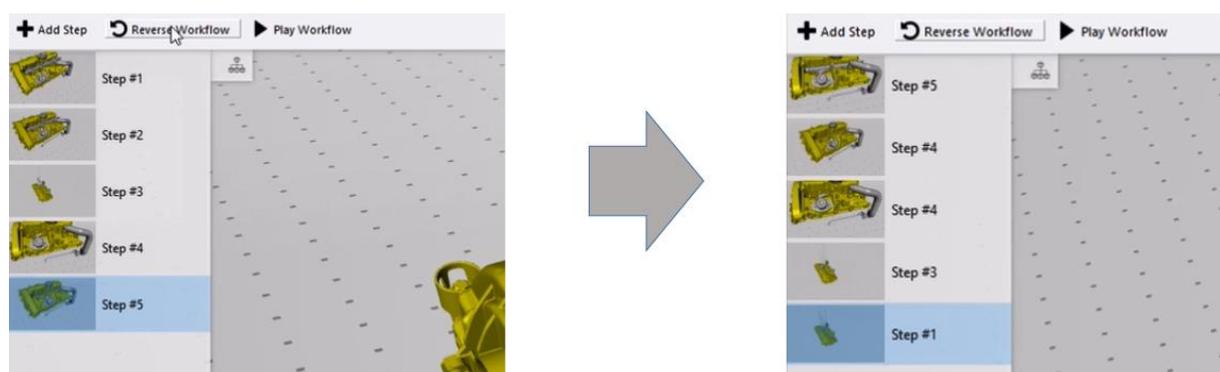


Abbildung 73: STEPS - Funktion zur Umkehrung der Arbeitsschritte. Links vorher, recht nachher (Quelle: Workshop ANBIETER C)

Im Anschluss wird das Animationsprojekt gespeichert und in PINS exportiert. Diese Funktionalität wird allerdings noch nicht unterstützt und ist deshalb in der Workflow-Grafik (siehe Abbildung 70) nur strichliert dargestellt. Im Workshop wurden die 3D-Animationen und 3D-Bauteile nicht auf die HoloLens kopiert.

In custom-build Use-Cases kann dies jedoch mit Hilfe von ANBIETER C schon umgesetzt werden. Die CAD-Daten werden dabei vom Anbieter extern aufbereitet und mit einem XML-Skript in das Projekt implementiert.

Generell ist der Workflow-Ansatz aufgrund der intuitiven Bedienung und der bereits eingeschränkten Funktionalität der Gestaltungsprogramme vielversprechend, da somit eine vereinfachte Bedienung durch den Trainingsersteller ermöglicht wird. Im Backend gibt es allerdings noch keine serverintegrierende Lösung, bei der Trainingsprojekte zentral gespeichert und abgerufen werden können.

5.4.4 Anbieter D

Anbieter D ist ein globales Technologieunternehmen und bietet Technologieplattformen und –lösungen für unterschiedliche Bereiche entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Unternehmen an. Neben den Software-Lösungen für CAD, Product Lifecycle Management, Application Lifecycle Management und Service Lifecycle Management bietet ANBIETER D im Bereich des IoT die ThingWorx-Technologieplattform an. Ihr zugehörig ist auch das, mit der Akquise von Anbieter D integrierte AR-Portfolio, welches aus der Anbieter D Engine (SDK) für Entwickler, Anbieter D Studio, ein Autorenprogramm für Unternehmen, und Chalk, einer Plattform für AR-unterstützte Remote Assistance Anwendungen, besteht (ANBIETER D 2018b).

In Abbildung 74 ist der Standard-Autorenprozess für die Erstellung von AR-Erlebnissen mit Anbieter D abgebildet. Im Workshop wurde das CAD-Modell, aufgrund einer fehlenden CATIA-Lizenz auf dem Demonstrationscomputer, mit dem Theorem Adapter in das PVZ-Format konvertiert, um weiter verarbeitet zu werden. Im Regelfall können die Daten, ohne Umwandlung, direkt aus CATIA exportiert werden.

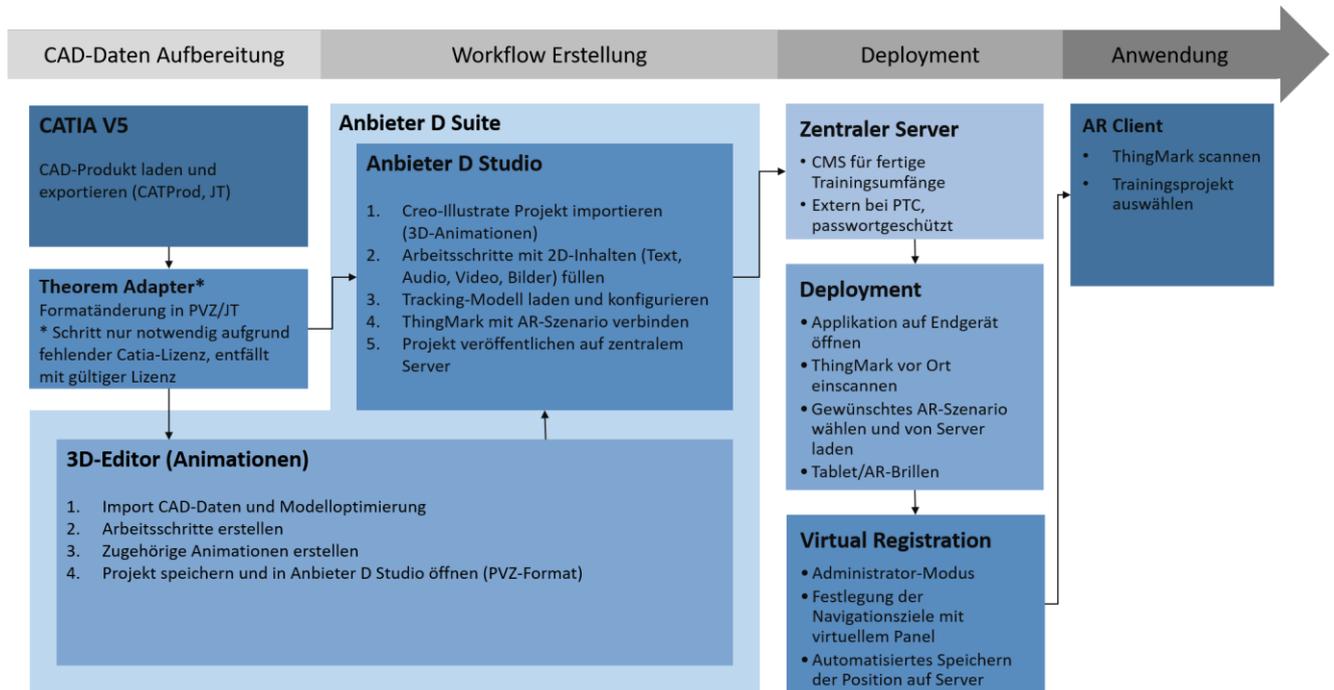


Abbildung 74: Der ANBIETER D-Autorenprozess mit 3D- und Content Editor

Im nächsten Schritt wird das CAD-Modell in das Animationsprogramm Creo Illustrate geladen und automatisch komprimiert. Auch eine Polygondezimierung erfolgt. In Creo Illustrate werden die Animationsschritte des 3D-Modells erstellt, welche dann als Ausgangsprojekt für die weitere Bearbeitung mit Anbieter D Studio dienen. Zur Erstellung einer Animation muss das zu animierende Bauteil ausgewählt und dessen Ausgangs- und Zielzustand definiert werden. Dadurch ergibt sich der Transformationspfad des Bauteils. Über die Timeline kann die Dauer der Animation festgelegt werden (siehe Abbildung 75). Nachdem alle Schritte festgelegt wurden, wird auf Anbieter D Studio ein neues Projekt unter Angabe des gewünschten Endgerätes (Tablet, 2D-Eyewear, 3D-Eyewear) angelegt und die aus Creo Illustrate exportierte CAD-Datei (PVZ-Format mit Animationsinformationen) kann als „Ressource“ importiert werden

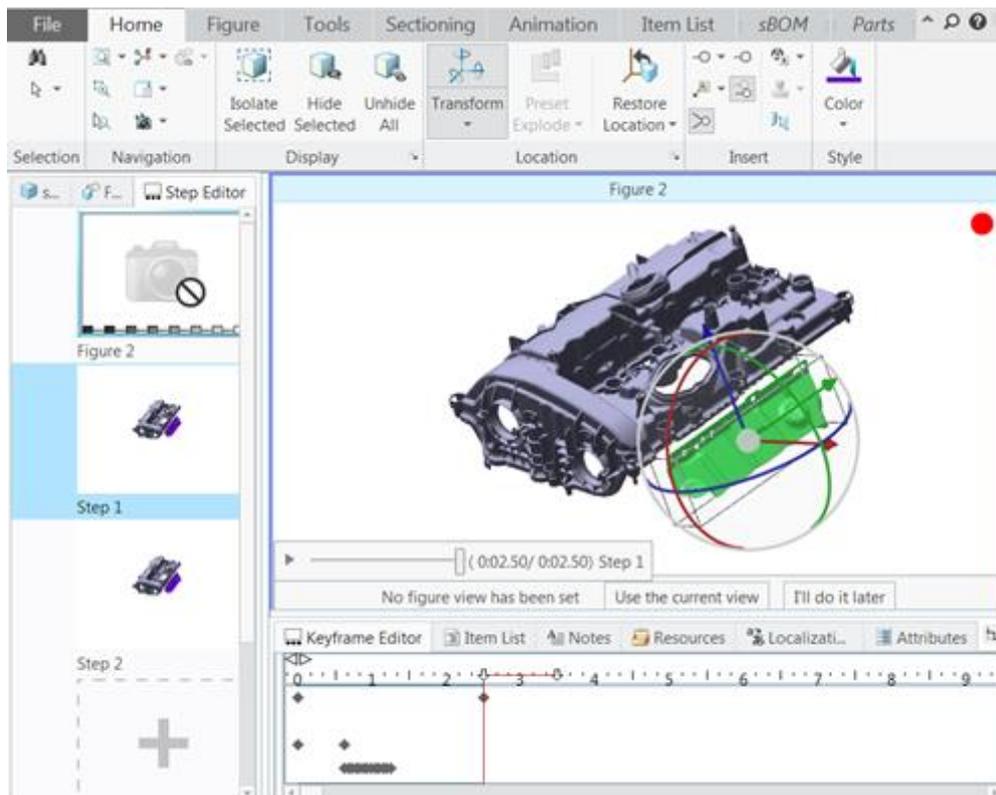


Abbildung 75: UI des 3D-Editors; Festlegung des Animationspfades über die Timeline (Quelle: Workshop Anbieter D)

In Anbieter D Studio kann nun die Tracking-Konfiguration erfolgen. Dazu muss im ersten Schritt dem Projekt ein „ThingMark“ zugewiesen werden. Dieses dient später zur Initialisierung des Projektes, damit das gewünschte AR-Erlebnis auf das Endgerät geladen wird.

Als Nächstes muss entschieden werden, welche Art von Tracking für den Anwendungsfall die bevorzugte Variante ist. Insgesamt stehen in Anbieter D Studio fünf Ansätze zur Verfügung, die aber im Wesentlichen auf die bekannten Kategorien marker-basiertes und modell-basiertes Tracking zurückzuführen sind (siehe Abbildung 76):

1. **Image Targets** – Marker-basiertes Tracking. In Anbieter D Studio muss das Markerbild ausgewählt und in der Szene räumlich zum CAD-Modell angelegt werden.
2. **Model Targets** – Modell-basiertes Tracking, Ein Bauteil oder eine Baugruppe werden als Tracking-Modell definiert.
3. **Spatial Targets** – Automatische Erkennung der umgebenden Raumgeometrie und der ebenen Grundflächen (zum Beispiel eine Tischoberfläche). Das 3D-Modell kann vom Nutzer frei, über Gestensteuerung, verschoben werden (Eine Variante des Markerlosen Trackings).
4. **ThingMark** – Marker-basiertes Tracking, ähnlich den Image Targets. Ein charakteristisches Piktogramm, welches als Bild zur Initialisierung von AR-

Erlebnissen dient. Es wird in Anbieter D Studio ausgewählt und in der Szene räumlich zum CAD-Modell angelegt. Ein ThingMark kann mit mehreren AR-Erlebnissen verlinkt sein.

5. **User-Defined Targets** – Der Autor kann eigene 3D-Objekte als Tracking-Modell definieren, die nicht Teil des bearbeiteten CAD-Modells sind. Zum Beispiel ein Ball oder eine Getränkeflasche, die ebenfalls in der realen Umgebung zu finden sind.

Im Workshop wurde das modell-basierte Tracking aufgrund der erhöhten Komplexität verwendet. Es müssen keine weiteren Optimierungen des 3D-Modells vorgenommen werden. Der Workflow für die Erstellung eines Trackingmodells mit dem Model Target Generator ist unter „Anbieter D by ANBIETER D 2017“ online als YouTube-Video verfügbar (Anbieter D by ANBIETER D 2017).

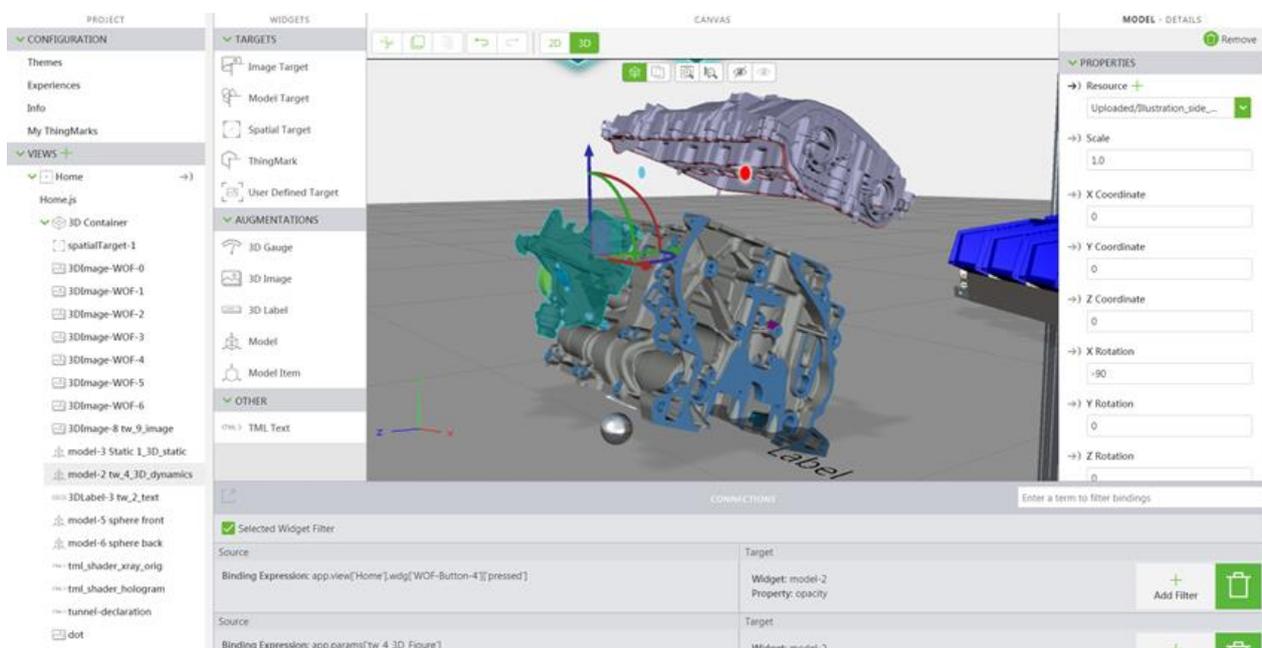


Abbildung 76: UI von Anbieter D Studio, links sind die Projektdaten geordnet nach 3D und 2D Inhalten abgelegt, rechts können die Eigenschaften des angewählten Objektes verändert werden (Quelle: Workshop Anbieter D)

Nach Festlegung der Tracking-Konfiguration können die Arbeitsschritte mit 2D-Inhalten und weiteren 3D-Inhalten befüllt werden. Hier können Videos, Bilder und Textfelder, aber auch vordefinierte Felder (3D-Label und sogenannte Gauges) hinzugefügt werden. Diese können bei Anbindung an eine Informationsquelle Livedaten (zum Beispiel den Batterieladezustand) darstellen. Die Schriftart, -farbe und -größe können ebenfalls verändert werden.

Der Autorenprozess findet auf einem Autorenservers beziehungsweise der ANBIETER D-Plattform ThingWorx statt. Nachdem das AR-Training erfolgreich erstellt wurde, kann es über eine Publish-Funktion auf einem zentralen CMS-Server veröffentlicht werden.

Im nächsten Schritt wird nun die Anwenderapplikation Anbieter D View auf dem Endgerät geöffnet und das erstellte Trainingsprojekt kann durch das Einscannen des hinterlegten ThingMarks gestartet werden. Die Applikation kann über den Windows Store oder den iTunes App Store heruntergeladen werden.

Um das Training zu initialisieren muss nun das Tracking-Objekt durch den Tracking-Algorithmus erkannt werden (Abbildung 77). Dafür muss auf die richtige Startposition geachtet werden, damit die Kanten des realen Modells erkannt und mit dem hinterlegten Tracking-Objekt überlagert werden können.



Abbildung 77: Model-based Tracking - links: Tracking Modell nicht gefunden, rechts: Tracking-Modell gefunden (Quelle: Workshop Anbieter D)

Das UI des erstellten AR-Trainings ist in Abbildung 78 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es der Vorlage des Referenz-Use-Cases nachempfunden ist.



Abbildung 78: UI auf dem Endgerät mit Einblendung einer Animation; Rechts: Öffnung des Administrator Modus für die virtuelle Registrierung und Abspielen der Animation (Quelle: Workshop Anbieter D)

Zusätzlich zu der ANBIETER D-Standardlösung wurde in dem Workshop eine vereinfachte, an die Anforderungen angepasste, Autorenlösung erstellt. Hierfür wird die Funktionalität der Anbieter D Suite so einschränkt, dass dem Trainingsersteller nur

das Nötigste angezeigt wird und die Komplexität deutlich reduziert wird. Der alternative Autorenprozess ist in Abbildung 79 dargestellt.

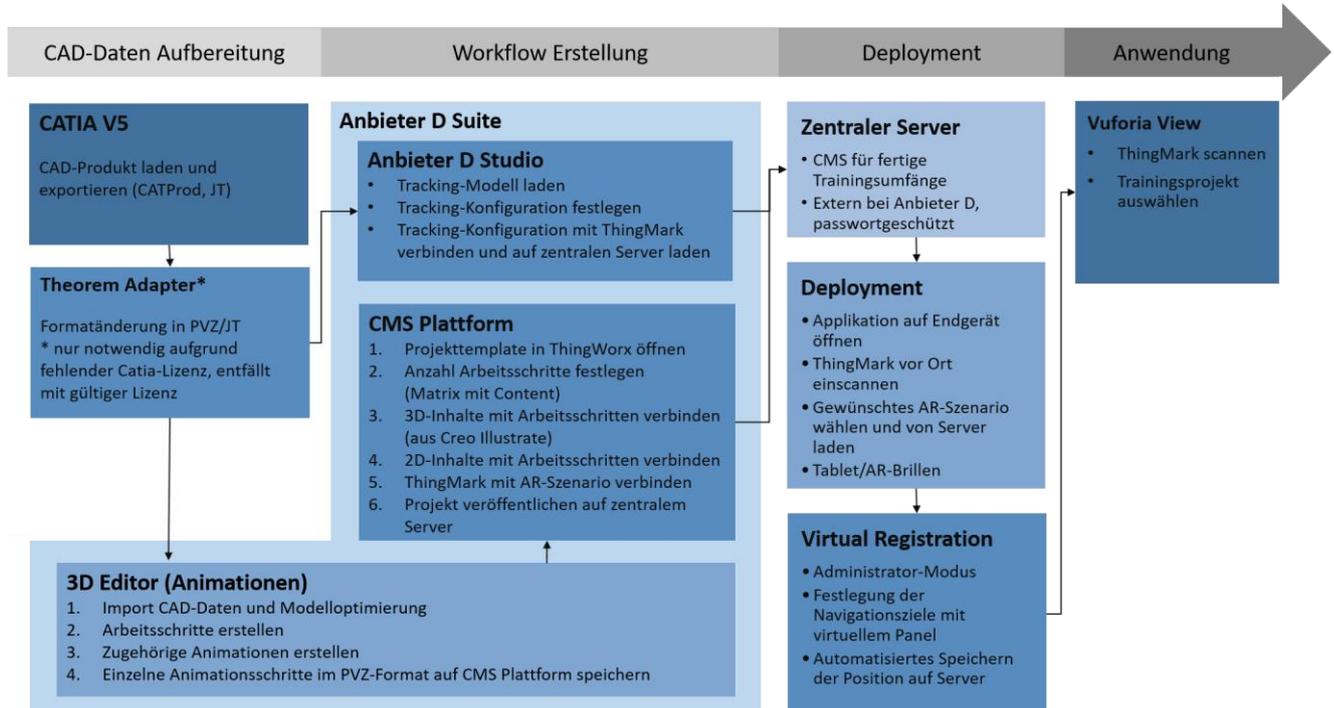


Abbildung 79: Der „customized“ ANBIETER D-Autorenprozess mit Template zur vereinfachten Content-Organisation

Das Kernstück dieses Ansatzes bildet eine „Maske“, die in Abbildung 80 dargestellt ist. Sie hat eine Matrixform und verknüpft die einzelnen Montageschritte mit dem zugehörigen Content. Der Autor kann nun vereinfacht die 2D- und 3D-Inhalte hinzufügen. Hierzu muss der Verzeichnispfad zu der jeweiligen Datei kopiert und in das vorgesehene Feld kopiert werden. Jedem Montageschritt wird eine StepID zugewiesen. Jede Kachel wird mit einer festgelegten Content-Art gefüllt. Das Textfeld wird automatisch mit einer Text-to-Speech Funktion in einen Audiostring verwandelt. Im Gegensatz zur Standard-Lösung, wo die Animationen in einem Projekt in Creo Illustrate erstellt werden, müssen nun die Animationen für jeden Arbeitsschritt einzeln gespeichert und mit dem zugehörigen Schritt im Template verlinkt werden.

Car Experience Repository Folder Contents										Delete Data	Add New Data	Modify Data
Step_ID	Step_1_3D_Static	Step_2_Text	Step_3_Navigation	Step_4_3D_Dynam	Step_4_3D_Figure	Step_5_Video	Step_6_Audio	Step_9_Image	Step_audio_string			
S1	https://iv28pttk.s	PDF_Step_1_Exan	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	https://techslides.s	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	Schritt 1: Bitte montieren Sie die Hc			
S2	https://iv28pttk.s	PDF_Step_2_Exan	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	Schritt 2: Bitte montieren sie die Heissoese			
S3	https://iv28pttk.s	PDF_Step_3_Exan	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	Uploaded/I-Creo	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	Bitte entnehmen sie das Bauteil aus dem Regal			
S4	https://iv28pttk.s	PDF_Step_4_Exan	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	Uploaded/I-Creo	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	Für mich bedeutet es Freiheit			
S5	-	PDF_Step_5_Exan	-	https://iv28pttk.s	Uploaded/I-Creo	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	https://upload.wi	Der neue BMW Fünfer. Die Eroberung der digitalen Welt			
S6	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	Uploaded/I-Creo	https://iv28pttk.s	-	https://upload.wi	BMW			
S7	sdfasdfsdfsad	-	-	https://iv28pttk.s	Uploaded/I-Creo	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	https://upload.wi	BMW			
S8	-	-	-	https://iv28pttk.s	Uploaded/I-Creo	https://techslides.s	https://iv28pttk.s	https://iv28pttk.s	Guten Morgen			
S9	-	-	-	-	[object Object]	-	-	-	[object Object]			



Abbildung 80: Template zur vereinfachten Content-Verwaltung; Für jede Kachel ist eine Verlinkung notwendig. Leere Felder werden farblich hervorgehoben. (Quelle: Workshop Anbieter D)

Durch den Einsatz des Templates als Maske über Anbieter D Studio wird eine verkürzte Content-Generierung bei steigender Montageschrittzahl ermöglicht. Es besteht die Möglichkeit die Montageprozessdaten, zum Beispiel aus dem BMW-internen Prozessplanungstool MAPP, als XML/XLS-Dokument auszulesen und somit das Template automatisiert mit einigen Inhalten, wie TVG-Nummer, Textbeschreibung oder CAD-Daten zu befüllen. Dies wurde im Workshop nicht erprobt und erfordert noch einige Anpassungsmaßnahmen, ist aber theoretisch möglich.

Diese Anpassung ist besonders für größere Qualifizierungsmaßnahmen, wie Anlauftrainings in der Endmontage von Vorteil, da bereits die grobe Struktur übernommen werden kann und lediglich Animationen, 3D-Bauteilüberlagerungen und Videos erstellt werden müssen.

Das Tracking erfolgt analog zum Standard-Autorenprozess über den Tracking Generator in Anbieter D Studio.

5.4.5 Anbieter E

Einen weiteren Autorenprozess, der hier dargestellt wird, aber nur indirekt mit den anderen Benchmarkteilnehmern vergleichbar ist, bietet die Lösung des Münchener Start-ups Anbieter E an. Das Konzept wurde insbesondere auf den Anwendungsfall Mitarbeiterschulung und Qualitätssicherung zugeschnitten und verspricht eine schnelle, unkomplizierte Erstellung von AR-Erlebnissen. Der gesamte Prozess findet ausschließlich auf der HoloLens statt. Der Autor erstellt in-situ das Training auf dem

Endgerät. Zur Vereinfachung des Prozesses wird auf die Visualisierung von Animationen und 3D-Bauteilüberlagerungen bewusst verzichtet. Der Umgang mit CAD-Daten entfällt somit.

Die Applikation wird in die zwei Modi „Editor Mode“ und „Training Mode“ unterteilt. Im ersteren Modus wird das Projekt erstellt und im Letzteren wird es lediglich abgespielt. Die Farbe des UI ändert sich in Abhängigkeit vom ausgewählten Modus. Zur Führung des Trainingserstellers und der Trainees steht ein Avatar zur Verfügung, welcher im Raum schwebt und die möglichen Sprachbefehle anzeigt.

Zurzeit wird ein Trainingsmodus entwickelt, welcher auf der 4-Stufen-Methode beruht und automatisiert in ein aufgebautes Training integriert werden kann (siehe Abschnitt 3.3.3). Zur Zeit der Erprobung war dieser Trainingsmodus jedoch noch nicht verfügbar. Die Steuerung der Applikation basiert primär auf Sprachsteuerung und eingeschränkter Gestensteuerung. Zur vereinfachten Eingabe von Textinformationen wird eine Bluetooth-Tastatur mit der Microsoft HoloLens gekoppelt.

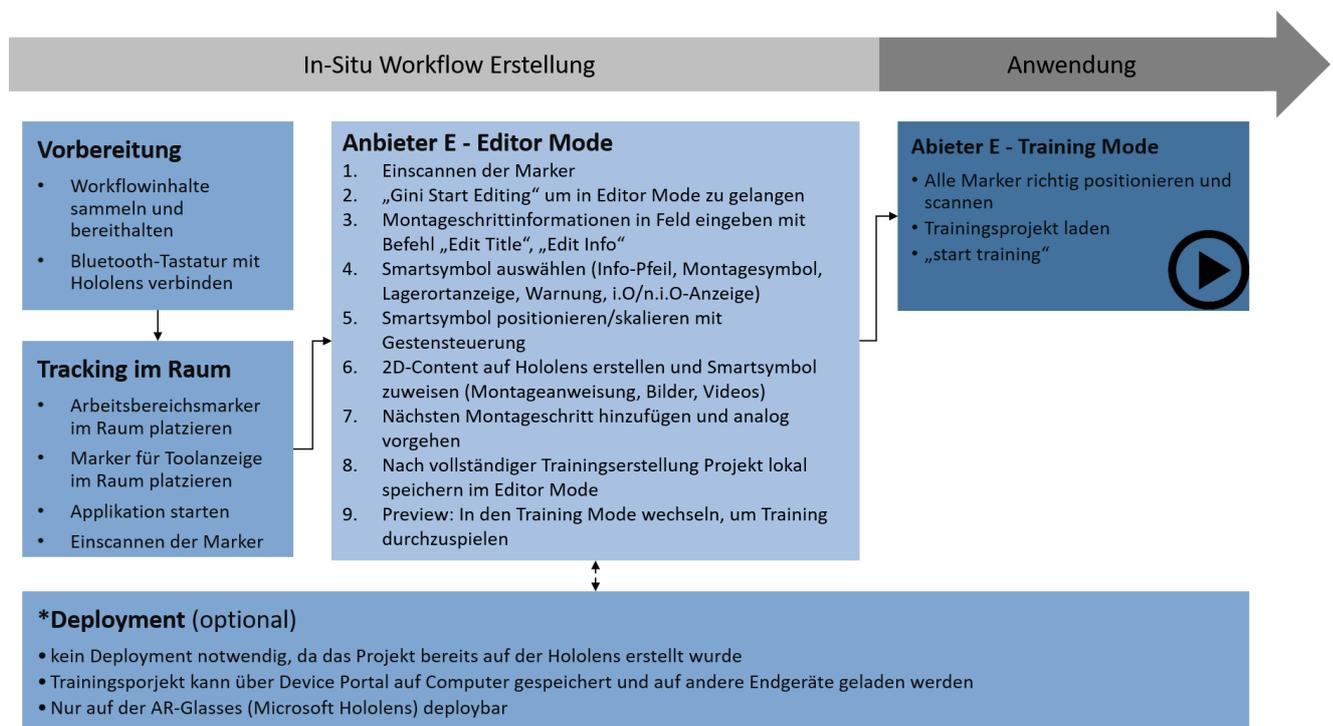


Abbildung 81: In-Situ Autorenprozess mit Anbieter E

Wie in Abbildung 81 zu sehen ist, entfallen die Arbeitsschritte CAD-Datenaufbereitung und Deployment. Um mit der Workflow-Erstellung zu starten, müssen zuerst vorgefertigte Markerbilder im Raum positioniert werden. Diese sind mit verschiedenen Arbeitsbereichen verknüpft. Insgesamt gibt es bis zu sechs Arbeitsbereiche, die vom Autor festgelegt werden und eine „Tool-Area“ in der die virtuellen Werkzeuge zur Erstellung des Szenarios eingeblendet werden. Die Anzahl der Arbeitsbereiche ist abhängig von der Komplexität des Anwendungsfalls. Im Referenz-Use-Case ist lediglich ein Arbeitsbereich notwendig, da der Motorblock und die verwendeten Bauteile/Werkzeuge nahe beieinander liegen. Es ist wichtig, dass die Positionen der

Marker auch nach Erstellung des Trainings exakt erhalten bleiben, da sie auch während des Trainings als Referenz für die virtuellen Objekte dienen.

Im nächsten Schritt wird die Applikation auf der AR-Brille geöffnet und die Marker werden eingescannt. Nun wird der Editor Mode geöffnet und es kann mit der Workflow-Erstellung begonnen werden. Es existiert ein Textfeld, in dem Arbeitsschritttitle und -beschreibung eingegeben werden. Zum Einfügen von 3D-Objekten kann aus der Toolpalette eine Reihe von vorgefertigten visuellen „Smart Symbols“ gewählt werden (siehe Abbildung 82). Ihnen sind auditive Bausteine und Navigationspfeile hinterlegt, die während des Trainings durch vorgefertigte Anweisungen assistieren. Auch können sie mit zusätzlichem 2D-Content verknüpft werden.



Abbildung 82: Anbieter E: Toolliste mit einer Auswahl an Smart Symbols (Anbieter E 2018)

Zu den Smart Symbols zählen:

- Pfeil – zur Indikation von wichtigen Punkten (POIs)
- Warnsymbol – bei Inhalten, die besonderer Beachtung bedürfen
- Montageposition – Indikation eines Montageorts
- Lagerort eines Bauteils/Werkzeugs – Anzeige eines Bauteils oder Werkzeugs im Regal
- Überprüfungssymbol – i.O/n.i.O-Symbol für Anwendungen in der Qualitätssicherung

Je nach Bedarf wählt der Autor das benötigte Smart Symbol aus und positioniert es mit Gestensteuerung an der gewünschten Stelle, zum Beispiel den Ort der Verschraubung. Auch kann das Smart Symbol auf die gewünschte Größe skaliert werden (siehe Abbildung 83).

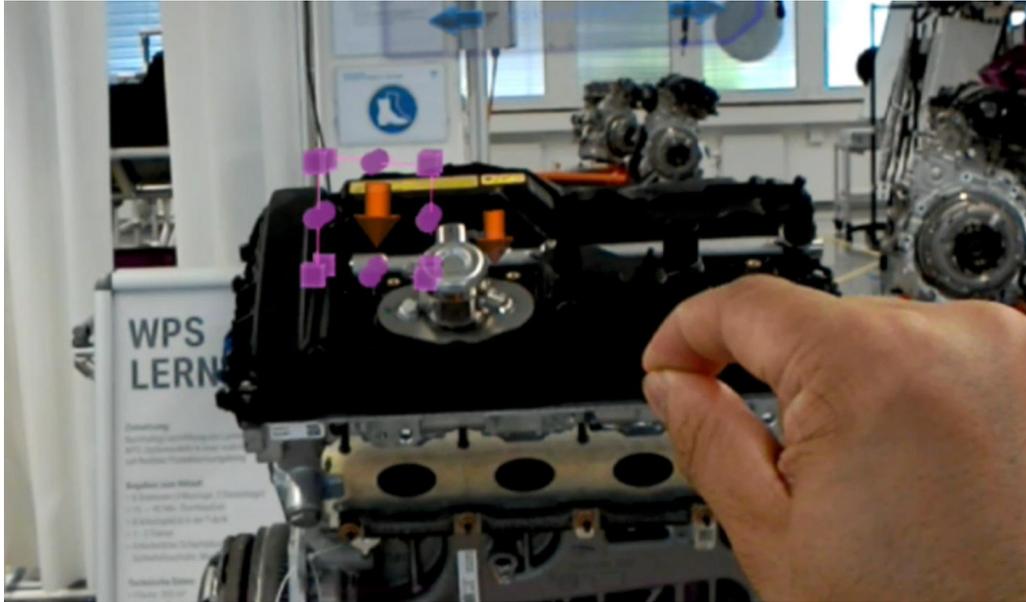


Abbildung 83: Verschiebung, Verdrehung und Skalierung eines Pfeiles mit Gestensteuerung (Screenshot Anbieter E 2018)

Im nächsten Schritt kann das Smart Symbol mit 2D-Content verknüpft werden. Dazu werden Videos und Bilder direkt vor Ort mit der HoloLens aufgenommen und hinterlegt. Benötigte Textinformationen werden über die Tastatur eingegeben. Innerhalb eines Arbeitsschrittes können mehrere Smart Symbols hinterlegt werden. Sie sind logisch miteinander verknüpft und werden später bei der Trainingsanwendung der Reihe nach adressiert. Um die Reihenfolge zu ändern, können sie im Editorfenster verschoben werden. Bei der Erstellung gibt es die Möglichkeit bereits positionierte und skalierte Objekte mit einer Copy-Paste-Funktion zu reproduzieren und an anderer Stelle einzufügen. Sobald ein Arbeitsschritt ausreichend mit Smart Symbols und 2D-Content beschrieben ist, kann der nächste Arbeitsschritt analog erstellt werden.

Während der Trainingserstellung hat der Autor jederzeit die Möglichkeit zur Überprüfung des Trainings in den Training Modus zu wechseln, in dem das Training abgespielt wird. So lassen sich sequentielle Fehler schnell erkennen. Durch eine Autosave-Funktion wird das Trainingsprojekt automatisch gespeichert.

Nachdem das Training erfolgreich erstellt wurde, kann es von den Trainees direkt auf demselben Gerät verwendet werden.

Falls sich mit der Zeit die Trainingsinhalte ändern, zum Beispiel die Montagereihenfolge oder sich der Lagerort eines Bauteils ändert, kann dies vor Ort vom Trainer schnell angepasst werden. Zum Beispiel durch Verschiebung der Smartobjects oder der Aufnahme neuer Bilder und Videos.

Daneben arbeitet das Unternehmen an einer Beobachter-Funktion in der der Trainer das Sichtfeld des Trainees auf einem Smartphone/Tablet angezeigt bekommt und so bei Missverständnissen leicht die Situation des Trainees nachvollziehen kann.

5.4.6 Weitere Anbieter

Neben den hier näher beschriebenen Anbieterlösungen, wurden im Rahmen des Benchmarks noch zwei weitere Anbieter eingeladen. Sie unterscheiden sich allerdings deutlich von den anderen Anbietern, da sie sich auf virtuelle Produktvisualisierung und primär VR-Anwendungen spezialisiert haben. So bietet ein Anbieter, **LivingSolids**, Komplettlösungen für die Erstellung, Verwaltung und Distribution von interaktiven 3D Anleitungen an. Zum Beispiel kann die Montage eines Fahrzeugs mit Hilfe der CAD-Modelle und Montageprozessdaten in richtiger Reihenfolge animiert werden. Das erstellte Erlebnis kann dann am Computer, Tablet oder auf einer VR-Brille dargestellt werden. Auch wird die Montagesimulation in Form eines Lernspiels für die Offline-Mitarbeiterqualifizierung eingesetzt.

Der zweite Anbieter, **Innoactive**, hat sich ursprünglich auf VR-Anwendungen spezialisiert und möchte nun auch auf dem AR-Markt Fuß fassen. Innoactive verfolgt einen modularen Ansatz und bietet den Klienten eine freizugängliche Autorenplattform, den Innoactive Hub, zur Verwaltung und Verknüpfung von AR-Trainingsinhalten. Zurzeit ist dies allerdings noch im Entwicklungsstand und es ist notwendig mit einem Unity SDK AR-Erlebnisse zu erstellen.

Da in dieser Arbeit der Fokus auf AR-Trainingserstellung liegt, werden die beiden Anbieter in diesem Benchmark nicht weiter berücksichtigt. Für virtuelle 3D-Trainings und VR-Trainings bieten sie aber vielversprechende Lösungen an (siehe Kapitel 3.3.4).

5.5 Ergebnisse des Benchmarks

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des Benchmarks dargestellt. Nach einer Erläuterung der Gewichtungsmethodik werden die Kriterien einem detaillierten Vergleich unterzogen. Im Anschluss werden die Gesamtnutzwerte der Anbieter ermittelt und verglichen, um darauf aufbauend eine Empfehlung für das weitere Vorgehen abzugeben. Ebenso wird auf methodische Einschränkungen und weitere Ergänzungen eingegangen.

5.5.1 Gewichtungsmethodik

Bevor ein qualitativer Vergleich vorgenommen werden kann, werden die Unterkategorien „feingewichtet“, um ein möglichst aussagekräftiges Ergebnis zu erzielen. Auf diese Weise kann die Priorität einzelner Unterpunkte angepasst werden. Zum Beispiel ist für das Deployment eine server-basierte Lösung gegenüber einer lokalen, kabelgebundenen Lösung eindeutig zu favorisieren, da dies für die Fachbereiche eine wesentliche Vereinfachung darstellt. In der Gewichtung wird daher das Verhältnis der beiden Unterpunkte von „eins zu eins“ auf „vier zu eins“ verschoben.

Ein anderes Beispiel ist der Unterpunkt „Video“ des Hauptkriteriums „Functions in Editor“. Wie in Abbildung 84 dargestellt, wird eine „Drag&Drop“ - Upload Funktion gegenüber einer direkten Aufnahme auf der HoloLens bevorzugt, da manche Montageschritte nur schwer mit einem HMD aufgenommen werden können. Dadurch verschiebt sich die Gewichtung zugunsten „Upload via Drag&Drop“.

Video	Bewertung Anbieter 1 $v(a)$	Gewichtung w_{alt} [%]	Gewichtung w_{neu} [%]
Upload via Drag&Drop	4	33	60
Hololens-Recording	1	33	10
Automated compression	2	33	30

Abbildung 84: Beispiel – Feingewichtung des Unterpunktes Video des Hauptkriteriums „Functions in Editor“

Wichtig bei der Feingewichtung ist, dass die Summe der Gewichtung weiterhin eins ergibt (1). Die einzelnen Gewichte werden nun mit den vergebenen Bewertungen multipliziert, so dass sich eine additive multiattributive Wertefunktion (2) ergibt.

$$\sum_{n=1}^m w_n = 1 \quad (1)$$

$$v(a) = \sum_{n=1}^m w_n * v_n(a_n) \quad (2)$$

Dies ist die methodische Grundlage der Nutzwertanalyse und ermöglicht die Ermittlung von Teil- und Gesamtnutzwerten und bietet somit eine systematische Entscheidungsgrundlage (Zangemeister 2014).

In dem detaillierten Vergleich werden zuerst die Teilnutzwerte der verschiedenen Anbieter analysiert, um im Anschluss einen Gesamtnutzwert zu ermitteln. Zur Ermittlung des Gesamtnutzwertes ist es notwendig ein geeignetes Gewichtungsverfahren zu wählen, um die Gewichtungsfaktoren zu bestimmen. Die Faktoren geben die Wichtigkeit der einzelnen Bewertungskriterien an (siehe Abschnitt 5.3.1, Tabelle 1).

Es werden parallel zwei verschiedene Gewichtungsverfahren verwendet und deren Einfluss auf den Gesamtnutzwert verglichen (siehe Abschnitt 5.5.3):

Das erste Verfahren ist eine simple **Punktezuweisung** (Point Allocation), bei der die wichtigeren Kriterien eine höhere Gewichtung erhalten. Besonders wichtige Kriterien werden mit dem Faktor drei multipliziert. Wichtige mit dem Faktor zwei und die unwichtigeren Kriterien werden einfach gewichtet. Dieses Verfahren ist sehr subjektiv und wird gemeinsam mit dem Benchmark-Kernteam und den Stakeholdern abgestimmt (siehe Tabelle 2, Abschnitt 5.5.3).

Als zweites Verfahren wird eine **Präferenzanalyse** gewählt, bei der durch einen paarweisen Vergleich alle Kriterien miteinander verglichen werden. Bei neun Kriterien ergeben sich somit 36 Vergleiche (Ishizaka und Nemery 2013). In Abbildung 85 ist der Aufbau einer Gewichtungsmatrix für die Präferenzanalyse exemplarisch illustriert.

als wichtiger	Kriterium 1	Kriterium 2	Kriterium 3	Kriterium 4	Kriterium 5	Kriterium 6	Kriterium 7	Kriterium 8	Kriterium 9	Kriterium 10	Summe	%
Kriterium 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	28,13%
Kriterium 2		1	1	1	1	0	0	1	1		6	18,75%
Kriterium 3			1	1	0	0	1	1	0		4	12,50%
Kriterium 4				1	1	0	1	0	0		3	9,38%
Kriterium 5					1	0	1	1	0		3	9,38%
Kriterium 6						1	1	1	1		4	12,50%
Kriterium 7							1	0	0		1	3,13%
Kriterium 8								1	0		1	3,13%
Kriterium 9									1		1	3,13%
Kriterium 10										1	0	0,00%
											Prüfsumme	100,00%

Abbildung 85: Beispiel der Gewichtungsmethode "Paarweiser Vergleich", auch Präferenzanalyse genannt (sixsigmablackbelt.de 2013)

Da eine Gewichtung an sich eher subjektiver Natur ist, können dadurch verschiedene Szenarien und „User-Stories“ erprobt werden. Dies ist von Vorteil, da zum einen die Anbieter in einigen Punkten komplett andere Ansätze verfolgen und zum anderen auch die Endanwender, welche die AR-Lösung in der Fertigung einsetzen möchten, unterschiedliche Gestaltungsvorstellungen haben.

In dieser Nutzwertanalyse werden deshalb zwei verschiedene Anwendungsfälle simuliert:

Im Ersten liegt der Fokus auf der **Universalität der Anwendung** und der IT-Verträglichkeit. Es werden also Anbieter favorisiert, die ein AR-Szenario nach den gegebenen Vorgaben aufbauen können und dabei eine leichte Skalierbarkeit und Integration der Lösung in die BMW-Infrastruktur ermöglichen.

Der zweite Anwendungsfall zielt auf eine **vereinfachte Content-Generierung**, indem der Fokus auf der Darstellung von 2D-Informationen wie Videos liegt und die Priorität von Animations- und 3D-Bauteil-Visualisierungen stark reduziert wird. Auch die Integration in die Firmenprozesse und die IT-Landschaft wird herabgestuft.

Dadurch wird differenziert betrachtet, welche Anbieter sich besonders für eine kurzfristige Erstellung von AR-Anwendungen eignen und welche eher für eine längerfristige Kooperation oder einen Einsatz im größeren Stil in Frage kommen.

Die anwendungsbezogene Gewichtung wird erst in Abschnitt 5.5.3 vorgenommen, da dort der Gesamtnutzwert ermittelt wird. Zuvor wird ein genauerer Blick auf die einzelnen Kategorien geworfen.

5.5.2 Detaillierter Vergleich der einzelnen Kategorien

Die neun Hauptkriterien, die in Abschnitt 5.3.2 beschrieben sind, werden nun einzeln untersucht und die wichtigsten Erkenntnisse erläutert. Zum Überblick seien die Kriterien hier erneut aufgelistet:

1. CAD-Pipeline
2. Functions of Editor
3. User Experience Editor
4. Deployment
5. Functions of Player
6. User Experience Player
7. Tracking
8. Software operation and integration in the BMW landscape
9. Costs & Licenses

5.5.2.1 CAD-Pipeline

In Abbildung 86 sind die vier Unterpunkte des Kriteriums CAD-Pipeline in einem Netzdiagramm visualisiert. Da Anbieter E einen Ansatz ohne CAD-Daten verfolgt, wird ihre Lösung hier nicht berücksichtigt.

Es ist zu erkennen, dass Anbieter C als einziger Anbieter über einen automatisierten CAD-Import mit integrierter Kompression verfügt. Anbieter D hat im Prinzip auch eine integrierte Lösung, diese funktionierte aber im Workshop auf Grund einer fehlenden CATIA-Lizenz nicht und es musste das Tool Theorem Adapter zur Umwandlung der CAD-Daten in das fbx-Format genutzt werden. Die Polygonezimirung ist lediglich in Anbieter D's Creo Illustrate und Anbieter B's Cortona3D integriert. Die anderen Anbieter nutzen hierfür externe Tools wie 3D-Excite, Blender oder 3djuump.

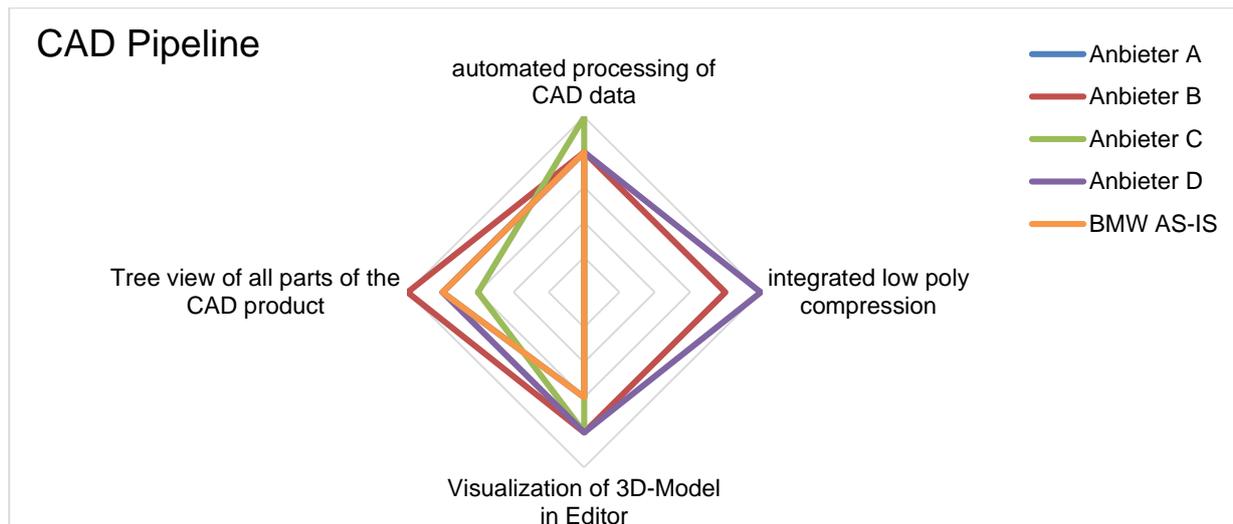


Abbildung 86: 1.Kriterium - CAD-Pipeline; Innen – schlecht ausgeprägt; Außen – gut ausgeprägt

Die Linien von Anbieter A und BMW-AS-IS überschneiden sich, da beide Lösungen in Unity umgesetzt werden.

5.5.2.2 Functions of Editor

Die Funktionen des Editors sind mit insgesamt acht Einzelkriterien und 19 Unterpunkten das umfangreichste Hauptkriterium. Im Kern wird hier die Workflow-Erstellung und Content-Befüllung bewertet. Im Workstep-Management sind Anbieter C und Anbieter A führend. Das heißt, die beiden Anbieter ermöglichen die beste Editierung von bestehenden Workflows. In der Visualisierung von Komponenten haben Anbieter D, Anbieter A und Anbieter B, mit maximal 2,8 von 5 Punkten, die beste Funktionalität, da sie eine leichte Verlinkung der Bauteile mit den Arbeitsschritten und die mögliche Erstellung eines Okklusion-Modells ermöglichen. Eine Okklusion ermöglicht die Verdeckung von virtuellen Bauteilen durch reale Objekte.

Die Möglichkeit Texte und Bilder einzufügen ist bei allen Anbietern gegeben. Bei der Integration von Audio-Dateien sticht Anbieter D durch eine eingebaute Text-to-Speech-Funktion hervor, bei der ein eingegebener Text automatisiert mit Hilfe von IBMs Watson oder Microsoft Cortana verbalisiert wird. Das Befüllen der AR-Applikation mit Videos ist bei fast keinem Anbieter unkompliziert realisierbar. Bei Anbieter D ist eine Einbindung von Videos über Hyperlinks möglich, jedoch noch ohne Wiedergabe auf der Microsoft HoloLens. Bei Anbieter E ist die Aufnahme von Videos vor Ort möglich. Zur Zeit des Benchmarks war die Aufnahmedauer von Videos auf nur acht Sekunden beschränkt, was nicht ausreichend für die Darstellung komplexer Montageschritte ist. Die beste Integration von Videos bietet die BMW-interne Lösung über die Unity-Oberfläche.

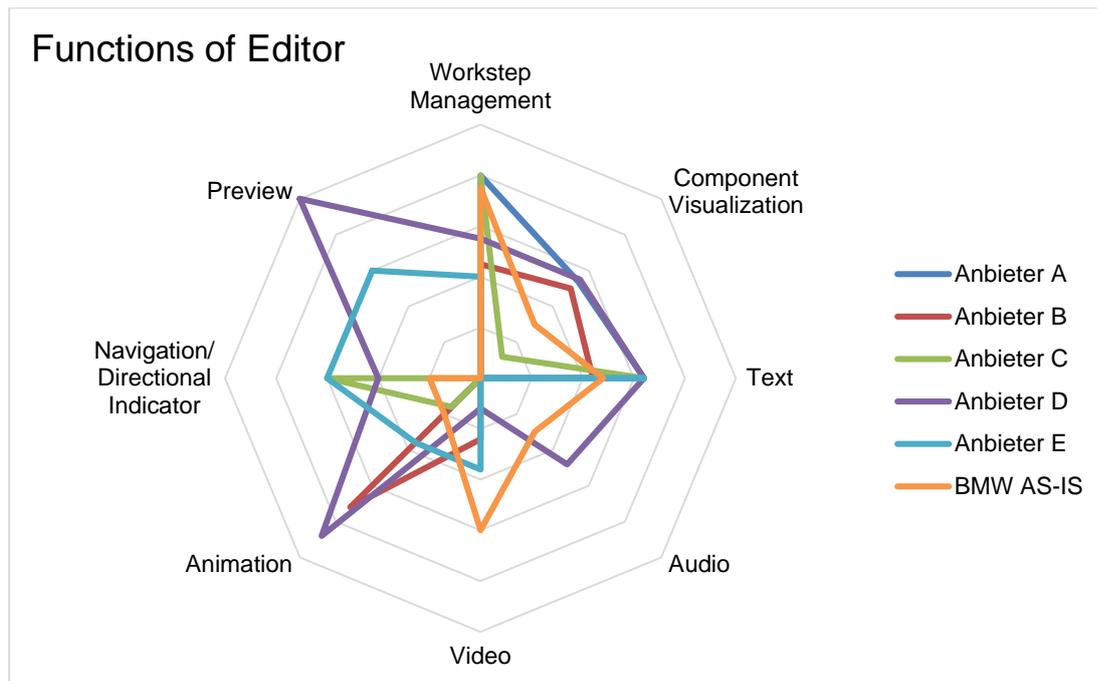


Abbildung 87: 2.Kriterium - Functions of Editor

Fast alle Anbieter legen in ihren Autorenprogrammen den Schwerpunkt auf die Erstellung von Animationen. Am besten umgesetzt wird dies mit den Lösungen von Anbieter B und Anbieter D. Anbieter D ist auch der einzige Anbieter, der über einen Editor-internen Preview-Modus verfügt. Bei den anderen Lösungen muss das Projekt erst auf das Endgerät übertragen werden, um es dort testen zu können. Bei Anbieter E ermöglicht der Wechsel von Editor und Training Mode auf der HoloLens eine rasche Überprüfung des erstellten Workflows.

5.5.2.3 User Experience Editor

Die User Experience für die Bedienung des Autorenprogramms unterteilt sich in das optische Design der Benutzeroberfläche und die Beschränkung der Funktionalität auf das Nötigste, beziehungsweise die Option, dies durch eine Maske zu ermöglichen. Zusätzlich wird die Führung des Autors bei der Erstellung eines Workflows bewertet. Bei Design und Funktionalität hat Anbieter C mit ihrer übersichtlichen, PowerPoint-ähnlichen Benutzeroberfläche die beste Lösung präsentiert. Ebenso kann Anbieter D mit dem Content-Editor Anbieter D Studio und der Möglichkeit der Maskenerstellung in ThingWorx überzeugen. Die Maske von Anbieter D bietet ebenso eine Führung, da fehlender Content hervorgehoben werden kann und dem Autor somit signalisiert wird, wo Handlungsbedarf besteht.

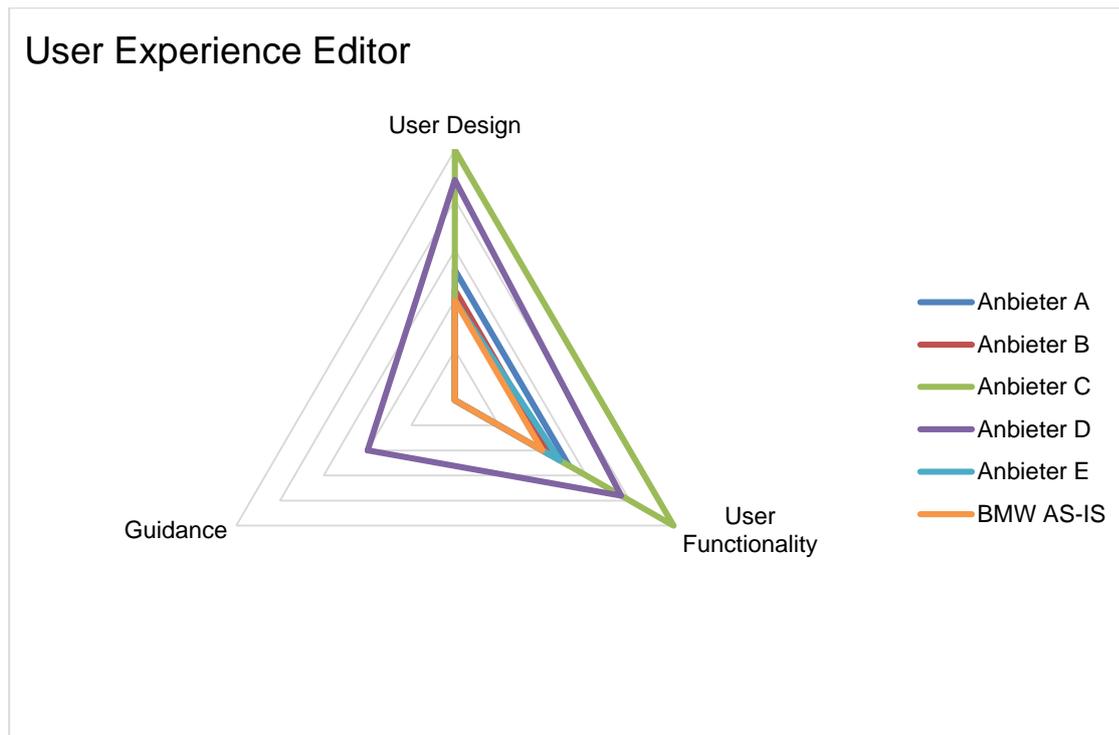


Abbildung 88: 4.Kriterium - User Experience während des Autorenprozesses

BMW AS-IS und Anbieter A schneiden in dieser Kategorie am Schlechtesten ab, da der Editor auf dem Unity SDK beruht, welches zwar eine Vielzahl an Funktionen besitzt, aber von einem unerfahrenen Autoren ohne Weiteres nicht bedient werden kann.

5.5.2.4 Deployment

Das Deployment unterteilt sich in die zwei Unterpunkte Content-Deployment und mögliche Endgeräte.

Anbieter B und Anbieter D bieten eine automatisierte Deployment-Lösung über einen zentralen Server an, ohne dass das Endgerät mit einem lokalen Computer verbunden werden muss. Der Content wird direkt über die Applikation von einem Server geladen. Bei Anbieter C ist zwar eine lokale Kabelverbindung notwendig, der Content kann jedoch direkt aus dem Autorentool heraus publiziert werden. Bei Anbieter A und der BMW-Lösung ist ein Deployment über Unity beziehungsweise Visual Studio notwendig.

Als Endgerät sind bei allen Anbietern hand-getragene Geräte wie Tablets, Smartphones und das AR-Headset Microsoft HoloLens möglich. Bei Anbieter B und Anbieter D gibt es zusätzlich einen VR-Modus in dem 3D-Animation unabhängig von der Umgebung in einem virtuellen Raum angezeigt werden können.

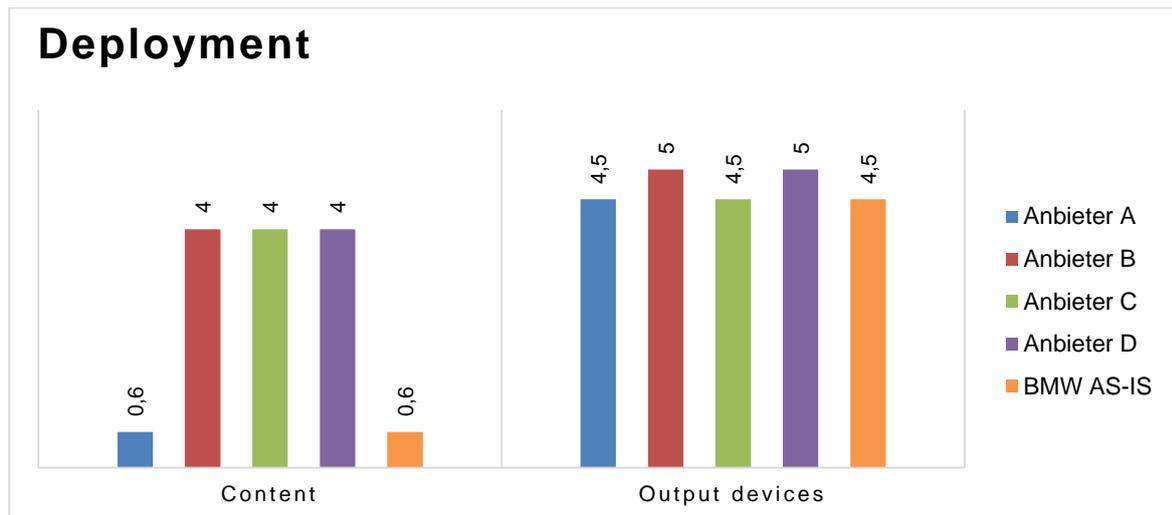


Abbildung 89: 4.Kriterium - Deployment

Für die Lösung von Anbieter E ist kein Deployment notwendig, da das AR-Szenario direkt auf der HoloLens erstellt wird. Um das AR-Erlebnis auf eine andere HoloLens zu transportieren, ist eine Verbindung über einen lokalen Computer notwendig. Andere visuelle Assistenzsysteme werden bisher nicht unterstützt.

5.5.2.5 Functions of Player

In Abbildung 90 sind die Unterpunkte generelle Anforderungen, virtuelle Registrierung und Trainingskonzept der Hauptkategorie „Funktionen der Endapplikation“ dargestellt.

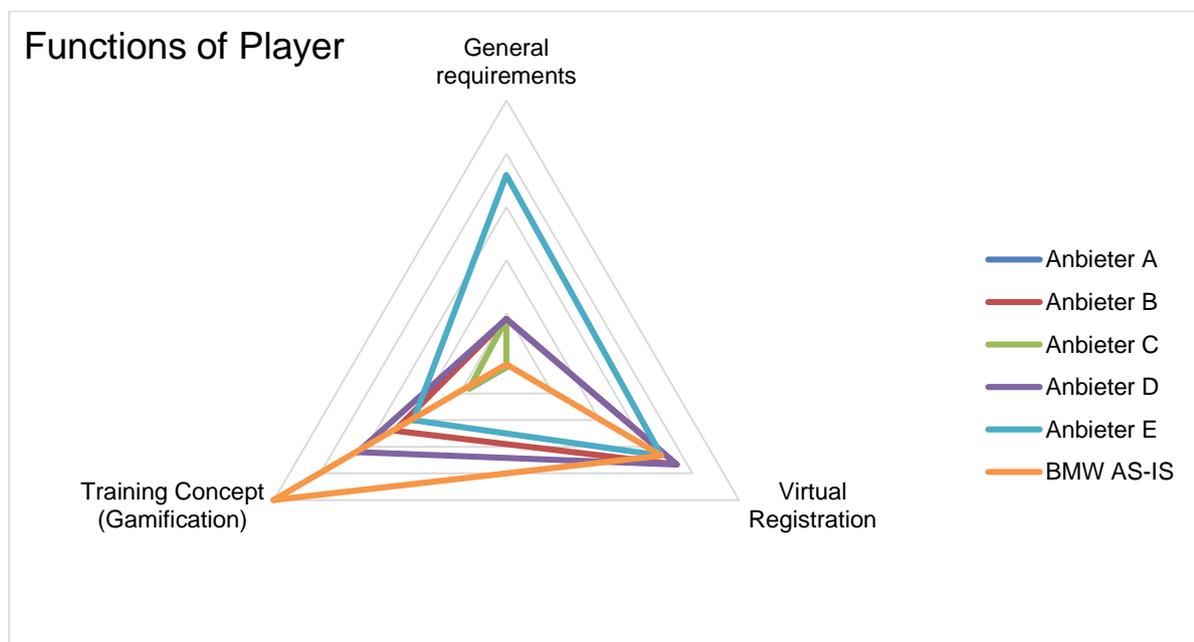


Abbildung 90: 5.Kriterium - Funktionen der Endapplikation

Die generellen Anforderungen umfassen die Möglichkeit der Rollenzuweisung auf dem Endgerät. Es muss einen Administratormodus geben, in dem weitere Einstellungen, zum Beispiel im Rahmen der virtuellen Registrierung, vorgenommen werden können. Ebenso könnten Trainingsinhalte nur in diesem Modus runtergeladen werden. Der

Traineeemodus enthält hingegen keine Änderungsrechte und es werden nur die notwendigen Funktionen zur Durchführung des Trainings angezeigt. Auch Datenerhebungsmöglichkeiten, wie ein Feedback der Trainees zum Trainingsprojekt nach erfolgreicher Absolvierung, fallen unter die generellen Anforderungen. Bei Anbieter E ist die Rollenverteilung durch die Architektur der gesamten Applikation bereits gegeben. Bei den anderen Anbietern gibt es noch keine klare Rollentrennung.

Die virtuelle Registrierung bezieht sich vor allem auf die Positionierung von Objekten/Pins im Raum über Gestensteuerung. Dadurch können Tunnelziele definiert werden, die auf den Lagerort von Bauteilen oder Werkzeugen zeigen. Dies wurde im Workshop von Anbieter B und Anbieter D umgesetzt. Bei Anbieter A und Anbieter C wurde das Tunnelfeature nicht umgesetzt. Bei Anbieter E findet ein Großteil des Autorenprozesses während der virtuellen Registrierung statt.

Das Trainingskonzept und der Gamifizierungsansatz werden in der Form, wie es in der internen BMW-Lösung umgesetzt wurde, von keinem der Anbieter implementiert. Die Meisten beschränken sich auf eine strikte Führung (Guidance) des Trainees durch das AR-Training mit Hilfe eines Navigationspfeiles, der auf die POIs zeigt. Die Implementierung des BMW-eigenen Trainingsansatzes ist am ehesten mit Anbieter D umsetzbar. Anbieter E arbeitet zurzeit an einem integrierten 4-Stufen Trainingskonzept, jedoch war dies zum Zeitpunkt des Workshops nicht verfügbar und fließt deshalb nicht in die Bewertung mit ein. Anbieter E verfügt neben der BMW-Lösung als einziger Anbieter über einen Avatar, der Autor und Trainee „spielerisch“ in der Anwendung unterstützt.

5.5.2.6 User Experience Player

Das Nutzererlebnis der Endanwendung ist eines der wichtigsten Kriterien in diesem Benchmark. Nur mit einem Mehrwert für den Trainee macht die Einführung von AR-Trainings Sinn. Da die wissenschaftlich fundierte, BMW-interne Lösung als Referenz hierfür dient, hat BMW AS-IS auch in dem Benchmark die höchste Bewertung erhalten. Mit Anbieter D konnte im Rahmen des Workshops das UX-Design fast vollständig reproduziert werden. Die Funktionalität ist bei allen Anbietern zufriedenstellend. Bei Anbieter A und Anbieter B wurde die Bedienung, aufgrund des von BMW gewünschten multimodalen Ansatzes, unübersichtlich. Die eigenen Lösungen sind aber übersichtlich und folgen gestalterischen Richtlinien.

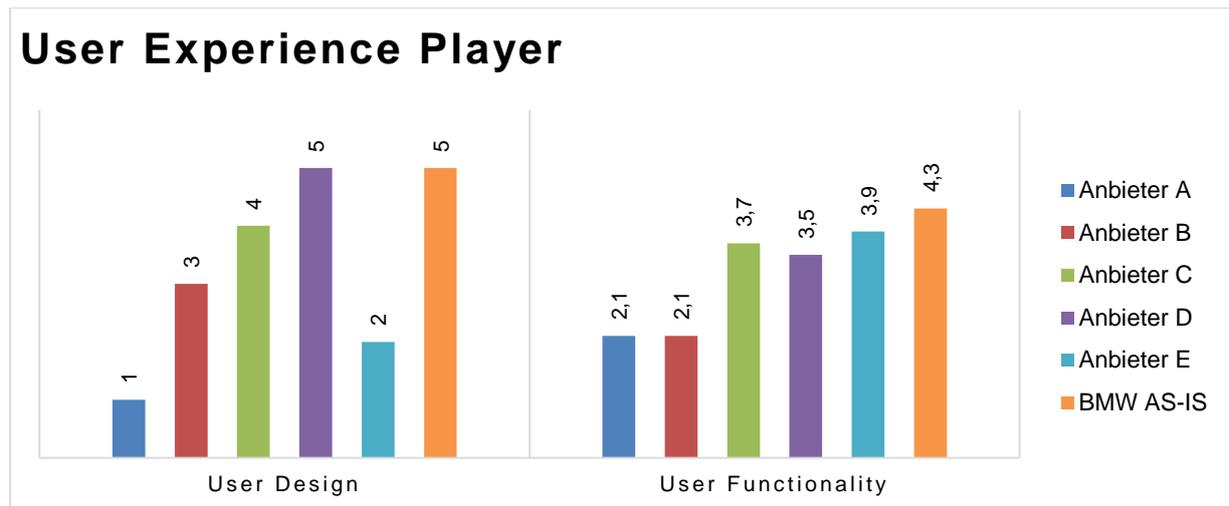


Abbildung 91: 6.Kriterium - User Experience Player

5.5.2.7 Tracking

Im Tracking konnte lediglich Anbieter D überzeugen. Sie konnten sowohl marker-basiertes Tracking als auch modell-basiertes Tracking schnell und unkompliziert umsetzen. Auch ist die Qualität des modell-basierten Trackings weitestgehend akkurat und stabil, insbesondere auf Tablets und Smartphones. Die HoloLens-Lösung hat allerdings etwas Probleme mit der Tracking-Initialisierung, wenn man an der falschen Seite des realen Objektes steht. Anbieter C und Anbieter E verfügen lediglich über eine marker-basierte Tracking-Lösung. Diese funktioniert stabil und zuverlässig und lässt sich schnell implementieren, jedoch ist die Anbringung eines Markers an dem realen Trainingsobjekt beziehungsweise in der Umgebung notwendig. Auch BMW AS-IS verfolgt bisher diesen Ansatz und benutzt dazu, die marker-basierte Tracking-Lösung von Anbieter D.

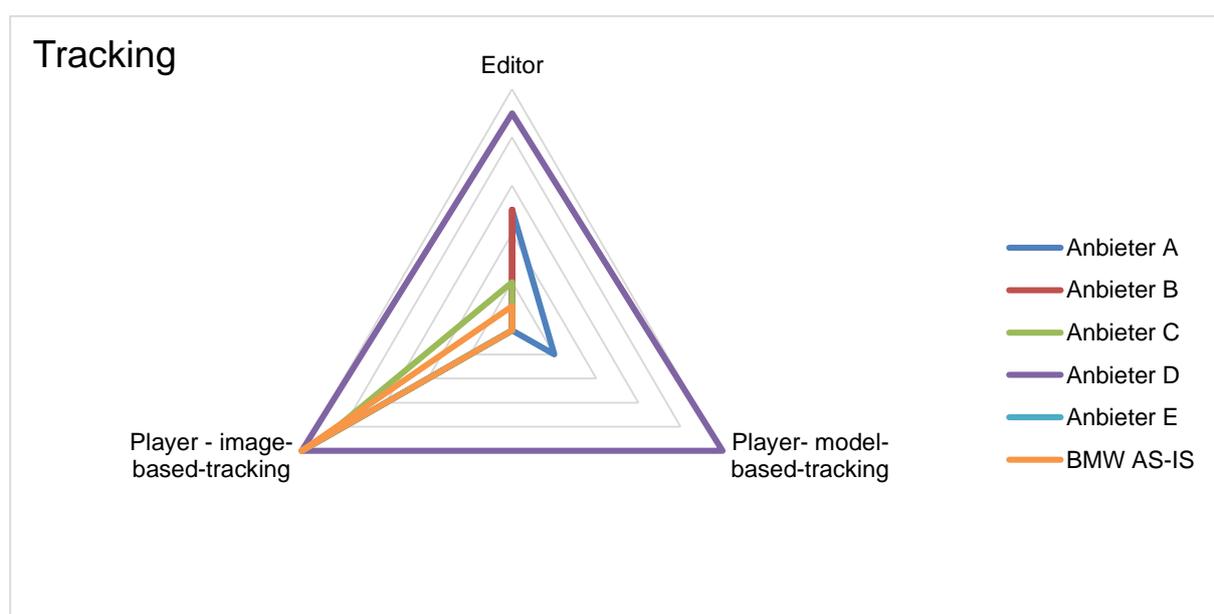


Abbildung 92: 7.Kriterium - Tracking

Im Workshop war bei Anbieter B die Aufbereitung des Tracking-Modells sehr aufwendig und es mussten über das Tracking-Tool einige spezifische Einstellungen vorgenommen werden. Bei Anbieter A war dies ebenfalls der Fall und es konnte kein zufriedenstellendes Tracking im Rahmen des Workshops realisiert werden. Auch ist bei beiden Anbietern kein modell-basiertes Tracking auf der Microsoft HoloLens möglich.

5.5.2.8 Software operation and integration in BMW IT-landscape

Im Hinblick auf die Software-Bedienbarkeit und die Integration in die BMW-IT-Landschaft, bietet Anbieter B, inspiriert durch die Perspektive eines Großkonzerns, die beste Lösung. Neben der Verwendung von Standardsoftware, wie Cortona3D, setzen Sie auf separate Module, die austauschbar sind. So lässt sich beispielsweise der Tracking-Lieferant Re'flect One durch Fraunhofer's VisionLib oder Anbieter D ersetzen. Auch bieten Sie durch Standardschnittstellen, wie Rest API, die Möglichkeit Prozess- und CAD-Daten aus anderen Systemen zu ziehen. Anbieter D ist hier im Nachteil, da sie über eine mehr oder weniger geschlossene Suite ihres eigenen Produktportfolios (Creo, ThingWorx) verfügen. Jedoch sind hier generell auch Schnittstellen implementierbar.

Anwendersprachen bieten Anbieter D und Anbieter B gleichermaßen mit Englisch, Deutsch, Spanisch und Chinesisch ausreichend an.

Mit Reusability wird die Wiederverwertbarkeit von bereits gestalteten Trainingsprojekten beschrieben. Hier bietet Anbieter D eine interessante und unkomplizierte Lösung an, da alte Trainingsprojekte über einen Server als Vorlage aufgerufen und editiert werden können. Auch bei Anbieter B CAP findet sich eine ähnliche, jedoch nicht so übersichtliche Lösung.

Der Serveransatz von ANBIETER D und Anbieter B erhöht auch das Potenzial einer skalierbaren Lösung, da mehrere Endgeräte die Trainingsinhalte unkompliziert anfordern können (Pull-Prinzip)

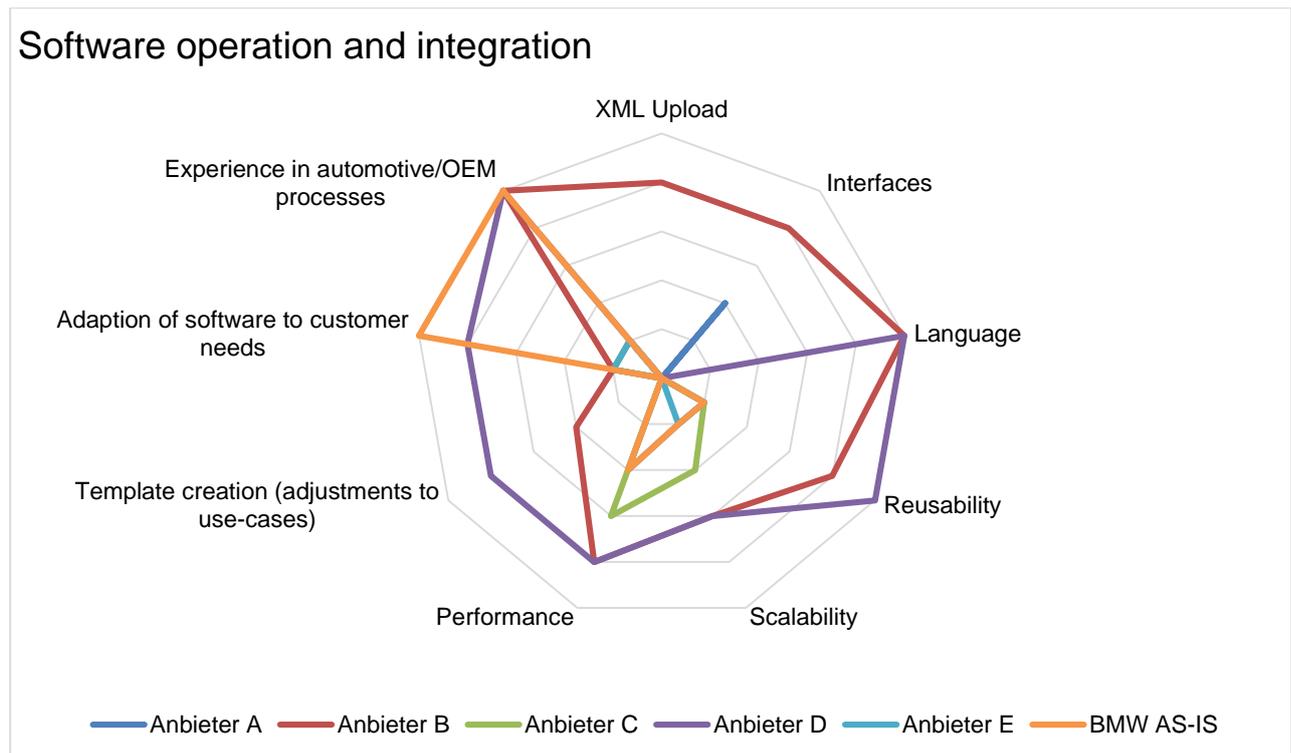


Abbildung 93: 8.Kriterium - Software operation and integration in the BMW landscape

Neben der BMW-internen Lösung haben Anbieter D und Anbieter B die größte Erfahrung im Umgang mit betrieblichen Prozessen und IT-Anforderungen in der Automobilindustrie und bieten dementsprechend umfassendere Lösungen an als die kleineren Anbieter.

Die Möglichkeit einer Maskenerstellung, um die Funktionalität für die jeweiligen Anwendungsfälle einzuschränken, wird im Workshop lediglich von Anbieter D vorgestellt. Anbieter B bietet theoretisch ebenso die Möglichkeit, dies wurde aber erst nach dem Workshop in Form eines Mock-Ups demonstriert, der nicht mehr in diesen Benchmark mit einfließt.

5.5.2.9 Costs and Licenses

Die Lizenzmodelle der verschiedenen Anbieter unterscheiden sich zum Teil deutlich in ihrer Struktur. Während ein Anbieter Use-Case spezifisch, abhängig von der Anzahl der Arbeitsschritte ein Angebot erstellt, bietet ein anderer Anbieter den Kauf oder die Miete einer Lizenz an. Anbieter B verrechnet als Einmalaufwand den Kauf eines Autorenserver, des Tracking-Tools und eines Runtime Servers. Als Floating-Lizenz werden die Autoren-Lizenzen angeboten, so dass sie unter mehreren Autoren geteilt werden können.

Um einen Vergleich zu ermöglichen, werden von allen Anbietern Angebote für 50 Autorenlizenzen und 200 Endnutzer-Lizenzen (Trainees) eingeholt. Die Kosten werden dann in ein einmaliges Anfangs-Investment und jährlich anfallende Kosten aufgeteilt. In Abbildung 94 ist die Kostenbewertung auf einer relativen Skala 0-5 eingetragen.

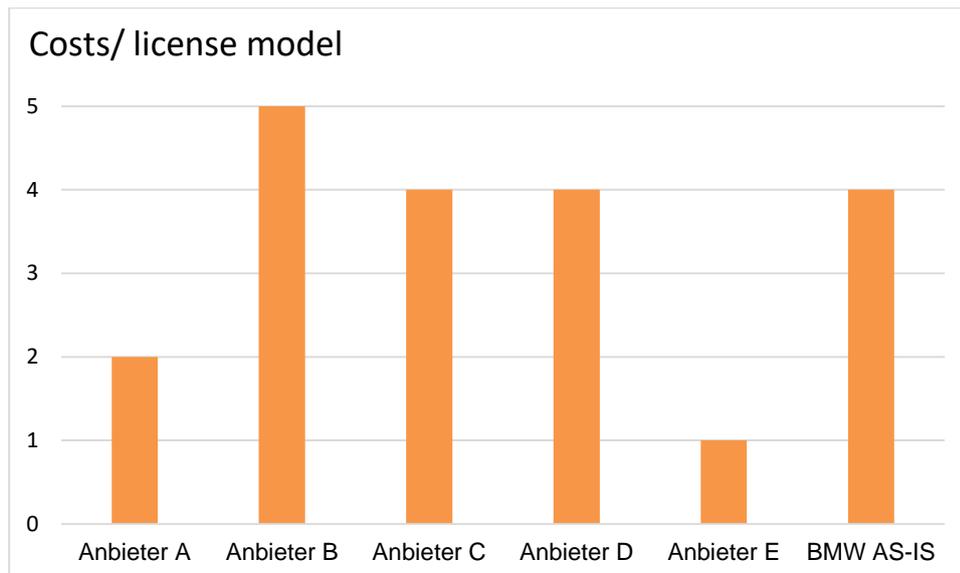


Abbildung 94: 9.Kriterium: Bewertung der Kostenstruktur der Anbieter: 1- teuer, 5 - günstig

Es ist zu sehen, dass Anbieter B die günstigste Lösung anbietet. Auch wenn eine hohe Anfangsinvestition notwendig ist, bieten sie ab dem vierten Jahr durch die geringen jährlichen Kosten das kostengünstigste Angebot. Auch lässt sich die Anzahl der Autoren und Trainees leicht skalieren. Die Kosten der theoretischen BMW-Eigenentwicklung setzen sich aus den Personalkosten von 3,5 Mitarbeitern und den benötigten Lizenzen (Unity, Visual Studio) zusammen. Anbieter E bietet das ungünstigste Angebot, da sich die Lösung nicht skalieren lässt und für jeden User ein eigene Autoren- bzw. Trainee Lizenz vergeben wird. Für detaillierte Informationen sei auf Anhang D verwiesen.

5.5.2.10 Gesamtbetrachtung

In Abbildung 95 sind die Ergebnisse des Benchmarks in zwei Netzdiagrammen dargestellt. Der Einfluss der Feingewichtung geht aus dem Vergleich der beiden Diagramme hervor. Es ist zu erkennen, dass sich vor allem bei den Kriterien Funktionen des Editors, UX des Editors und Deployment Änderungen ergeben. Generell werden aber alle Anbieter „aufgewertet“, da unwichtigere Kriterien, welche von vielen Anbietern nicht erfüllt wurden, teilweise abgewertet werden (siehe Kriterienkatalog und die Gewichtungsmethodik, Abschnitt 5.1).

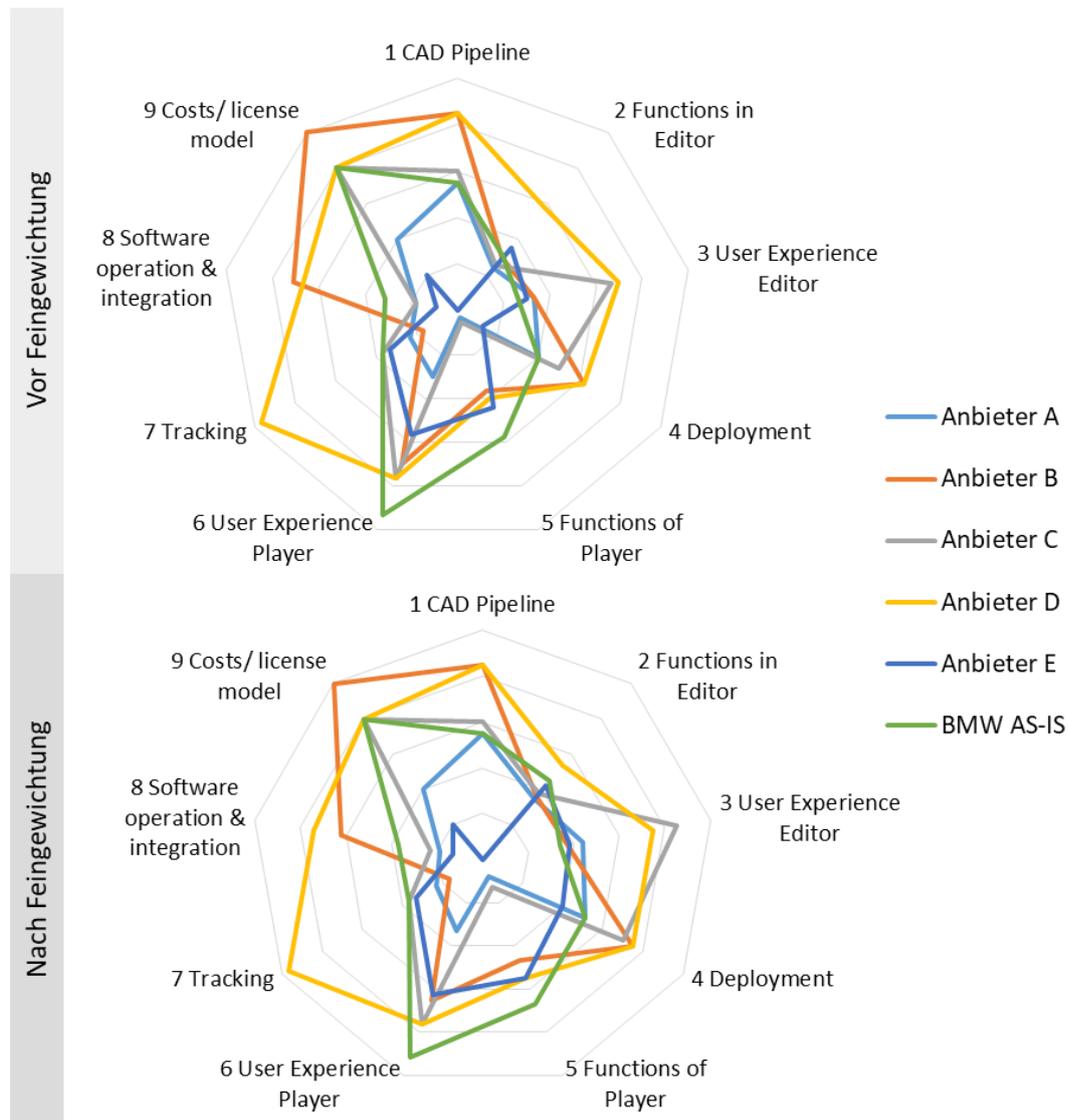


Abbildung 95: Vergleich aller Anbieter in den verschiedenen Kategorien: Oben - ungewichtet; unten - mit Feingewichtung

In Abbildung 96 werden die Ergebnisse mit der Feingewichtung zudem zusammenfassend in Tabellenform dargestellt. Anschließend werden die wichtigsten Punkte erläutert.

Sub-category	Description	Anbieter A	Anbieter B	Anbieter C	Anbieter D	Anbieter E	BMW AS-IS
1	CAD Pipeline	2,75	4,25	3	4,25	0	2,75
2	Functions in Editor	1,73	1,80	1,89	2,68	2,12	2,23
3	User Experience Editor	2,21	1,87	4,25	3,74	1,90	1,70
4	Deployment	2,55	4,5	4,25	4,5	2	2,55
5	Functions of Player	0,40	2,34	1,83	2,74	2,73	3,35
6	User Experience Player	1,66	3,26	3,82	3,82	3,14	4,58
7	Tracking	1,17	0,83	1,83	4,83	1,67	1,83
8	Software operation & integration in BMW landscape	0,95	3,10	1,15	3,70	0,65	1,85
9	Costs/ license model	2	5	4	4	1	4

Abbildung 96: Die Ergebnisse des feingewichteten Benchmarks im Überblick (siehe Anhang C)

Die beste **CAD-Pipeline** bieten Anbieter D und Anbieter B, da sie mit Cortona3D und Creo Illustrate über mächtige 3D-Editoren verfügen, die eine weitestgehend integrierte Datenkompression und Polydezipierung ermöglichen. Da der Ansatz von Anbieter E keine CAD-Daten benötigt, ist keine CAD-Pipeline notwendig. Bei den **Funktionen des Editors**, der eigentlichen Workflow-Erstellung, erzielt Anbieter D aufgrund der Möglichkeit der Template-Erstellung das beste Ergebnis. Zur Bestmarke von fünf sind sie jedoch mit 2,7 noch weit entfernt. Den **benutzerfreundlichsten Autorenprozess**, mit dem besten Nutzererlebnis, bietet Anbieter C mit ihrer, an PowerPoint angelehnten, Oberfläche und ihrem intuitiven Bedienungskonzept. Beim **Deployment** sind die Lösungen von Anbieter B und Anbieter D durch den Serveransatz am Vielversprechendsten, da so eine leichte Skalierung ermöglicht wird. Bei den **Funktionen der Endanwendung** konnte keiner der Anbieter ein funktionierendes Trainings-Konzept mit Gamifizierungs-Elementen vorweisen. Die meisten Anbieter beschränken sich auf Guidance-Lösungen, bei denen alle Trainingsinhalte direkt angezeigt werden. Aus diesen Gründen erzielt BMW AS-IS hier die höchste Punktzahl. Bei der Interaktion des Nutzers mit dem virtuellen UI hat Anbieter C mit der „Gaze“-Funktion einen interessanten Ansatz. Die Gaze-Funktion beschreibt eine Blicksteuerung, bei der durch längeres Anschauen einer Schaltfläche eine Interaktion ausgelöst wird. Die beste **User-Experience** für den Trainee ermöglicht, neben BMW AS-IS, der Ansatz von Anbieter D, da sie das geforderte AR-Erlebnis fast identisch umsetzen können.

Bei den **Tracking**-Lösungen kann lediglich Anbieter D mit einem stabilen, modellbasierten Trackingalgorithmus überzeugen. Anbieter B und Anbieter A können im Workshop, zum Teil wegen fehlerhafter CAD-Daten, kein funktionsfähiges, modellbasiertes Tracking präsentieren. Anbieter C und Anbieter E bieten zwar nur markerbasiertes Tracking, ermöglichen aber eine schnelle und effiziente Einstellung durch einen technisch unerfahrenen Autor.

Bei der **Softwareintegration in die BMW IT-Landschaft** bieten Anbieter B und Anbieter D mit dem Einsatz von Standardsoftware und -schnittstellen die besten Möglichkeiten. Auch ermöglichen Sie durch ein solides CMS am ehesten den Einsatz auf einer größeren Skala mit vielen Autoren und Endanwendern. Das **Kostenmodell** von Anbieter B hat zwar die höchste Anfangsinvestition, jedoch deutlich geringere jährliche Kosten als die Lizenzmodelle der anderen Anbieter.

5.5.3 Gesamtnutzwert

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Ergebnisse der einzelnen Kriterien erläutert wurden, werden in diesem Abschnitt die Gesamtnutzwerte der verschiedenen Anbieter ermittelt und gegenübergestellt. Zu Beginn werden dabei die Gewichtungungsverfahren, die in Abschnitt 5.5.1 erläutert werden, miteinander verglichen. In Abbildung 97 ist zu erkennen, welchen Einfluss die Feingewichtung auf den Gesamtnutzwert hat.

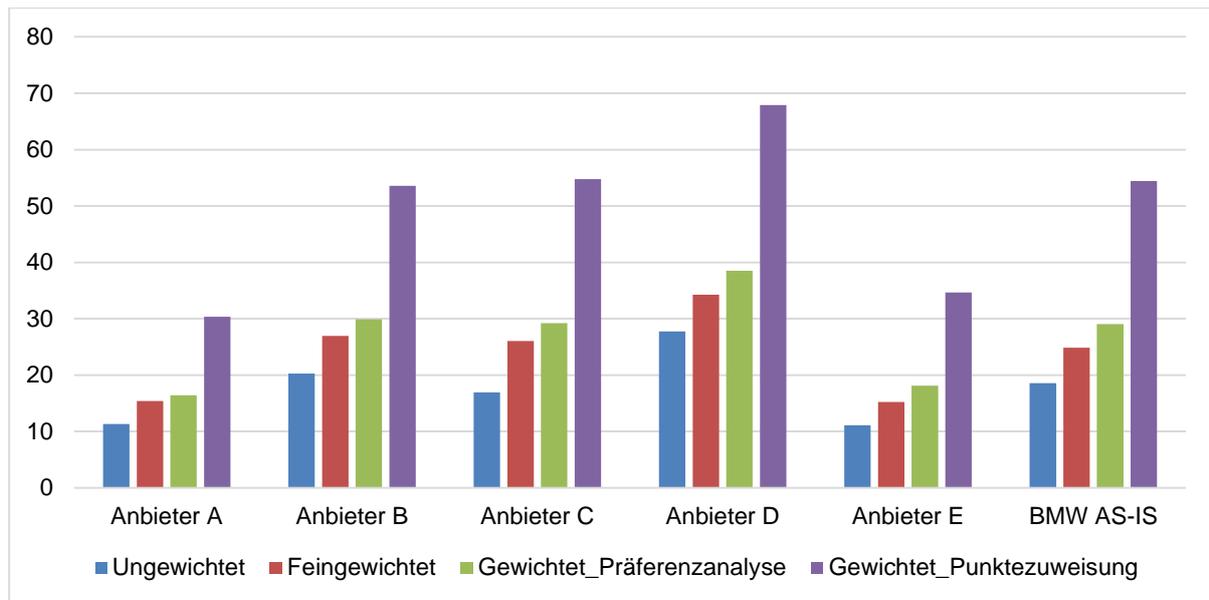


Abbildung 97: Einfluss der Gewichtungsverfahren auf den Gesamtnutzwert der Anbieter

Alle Benchmarkteilnehmer profitieren gleichermaßen von der Feingewichtung und erhalten einen höheren Nutzwert. Durch die beiden Gewichtungsverfahren „Punktezuweisung“ und „Präferenzanalyse“, mit denen die Hauptkriterien gewichtet werden, verschiebt sich die Gewichtung weiter zugunsten der Anbieter D, Anbieter C und Anbieter B. Das Gewichtungsverfahren mit Punktezuweisung ist deutlich subjektiver als die Präferenzanalyse, was zu einem größeren Skaleneffekt führt. Hier stehen insbesondere die User Experience und die Funktionen der Trainee- und der Autorenapplikation im Fokus. Die Gewichtung der einzelnen Kriterien ist in Tabelle 2 aufgelistet. Für eine ausführliche Erklärung der Berechnung der Gewichte sei auf **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** E verwiesen.

Tabelle 2: Gewichtung der Hauptkriterien mit drei verschiedenen Gewichtungsverfahren

Hauptkriterien	Gewichtung mit Punktezuweisung	Gewichtung mit Präferenzanalyse	Gewichtung mit Fokus auf Video
1 CAD Pipeline	1	0,2	0,2
2 Functions in Editor	3	1,1	1,3
3 User Experience Editor	3	0,9	1,6
4 Deployment	1	0,9	1,1
5 Functions of Player	3	0,4	0,4
6 User Experience Player	3	2,0	2,0
7 Tracking	1	1,3	0,9
8 Software operation & integration in BMW IT-landscape	2	1,6	0,7
9 Costs/ license model	2	1,6	1,8

Unabhängig von der Gewichtungsvariante erzielt Anbieter D übergreifend den höchsten Gesamtnutzwert. Bei der Punktezuweisung erzielen ebenso Anbieter C, Anbieter B und BMW AS-IS einen hohen Wert.

Da bis jetzt ein Anwendungsfall betrachtet wurde, der auf eine maximale Verträglichkeit mit den fachlichen und technischen Anforderungen angelegt ist, wird im folgenden Fall das Szenario einer „schnellen“ und unkomplizierten AR-Trainingserstellung simuliert. So wird die Bedeutung der 3D-Bauteilanzeige und der Animationen herabgesetzt und der Fokus auf die Videodarstellung gelegt. Auch die Bedeutung der IT-Systemverträglichkeit wird herabgesetzt (siehe Tabelle 2). Diese Perspektive soll Stakeholder simulieren, die ohne große Vorkenntnisse ein AR-Training für einen überschaubaren Montageumfang, in einem kurzen Zeithorizont ohne aufwendige Prozessanbindung erstellen wollen.

In Abbildung 98 sind die Nutzwerte der beiden Anwendungsfälle dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Anbieter C und Anbieter E einen höheren Nutzwert erzielen und hingegen die Anbieter B oder Anbieter D an Nutzwert einbüßen. Dennoch ist weiterhin Anbieter D der führende Anbieter mit der besten Autorenlösung.

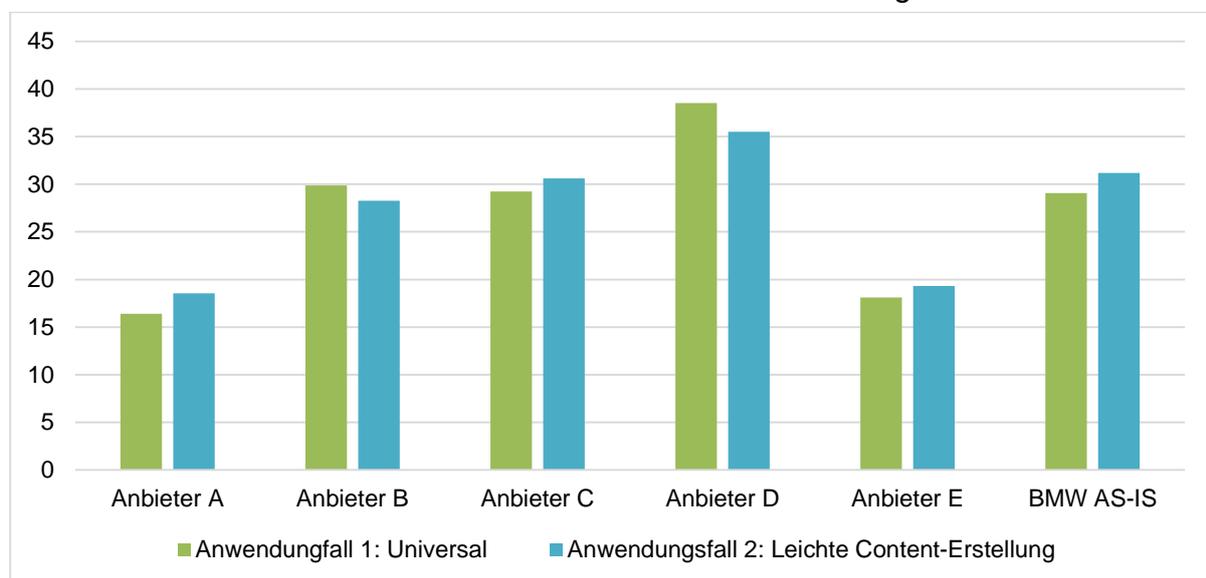


Abbildung 98: Vergleich der beiden Anwendungsfälle: 1. Universelle „Verträglichkeit“ mit den fachlichen und technischen Anforderungen; 2. Präferenz auf vereinfachte Contenterstellung mit Fokus auf 2D-Content, wie Videos

Der Gesamtnutzwert gibt eine komprimierte Zusammenfassung des Benchmarks wieder. Es wird deutlich, dass Anbieter D in vielen Kategorien den anderen Anbietern überlegen ist. Insbesondere bei dem Modell-basierten Tracking ist die Lösung am Vielversprechendsten. Auch im Deployment konnte Anbieter D neben Anbieter B durch eine Server-basierte Lösung und ein funktionierendes CMS überzeugen. Insgesamt war Anbieter A im Workshop der schwächste AR-Anbieter, da die Autorenlösung nur aus einem Unity-Plugin besteht und die Bedienung fundierte Programmkenntnisse erfordert. Anbieter C bietet das übersichtlichste Autorenprogramm an, welches durch den simplen, an PowerPoint erinnernden Ansatz überzeugt. Jedoch ist eine Skalierung aufwendig und die Integration von 3D-Animationen ist mit dem Programm Anbieter C Pins noch nicht ohne weiteres möglich. Ebenso ist Anbieter E nicht für eine Skalierung

geeignet, da es die Strategie einer lokalen Workflow-Erstellung auf der HoloLens verfolgt.

5.5.4 Empfehlung

Als „All-in-One“ Anbieter ist Anbieter D als Kollaborationspartner für die Erstellung von AR-Trainingsprojekten zu empfehlen. Jedoch ist der Markt für IAR noch am Anfang und sehr volatil. Aus diesem Grund ist es für BMW bedeutsam, nicht zu früh auf eine einzelne Lösung zu setzen, um so flexibel wie möglich zu bleiben. Es wird deshalb ein modularer Ansatz empfohlen, in dem eine interne Plattform mit austauschbaren Komponenten geschaffen wird. So werden zurzeit die Tracking-Lösungen von Anbieter D favorisiert, da das Modell-basierte Tracking im Workshop die beste Performance lieferte und das Marker-basierte Tracking bereits in der eigenen Trainingsapplikation implementiert ist. Falls in Zukunft ein weiterer Anbieter, zum Beispiel VisionLib der Fraunhofer IGD, eine bessere Tracking-Lösung bietet, können die Komponenten Anbieterunabhängig ausgetauscht werden.

Für eine schnelle Erstellung von AR-Erlebnissen mit einem Fokus auf Videodarstellung werden die Lösungen von agilen Start-up Unternehmen, wie Anbieter C oder Anbieter E, empfohlen, da diese eine schnelle Content-Generierung ohne weiteres Expertenwissen versprechen und individuell auf Kundenwünsche eingehen können. Generell sind solche Pilotprojekte auch mit den anderen Anbietern sinnvoll, um Erfahrungen zu sammeln, sie sind jedoch finanziell kostspieliger.

Von Seiten der Workflow-Erstellung waren bei allen Anbietern, die CAD-Pipeline, die Einstellung der Tracking-Konfiguration sowie die Erstellung von 3D-Animationen die zeit- und ressourcenintensivsten Blöcke. Es wird deshalb eine „vereinfachte“ Eigenentwicklung der BMW-internen Lösung favorisiert, die diese Blöcke zunächst vernachlässigt und sich zuerst auf die Integration von klassischen 2D-Content-Blöcken, wie der Darstellung von Videos, Bildern und Textinformationen fokussiert. Dies ermöglicht es, auch unerfahrene Autoren mit der Erstellung von ersten AR-Erlebnissen zu Trainingszwecken zu befähigen und gleichzeitig die weiteren Marktentwicklungen zu verfolgen.

5.5.5 Einschränkungen und Bemerkungen

Natürlich bildet der durchgeführte Benchmark nur eine Momentaufnahme des Entwicklungsstandes der ausgewählten Anbieter ab. Da sich der IAR-Markt schnell entwickelt und durch technologische Weiterentwicklungen und neue Impulse aus der Industrie ständig beeinflusst wird, ist die Aktualität nur kurzweilig.

Eine Schwierigkeit in der Methodik dieses Benchmarks besteht darin, dass zum einen die technische Struktur des Autorenprozesses bewertet wird und zum anderen die Möglichkeit der flexiblen Anpassung an die Wünsche der Stakeholder mit berücksichtigt wird. So wurde, im Rahmen der ein- bis zwei-tägigen Workshops, nicht

immer das von BMW gewünschte Ergebnis modelliert und es musste differenziert werden, ob dies an technischen, Software-basierten Einschränkungen oder an der mangelnden Implementierungszeit lag. Da als Grundlage des Benchmarks nur der im Workshop erlebte Autorenprozess und die gesehene Endanwendung dienen, sind manche Benchmarkteilnehmer in einzelnen Punkten schlechter bewertet worden, als ihr eigenes Portfolio versprechen lässt. Dies ist zum Beispiel bei den Tracking-Lösungen von Anbieter A und Anbieter B der Fall, die in anderen Anwendungsfällen wohl gut funktionieren, jedoch im Workshop nicht umgesetzt werden konnten. Andererseits ist der Anspruch eine einfache Content-Generierung für AR-Systeme. Dies impliziert auch eine unkomplizierte Tracking-Konfiguration innerhalb eines zweitägigen Workshops.

6 Qualitativer Vergleich verschiedener Trainingserstellungsvarianten

Nachdem nun ein Überblick über die Autorenprozesse verschiedener Anbieter zur Erstellung von multimedialen AR-Erlebnissen geschaffen wurde, werden in diesem Abschnitt die Workflows der Benchmarkteilnehmer Anbieter D, Anbieter C und Anbieter E mit den Workflows von bisher praktizierten Methoden zur Qualifizierung von Montagemitarbeitern verglichen und auf Effizienz hin untersucht. Wissenschaftliche Basis hierfür ist ein technisch-wirtschaftlicher Ansatz, bei dem der Nutzen der Endanwendung dem Erstellungsaufwand eines Trainings gegenübergestellt wird. Auf diese Weise sollen die verschiedenen Ansätze vergleichbar gemacht werden, um eine qualitative Auskunft über das Aufwand-Nutzen-Verhältnis von AR-basierten Trainings gegenüber papier- und video-basierten Trainings geben zu können. In dieser Arbeit wird kein quantitativer Vergleich durchgeführt, sie dient lediglich als Vorarbeit um die Unterschiede der verschiedenen Ansätze deutlich zu machen.

6.1 Effizienzkriterien

Die gewählten Effizienzkriterien gliedern sich in die drei Blöcke **Aufwand** und **Zeit** der Trainingserstellung sowie der **Qualität** der Endanwendung. Da die Trainingsmethoden sehr unterschiedlich sind, werden die Kriterien so allgemein wie möglich gehalten. Die Effizienzkriterien sind in Abbildung 99 abgebildet und werden in diesem Abschnitt erläutert.



Abbildung 99: Übersicht und Kategorisierung der möglichen Effizienzkriterien

Aufwand

Die Aufwandsbewertung wird anhand einer qualitativen Workflowbetrachtung vorgenommen, bei der die Prozessschritte erfasst und miteinander verglichen werden.

Durch eine exemplarische Trainingserstellung mit drei Montageschritten werden folgende Szenarien simuliert:

1. Erstellung eines neuen Workflows
2. Änderung der Montagesequenz (Verschieben, Löschen)
3. Änderung des Montageinhalts (Geändertes Bauteil) in einem Montageschritt

Neben der Wiederverwertbarkeit bestehender Trainings werden auch die notwendigen Fachkenntnisse zur Trainingserstellung erfasst. Ebenso wird auf die anfallenden Kosten eingegangen.

Durch die Aufwandserfassung bekommt der Leser einen Überblick über die unterschiedlichen Autorenprozesse und wie das erstellte Resultat ausschauen kann.

Zeit

Um einen Überblick über die zeitliche Dauer zur Erstellung und Änderung von Trainingsinhalten zu erhalten, werden die zuvor beschriebenen Montageschritte in allen Varianten durch einen Experten erstellt, der über alle benötigten Fachkenntnisse verfügt. Parallel dazu wird exemplarisch die Zeit gemessen.

Dabei werden ebenso die Neuerstellung, die Änderung der Montagesequenz sowie die Änderung des Montageinhaltes simuliert.

Um den zeitlichen Aufwand differenziert zu betrachten, werden eine **Workflow-orientierte** und eine **Content-orientierte Zeitmessung** durchgeführt. Bei Ersterer steht der Zeitaufwand zur Workflow-Vorbereitung und Erstellung der einzelnen Arbeitsschritte im Vordergrund. Dadurch wird ein direkter Vergleich zwischen den einzelnen Lösungsansätzen geschaffen. Auch werden Unterschiede bei den Inhalten der einzelnen Montageschritte deutlich.

Bei der Content-orientierten Zeitmessung wird auf die Generierung einzelner Content-„Blöcke“ Bezug genommen. Es wird zwischen der Erstellung von 2D-Content, wie Textinformationen und Videos, sowie 3D-Content, wie die 3D-Bautelanzeige, die Animationserstellung und das Tunnelfeature unterschieden. Zudem werden die Blöcke CAD-Import, Tracking-Konfiguration, Deployment und Virtuelle Registrierung zeitlich bewertet.

Dadurch wird deutlich, welcher Content besonders zeitintensiv in der Erstellung ist und welcher schnell erstellt werden kann.

Qualität

Die Qualität des Autorenprozesses steht und fällt mit dem Nutzen der Endanwendung. Ein noch so effizienter Prozess hat keine Wirkung, wenn er nicht effektiv ist und das Ziel, in diesem Fall die Qualifizierung von Mitarbeitern, nicht erreicht wird. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit über den, in verschiedenen Studien nachgewiesenen Nutzen argumentiert, dass AR-basierte Anwendungen einen Mehrwert generieren. Die Validität der Studienergebnisse ist jedoch mit Vorsicht zu genießen, da viele Studien in einer anderen Umgebung und mit anderen Tools durchgeführt wurden. Generell gibt es bei der Art der Contentdarstellung jedoch Überschneidungen. Insbesondere die Ergebnisse von Werrlich et al. (2017-2018) sind für den hier durchgeführten Vergleich wertvoll, da das gleiche UX von BMW AS-IS verwendet wird und bereits Ergebnisse zur Qualitätssteigerung und der Zufriedenheit der Trainees existieren.

6.2 Überblick verschiedener Trainingserstellungsansätze

In Tabelle 3 werden die verschiedenen Trainingserstellungsansätze und ihre jeweiligen Endgeräte und -applikationen zusammengefasst, die am Ende zur Durchführung eines Trainings verwendet werden. Da der Fokus auf der Content-Generierung für die verschiedenen Varianten liegt, wird in diesem Abschnitt nicht weiter auf den Nutzen eingegangen.

Tabelle 3: Übersicht der verschiedenen Qualifizierungsvarianten, klassifiziert nach Medium, Hardware und Nutzeranwendung

Primäres Medium	Hardware Endgerät	Endapplikation	
Paper-based	Papier	Anlernmappe/SAB	
Video-based	Display/Tablet	Windows Media Player/Quick Time	
	AR-Headset (HMD)	MS PowerPoint	
	2D-Datenbrille	Ubimax	
AR-based	AR-Headset (HMD)	Spatial Media Player (SMP)	
		Anbieter E-Applikation	
		Mit CAD-Inhalten	Anbieter C-Applikation
		Mit CAD-Inhalten	Anbieter D-Applikation
		BMW AS-IS	

Die Trainingsansätze werden, abhängig von der Wahl des Schulungsmediums, in Papier-basiert, Video-basiert und AR-basiert klassifiziert. Die nächste Unterscheidung findet dann bei der Wahl des Endgerätes statt. So können Videos auf stationären Displays, mobilen Tablets oder Datenbrillen und HMDs dargestellt werden. Zusätzlich zu den Endgeräten kann noch zwischen der verwendeten Applikation (Software) unterschieden werden. Wie bereits im Benchmark, in Abschnitt 5, deutlich wurde, existieren gerade bei AR-basierten Trainings sehr unterschiedliche Ansätze, mit denen die Erstellung eines Trainings realisiert werden kann.

6.2.1 Paper-based-Training (mit Face-to-Face Unterstützung)

Ein Papier-basiertes Training ist die aktuell praktizierte und standardisierte Methode zur Anlernung neuer Montagemitarbeiter in der BMW Group (siehe dazu Abschnitt 3.3.2). Das Kernelement bildet das SAB, wo die Montageschritte (TVGs) mit einer kurzen Beschreibung angeführt sind. Die Anlernhilfe ist dabei das Dokument, in dem eine detaillierte Ausführung der Schritte festgehalten wird.

In Abbildung 100 ist der Prozess zur Erstellung einer Anlernhilfe skizziert, der durch den Trainer ausgeführt wird.

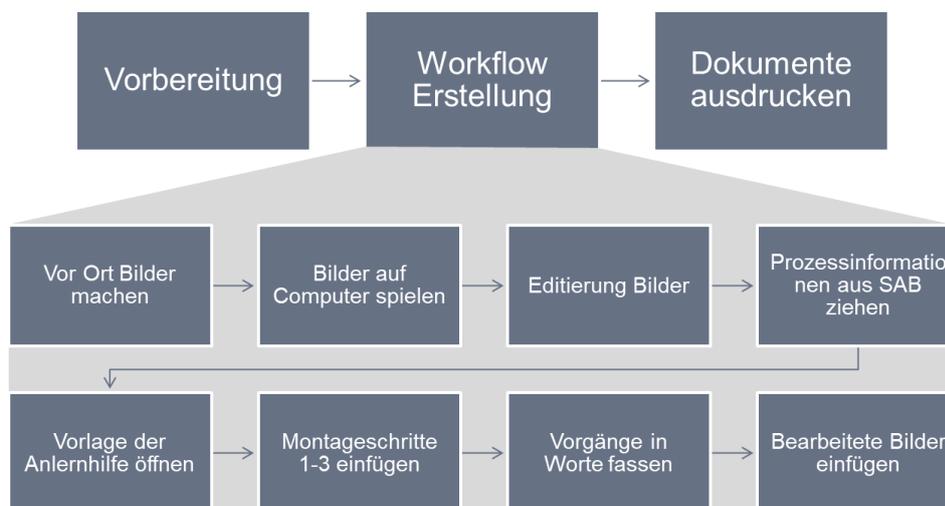
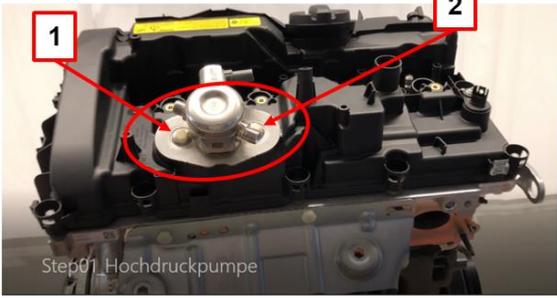
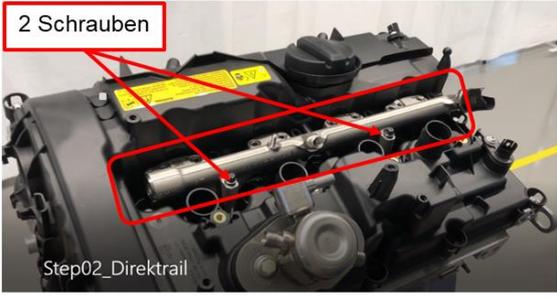
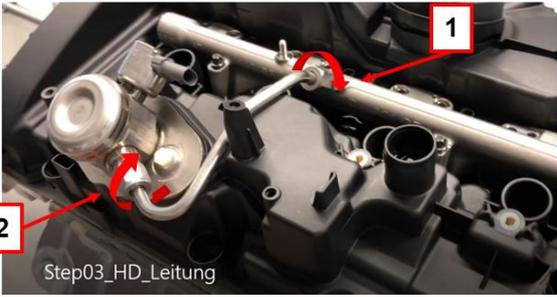


Abbildung 100: Prozess zur Erstellung einer Anlernhilfe mit drei Schritten

Exemplarisch werden drei Montageschritte erstellt, die im Rahmen dieser Arbeit auch mit den anderen Trainingsvarianten (Video- und AR-basiert) umgesetzt werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 101 dargestellt.

- 1.
- 
- Step01_Hochdruckpumpe
1. Entnahme der Hochdruckpumpe aus dem Regal
 2. Aufsetzen der Hochdruckpumpe an der markierten Stelle
 3. Aufnahme von zwei Schrauben aus Regal
 4. Aufnahme Werkzeug aus Regal
 5. An Stelle 1 und 2 verschrauben
- 2.
- 
- Step02_Direktrail
1. Entnahme des DirectRail aus dem Regal
 2. Einsetzen des DirectRail auf der markierten Stelle
 3. Aufnahme von zwei Schrauben
 4. Aufnahme Werkzeug
 5. Einsetzen und manuelles Andrehen der Schrauben
 6. Festschrauben der Schrauben mit Werkzeug
- 3.
- 
- Step03_HD_Leitung
1. Entnahme der HD-Leitung aus dem Regal
 2. Ansetzen der HD-Leitung an Stelle 1
 3. Ansetzen der HD-Leitung an Stelle 2
 4. Mit der Hand anschrauben
 5. Aufnahme Schraubenschlüssel
 6. Festziehen der Muttern mit Schraubenschlüssel

VERKANTUNG DES GEWINDES VERMEIDEN!

Abbildung 101: Papier-basierte Anlernhilfe mit drei exemplarischen Montageschritten

Es ist zu erkennen, dass für den Wissenstransfer in der Regel ein unbearbeitetes Bild nicht aussagekräftig genug ist. Durch das Einfügen von Symbolen, wie Pfeilen und Kreisen, können entscheidende Hinweise gegeben werden. Dafür müssen die Bilder über ein Bildbearbeitungsprogramm wie MS Paint oder mit den integrierten Tools in MS PowerPoint editiert werden. Für den textuellen Input reicht es nicht die Informationen aus dem SAB zu übernehmen, da diese nicht ausreichend sind. Deshalb muss der Trainingsersteller die notwendigen, motorischen Vorgänge abstrahieren und in Worte fassen. Dies erfordert eine kognitive Transferleistung, zum einen durch den Trainingsersteller, zum anderen durch die Trainees, welche die Information wieder „entschlüsseln“ müssen.

Aus diesem Grund ist Papier-basiertes Training eng mit einem „Face-to-Face“-Training verbunden, bei dem ein Trainer während des gesamten Anlernprozesses anwesend ist.

Abhängig von der Qualität der Anlernmappe und der Abstraktionsfähigkeit des Trainers sind die Trainingsunterlagen nicht immer ausreichend, um einen Trainee auf die Aufgaben vorzubereiten. Dies gilt insbesondere für unerfahrene Mitarbeiter (Werrlich et al. 2017c, S. 417).

Im Folgenden sind zusammenfassend die zentralen Punkte bezüglich des Erstellungsaufwandes und des Nutzens eines Papier-basierten Trainings dargestellt.

Erstellungsaufwand für eine Anlernmappe

- Bilder vor Ort machen
- Textinformationen sammeln und erweitern
- Bedienung eines Textverarbeitungsprogrammes (MS Word, MS PowerPoint)
- Abstraktion: Der Trainer muss die Tätigkeiten in verständliche Worte fassen → Kognitive „Workload“ für Trainingsersteller und Trainees, Es kann leicht zu Missverständnissen kommen
- Notwendigkeit eines Druckers

Darüber hinaus ergeben sich für das Training weitere **Nachteile**:

- Intensive Betreuung eines Trainees durch Trainer während des Trainings notwendig, um Missverständnisse zu vermeiden
- Lese- und Sprachfähigkeiten der Trainees müssen ausreichend sein
- Trainingserfolg abhängig von pädagogischen Fähigkeiten einzelner Trainer. Zum Beispiel können Trainees leicht gestresst werden durch harsche Kritik.

Auf der **Nutzenseite** ergeben sich diese **Vorteile**:

- Es handelt sich um den IST-Prozess: Keine weitere Implementierung notwendig
- Bewährte Methode, Akzeptanz der Produktionsmitarbeiter: „Das machen wir schon seit 30 Jahren so“
- Bei Änderungen sind die Inhalte leicht editierbar
- hohe Wiederverwendbarkeit, zum Beispiel bei anderen Derivaten
- Dient zugleich zur Dokumentation/ Prozessabsicherung an der Arbeitsstation
- Leichter Zugang zu der Anlernmappe für das Inline-Training

6.2.2 Video-based Training

Ein weiterer Ansatz, der die Nachteile des Papier-basierten Trainings vermindern soll, ist das Video-basierte Training. Hierbei werden die Montagevorgänge in einem Video festgehalten. Abhängig von der Komplexität der Montageschritte ist eine zusätzliche Editierung der Videoinhalte notwendig, um weitere Informationen einzubauen. In einem Pilotprojekt, im BMW Werk München, wurden in der Endmontage über 1500 TVGs eines Derivates verfilmt. Dabei ist die folgende Struktur für den Aufbau eines Montagevideos gewählt worden (siehe Abbildung 102).

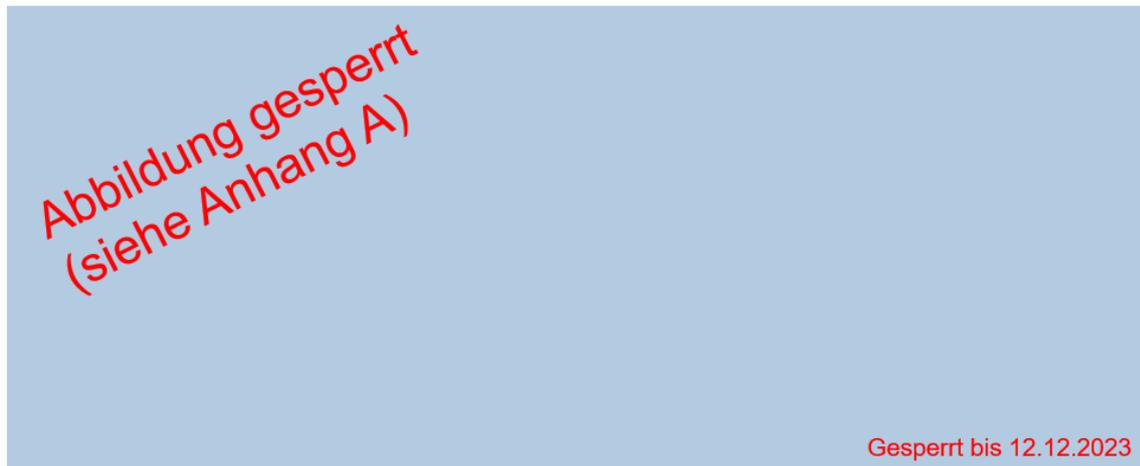


Abbildung 102: Aufbau eines standardisierten Montagevideos

Für die Erstellung der Videos sind mehrere Schritte notwendig. Zum einen müssen die Videos in einem geeigneten Rahmen gedreht werden, ohne große Mehrkosten zu verursachen. So können die Videosequenzen zum Beispiel parallel zum Training der Anlauftrainer aufgenommen werden. Dafür ist eine Person notwendig, die den Videodreh organisatorisch leitet und die zu drehenden Montagevorgänge vorbereitet. Für den Drehtag sind zusätzlich ein Kameramann mit einem geeigneten Kamerasystem (Kamera und Stativ) sowie ein Mitarbeiter, der die Montageschritte im Video ausführt, notwendig. Zu Beginn der Verfilmung eines TVGs werden die verwendeten Bauteile und Werkzeuge gefilmt (siehe Abbildung 102). Der Montagevorgang eines TVGs wird dann nach Möglichkeit in einem „Take“ gedreht, so dass man später die Videodatei leicht zuordnen kann.

Nachdem alle Videos aufgenommen wurden, müssen sie auf einem Computer gespeichert und den einzelnen TVGs zugeordnet werden. Dafür ist, abhängig von der Anzahl an zu filmenden TVGs, eine übersichtliche Organisationsstruktur notwendig. Anschließend werden die TVGs einzeln mit einem Videobearbeitungsprogramm, wie Adobe Premiere Elements, geschnitten und die benötigten Symbole eingeblendet. Insgesamt gibt es acht genormte Symbole die während des Montagevorgangs eingeblendet werden können (siehe Abbildung 103).



Abbildung 103: Verwendete Symbolik in Trainingsvideos (angelehnt an BMW 2016)

In Abbildung 104 ist der Gesamtprozess zur Erstellung von Videos, sowie die detaillierte Vorgehensweise bei der Editierung eines Videos, dargestellt. Wie oben beschrieben wird in der Vorbereitung ein Überblick über die zu verfilmenden Prozesse gewonnen. Nachdem die Videos erfolgreich gedreht wurden, erfolgt die Bearbeitung. Dazu wird ein bereits bestehendes Vorlageprojekt geöffnet, in dem eine Schnittmaske vorbereitet ist. Die weiteren Schritte gehen aus Abbildung 104 hervor.

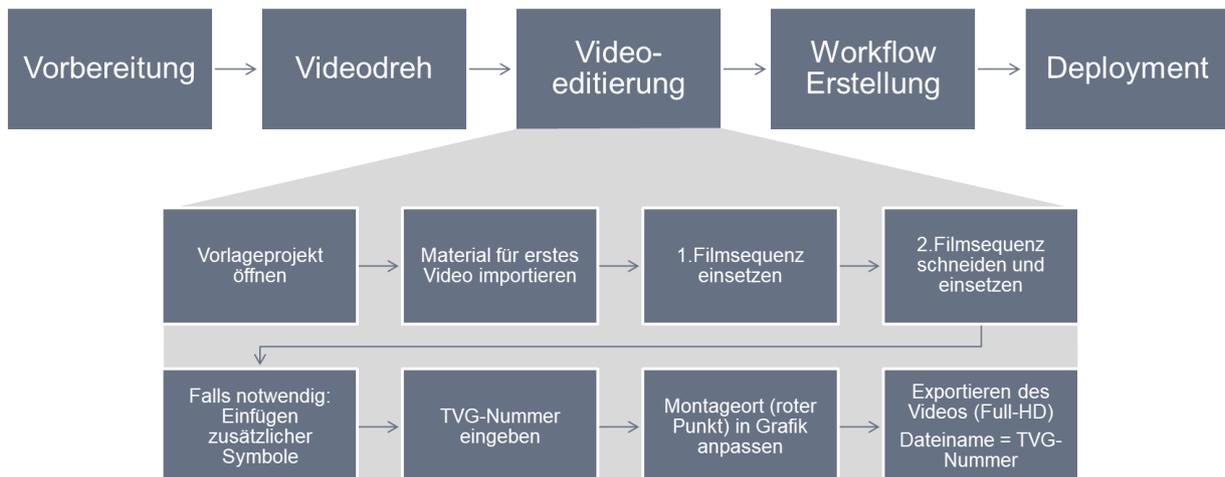


Abbildung 104: Prozess zur Editierung eines Montagevideos, eingeordnet in den gesamten Videoerstellungsprozess

Nach dem erfolgreichen Export der Videos, können sie sequentiell verknüpft werden, um dem Trainee den Trainingsablauf zu erleichtern. Abhängig von dem Endgerät unterscheiden sich hier die Verfahren.

Display/Tablet

Die Videos werden in einem Ordner abgelegt. Die Ordnerstruktur hat hierbei die Hierarchie: Montageband → Meisterbereich → Takt. Nach der vorgegebenen Reihenfolge im SAB werden die Videos mit ihrer TVG-Nummer durch den Trainee identifiziert und können einzeln abgespielt werden.

HMD/AR-Headset

Durch die Einbindung der Videos in eine PowerPoint-Präsentation kann eine sequentielle Verknüpfung mit einfachen Methoden hergestellt werden. Dieses Verfahren wird bei der Darstellung auf der HoloLens praktiziert, da die Videoauswahl über die Gestensteuerung für HMD-unerfahrene Trainees mühsam ist und es leicht zu einer Fehlbedienung kommen kann. Durch eine einfache PowerPoint-Maske haben die Trainees lediglich die Möglichkeit „Weiter“, zum Abspielen des nächsten Videos, oder „Zurück“, zum Abspielen des letzten Videos, zu drücken (siehe Abbildung 105). Zu Beginn eines Trainings muss dabei der Trainer die HoloLens so konfigurieren, dass die Trainees direkt die geöffnete PowerPoint Präsentation vor sich haben.

Die Darstellung von Videos mit einem AR-Headset oder einer Datenbrille hat den Vorteil, dass der Mitarbeiter die Hände frei hat und das Video direkt am Montageort

anzeigen kann. Bei Unklarheiten kann somit das Video direkt wieder abgespielt werden und es ist nicht notwendig, ein Tablet in die Hand zu nehmen bzw. auf einen Bildschirm an einer Arbeitsstation zu schauen.



Abbildung 105: Einbindung von zwei Montagevideos in eine PowerPoint-Präsentation

Für die Darstellung der Videos auf den Smart Glasses müssen die Videos jedoch komprimiert werden, damit sie ohne Probleme wiedergegeben werden können. Auf der HoloLens ist eine maximale Auflösung von 1280x720 (HD ready) möglich. Für das Deployment muss die HoloLens über das Device Portal mit dem Computer verbunden werden. Dazu muss ein lokales WLAN verfügbar sein, in dem beide Geräte registriert sind. Durch einen Internet Browser, wie Google Chrome, kann so auf die HoloLens zugegriffen und die PowerPoint hochgeladen werden. Der Zeitaufwand ist dabei recht hoch, weshalb eine geringere Videoauflösung von 720 x 576 (SD) empfohlen wird.

Einsatz auf 2D-Datenbrillen

Zur Workflow-Erstellung auf Datenbrillen gibt es, wie bei AR-Brillen, zahlreiche Anbieter, die eigene Editoren anbieten. Als Anbieter seien zum Beispiel die Software-Hersteller Oculavis, loxp, Ubisoft oder Upskill erwähnt, die sich alle hardwareunabhängig positionieren. In dieser Arbeit wird das Autorentool Frontline Creator des Anbieters Ubimax verwendet. Als Ausgabegerät können dabei verschiedene Brillen verwendet werden. Der hier kreierte Workflow wird exemplarisch auf die drei Datenbrillen Google Glass, HMT-1 von RealWear und die Vuzix M100 gespielt. Der Deployment-Prozess ist dabei identisch.

Zur Erstellung eines Workflows muss der Ubimax-Server über den Webbrowser (Google Chrome) aufgerufen werden. Dann wird ein neues Projekt geöffnet, welches mit einem QR-Code verbunden wird. Dieser QR-Code muss ausgedruckt und später im Trainingsraum mit der Kamera der Datenbrille eingescannt werden. Im Anschluss wird der Workflow in Form eines Flussdiagramms definiert (siehe Abbildung 106).

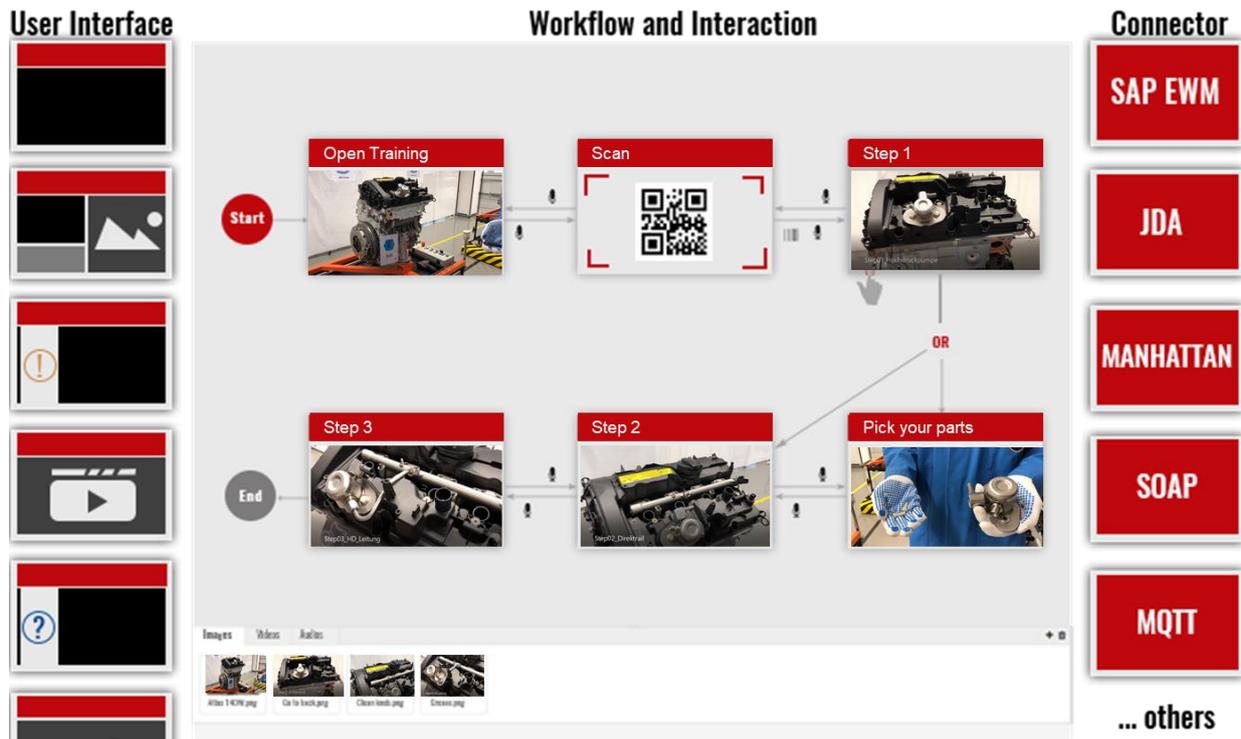


Abbildung 106: Workflowerstellung mit dem Frontline Creator von Ubimax (Ubimax 2018)

Dabei werden die Schaltflächen aus dem linken Panel via Drag&Drop gewählt und auf die Bearbeitungsfläche in der Mitte gezogen. Abhängig von den vorhandenen Medien, kann aus den vorgegeben Standardvorlagen gewählt werden. In diesem Fall sollen nur die Montagevideos dargestellt werden. Die einzelnen Schaltflächen werden mittels Beziehungspfeilen miteinander verbunden. Sie definieren die Beziehung zwischen den Elementen und werden über Interaktionskommandos (Sprache, Klicken, Barcode/QR-Code) ausgelöst. Dabei kann der Ersteller wählen, welche Interaktionsmethode bevorzugt wird. Es besteht auch die Möglichkeit Wenn-Dann-Beziehungen oder AND/XOR/OR –Gatter zu implementieren.

Bei einer Änderung der Workflowsequenz oder dem Löschen eines Elementes, müssen die Beziehungen zwischen den Schaltflächen neu definiert werden.

Auf der rechten Seite der Oberfläche des Ubimax-Editors sind die Schnittstellen zu der gängigsten Standardsoftware, wie SAP EWM oder JDA, dargestellt. Dadurch wird eine Anbindung an Datensysteme ermöglicht, wie sie zum Beispiel für den Kommissioniereinsatz in der Lagerlogistik benötigt wird. Hier liegt die „wahre Stärke“ von assistierenden 2D-Datenbrillen. Auch können bei Prüfprozessen Dokumentationsbilder aufgenommen und in ein IT-System zurückgespielt werden.

Bei Mitarbeitertrainings kommt es jedoch zu Nachteilen, wie einem eingeschränkten Sichtfeld durch das Display. Auch ist die maximale Auflösung der Videos auf 640 × 360 Pixel (nHD) beschränkt und es ist anstrengend, sich bei einer monokularen Brille auf die angezeigten Informationen zu konzentrieren.

Im Folgenden wird zuerst der generelle Aufwand und Nutzen für die Erstellung von Trainingsvideos zusammengefasst, bevor auf die verschiedenen Endgerätespezifischen Vor- und Nachteile eingegangen wird.

Erstellungsaufwand für bearbeitete Montagevideos

- Videodreh vor Ort
 - Organisation der Drehtage und –Inhalte, des benötigten Personals (Kameramann, Anlauftrainer, Assistenz) und des Equipments (Kamera, Stabilisator)
- Videobearbeitung mit geeigneter Software (z.B. Adobe Premiere Elements)
 - Geschultes Personal
 - Zeitaufwand ca. 5-15 Minuten pro Montagevideo, abhängig von Montageumfang und Bedarf an zusätzlicher Symbolik
 - Bearbeitungszeit auch von Hardwareleistung abhängig (Rendering, Export der Videos)
 - Montagesymbole sinnvoll einsetzen
- Organisation des Filmmaterials (insbesondere bei vielen Montagevorgängen)
 - Zuordnung des Materials zu den einzelnen TVGs
 - Handling der Dateigrößen

Nachteile bei der Erstellung von Montagevideos:

- Nicht alle Montagevorgänge gut verfilmbar (z.B. feinmotorische oder verdeckte Tätigkeiten)
- Abweichungen der Bauteile und des Verbauvorgangs (BBG zu Serie) → Bei Änderungen müssen Videos komplett neu gedreht werden, keine Wiederverwertbarkeit alten Materials
- Trainingsbauteile oft bereits abgenutzt oder defekt
- Erstellungsaufwand steigt mit der Qualität bei zusätzlicher Videobearbeitung

Auf der **Nutzenseite** ergeben sich jedoch folgende **Vorteile**:

- Notwendige Abstraktion der Trainingsinhalte entfällt → erleichterter Wissenstransfer gegenüber Paper-basierten Trainings
- Videos sind sprachunabhängig → **Hohe Wiederverwendbarkeit** bei Derivatsanläufen in mehreren Werken (z.B. der 3er BMW in München, Mexiko und China), Sprachbarrieren der Mitarbeiter können umgangen werden
- Ermöglicht Selbstlernen der Mitarbeiter
- Bereits erprobte Methode, hohe Akzeptanz der Produktionsmitarbeiter (Mehring 2017)

- Erstellung und Schnitt von Videos auch durch unerfahrene Mitarbeiter gut durchführbar, zusätzliche Bearbeitung, z.B. das Einfügen von Symbolen, jedoch etwas aufwendiger
- Leicht abrufbar am Arbeitsplatz der Meister und Vorarbeiter

Zusätzlich zu dem oben erwähnten Nutzen und Aufwand von Video-basierten Trainings, ergeben sich abhängig von den verwendeten Endgeräten zusätzliche Vor- und Nachteile. Zum einen für den Trainingserstellungsprozess durch den zusätzlichen Workflow- und Deployment-Aufwand und zum anderen für die Durchführung des Trainings. In Tabelle 4 sind die Endgerät-spezifischen Vor- und Nachteile erläutert.

Tabelle 4: Vor- und Nachteile der verschiedenen Endgeräte bei der Erstellung und Durchführung von video-basierten Trainings

	Deployment	Vorteile	Nachteile
Video-based	Display oder HHD (Tablet)	Vorteile video-based plus: <ul style="list-style-type: none"> – Erleichtertes Gruppentraining mit Display – freie Platzierung der Videos im Raum möglich – Bereits praktiziert (G20-Training) – hohe Akzeptanz der Mitarbeiter (Mehring 2017) – Hohe Auflösung der Videos möglich (HD, 4K) 	Nachteile video-based plus: <ul style="list-style-type: none"> – Tablet: nicht hands-free, Bedienung mit Handschuhen eingeschränkt – Display: stationär, nicht im Sichtfeld während des Montagevorgangs – Trainees müssen über TVG-Nummern richtige Videos identifizieren (keine vorgegebene Workflow-Struktur) – Gefahr von Anwendungsfehlern bei Auswahl der Videos in Ordnerstruktur (Löschen, Verschieben)
	HMD mit Powerpoint-Workflow	Vorteile video-based plus: <ul style="list-style-type: none"> – Hands-free – freie Platzierung der Videos im Raum möglich – Vorgegebene Montagelerneihenfolge durch Powerpoint-Workflow – Bereits Nutzerstudien durchgeführt: <ul style="list-style-type: none"> – Anlernzeit für neue Mitarbeiter geringer im Vergleich zu paper-based Training (Mehring 2017) – hohe Akzeptanz der Mitarbeiter (Mehring 2017) 	Nachteile video-based plus: <ul style="list-style-type: none"> – Deployment über Device Portal zeitintensiv – Kompression der Videos für Hololens – Größe des PowerPoint-Datei – geringer funktionaler Nutzen der Hololens – Bauraumtauglichkeit: Hololens ungeeignet für Innenraum- und Überkopfmontage – Kosten und Ergonomie des Endgeräts
	2D-Datenbrille mit Ubimax-Workflow	Vorteile video-based plus: <ul style="list-style-type: none"> – Hands-free – Direkte Anzeige der Videos im Sichtfeld – Vorgegebene Montagelerneihenfolge durch Ubimax-Workflow – Zusätzlich Anzeige von Bildern, Textinformationen möglich – Ergonomie Endgerät – Übersichtliche Workflow-Erstellung mit UML-Ansatz – Deployment auf Endgerät über Server möglich – Unabhängig von Hardwarehersteller 	Nachteile video-based plus: <ul style="list-style-type: none"> – Fokussierung anstrengend bei monokularen Lösungen (Vuzix, RealWear HMT-1, Google Glass) – Kompression der Videos für Datenbrille (nHD) – Änderung des Workflows: Manuelle Neuverlinkung der Prozessschritte bei Veränderung der Sequenz – Sichtfeld leicht beeinträchtigt bei Videoanzeige (zu viele Informationen) – Kosten Endgerät und Software

Ergänzend ist in Anhang F eine Übersicht verschiedener Hardware- und Softwarelösungen für die Videoaufnahme und –bearbeitung aufgelistet, die alternativ verwendet werden können, jedoch nicht alle im Rahmen dieser Arbeit getestet wurden.

6.2.3 AR-based Training

Aufbauend auf den Papier- und Video-basierten Trainingsansätzen existiert, wie bereits in Kapitel 5.2 ausführlich erläutert, ein AR-basiertes Training. Als umfassender

Ansatz gilt dabei die BMW-interne Trainingsapplikation BMW AS-IS. Daneben werden in diesem Abschnitt die Content-Generierungsvarianten von ANBIETER C, Anbieter E, Anbieter D sowie eine weitere BMW-interne Eigenentwicklung betrachtet, die an BMW AS-IS angelehnt ist, jedoch einen wesentlich leichteren Autorenprozess ermöglichen soll.

Spatial Media Player (SMP)

Der Ansatz des Spatial Media Players (SMP) bildet einen stetigen Übergang zwischen Video-basiertem zu AR-basiertem Training. Als Endgerät wird, wie bei der Video-basierten PowerPoint-Lösung, die Microsoft HoloLens verwendet. Auch hier können Videos frei im Raum, direkt am Montageort fixiert werden. Zusätzlich zu den Montagevideos können Bilder und Textinformationen im SMP dargestellt werden.

Auf die Darstellung von 3D-Content wird bisher verzichtet, um einen schlanken Autorenprozess zu ermöglichen.

In Abbildung 107 sind die wesentlichen Prozessschritte zur Erstellung eines Montagetrainings dargestellt. Als **Vorbereitung** werden die relevanten Prozess- und Trainingsinformationen gesammelt sowie der 2D-Content bereitgestellt. In der **Workflow-Erstellung** wird der gewünschte Content über Unity in die Projektvorlage eingepflegt. Der Marker für das Tracking ist bereits vorkonfiguriert. Die weiteren Teilschritte sind im unteren Teil der Abbildung 107 beschrieben.

Nach der Erstellung des Workflows wird das Projekt im Rahmen des **Deployments** auf das Endgerät gespielt. Hierfür wird die HoloLens via Kabel an den Computer angeschlossen. Das Projekt wird als „Bundle“ gespeichert und mit den folgenden Einstellungen exportiert:

Target Device:	HoloLens
Build Type:	D3D
Build and Run on:	Local machine
Unity C# Projects:	Yes
Compression Method:	Default

Anschließend wird in dem neuerstellten Build-Ordner das kompilierte C#-Skript mit Visual Studio geöffnet. Dort wird das erstellte Trainingsszenario mit den Einstellungen „Release“, „x86“ und „Device“ auf die HoloLens übertragen.

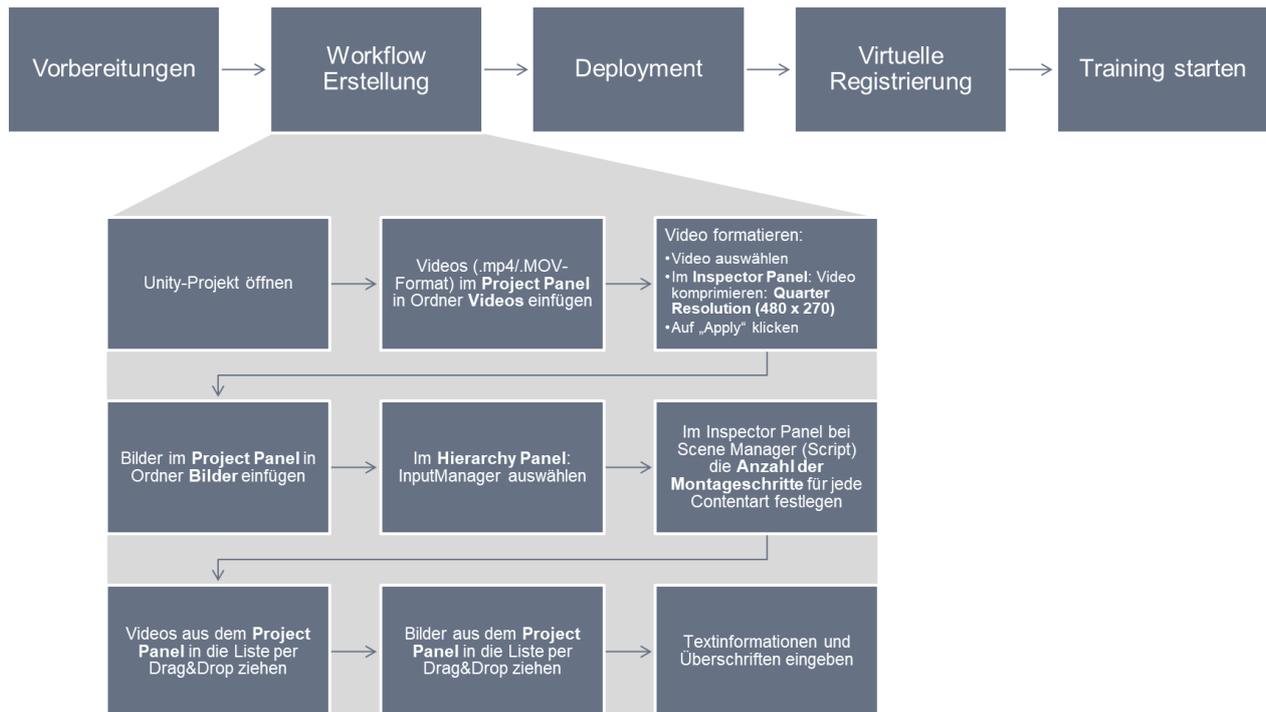


Abbildung 107: Autorenprozess des Spatial Media Players (SMP); im unteren Abschnitt sind die Teilprozesse der Workflow-Erstellung dargestellt

Nach erfolgreichem Deployment wird die Unity-Applikation auf dem Endgerät geöffnet und es kann mit der **virtuellen Registrierung** begonnen werden. In diesem Abschnitt wird der räumliche Autorenprozess ausgeführt, in denen die einzelnen POIs durch den Trainingsersteller definiert werden. In Abbildung 108 ist der Vorgang für die drei Montageschritte visualisiert.

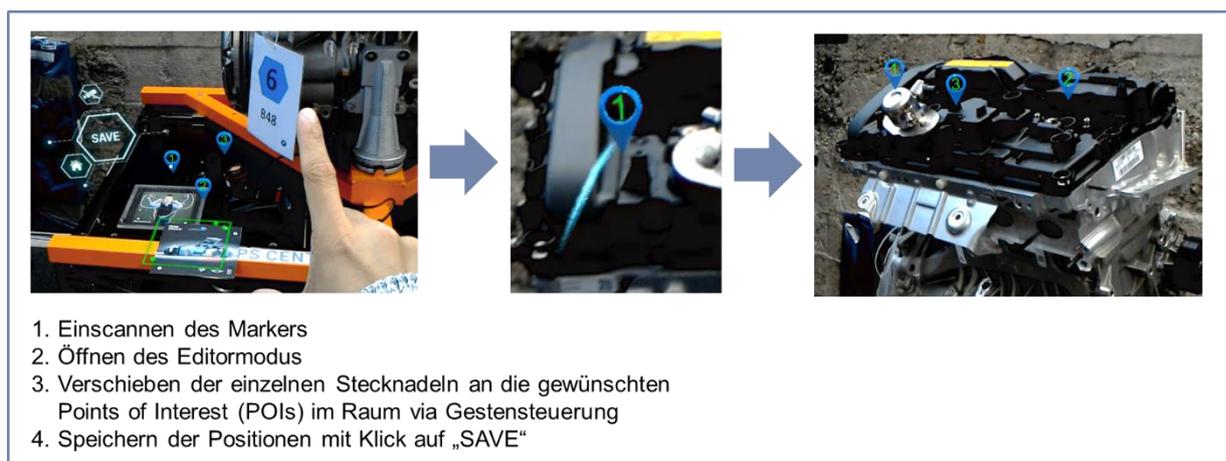


Abbildung 108: Virtuelle Registrierung mit dem SMP: Im Editormodus werden die nummerierten Stecknadeln (mit dem verlinkten Content) an den POIs positioniert

Im Anschluss kann der Traineeemodus mit einem Klick auf „START“ geöffnet werden. In Abbildung 109 ist das UI für das erstellte Szenario mit den drei Montageschritten am Motorblock dargestellt.

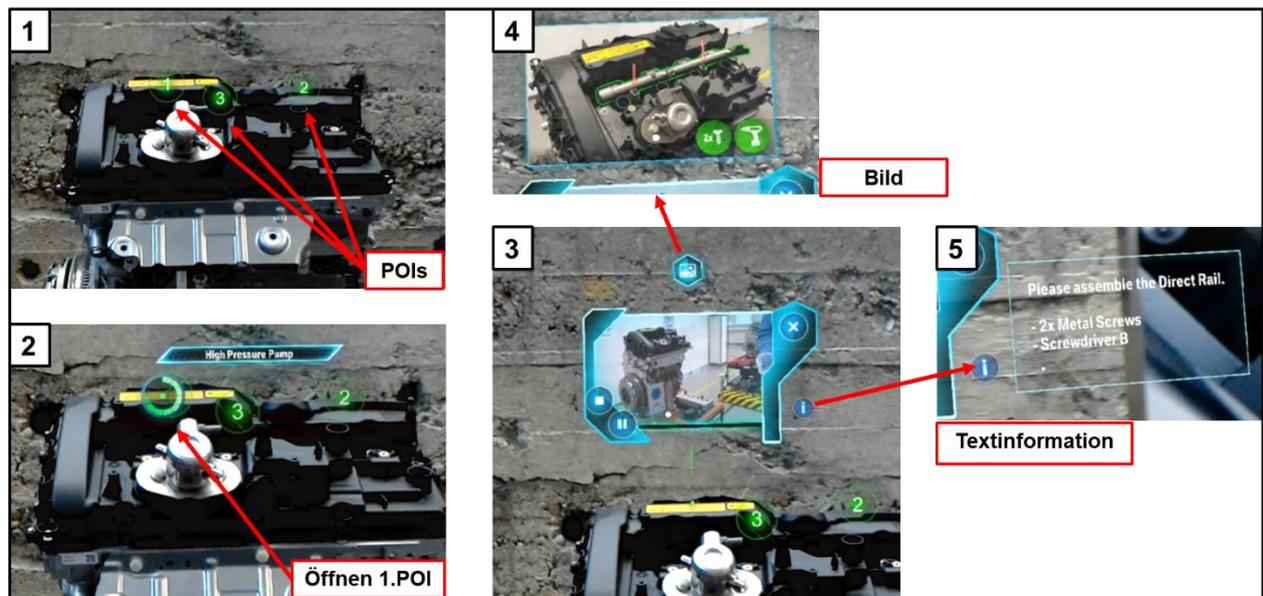


Abbildung 109: Trainingsmodus des SMP: 1. Anzeige der POIs; 2. Auswahl eines POIs via Blicksteuerung (Gaze); 3. Geöffneter POI: Video wird sofort abgespielt; 4. Öffnen des Bildes mit Blick auf das Bildsymbol; 5. Öffnen der Textinformation mit Blick auf I-Symbol

- 1 - Anzeige der nummerierten POIs an der vorgesehenen Stelle im Raum.
- 2 - Auswahl eines POIs via Blicksteuerung, auch Gaze-Funktion genannt.
- 3 - Nach kurzer Verweilzeit mit dem Blick auf der Schaltfläche, wird der Content des ersten POIs geöffnet. Dabei wird das verknüpfte Video sofort abgespielt. Es kann angehalten und pausiert werden.
- 4 - Mit einem Blick auf das Bildsymbol im oberen Bereich des UIs wird das hinterlegte Bild geöffnet.
- 5 - Mit einem Blick auf das Informationssymbol, rechts vom Videofenster wird die textuelle Zusatzinformation eingeblendet

Der gesamte Autorenprozess befindet sich in Anhang G unter der Überschrift SMP.

Da das Projekt agil in der BMW-internen Softwareentwicklung vorangetrieben wird, gibt es bereits Bestrebungen den **Autorenprozess deutlich zu vereinfachen** und eine Verknüpfung des Contents ohne den Programmen Unity und Visual Studio zu realisieren. In dem Rahmen wird ein Webbrowser-basiertes Autorentool geschaffen, in dem die Trainingsersteller eigene Trainingsprojekte anlegen und den bereits existierenden 2D-Content via Drag&Drop - Funktion verknüpfen können.

Ein „Mock-up“ dieser Möglichkeit ist in Abbildung 110 dargestellt. Dabei werden die drei Montageschritte erstellt. Es ist ein einfaches Ändern und Löschen von Montageschritten möglich, auch kann die Montagereihenfolge schnell verändert werden.



Abbildung 110: Vereinfachter Autorenprozess durch ein Webbrowser-basiertes Autorentool: Content wird via Drag&Drop verlinkt; Icons werden grün bei verknüpften Content; Text wird im Autorentool eingegeben

Nachdem das Training mit dem Autorentool erstellt wurde, wird es auf einen AR Server publiziert. Von diesem CMS kann das Trainingsprojekt von den Klienten-Applikationen auf die Endgeräte heruntergeladen werden. Auf dem Endgerät wird dann mit der virtuellen Registrierung vor Ort fortgefahren. Die gespeicherten Positionsdaten können dann im lokalen Trainingsprojekt gespeichert werden und zudem auf das zentrale Trainingsprojekt im CMS übertragen werden.

In dieser Arbeit wird jedoch der Unity-basierte Autorenprozess bewertet, da das Autorentool noch nicht zur Verfügung steht. Im ersten Quartal 2019 wird es eine erste Version des Autorentools, als sogenanntes „Minimum Viable Product“ (MVP), geben.

Anbieter E (siehe Benchmark)

Da der Content-Generierungsprozess mit Anbieter E bereits im Benchmark vorgestellt wurde, wird er an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt (siehe Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Der gesamte Prozess zur Erstellung der drei Montageschritte ist in Anhang G unter Anbieter E dokumentiert.

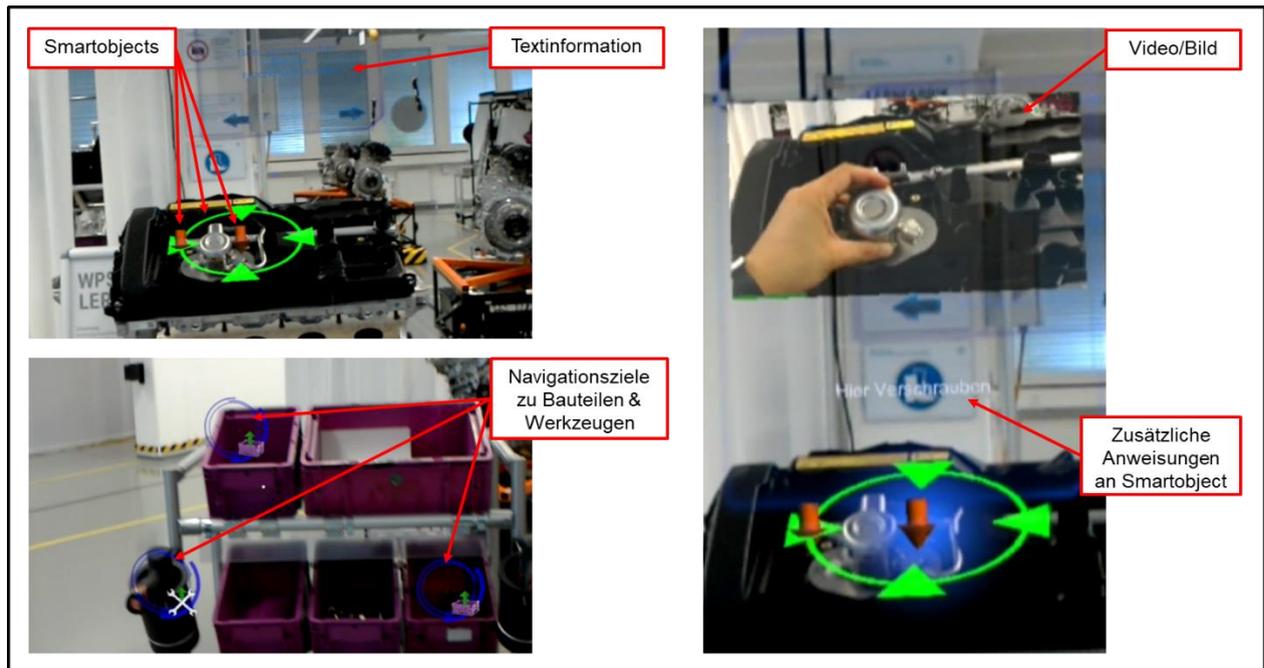


Abbildung 111: UX des Trainee Modes: Oben links: Drei Smartobjects in Szene, oberhalb des Motors schwebt ein Textinformationsfeld; unten links: Navigationsziele zu Bauteilen/Werkzeugen; Rechts: Hervorgehobenes Smart Object (Pfeil) mit verknüpftem Content (geöffnetes Video und zusätzlicher textueller Information).

Anbieter C (siehe Benchmark)

Ein weiterer Softwareanbieter, der bereits bei BMW in Form von Pilotprojekten in der Komponentenfertigung und der Hochvoltspeichermontage im Einsatz ist, ist Anbieter C. Im Gegensatz zu der, im Benchmark (Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) demonstrierten Variante mit STEPS und PINS, handelt es sich in diesen Anwendungsfällen um speziell angepasste Lösungen, die 2D-Content und 3D-Content einbinden. Dabei werden die verwendeten CAD-Daten im ersten Schritt durch Anbieter C extern aufbereitet. Über ein gemeinsames Austauschverzeichnis werden die Daten geteilt. Die Workflow-Erstellung und Content-Verlinkung geschieht bei diesen Lösungen über einen XML-Editor. In Abbildung 112 ist die Erstellung eines Arbeitsschrittes exemplarisch dargestellt.



Abbildung 112: Workflow-Erstellung: Content-Verlinkung innerhalb eines Arbeitsschrittes mit XML-Code in Visual Studio (Screenshot Visual Studio)

Der hier bewertete Autorenprozess beruht jedoch auf dem Programm PINS, mit dem einzelne POIs mit 2D-Content dargestellt werden können. Der gesamte Autorenprozess ist in Anhang G unter Anbieter C dokumentiert.

Das UX der Endapplikation für den Trainee ist in Abbildung 113 zu sehen. In Schritt 1 werden in die Informationen zum Verbau der Öldruckpumpe gezeigt. In Schritt 2 wird die Position des „Direct Rails“ auf einem Bild, verbunden mit einem Warnsymbol eingeblendet. Im letzten Montageschritt wird ein Bild der verbauten HD-Leitung angezeigt. Es werden keine zusätzlichen Informationen zu dem Lagerort der Bauteile gegeben. Für die Erprobung konnten keine Montagevideos verlinkt werden. Prinzipiell ist dies jedoch möglich.

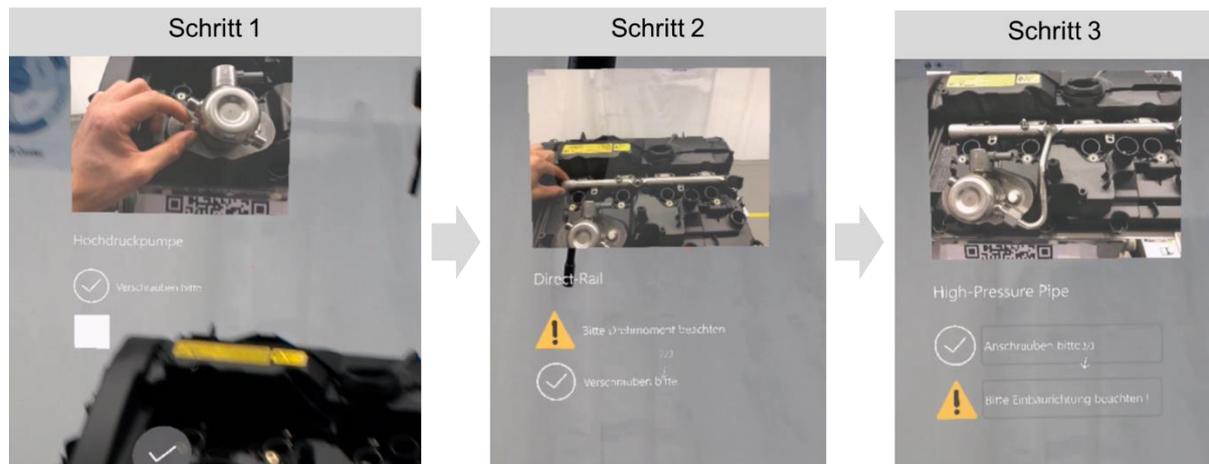


Abbildung 113: UX der Endanwendung für den Trainee. Abgebildet sind die drei Montageschritte mit Textinformation und Bildanzeige

Anbieter D

Als bester Anbieter des durchgeführten Benchmarks ist auch Anbieter D in diesem Vergleich vertreten. Die Vorstellung der verschiedenen Lösungsansätze ist in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** näher beschrieben. Für die Erprobung des Autorenprozesses wurde eine einmonatige Testlizenz der Anbieter D Suite auf einem privaten Computer verwendet. Da die CAD-Daten des Motors aus Datenschutzgründen dafür nicht verwendet werden können, wurde der Prozess anhand eines alternativen CAD-Modells (eine Quadrocopter-Modell) erprobt, um drei Montageschritte in vergleichbarer Komplexität zu erstellen.

Die übergreifenden Prozessschritte zur Erstellung eines AR-Erlebnisses, sowie die Teilschritte zum Import der CAD-Daten aus CATIA, sind in Abbildung 114 dargestellt. Für den detaillierten Gesamtprozess sei auf Anhang F unter Anbieter D verwiesen, wo angelehnt an die Abbildung 114, auch die weiteren Prozessschritte beschrieben werden. Auch stellt die Anbieter D Suite eine umfangreiche Tutorialsammlung für Beginner, Fortgeschrittene und Experten zur Verfügung (Anbieter D 2018).

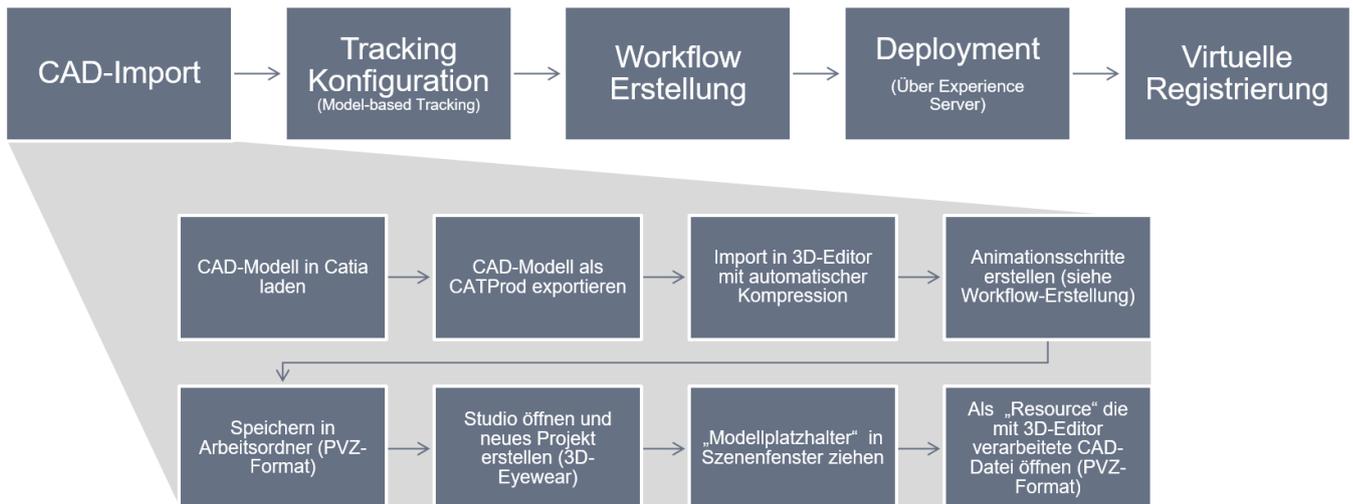


Abbildung 114: Oben: Übergreifende Prozesskette zur Erstellung eines AR-Szenarios mit Creo Illustrate und Anbieter D Studio. Unten: Die einzelnen Prozessschritte zum Import von CAD-Daten

BMW AS-IS

Der BMW AS-IS Ansatz wird ausführlich in Abschnitt 5.2.1 beschrieben. In Abschnitt 5.2.2 wird der Unity-basierte Autorenprozess erläutert. Die Vorgehensweise zur Erstellung der drei Montageschritte befindet sich in Anhang B.

6.3 Effizienzbewertung und Gegenüberstellung der Varianten

Nachdem nun alle verschiedenen Trainingsvarianten vorgestellt wurden und bereits einige Vor- und Nachteile erörtert wurden, wird im Folgenden ein tabellarischer Vergleich zwischen den Varianten ausgeführt.

Aufwandsbewertung

In **Tabelle 5** sind die verschiedenen Trainingserstellungsvarianten, der darstellbare Content sowie die notwendigen Softwareprogramme aufgelistet. In **Tabelle 6** ist der Aufwand zur Neuerstellung, zur Änderung der Workflowsequenz sowie zur Änderung eines Bauteils in einem Montageschritt zusammengefasst. In **Tabelle 7** wird die Wiederverwendbarkeit der einzelnen Ansätze verglichen.

Im Anschluss werden in **Tabelle 8** die Kosten der Trainingserstellung aufgelistet. Da die Kostenstrukturen sehr unterschiedlich sind und zu diesem Zeitpunkt keine verlässliche Quantifizierung der Kosten möglich ist, wird hier auf einen direkten Vergleich verzichtet.

Tabelle 5: Übersicht der Content-Erstellungsvarianten: Darstellbarer Content und die notwendigen Erstellungstools, inklusive der Toolanzahl

Klassifizierung	Hardware Endgerät	Applikation Endgerät	Trainingserstellung	
			Neuerstellungsaufwand	Änderung der Workflowsequenz (Tausch Schritt 1 und 2)
paper-based	keine	Anlernmappe / Dialog mit Trainer	<ul style="list-style-type: none"> - Anlernmappe erstellen: - Bilder machen - Textinfo erstellen - Hohe Abstraktion: Tätigkeit in Worte fassen (Bsp?) - Intensive Betreuung durch Trainer während Trainings notwendig - Ausdrucken auf Papier 	<ul style="list-style-type: none"> - Änderung des Montagebauteil eines Arbeitsschrittes - Neues Bild des Bauteils/Prozessschrittes machen - Einfügen in bestehende Anlernhilfe - Textänderung falls notwendig
			<ul style="list-style-type: none"> - Videoproduktion (Organisation, Dreh, Editierung mit Template, Rendering, Validierung) - Handling Dateigrößen (FullHD-Videos) - Videoorganisation in Ordnerstruktur Trainer vor Ort gibt den Workflow vor) 	<ul style="list-style-type: none"> - Keine, Trainer wählt Videos vor Ort aus - Änderung der TVG-Reihenfolge in SAB
video-based	AR-Headset (HMD)	MS Powerpoint	<ul style="list-style-type: none"> - Videoerstellung (Organisation, Dreh, Editierung mit Template, Rendering, Validierung) - Kompression der Videos auf SD (720 x 576) - Einpflegung der Videos in Powerpoint-Template (Selektion der Videos, Sequenzierung) - Deployment auf HMD über Device Portal 	<ul style="list-style-type: none"> - Neues Montagevideo drehen - Kompression - Powerpoint-Projekt öffnen und altes Video im betroffenen Arbeitsschritt ersetzen - Deployment auf Endgerät
			<ul style="list-style-type: none"> - Videoerstellung (Organisation, Dreh, Editierung mit Template, Rendering, Validierung) - Kompression der Videos auf nHD (640 x 360) - Workflow und Beziehungen zwischen den Schaltflächen erstellen (Prozessmodellierungs-UI) - Deployment auf Endgerät 	<ul style="list-style-type: none"> - Neues Montagevideo drehen - Neue Bilder machen - Inhalt der betroffenen Schaltfläche aktualisieren (Text, Bild, Video) - Projekt veröffentlichen auf Ubimax Server - Deployment auf Endgerät
AR-based	AR Headset (HMD)	Spatial Media Player (SMP)	<ul style="list-style-type: none"> - Videoerstellung (Organisation, Dreh, Editierung mit Template, Validierung) - Kompression der Videos auf Quarter Resolution (480x270 Pixel) - Einpflegung in SMP-Projekt (Anzahl Montageschritte erstellen, Import der notwendigen Videos und Bilder, Verknüpfung der Videos mit Arbeitsschritten, Überschriften und Textinformation festlegen) - Lokales Deployment über Kabel - Lokale Verortung der POIs 	<ul style="list-style-type: none"> - Neue Bilder machen - Trainingsprojekt in Unity öffnen - Neues Video in Projekt laden (unter Videos) - Neues Video/Bild in den betroffenen Arbeitsschritt einfügen - Deployment über Visual Studio auf Endgerät - Virtuelle Registrierung: Neuzuweisung der einzelnen POIs
			<ul style="list-style-type: none"> - Workflow Erstellung auf Endgerät (inkl. Virtuelle Registrierung) - Videos (8 Sekunden) und Bilder direkt auf HoloLens aufnehmen - Eingabe Textinformation über Bluetooth-Tastatur - Detaillierte Gestaltung jedes Montageschrittes (Smartobjects, Text-, Video-, Bildbausteine) - Tragen der HoloLens während des Autorenpzesses 	<ul style="list-style-type: none"> - Editor Mode öffnen - Schrittmenu auswählen bis sich Menü öffnet - Schritt nach vorne oder hinten schieben über Sprachbefehl oder Tastatur - Speichern des Projektes
AR-based	AR Headset (HMD)	VISCOPIC Client	<ul style="list-style-type: none"> - CAD-Import notwendig (auch bei Pins um POIs zu setzen) - Tracking Konfiguration (Marker-based) - Workflow Erstellung - Lokales Deployment über Kabel - Virtuelle Registrierung: primär am Desktop, lediglich Anpassung der Markerposition - CAD-Daten Aufbereitung und Import in Creo Illustrate und Vuforia Studio 	<ul style="list-style-type: none"> - siehe Neuerstellungsaufwand (geändertes CAD-Modell) - siehe Neuerstellungsaufwand (geändertes CAD-Modell)
			<ul style="list-style-type: none"> - Workflowerstellung: - Animationserstellung in Creo Illustrate - Content-Verlinkung in Vuforia Studio/ThingWorx (2D- und 3D-Content) - Tracking-Konfiguration (Model-based oder Marker-based) - Deployment über Server - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Projekt in PINS öffnen - Verschieben des Montageschrittes an gewünschte Position - Speichern - Deployment auf Endgerät - Projekt in Vuforia Studio öffnen - Animationschritte tauschen (Drag&Drop) - Deployment: Veröffentlichen des geänderten Projektes
AR-based	AR Headset (HMD)	BMW AS IS	<ul style="list-style-type: none"> - CAD-Daten Aufbereitung und Import - Workflowerstellung - Content-Verlinkung (2D + 3D) - Tracking-Konfiguration (Image-based) - Lokales Deployment - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel 	<ul style="list-style-type: none"> - siehe Neuerstellungsaufwand (geändertes CAD-Modell)
			<ul style="list-style-type: none"> - CAD-Daten Aufbereitung und Import - Workflowerstellung - Content-Verlinkung (2D + 3D) - Tracking-Konfiguration (Image-based) - Lokales Deployment - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Vorlageprojekt in Unity öffnen - Montageschritt via Drag&Drop im Inspector Panel verschieben - Montageschrittbezeichnung in Übersichtsmenü anpassen - Deployment über Visual Studio auf Endgerät

Tabelle 6: Übersicht der Content-Erstellungsvarianten: Aufwand der Trainingserstellung bei Neuerstellung, Änderung der Workflowsequenz und Änderung eines Bauteils

		Trainingserstellung		
Hardware Endgerät	Applikation Endgerät	Neuerstellungsaufwand	Änderung der Workflowsequenz (Tausch Schritt 1 und 2)	Änderung des Montagebauteils eines Arbeitsschrittes
paper-based	keine	<ul style="list-style-type: none"> - Anlernmappe erstellen: - Bilder machen - Textinfo erstellen - Hohe Abstraktion: Tätigkeit in Worte fassen (Bsp?) - Intensive Betreuung durch Trainer während Trainings notwendig - Ausdrucken auf Papier 	<ul style="list-style-type: none"> - Copy and Paste des Arbeitsschrittes - Neuausdrucken der Dokumente 	<ul style="list-style-type: none"> - Neues Bild des Bauteils/Prozessschrittes machen - Einfügen in bestehende Anlernhilfe - Textänderung falls notwendig
		<ul style="list-style-type: none"> - Videorestellung (Organisation, Dreh, Editierung mit Template, Rendering, Validierung) - Handling Dateigrößen (FullHD-Videos) - Videoorganisation in Ordnerstruktur Trainer vor Ort gibt den Workflow vor) - Videorestellung (Organisation, Dreh, Editierung mit Template, Rendering, Validierung) - Kompression der Videos auf SD (720 x 576) - Einpflegung der Videos in Powerpoint-Template (Selektion der Videos, Sequenzierung) - Handling Dateigrößen, Kompression der Videos - Deployment auf HMD über Device Portal - Videorestellung (Organisation, Dreh, Editierung mit Template, Rendering, Validierung) - Kompression der Videos auf nHD (640 x 360) - Workflow und Beziehungen zwischen den Schaltflächen erstellen (Prozessmodellierungs-UI) - Deployment auf Endgerät 	<ul style="list-style-type: none"> - Keine, Trainer wählt Videos vor Ort aus - Änderung der TVG-Reihenfolge in SAB 	<ul style="list-style-type: none"> - Neues Montagevideo drehen - Einfügen in den Ordner - Löschen des alten Videos aus Ordner
		<ul style="list-style-type: none"> - Videorestellung (Organisation, Dreh, Editierung mit Template, Rendering, Validierung) - Kompression der Videos auf nHD (640 x 360) - Workflow und Beziehungen zwischen den Schaltflächen erstellen (Prozessmodellierungs-UI) - Deployment auf Endgerät 	<ul style="list-style-type: none"> - Powerpointprojekt öffnen und Folien tauschen - Projekt speichern - Deployment auf Endgerät 	<ul style="list-style-type: none"> - Neues Montagevideo drehen - Kompression - Powerpoint-Projekt öffnen und altes Video im betroffenen Arbeitsschritt ersetzen - Deployment auf Endgerät
video-based	MS Powerpoint	<ul style="list-style-type: none"> - Videorestellung (Organisation, Dreh, Editierung mit Template, Rendering, Validierung) - Kompression der Videos auf nHD (640 x 360) - Workflow und Beziehungen zwischen den Schaltflächen erstellen (Prozessmodellierungs-UI) - Deployment auf Endgerät 	<ul style="list-style-type: none"> - Projekt auf Ubimax-Plattform öffnen - Beziehungen zu allen betroffenen Schaltflächen löschen (in dem Fall alle 3 Schritte) - Schaltflächen neu verknüpfen in richtiger Reihenfolge - Projekt veröffentlichen auf Ubimax Server - Deployment auf Endgerät 	<ul style="list-style-type: none"> - Neues Montagevideo drehen - Neue Bilder machen - Inhalt der betroffenen Schaltfläche aktualisieren (Text, Bild, Video) - Projekt veröffentlichen auf Ubimax Server - Deployment auf Endgerät
		<ul style="list-style-type: none"> - Videorestellung (Organisation, Dreh, Editierung mit Template, Validierung) - Kompression der Videos auf Quarter Resolution (480x270 Pixel) - Einpflegung in SMP-Projekt (Anzahl Montageschritte erstellen, Import der notwendigen Videos und Bilder, Verknüpfung der Videos mit Arbeitsschritten, Überschriften und Textinformation festlegen) - Lokales Deployment über Kabel - Lokale Verortung der POIs 	<ul style="list-style-type: none"> - Trainingsprojekt in Unity öffnen - Videos und Bilder via Drag&Drop neu zuweisen - Textinformationen und Überschriften mit Copy&Paste tauschen - Deployment über Visual Studio auf Endgerät - Virtuelle Registrierung: Neuzuweisung der einzelnen POIs 	<ul style="list-style-type: none"> - Neues Montagevideo drehen - Neue Bilder machen - Trainingsprojekt in Unity öffnen - Neues Video in Projekt laden (unter Videos) - Neues Video/Bild in den betroffenen Arbeitsschritt einfügen - Deployment über Visual Studio auf Endgerät - Virtuelle Registrierung: Neuzuweisung der einzelnen POIs
		<ul style="list-style-type: none"> - Workflow Erstellung auf Endgerät (inkl. Virtuelle Registrierung) - Videos (8 Sekunden) und Bilder direkt auf HoloLens aufnehmen - Eingabe Textinformation über Bluetooth-Tastatur - Detaillierte Gestaltung jedes Montageschrittes (Smartobjects, Text, Video, Bildbausteine) - Tragen der HoloLens während des Autorenprozesses 	<ul style="list-style-type: none"> - Editor Mode öffnen - Schrittmenu auswählen bis sich Menü öffnet - Schritt nach vorne oder hinten schieben über Sprachbefehl oder Tastatur - Speichern des Projektes 	<ul style="list-style-type: none"> - Editor Mode öffnen - Zu Montageschritt gehen - Betroffene Smartobjects anpassen: Verschieben - Neues Video aufnehmen - Neues Bild machen - Speichern des Projektes - siehe Neuerstellungsaufwand (geändertes CAD-Modell)
AR-based	Anbieter E	<ul style="list-style-type: none"> - CAD-Import notwendig (auch bei Pins um POIs zu setzen) - Tracking Konfiguration (Marker-based) - Workflow Erstellung - Lokales Deployment über Kabel - Virtuelle Registrierung: primär am Desktop, lediglich Anpassung der Markerposition - CAD-Daten Aufbereitung und Import in Creo Illustrate und Vuforia Studio - Workflowerstellung: - Animationserstellung in Creo Illustrate - Content-Verlinkung in Vuforia Studio/ThingWorx (2D- und 3D-Content) - Tracking-Konfiguration (Model-based oder Marker-based) - Deployment über Server - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel - CAD-Daten Aufbereitung und Import - Workflowerstellung - Content-Verlinkung (2D + 3D) - Tracking-Konfiguration (Image-based) - Lokales Deployment - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Projekt in PINS öffnen - Verschieben des Montageschrittes an gewünschte Position - Speichern - Deployment auf Endgerät 	<ul style="list-style-type: none"> - siehe Neuerstellungsaufwand (geändertes CAD-Modell)
		<ul style="list-style-type: none"> - CAD-Import notwendig (auch bei Pins um POIs zu setzen) - Tracking Konfiguration (Marker-based) - Workflow Erstellung - Lokales Deployment über Kabel - Virtuelle Registrierung: primär am Desktop, lediglich Anpassung der Markerposition - CAD-Daten Aufbereitung und Import in Creo Illustrate und Vuforia Studio - Workflowerstellung: - Animationserstellung in Creo Illustrate - Content-Verlinkung in Vuforia Studio/ThingWorx (2D- und 3D-Content) - Tracking-Konfiguration (Model-based oder Marker-based) - Deployment über Server - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel - CAD-Daten Aufbereitung und Import - Workflowerstellung - Content-Verlinkung (2D + 3D) - Tracking-Konfiguration (Image-based) - Lokales Deployment - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Animationsschritte tauschen (Drag&Drop) Projektes 	<ul style="list-style-type: none"> - siehe Neuerstellungsaufwand (geändertes CAD-Modell)
		<ul style="list-style-type: none"> - CAD-Import notwendig (auch bei Pins um POIs zu setzen) - Tracking Konfiguration (Marker-based) - Workflow Erstellung - Lokales Deployment über Kabel - Virtuelle Registrierung: primär am Desktop, lediglich Anpassung der Markerposition - CAD-Daten Aufbereitung und Import in Creo Illustrate und Vuforia Studio - Workflowerstellung: - Animationserstellung in Creo Illustrate - Content-Verlinkung in Vuforia Studio/ThingWorx (2D- und 3D-Content) - Tracking-Konfiguration (Model-based oder Marker-based) - Deployment über Server - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel - CAD-Daten Aufbereitung und Import - Workflowerstellung - Content-Verlinkung (2D + 3D) - Tracking-Konfiguration (Image-based) - Lokales Deployment - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Vorlageprojekt in Unity öffnen - Montageschritt via Drag&Drop im Inspector Panel verschieben - Montageschrittbezeichnung in Übersichtsmenü anpassen - Deployment über Visual Studio auf Endgerät 	<ul style="list-style-type: none"> - siehe Neuerstellungsaufwand (geändertes CAD-Modell)
AR-based	Anbieter C	<ul style="list-style-type: none"> - CAD-Import notwendig (auch bei Pins um POIs zu setzen) - Tracking Konfiguration (Marker-based) - Workflow Erstellung - Lokales Deployment über Kabel - Virtuelle Registrierung: primär am Desktop, lediglich Anpassung der Markerposition - CAD-Daten Aufbereitung und Import in Creo Illustrate und Vuforia Studio - Workflowerstellung: - Animationserstellung in Creo Illustrate - Content-Verlinkung in Vuforia Studio/ThingWorx (2D- und 3D-Content) - Tracking-Konfiguration (Model-based oder Marker-based) - Deployment über Server - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel - CAD-Daten Aufbereitung und Import - Workflowerstellung - Content-Verlinkung (2D + 3D) - Tracking-Konfiguration (Image-based) - Lokales Deployment - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Projekt in PINS öffnen - Verschieben des Montageschrittes an gewünschte Position - Speichern - Deployment auf Endgerät 	<ul style="list-style-type: none"> - siehe Neuerstellungsaufwand (geändertes CAD-Modell)
		<ul style="list-style-type: none"> - CAD-Import notwendig (auch bei Pins um POIs zu setzen) - Tracking Konfiguration (Marker-based) - Workflow Erstellung - Lokales Deployment über Kabel - Virtuelle Registrierung: primär am Desktop, lediglich Anpassung der Markerposition - CAD-Daten Aufbereitung und Import in Creo Illustrate und Vuforia Studio - Workflowerstellung: - Animationserstellung in Creo Illustrate - Content-Verlinkung in Vuforia Studio/ThingWorx (2D- und 3D-Content) - Tracking-Konfiguration (Model-based oder Marker-based) - Deployment über Server - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel - CAD-Daten Aufbereitung und Import - Workflowerstellung - Content-Verlinkung (2D + 3D) - Tracking-Konfiguration (Image-based) - Lokales Deployment - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Animationsschritte tauschen (Drag&Drop) Projektes 	<ul style="list-style-type: none"> - siehe Neuerstellungsaufwand (geändertes CAD-Modell)
		<ul style="list-style-type: none"> - CAD-Import notwendig (auch bei Pins um POIs zu setzen) - Tracking Konfiguration (Marker-based) - Workflow Erstellung - Lokales Deployment über Kabel - Virtuelle Registrierung: primär am Desktop, lediglich Anpassung der Markerposition - CAD-Daten Aufbereitung und Import in Creo Illustrate und Vuforia Studio - Workflowerstellung: - Animationserstellung in Creo Illustrate - Content-Verlinkung in Vuforia Studio/ThingWorx (2D- und 3D-Content) - Tracking-Konfiguration (Model-based oder Marker-based) - Deployment über Server - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel - CAD-Daten Aufbereitung und Import - Workflowerstellung - Content-Verlinkung (2D + 3D) - Tracking-Konfiguration (Image-based) - Lokales Deployment - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Vorlageprojekt in Unity öffnen - Montageschritt via Drag&Drop im Inspector Panel verschieben - Montageschrittbezeichnung in Übersichtsmenü anpassen - Deployment über Visual Studio auf Endgerät 	<ul style="list-style-type: none"> - siehe Neuerstellungsaufwand (geändertes CAD-Modell)
AR-based	Anbieter D	<ul style="list-style-type: none"> - CAD-Import notwendig (auch bei Pins um POIs zu setzen) - Tracking Konfiguration (Marker-based) - Workflow Erstellung - Lokales Deployment über Kabel - Virtuelle Registrierung: primär am Desktop, lediglich Anpassung der Markerposition - CAD-Daten Aufbereitung und Import in Creo Illustrate und Vuforia Studio - Workflowerstellung: - Animationserstellung in Creo Illustrate - Content-Verlinkung in Vuforia Studio/ThingWorx (2D- und 3D-Content) - Tracking-Konfiguration (Model-based oder Marker-based) - Deployment über Server - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel - CAD-Daten Aufbereitung und Import - Workflowerstellung - Content-Verlinkung (2D + 3D) - Tracking-Konfiguration (Image-based) - Lokales Deployment - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Projekt in PINS öffnen - Verschieben des Montageschrittes an gewünschte Position - Speichern - Deployment auf Endgerät 	<ul style="list-style-type: none"> - siehe Neuerstellungsaufwand (geändertes CAD-Modell)
		<ul style="list-style-type: none"> - CAD-Import notwendig (auch bei Pins um POIs zu setzen) - Tracking Konfiguration (Marker-based) - Workflow Erstellung - Lokales Deployment über Kabel - Virtuelle Registrierung: primär am Desktop, lediglich Anpassung der Markerposition - CAD-Daten Aufbereitung und Import in Creo Illustrate und Vuforia Studio - Workflowerstellung: - Animationserstellung in Creo Illustrate - Content-Verlinkung in Vuforia Studio/ThingWorx (2D- und 3D-Content) - Tracking-Konfiguration (Model-based oder Marker-based) - Deployment über Server - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel - CAD-Daten Aufbereitung und Import - Workflowerstellung - Content-Verlinkung (2D + 3D) - Tracking-Konfiguration (Image-based) - Lokales Deployment - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Animationsschritte tauschen (Drag&Drop) Projektes 	<ul style="list-style-type: none"> - siehe Neuerstellungsaufwand (geändertes CAD-Modell)
		<ul style="list-style-type: none"> - CAD-Import notwendig (auch bei Pins um POIs zu setzen) - Tracking Konfiguration (Marker-based) - Workflow Erstellung - Lokales Deployment über Kabel - Virtuelle Registrierung: primär am Desktop, lediglich Anpassung der Markerposition - CAD-Daten Aufbereitung und Import in Creo Illustrate und Vuforia Studio - Workflowerstellung: - Animationserstellung in Creo Illustrate - Content-Verlinkung in Vuforia Studio/ThingWorx (2D- und 3D-Content) - Tracking-Konfiguration (Model-based oder Marker-based) - Deployment über Server - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel - CAD-Daten Aufbereitung und Import - Workflowerstellung - Content-Verlinkung (2D + 3D) - Tracking-Konfiguration (Image-based) - Lokales Deployment - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Vorlageprojekt in Unity öffnen - Montageschritt via Drag&Drop im Inspector Panel verschieben - Montageschrittbezeichnung in Übersichtsmenü anpassen - Deployment über Visual Studio auf Endgerät 	<ul style="list-style-type: none"> - siehe Neuerstellungsaufwand (geändertes CAD-Modell)
AR-based	BMW AS IS	<ul style="list-style-type: none"> - CAD-Import notwendig (auch bei Pins um POIs zu setzen) - Tracking Konfiguration (Marker-based) - Workflow Erstellung - Lokales Deployment über Kabel - Virtuelle Registrierung: primär am Desktop, lediglich Anpassung der Markerposition - CAD-Daten Aufbereitung und Import in Creo Illustrate und Vuforia Studio - Workflowerstellung: - Animationserstellung in Creo Illustrate - Content-Verlinkung in Vuforia Studio/ThingWorx (2D- und 3D-Content) - Tracking-Konfiguration (Model-based oder Marker-based) - Deployment über Server - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel - CAD-Daten Aufbereitung und Import - Workflowerstellung - Content-Verlinkung (2D + 3D) - Tracking-Konfiguration (Image-based) - Lokales Deployment - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Projekt in PINS öffnen - Verschieben des Montageschrittes an gewünschte Position - Speichern - Deployment auf Endgerät 	<ul style="list-style-type: none"> - siehe Neuerstellungsaufwand (geändertes CAD-Modell)
		<ul style="list-style-type: none"> - CAD-Import notwendig (auch bei Pins um POIs zu setzen) - Tracking Konfiguration (Marker-based) - Workflow Erstellung - Lokales Deployment über Kabel - Virtuelle Registrierung: primär am Desktop, lediglich Anpassung der Markerposition - CAD-Daten Aufbereitung und Import in Creo Illustrate und Vuforia Studio - Workflowerstellung: - Animationserstellung in Creo Illustrate - Content-Verlinkung in Vuforia Studio/ThingWorx (2D- und 3D-Content) - Tracking-Konfiguration (Model-based oder Marker-based) - Deployment über Server - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel - CAD-Daten Aufbereitung und Import - Workflowerstellung - Content-Verlinkung (2D + 3D) - Tracking-Konfiguration (Image-based) - Lokales Deployment - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Animationsschritte tauschen (Drag&Drop) Projektes 	<ul style="list-style-type: none"> - siehe Neuerstellungsaufwand (geändertes CAD-Modell)
		<ul style="list-style-type: none"> - CAD-Import notwendig (auch bei Pins um POIs zu setzen) - Tracking Konfiguration (Marker-based) - Workflow Erstellung - Lokales Deployment über Kabel - Virtuelle Registrierung: primär am Desktop, lediglich Anpassung der Markerposition - CAD-Daten Aufbereitung und Import in Creo Illustrate und Vuforia Studio - Workflowerstellung: - Animationserstellung in Creo Illustrate - Content-Verlinkung in Vuforia Studio/ThingWorx (2D- und 3D-Content) - Tracking-Konfiguration (Model-based oder Marker-based) - Deployment über Server - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel - CAD-Daten Aufbereitung und Import - Workflowerstellung - Content-Verlinkung (2D + 3D) - Tracking-Konfiguration (Image-based) - Lokales Deployment - Virtuelle Registrierung: Optimierung Tracking-Position und Rejustierung Navigationsstunnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Vorlageprojekt in Unity öffnen - Montageschritt via Drag&Drop im Inspector Panel verschieben - Montageschrittbezeichnung in Übersichtsmenü anpassen - Deployment über Visual Studio auf Endgerät 	<ul style="list-style-type: none"> - siehe Neuerstellungsaufwand (geändertes CAD-Modell)

Tabelle 7: Übersicht der Content-Erstellungsvarianten: Wiederverwertbarkeit von Trainingsmaterial

	End-gerät	Software Endgerät	Trainingserstellung
			Wiederverwertbarkeit
paper-based	keine	Anlernmappe/ Dialog mit Trainer	Generell hoch: - Alte Projekte können als Vorlage verwendet werden - nur textuelle und bildliche Anpassung - Sprachabhängigkeit
	Display/ Tablet	Media Player, Quick Time	Einsatz von Montagevideos: - Hohe Wiederverwertbarkeit bei Multi-Werksanläufen/ verwandten Derivaten - Bei großen Abweichungen alte Videos nicht mehr nutzbar - Neudreh bei TVG-Änderung notwendig
	AR- Headset (HMD)	MS PowerPoint	Einsatz von Montagevideos: - Hohe Wiederverwertbarkeit bei Multi-Werksanläufen/ verwandten Derivaten - Bei großen Abweichungen alte Videos nicht mehr nutzbar - Neudreh bei TVG-Änderung notwendig - Gesamtes Projekt muss neu deployed werden
video-based	2D- Daten- brillen	Ubimax Frontline Creator	Einsatz von Montagevideos: - Hohe Wiederverwertbarkeit bei Multi-Werksanläufen/ verwandten Derivaten - Bei großen Abweichungen alte Videos nicht mehr nutzbar - Neudreh bei TVG-Änderung notwendig - Sprachänderung notwendig bei ausländischen Werken - Muss immer neu deployed werden
		Spatial Media Player (SMP)	Einsatz von Montagevideos: - Hohe Wiederverwertbarkeit bei Multi-Werksanläufen/ verwandten Derivaten - Bei großen Abweichungen alte Videos nicht mehr nutzbar - Neudreh bei TVG-Änderung notwendig - Sprachänderung notwendig bei ausländischen Werken - Muss immer neu deployed werden
AR-based	AR Headset (HMD)	Anbieter E	Geringe Wiederverwertbarkeit: - Customized Aufbau für den spezifischen Anwendungsfall - Muss immer neu aufgebaut werden - Kein Deployment auf andere Endgeräte vorgesehen
		Anbieter C	Eher gering: - Workflow muss bei geändertem CAD-Modell neuerstellt werden - Hohe Wiederverwertbarkeit des 3D-Content bei Multi-Werksanläufen/ verwandten Derivaten - Lokales Deployment auf mehrere Endgeräte möglich
		Anbieter D	- erleichterte Wiederverwendung von bereits erstellten Trainingsprojekten über Serverarchitektur - Hohe Wiederverwertbarkeit der Projekte bei Multi-Werksanläufen/ verwandten Derivaten (auf Server kann von allen Werken zugegriffen werden) - Bei geändertem CAD-Modell muss der Workflow neu erstellt werden - Schnelles Deployment auf viele Endgeräte über Runtime Server
		BMW AS IS	- geringe Wiederverwertung von Trainingsprojekten - „customized“: für jeden Anwendungsfall hoher Erstellungsaufwand - AR-Experte notwendig

Tabelle 8: Übersicht der Content-Erstellungsvarianten: Auflistung anfallender Erstellungskosten

	End- gerät	Software Endgerät	Erstellungskosten
paper- based	keine	Anlernmappe/ Dialog mit Trainer	- Zeit Trainingsersteller (400 Euro/Tag) - Fotokamera, Smartphone - Papier- und Druckkosten
video- based	Display/ Tablet	Windows Media Player, Quick Time	- Zeit (Trainingsersteller, Kameramann, Videoschnitt) - Kameraequipment (z.B. DJI Osmo mit Gimbal ab 530 Euro) - Lizenz: Videoschnitttool - Hardware Endgerät: Feste Displays (ab 300€) - Alternativ: Professionelles Filmteam (ca. 30 Euro pro Montagevideo)
	AR- Headset (HMD)	MS Power- point	- Zeit (Trainingsersteller, Kameramann, Videoschnitt) - Kameraequipment (z.B. DJI Osmo mit Gimbal ab 530 Euro) - Lizenz: Videoschnitttool - Alternativ: Professionelles Filmteam (ca. 30 Euro pro TVG) - Hardware Endgerät: MS HoloLens (3000-6000 Euro)
	2D- Daten- brillen	Ubimax Frontline Creator	- Zeit (Trainingsersteller, Kameramann, Videoschnitt) - Kameraequipment (z.B. DJI Osmo mit Gimbal ab 530 Euro) - Software-Lizenzen: Videoschnitttool, Ubimax Workplace - Alternativ: Professionelles Filmteam (ca. 30 Euro pro TVG) - Hardware Endgerät: z.B. 1700 Euro für Vuzix M300
AR- based		Spatial Media Player (SMP)	- siehe Erstellungskosten video-based plus: - Zeit Trainingsersteller Software-Lizenzen: Unity, Visual Studio (später nur für AR Autorentool) + Videoschnitttool - Hardware Endgerät: MS HoloLens (3000-6000 Euro) - Später zusätzlich: Entwicklungskosten des AR-Autorentools (4-5 Personen)
		Anbieter E	- Lizenz (Editor und Trainee Mode plus Equipment) - 9970 Euro/Jahr für ein Endgerät - Hardware Endgerät: MS HoloLens (3000-6000 Euro) - Schulungskosten - Zeit Trainingsersteller
	AR Headset (HMD)	Anbieter C	- Lizenz: Anbieter C - Starterpaket ab 990 Euro/Monat für ein Editor und zwei Endgeräte - Enterprise Lösungen etwas teurer (1000€ pro Editor/Monat) - Hardware Endgerät: MS HoloLens (3000-6000 Euro) - Schulungskosten (1000 Euro Tagessatz + Anreise) - Zeit Trainingsersteller
		Anbieter D	- Lizenz: Anbieter D AR Suite - ab 25000€ für einen Editor - Lizenz: Anbieter D View (1500€ pro Client) - Enterprise Lösungen günstiger (1000 Seats für 333.000 €) - Customizing durch ANBIETER D (30-50000€) - Hardware Endgerät: MS HoloLens (3000-6000 Euro) - Schulungskosten (1000 Euro Tagessatz + Anreise) - Zeit Trainingsersteller
		BMW AS IS	- Zeit und Kosten - Trainingsersteller (400€/Tag) - Entwickler/ Programmierer (327€/Tag =6541€ Bruttolohn) - Lizenzen: Unity, Visual Studio - Hardware Endgerät: MS HoloLens (3000-6000 Euro)

Aus der Gegenüberstellung der verschiedenen Trainingserstellungsvarianten in Tabelle 5-8 wird deutlich, dass die Anzahl der notwendigen Arbeitsschritte mit der Einbindung von 3D-Content deutlich zunimmt. Während die Änderung der Workflowsequenz auch bei den AR-basierten Trainingsvarianten schnell umsetzbar ist, muss bei einer Änderung eines Bauteils, das neue CAD-Modell geladen werden. Dabei ist es bei Anbieter C und Anbieter D notwendig, das gesamte CAD-Produkt neu zu importieren. Damit ist der Anpassungsaufwand mit einer Neuerstellung vergleichbar, da die Inhalte neu verknüpft werden müssen. Auch bei den Video-basierten Trainingsansätzen müssen bei einer Bauteiländerung die Montagevideos aktualisiert werden. Dies kann in der Regel nur über eine Neuverfilmung des Montagevorgangs geschehen. Die Trainingsunterlagen konsistent zu halten ist damit eines der größten Probleme. Durch die automatisierte Anbindung an bestehende Prozessplanungs- und Abtaktungstools (z.B. MAPP und TaktIQ) kann dieses Problem verringert werden.

Zeitbewertung

Um eine ungefähre zeitliche Einordnung der Trainingserstellung zu bekommen, wird im Folgenden eine Zeitmessung durchgeführt. In (fast) allen Varianten werden die gleichen drei Montageschritte erstellt. Dabei wird, abhängig von der Trainingsvariante, der darstellbare Content realisiert. Da bei der Lösung von Anbieter D nicht das CAD-Motormodell verwendet werden kann, wird die Erstellung anhand der Rotorblattmontage eines Quadrocopter-3D-Modells simuliert. Die zeitliche Schätzung für den CAD-Import des Motorblocks und die Navigationstunnelerstellung basiert hierbei auf den Erfahrungen des durchgeführten Workshops mit ANBIETER D (Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

In Abbildung 115 ist eine **workflow-orientierte Zeitmessung** der Trainingserstellungsvarianten dargestellt. Es wird entlang der gesamten Prozesskette eine Zeitmessung der wichtigsten Schritte durchgeführt. Dabei wird zwischen CAD-Import, Tracking-Konfiguration, Erstellung der Arbeitsschritte 1-3, Deployment und virtueller Registrierung differenziert. Wenn ein Prozessschritt bei einer Variante entfällt, wird er mit Null bewertet. Zur Erstellung eines Arbeitsschrittes zählt die gesamte Erstellung der Content-Blöcke, die damit verknüpft werden. Bei der Verwendung von Montagevideos, zum Beispiel, wird auch die Zeit für den Videodreh, -schnitt und die Kompression auf das geeignete Format berücksichtigt. Das gleiche gilt bei der Aufnahme und Bearbeitung von Bildern.

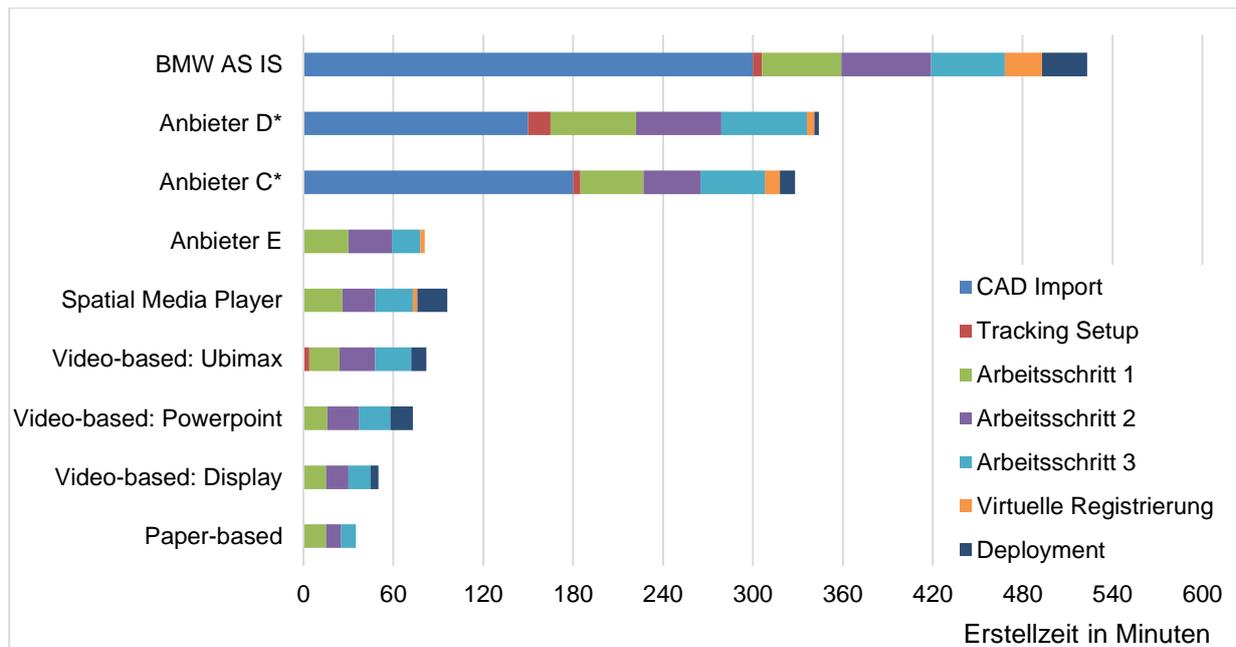


Abbildung 115: Workflow-orientierte Zeitmessung zur Erstellung eines Montagetrainings mit drei Montageschritten; *Ergebnisse von Anbieter D und Anbieter C teilweise geschätzt (CAD-Import Zeiten aus Benchmark-Workshop übernommen)

In Abbildung 116 ist der gleiche Erstellungsprozess mit einem **Fokus auf die einzelnen Contentarten** dargestellt. Neben den Prozessbausteinen CAD-Import, Tracking-Setup, Deployment und virtueller Registrierung ist der Aufwand für die Erstellung der einzelnen Contentarten, wie Text, Bild, Video, Animationen (inklusive Anzeige von 3D Objekten), 3D-Bauteilanzeige und Navigationstunneln abgebildet.

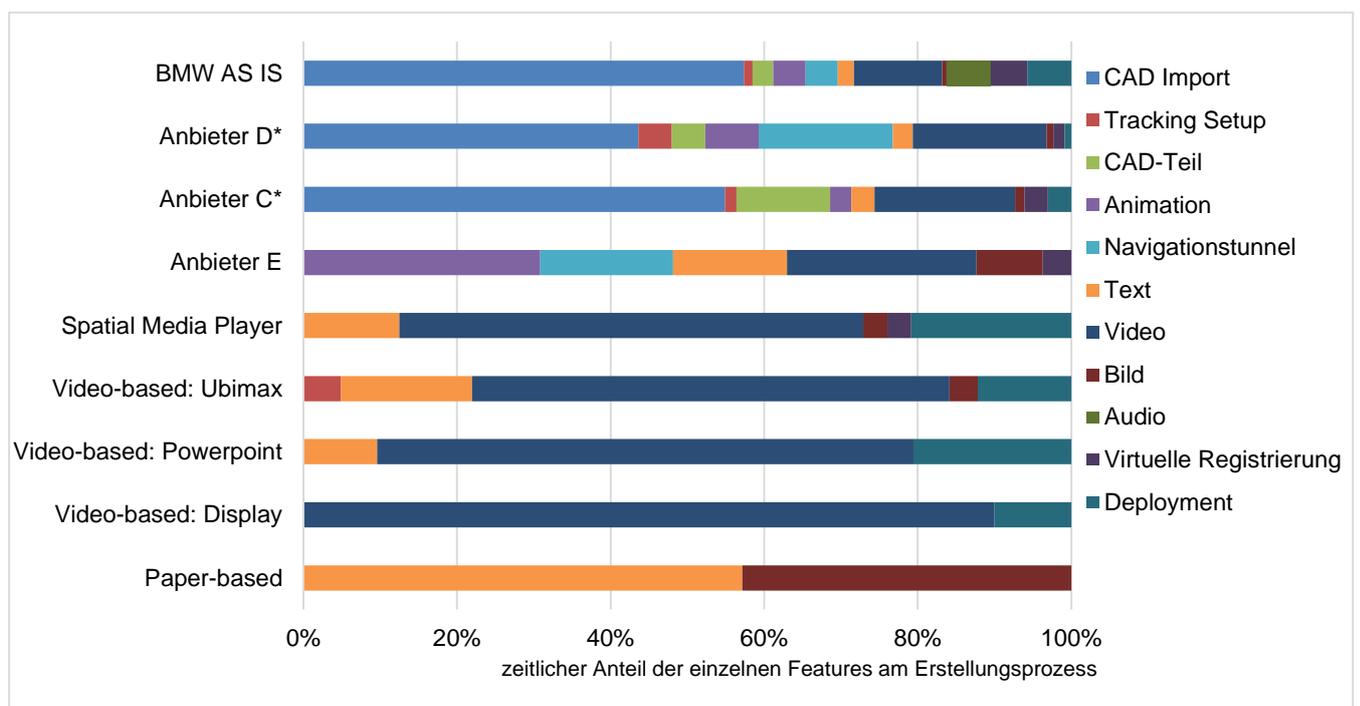


Abbildung 116: Relativer zeitlicher Anteil zur Erstellung der einzelnen Content-Features; * Ergebnisse von Anbieter D und Anbieter C teilweise geschätzt (CAD-Import-Zeiten aus Benchmark-Workshop übernommen)

Es wird deutlich, wie sich innerhalb der einzelnen Varianten der Erstellungsaufwand verteilt. Während bei der Papier-basierten Methode nur Bilder und Text zum Einsatz kommen, ist bei den AR-basierten Varianten mit CAD-Einbindung eine weitere Auffächerung der Content-Features zu sehen. Wie schon in Abbildung 115 dargestellt, sind der CAD-Import und die CAD-Modelloptimierung der größte Zeitfaktor. Auch bei den Video-basierten Methoden nimmt die Videoerstellung den Großteil der Zeit in Anspruch. Der zeitliche Aufwand für das Deployment, die Workflow-Erstellung und die virtuelle Registrierung sind bei der PowerPoint-Lösung, Ubimax und dem SMP verhältnismäßig gering. Daraus lässt sich ableiten, dass eine hands-free Lösung ohne großen zeitlichen Aufwand realisiert werden kann, sobald Montagevideos existieren. Bei Anbieter E besteht der Prozess zum größten Teil aus der Erstellung und Verschiebung von Smartobjects (Animation und Navigationstunnel). Auch die Erstellung von Videos auf der HoloLens benötigt eine gewisse Zeit, da oftmals aufgrund des eingeschränkten Sichtfeldes der Kamera, mehrere Filmversuche notwendig sind.

Nutzenbewertung

Nach der ausführlichen Betrachtung der Aufwandsseite für die Trainingserstellung wird nun der eigentliche Nutzen der Trainingsvarianten betrachtet. Dazu wird auf die qualitativen und quantitativen Ergebnisse der Nutzenbewertung in der Literatur eingegangen, um eine grobe Aussage ableiten zu können, inwieweit AR-basiertes Training den anderen Varianten überlegen ist. In Tabelle 9 sind die wichtigsten Studien in Bezug auf AR-basiertes Montagetraining zusammengefasst. Auch wenn die Ergebnisse keine einheitliche und quantifizierbare Aussage über den hier durchgeführten Montageprozess zulassen, so lässt sich doch erkennen, dass AR-basierte Trainings einen Mehrwert in der Qualität des Lernprozesses und der Durchführung der Montagefähigkeit geben. Insbesondere die Speicherung der Montageinhalte im Langzeitgedächtnis gelingt durch AR-Unterstützung besser. Der Einsatz von interaktiven Elementen und Lernkonzepten, wie einem Trainingslevelansatz, steigert den Lerneffekt (Westerfield et al. 2015, S. 157).

Was die Trainingszeit angeht, sind die Ergebnisse nicht eindeutig. Während in manchen Studien auch eine schnellere Lernzeit durch AR-Unterstützung erzielt wird, ist bei anderen Studien ein Papier-basierter Ansatz in Verbindung mit aktiver Trainerunterstützung die schnellere Lösung (Werrlich et al. 2016, S. 11; Webel et al. 2011). Auch gegenüber Video-basiertem Montagetraining hat AR-Unterstützung Vorteile, wie Loch et al. (2016) nachweisen konnte.

Tabelle 9: Literaturüberblick zur Nutzenbewertung von Papier-, Video- und AR-basierten Trainings

Beschreibung	Qualitative/Quantitative Aussage	Kategorie	Endgerät	Quelle
Integration eines AR Trainingskonzeptes steigert den Lernerfolg gegenüber herkömmlichem AR Training - 16 Teilnehmer ohne Montageerfahrung - Motherboards montieren	- 25% bessere Testergebnisse - 30% schnellere Ausführung - Feedback für Trainees fördert den Lerneffekt signifikant	AR-based vs. HMD/ AR-based mit Tablet Lernkonzept		Westerfield et al. (2015), S. 157
AR Training mit Anzeige auf Display verkürzt die Lernzeit gegenüber paper-based Training, bereits ab dem ersten Montageversuch - Teilnehmer: 20 Studenten - Montage eines „Gully traps“	- 43% schnelleres Training mit AR-Unterstützung - 2 Minuten schnellere Montage eines "Gully traps"	AR-based vs. paper-based	Display	Hořejší (2015), S. 704
AR-based Training ist effektiver als Video-based Training - Manuelle Arbeitsstation mit Lego-Montage (Kamera und Motorroller) - schnellere Durchführungszeit - geringere Anzahl an Fehlern - geringere mentale Arbeitsbelastung	- Schnellere Durchführungszeit: 3,8 vs. 3,1 Minuten - Geringere Anzahl an Fehlern: 5,1 vs. 0,5 Fehler - Geringere mentale Arbeitsbelastung: 53,6 vs. 42%	AR-based vs. Video-based	Display/ Tablet	Loch et al. (2016), S. 149
Vergleich von vier Lernansätzen: paper-based, video-based, Text-Anmerkungen mit Maus-Interaktion, AR-based - Kurzzeit- und Langzeitgedächtnistest - Teilnehmer alle Studenten - Montage einer Ölpumpe für ein Flugzeug	- Kurzzeitgedächtnis: AR-based und video-based besser als paper-based und Text-Anmerkungen - Langzeitgedächtnis: AR-based signifikant besser als video-based, aber gleich auf mit paper-based und Text-Anmerkungen	AR-based vs. Video-based vs. Paper-based vs. Textanmerkungen mit Maus-Interaktion	Display	Vincenzi et al. (2003)
Trainees machen weniger Montagefehler und montieren schneller - 17 Teilnehmer (Studenten) - Montage eines Boeing 737 Engine bleed air system	Zeitverbesserung von 17% Qualitätsverbesserung von 24%	AR-based vs. paper-based	Tablet	Rios et al. (2013), S.161-170
AR-Trainees sind zwar langsamer beim Lernen, aber machen weniger Montagefehler - Montageaufgabe mit 25 Schritten "electro-mechanical actuator" - 20 Teilnehmer (Techniker mit min. 2 Jahren Erfahrung) - Arbeitsschritte lernen am Morgen, nachmittags den Schritt ohne Hilfe ausführen -AR-Tablet vs. Instruktionsvideos	- Trainees trainieren 20% langsamer - Trainees machen 77% weniger Fehler mit AR-Tablets	AR-based vs. Video-based	Tablet	Webel et al. (2011), S.123-132
Vergleich von vier Lernansätzen: paper-based, video-based, text Annotationen am Computer und AR-based - Montage einer Ölpumpe	- AR-based Training erzielt die besten Werte im Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis im Vergleich zu den anderen Lernansätzen - am wenigsten Montagefehler	AR-based vs. Video-based vs. Paper-based vs display-based	Display	Valimont et al. (2002)
Erfassung der kognitiven Workload verschiedener Lernansätze (AR und paper-based) - 50 Teilnehmer (alle Studenten) - Lego-Modell als Montagebeispiele - Durchführung zuerst mit Lernunterstützung, anschließend ohne - NASA-TLX Befragung	- Kürzerer Durchführungszeit mit AR-system - Teilnehmer machen weniger Fehler - Höhere mentale Arbeitsbelastung (workload durch paper-based Training) - AR reduziert die Lernkurve	AR-based vs. paper-based	Display	Hou et al. (2013)
- 20 Teilnehmer - Vier 2D- und 3D-Puzzle als Montagebeispiele - Jeder Teilnehmer muss die Puzzle mit AR und ohne AR-Unterstützung lösen	- AR steigert die Trainingseffizienz - Trainees benötigen weniger Montageschritte für die Durchführung - Deutung: Erhöhter Wissenstransfer durch AR-Unterstützung	AR-based vs. paper-based	Display	Pathomaree et al. (2005)
Vergleich von vier Lernansätzen: paper-based, video-based, AR-based, AR-interactive-based - 96 Teilnehmer (alle Studenten) - Montage einer Ölpumpe für Flugzeuge - Vergleich des Wissenstransfers in Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis - Langzeit-Erinnerungstest nach 7 Tagen	AR- und AR-interaktives Lernen beschleunigt den Wissenstransfer ins Langzeitgedächtnis - Teilnehmer vergessen weniger im Laufe der Zeit im Vergleich zu paper-based und video-based	paper-based, video-based, AR-based, AR-interactive-based	Display	Macchiarella et al. (2004)

Beschreibung	Qualitative/Quantitative Aussage	Kategorie	Endgerät	Quelle
Vergleich von AR-based HMD Training und Face-to-face Training - 36 Teilnehmer (produktionserfahren und AR-unerfahren)	- 10% weniger Picking-Fehler - 5% weniger Montagefehler -60% weniger Nacharbeitsaufwand -aber sehr viel langsamer als Face-to-face-Training (60%)	AR-based vs. Face-to-face Training	HMD	(Werrlich et al. 2016, S. 11)
Ein Level-basierter Trainingsansatz mit Lernzielüberprüfung (Quizlevel) erhöht den Trainingstransfer - 30 Teilnehmer (produktionserfahren und AR-unerfahren)	-79% weniger Sequenzfehler durch AR Training - 17,6% langsamer, aber dafür eine höhere Lernqualität - Abschließendes Quizlevel erhöht nicht die Workload - AR-Trainingsansatz bei älteren und jüngeren MA gleich beliebt	AR-based vs. AR-based mit Lernzielkontrolle	HMD	(Werrlich et al. 2017)
Nutzeranforderungen an ein AR-basiertes Montagetraining - 10 Produktionsmitarbeiter befragt nach Must-have und nice-to-have Kriterien Value Proposition Design: Gains -persönlicher Kontakt mit anderen - Strukturiertes, standardisiertes Training - Trainer beschreibt Prozess detailliert - Trainer unterstützt den Trainee bis zum Ende - Es können schnell an den Arbeitsstationen am Band die Taktinhalte nachgeschaut werden Pains - Training dauert zu lange - Trainer ist nicht immer verfügbar - Didaktische Fähigkeiten der Trainer variieren stark, liegt auch an Sprach-/Kulturbarrieren	- Gamification steigert Motivation und Lernbereitschaft - Hohe Akzeptanz bei allen Nutzergruppen (Erfahrene Montagemitarbeiter, Studenten, AR Experten) System Usability Scale, Atraktdiff. - Attraktivität Videos: Bei Montagemitarbeitern und Studenten: Klickrate für Videos zwei bis drei Mal höher im Vergleich zu 3D-Bauteilanzeige, Fünf Mal höher im Vergleich zu 3D-Animation)	AR-based vs. Ist-Situation	HMD	(Werrlich et al. 2017, S. 417)
Vergleich zwischen einem multimodalen AR-based Training und paper-based training - 30 Teilnehmer - 15 Montageschritte in der Motormontage	- Trainees sind deutlich schneller mit paper-based Training - Trainees machen deutlich weniger Fehler mit AR-based Training - Alle Trainees wünschen sich für die Zukunft ein AR-basiertes Training (wissenschaftlich belegt mit UEQ-Test)	AR-based vs. paper-based	HMD	Werrlich et al. (2018)

In der Studie von Werrlich et al. (2018), die den Nutzen der Variante BMW-AS-IS bewertet, wird auch das Klickverhalten von 30 Probanden dokumentiert. Dabei handelt es sich um 20 Montagemitarbeiter und „produktionsferne“ Büromitarbeiter, die AR unerfahren sind, und zehn AR-Experten, die bereits mit einem HMD vertraut sind. In Abbildung 117 sind die Klickraten der einzelnen Kacheln zu sehen.

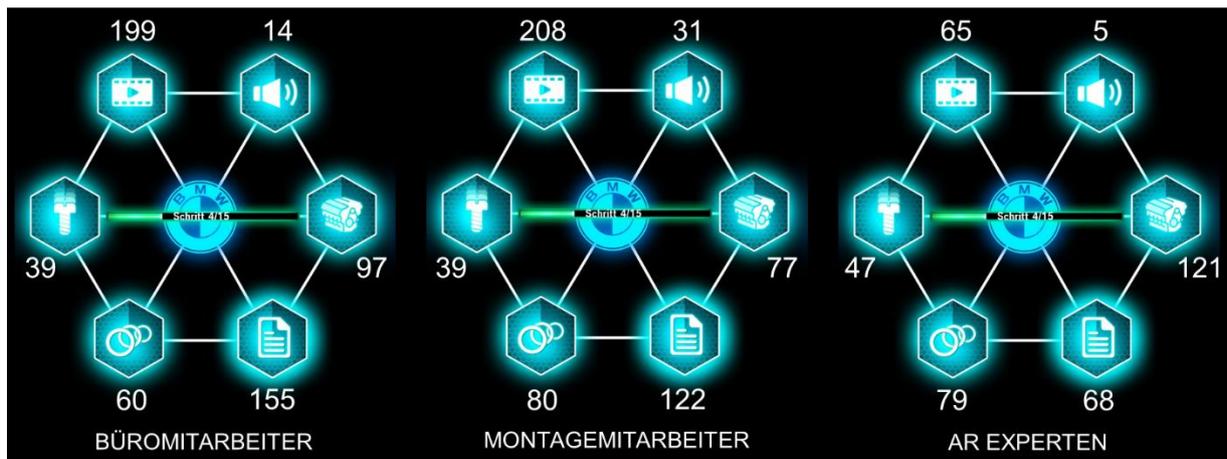


Abbildung 117: Klickanzahl der 30 Probanden auf die einzelnen Features des UI der Anwendung BMW AS-IS (Werrlich et al. 2018)

Bemerkenswert ist, dass AR-unerfahrene Mitarbeiter das Feature **Video als besonders hilfreich** empfinden. Es wird zwei bis drei Mal häufiger ausgewählt als die 3D-Bauteilanzeige und fünf Mal häufiger als die Animation (Werrlich et al. 2018).

Dies kann so interpretiert werden, dass für die Vorgangsbeschreibung auch ein Video bereits eine hohe Wirkung hat und von den Nutzern gerne in Anspruch genommen wird. Andererseits kann daraus auch die Tendenz, bereits bekannte Medien zu bevorzugen, abgeleitet werden.

Neben den, in der Literatur gefundenen Studien wurde im Rahmen zweier UX-Workshops, bei der es um die UX-Gestaltung des SMP ging, eine informelle Befragung verschiedener Stakeholder zu der Bedeutung der einzelnen Content-Features durchgeführt. Insgesamt nahmen 12 Montageplaner und Produktionsspezialisten aus den Werken Regensburg, Leipzig, München, Dingolfing, Rolls Royce in Goodwood sowie dem FIZ und der Komponentenfertigung in Landshut an dem Workshop teil.

Folgende Priorisierung des Contents wurde festgehalten, dabei hat 1 die höchste und 6 die geringste Priorität. Die Aufzählung ist eine Zusammenfassung aus zwei verschiedenen Terminen (angelehnt an Salomo 2018):

1. Video
2. Navigation (von POI zu POI)
3. Text, Bild
4. Einsatz von „Cliparts“, 3D-Objekten wie Pfeile und 3D-Überlagerungen
5. Audio (kritisch wegen Produktionslautstärke, nur in leiser Umgebung)
6. CAD-Animationen und Navigationstunnelfeature (Erstellungsaufwand lohnt sich nur bei festen Arbeitsstationen)

Auch hier wird deutlich, dass Videos eine hohe Rolle bei der Visualisierung von Montagevorgängen zukommt. Auch die Navigation zwischen einzelnen POIs ist für die Teilnehmer wichtig. Dies ist nicht zu verwechseln mit den Navigationstunneln, dessen Ziele zu Bauteilen und Werkzeugen während der virtuellen Registrierung festgelegt werden. Dieses Feature bekommt zusammen mit der Animation von CAD-Bauteilen die geringste Priorität.

6.4 Ergebnisse und Erkenntnisse

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die einzelnen Verfahren gegenübergestellt wurden, werden nun die Ergebnisse und ihre Bedeutung zusammenfassend erläutert. In Abbildung 118 ist dabei das **Erstellungsaufwand-Nutzen-Verhältnis** der verschiedenen Qualifizierungsansätze illustriert. Basierend auf den gefundenen Ergebnissen wird angenommen, dass der Nutzen einer Lernunterstützung durch die Einbindung von möglichst viel Content, sowie einer Workflow-Struktur, steigt. Deshalb wird eine stufenweise Steigerung der Anwendungsqualität, ausgehend von Textinformationen und Bildern, über Montagevideos, bis hin zu einem multimedialen AR-Training mit integriertem Lernkonzept auf der horizontalen Achse aufgetragen. Auf der Seite des Aufwandes werden die erforderlichen Fähigkeiten und Programmkenntnisse, die zur Content-Generierung und Bedienung der Autorensoftware notwendig sind, dargestellt. Dabei steigen die Anforderungen an den Trainingsersteller, ausgehend von einfachen Textverarbeitungs-Kenntnissen (MS Word und MS PowerPoint) bis hin zu umfassenden Unity- und Programmierkenntnissen. Die Fähigkeiten bauen dabei aufeinander auf und es wird vorausgesetzt, dass ein Programmierer oder technischer Autor auch mit XML-Code oder einem Videoschnitttool umgehen kann. Da nicht alle benötigten Tools (z.B. Visual Studio) und Fähigkeiten auf der Achse aufgelistet werden können, werden nur die Wichtigsten und Anspruchsvollsten dargestellt.

Die einzelnen Trainingserstellungsansätze lassen sich nicht immer eindeutig zuordnen, weshalb sie mehrere Bereiche überschneiden. So lässt sich in die Lösung von Anbieter D prinzipiell auch ein erweitertes Trainingskonzept implementieren, in diesem Szenario war der Aufwand dafür jedoch zu groß. Bei Anbieter C gibt es eine Unterscheidung zwischen **Anbieter C ohne Einbindung** von CAD-Daten und **Anbieter C mit CAD-Daten Einbindung** über XML-Code.

Der SMP ist ein Hybrid zwischen einem Video- und AR-basierten Ansatz. Durch die ständige Weiterentwicklung der Lösung und der Integration von 3D-Objekten, wie 3D-Pfeilen, wird der SMP zu einer AR-basierten Lösung. Auch durch die Entwicklung des, in Abschnitt 6.2.3, beschriebenen Autorentools ist eine weitere Vereinfachung des Autorenprozesses im ersten Quartal 2019 zu erwarten und es wird kein Unity mehr zur Content-Generierung benötigt.

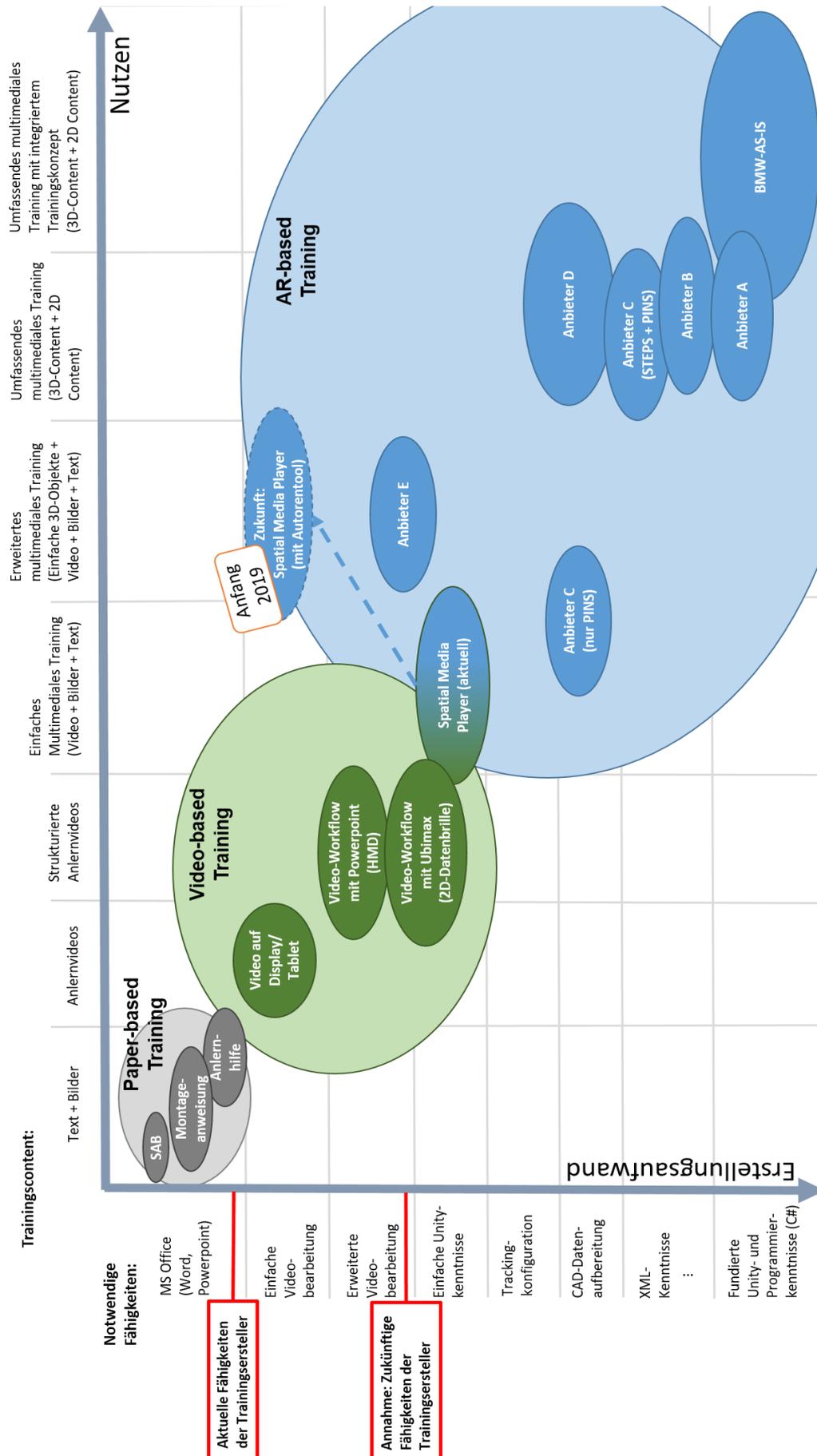


Abbildung 118: Erstellungsaufwand-Nutzen-Verhältnis der verschiedenen Qualifizierungsansätze

In dem oberen, rot-umrandeten Textfeld in Abbildung 118 sind die aktuell notwendigen Fähigkeiten der Trainer und Trainingsersteller abgebildet. In dem Textfeld darunter ist eine Annahme der zukünftigen Fähigkeiten dargestellt. Diese Annahme beruht zum einen auf der Tatsache, dass der Videoerstellungsprozess immer einfacher wird. Es gibt zum Beispiel Tools und Anbieter die einen teilautomatisierten Videoschnitt anbieten oder in Form von „Utility“-Filmen eine schnell anpassbare Clipstruktur ermöglichen (Memex 2018, MAGIX Fastcut 2018). Zum anderen steigen aber auch die Anforderungen an die Trainingskonzepte und damit auch an die zukünftigen Trainingsersteller, die neue, vertretbare Fähigkeiten erwerben müssen (siehe Abschnitt 3.3.1).

6.4.1 Strategieempfehlung für das weitere Vorgehen

Ausgehend von den erzielten Erkenntnissen über die Autorenprozesse der verschiedenen Anbieter, in Abschnitt 5, sowie dem direkten Vergleich mit den internen Lösungsansätzen für Montagetrainings, in Abschnitt 6, wird ein **zeitsensitives Vorgehen** empfohlen, bei dem einfach realisierbare Features, wie die Erstellung und Einbindung von Montagevideos, zeitnah umgesetzt werden. Auch bieten Videos Synergieeffekte zwischen den einzelnen Trainingsvarianten, da sie Geräteunabhängig auf Displays, HHDs und HMDs abgespielt und auch in die verschiedenen Softwareapplikationen integriert werden können. Somit können die einzelnen Fachbereiche in der Montage ihre präferierte Darstellungs- und Trainingsform wählen. In Abbildung 119 sind wichtige Technologien und Content-Arten in einer Einfluss-Aufwand-Matrix dargestellt. Die vier Felder der Matrix orientieren sich dabei an dem erwarteten Nutzen und den Implementieraufwand der Technologien/Content-Arten. Man unterscheidet zwischen folgenden vier Feldern (Edrawsoft 2017):

- **Fill in Jobs:** Leicht umsetzbar, aber geringer Nutzen
- **Quick Wins:** Leicht umsetzbar, hoher Nutzen → Umsetzung lohnt sich
- **Major Projects:** Erhöhter Implementieraufwand, aber hoher Nutzen → Genauere Betrachtung notwendig, Umsetzung kann sich lohnen
- **Thankless Tasks:** Erhöhter Implementieraufwand, der Nutzen ist aber begrenzt → geringste Priorisierung

Neben leicht umsetzbarem Content, wie Bild, Text und Audioeinbindung (mittels Text-to-speech) ist ebenso das lokale Deployment leicht implementierbar. Eine aufwendigere Lösung, aber eine deutliche Verbesserung bietet ein server-basiertes Deployment, da somit mehrere Endgeräte über WLAN auf die einzelnen Trainingsprojekte zugreifen können. Dadurch wird die Skalierbarkeit der Lösung deutlich erhöht, was für einen werksübergreifenden „Roll out“ notwendig ist. Aufgrund des erhöhten Aufwandes ist dies als Major Project klassifiziert.

Auch die Einbindung von 3D-Bauteilüberlagerungen und die Erstellung von Navigationstunneln zu Bauteilen am Trainingsort bieten einen Nutzen und werden durch die Stakeholder gewünscht. Jedoch ist eine Umsetzung, primär aufgrund des CAD-Imports noch sehr aufwendig. Eine einfachere Übergangslösung ist die Erstellung von 3D-Objekten in Form von „Cliparts“ in ein Trainingsprojekt. Auch wenn bei den im Benchmark explorierten Anbieterlösungen die Animationserstellung ein wichtiger Bestandteil der Workflow-Erstellung ist, ist sie in dieser Grafik als „Thankless Task“ klassifiziert. Dies liegt primär daran, dass ein Einfliegen von Bauteilen nur einen vergleichsweise geringen Nutzen gegenüber einer statischen 3D-Überlagerung aufweist. Erst bei komplexen Montagevorgängen, wie der Verlegung eines Kabelbaumes im Fußraum eines Fahrzeuges, bietet die Animation einen visuellen Mehrwert, wenn die einzelnen Stecker des virtuellen Kabelbaums animiert werden können. Um dies zu erreichen ist jedoch ein erhöhter Bearbeitungsaufwand, bereits bei der Konfiguration der CAD-Daten aus CATIA, notwendig.

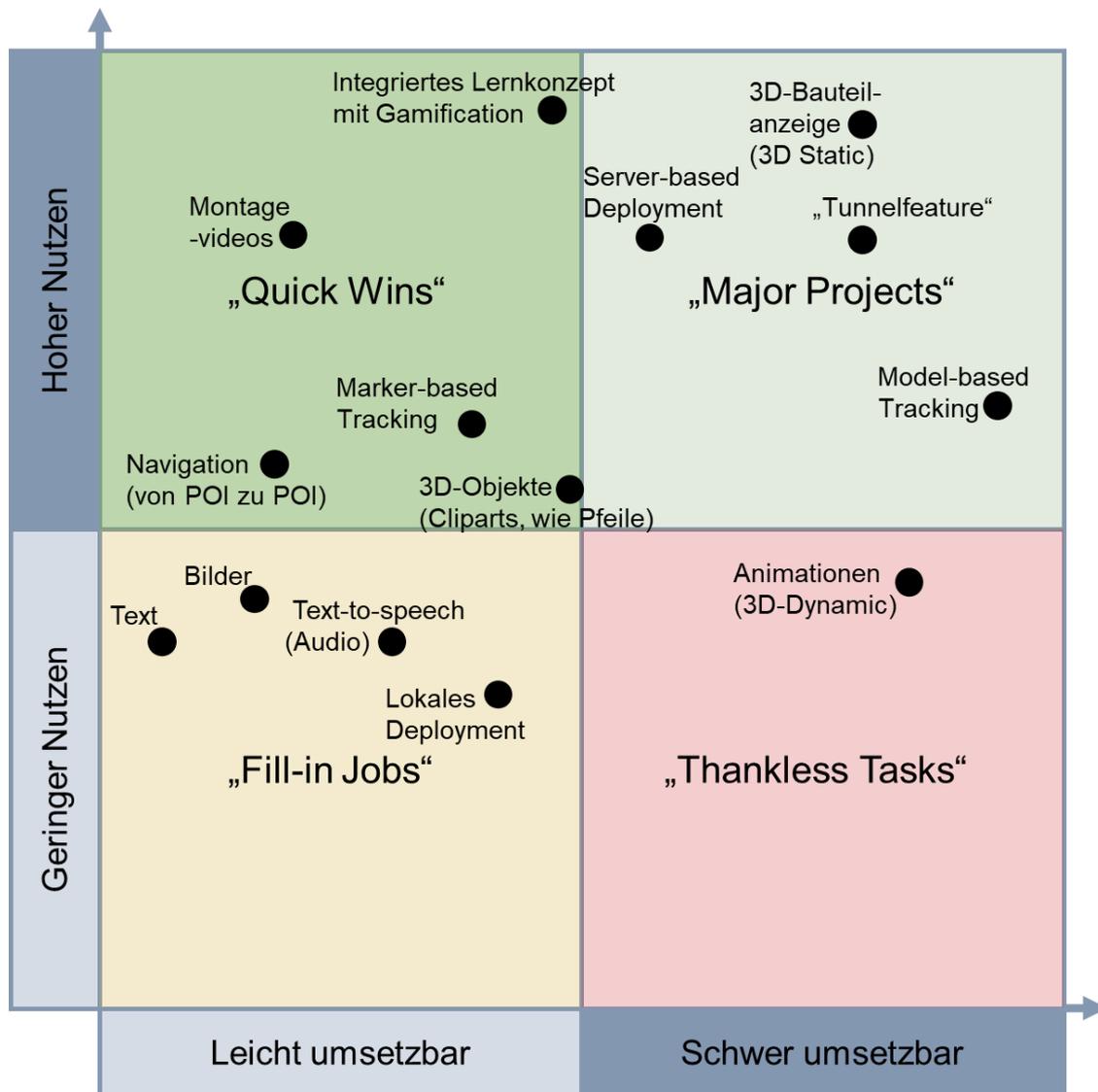


Abbildung 119: Einordnung der wichtigsten Prozessschritte zur Erstellung eines AR-Trainings nach Implementierungsaufwand und erwartetem Nutzen.

Marker-basiertes Tracking lässt sich bei allen AR-Applikationen leicht umsetzen und erfordert auch von den Trainingserstellern keinen erhöhten Aufwand, wenn es einmal durch einen AR-Experten vorkonfiguriert wurde. Zudem ist es robust im Einsatz und erzielt ein akzeptables Tracking-Erlebnis. Modell-basiertes Tracking ist im Ansatz bereits vielversprechend. Allerdings ist die Stabilität des Trackings auf der HoloLens noch nicht ausreichend für einen ausgeweiteten Einsatz. Die Implementierung ist aber ein Major Project, da es von den Anwendern erwünscht ist. Der integrierte Tracking-Konfigurator von Anbieter D bietet hier einen sehr vielversprechenden Ansatz.

Ein weiterer Faktor mit hohem Nutzen ist die Integration eines Lernkonzeptes mit Gamification-Elementen in den Qualifizierungsprozess. Dadurch lässt sich nachweislich die Trainingsqualität steigern (siehe Abschnitt 6.3).

Neben der verbesserten Qualität der Montageschulung und der daraus resultierenden geringen Fehleranzahl im Produktionsbetrieb ergibt sich aus Kostenperspektive vor allem dann ein Mehrwert, wenn es Trainees ermöglicht wird, weitgehend selbstständig ein Training zu durchlaufen. Damit wird der Trainer entlastet und kann mehr Mitarbeiter in kürzerer Zeit antrainieren. Durch die verkürzte Anlernzeit können die Mitarbeiter schneller den wertschöpfenden Produktionsbetrieb aufnehmen. Im Idealfall ist eine komplette Einsparung von Trainerpersonal möglich.

6.4.2 Handlungsfelder

Da sich der IAR-Markt rasch entwickelt und neue Hard- und Softwarelösungen in naher Zukunft erwartet werden, ist es ratsam weiterhin den Markt zu beobachten und auch Pilotprojekte mit verschiedenen Anbietern durchzuführen. Dadurch können neue Technologien und Entwicklungen leicht erprobt werden. Als Haupthandlungsfeld wird vorgeschlagen, die Eigenentwicklung des SMP weiter voranzutreiben und mit Fokus auf der Einbindung von Montagevideos einen Einsatz in den Werken zu ermöglichen. Dadurch werden weitere Erfahrungen über die Gestaltungswünsche der Stakeholder gesammelt, die bei der weiteren Entwicklung berücksichtigt werden können.

Zusätzlich werden die Montagemitarbeiter langsam an AR-basiertes Training „herangeführt“ und somit auf zukünftige Lernassistenzsysteme vorbereitet.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Nun werden die gefundenen Ergebnisse zusammengefasst und die möglichen Einschränkungen der Methodik erläutert. Zudem wird ein Ausblick auf weitere Forschungsfelder gegeben, die auf dieser Arbeit aufbauen.

7.1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

In dieser Arbeit wird ein tiefergehender Blick auf den Erstellungsprozess von AR-basierten Trainings geworfen. Neben dem BMW-internen Ansatz BMW AS-IS sowie weiteren HMD-basierten Varianten werden ausgewählte „High End“ AR-Lösungen verschiedener Anbieter analysiert und miteinander verglichen. Zusätzlich werden sie mit bereits bewährten Methoden, wie Papier- und Video-basierten Trainings, verglichen.

Auch wenn der Nutzen eines AR-basierten Trainings nachweislich höher ist gegenüber Video- und Papier-basierten Trainings, so ist der Content-Generierungsprozess bei den untersuchten Ansätzen aktuell noch zeitlich und technisch aufwendig. Es gibt eine große Diskrepanz zwischen den aktuellen und den notwendigen Fähigkeiten der Trainingsersteller für Montagetrainer. Insbesondere der Umgang mit 3D-Content, wie CAD-Bauteilüberlagerungen und Animationen, ist dabei zeiteinnehmend und bedarf den Umgang mit 3D-Content-Editoren.

Die Darstellung von Videos mit einer hands-free Lösung ist dabei ein vielversprechender Ansatz, da die Erstellung von Videos vergleichsweise schnell und mit geringen Videobearbeitungskenntnissen umgesetzt werden kann. Durch die zukünftige Entwicklung eines vereinfachten Autorentools für den SMP werden auch die bisherigen Trainingsersteller befähigt, Video-basierte AR-Trainings zu generieren. Für das Tracking wird vorerst auf eine marker-basierte Lösung gesetzt, da der modell-basierte Ansatz noch nicht robust genug auf HMDs funktioniert. In Zukunft ist jedoch auch hier eine weitere Steigerung der Trackingqualität zu erwarten.

Von Bedeutung für eine Steigerung der Lernqualität ist zudem die Integration eines gamifizierten Lernkonzeptes mit Lernzielüberprüfung, da so auch schwierige Montageschritte leichter vermittelt werden können, ohne dass ein Trainer aktiv vor Ort unterstützen muss.

7.1.2 Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse

Da sich der Markt für IAR schnell entwickelt und durch technologische Weiterentwicklungen und Impulse aus der Industrie ständig beeinflusst wird, stellen die hier gefundenen Ergebnisse eine Momentaufnahme der aktuellen Entwicklung dar. Weiterentwicklungen in Soft- und Hardware für den AR-Einsatz sind in ständigem Fluss und erlauben nur die Betrachtung zu einem bestimmten Zeitpunkt. So haben einige Anbieter bereits im Laufe dieser Arbeit ihre AR-Autorenlösungen deutlich

weiterentwickelt (Anbieter E und Anbieter C). Die Auswahl der Anbieter trägt der derzeit am europäischen Markt verfügbaren Lösungen für den geplanten Einsatz Rechnung und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Eine weitere Einschränkung ist die Tatsache, dass viele Anbieter naturgemäß ein möglichst breites Feld an Anwendungsfällen abdecken. Zur Anpassung an die speziellen Anforderungen eines Montagetrainings ist teilweise ein erhöhter Implementierungsaufwand notwendig. Da in den zweitägigen Workshops nicht immer das gewünschte Ergebnis erzielt werden konnte, musste differenziert werden ob die Ursache in der mangelnden Implementierungszeit oder an der Struktur des Workflows lag, z.B. bei der Integration eines Trainingsansatzes.

Da für die tiefere Erprobung, in Abschnitt 6, nicht alle Lizenzen der Autorentools zur Verfügung standen, wurde ein Teil der Ergebnisse nur durch die Erfahrungen aus den Workshops und mit Einsatz eines Ersatz-CAD-Modells erzielt. In dieser Arbeit wird nur ein Anwendungsfall, der Einsatz von AR für die Mitarbeiterqualifizierung in der Automobilmontage, untersucht. Somit ist keine grundsätzliche Aussage für andere Anwendungsgebiete oder Branchen möglich, da immer eine Anpassung an die dort geltenden Prozesse durchgeführt werden muss.

7.1.3 Ausblick und weitere Forschungsfelder

Aufbauend auf dieser Arbeit gibt es weitere Forschungsfelder, die einer genaueren Betrachtung bedürfen. Neben einem permanenten Scouting des Marktes nach neuen Technologieentwicklungen im Hardware- und Softwarebereich sind vor allem die prozessspezifischen **Schnittstellen** und das **Datenmanagement** innerhalb des Montageumfelds von Bedeutung. So ist eine unkomplizierte CAD-Prozesskette von der Generierung mit integrierter Kompression bis zur Anwendung im AR-System weiterhin eine Herausforderung. Auch sollten die Montageprozessdaten automatisiert aus den Planungs- und Produktionsplanungsprogrammen übernommen werden können, um im seriellen Einsatz eine erleichterte Trainingserstellung zu ermöglichen. Ein weiteres Thema ist die **Konsistenzerhaltung** von bestehenden Trainingsprojekten, da bei der Änderung von Prozess- oder Produktdaten bei Video- und AR-basierten Trainingsunterlagen ein hoher Änderungsaufwand besteht. Ebenso sind Fragen zur Digitalisierung der Anlernmappe relevant, da weiterhin die Dokumentation von absolvierten Trainings auf Papier am Arbeitsplatz erfolgt. Durch die Neugestaltung solcher Prozesse wird die **Skalierbarkeit** von AR-Lösungen deutlich verbessert.

Für die Entwicklung des Spatial Media Players (SMP) ist eine tiefere Erprobung in mehreren Anwendungsfällen in der Produktion sinnvoll, um Nutzerfeedback zu erhalten und so den Entwicklungsprozess zielgerichtet zu steuern. Auch ist die Durchführung von Nutzerstudien von Bedeutung, um einen **quantifizierbaren**

Vergleich zwischen der konventionellen Trainingsmethodik und dem Einsatz moderner AR-basierter Wissensvermittlung (z.B. durch den HMD-basierten SMP) zu ermöglichen. Hierbei ist es von Bedeutung den Prozess ganzheitlich von der Trainingserstellung bis zum Nutzen der Endanwendung zu betrachten. Der dadurch generierte **Business Case** dient als Entscheidungsgrundlage für das Management und das weitere Vorgehen bezüglich des Einsatzes von AR-Trainings. Erst mit dem Nachweis der Wirtschaftlichkeit unter dem Aspekt der Zukunftsfähigkeit lässt sich bestimmen, wann neue Technologien im Produktionsprozess zum Einsatz kommen. Diese Arbeit liefert die Grundlagen dazu.

8 Verzeichnisse

8.1 Literaturverzeichnis

Adam, Dietrich (Hg.) (1998): Produktions-Management. 9., überarbeitete Auflage. Wiesbaden, s.l.: Gabler Verlag.

Anand, G.; Kodali, Rambabu (2008): Benchmarking the benchmarking models. In: *Benchmarking* 15 (3), S. 257–291. DOI: 10.1108/14635770810876593.

Anbieter E (2018): Anleitung Schulung Gini, zuletzt geprüft am 04.10.2018.

Association for Manufacturing Excellence: The Roots of Lean. Training Within Industry: The Origin of Kaizen. In: *Target Volume 18* (1), zuletzt geprüft am 30.09.2018.

Azuma, Ronald T. (1997): A survey of augmented reality. In: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 6 (4), S. 355–385.

Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten; Vogel-Heuser, Birgit (Hg.) (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg (SpringerLink).

Becker, Thorsten (2008): Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Bergauer, Stephan (2009): Die Bewertung von Prozessen im Rahmen eines Prozessmanagements. Diplomarbeit. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Fakultät für Informatik, zuletzt geprüft am 08.08.2018.

Berthold, Maik (2017): Industrie 4.0: Was Werker wollen. Fraunhofer IAO.

Blender3D (2006): Introduction - Poly Reducer. Online verfügbar unter https://en.blender.org/index.php/Extensions:2.4/Py/Scripts/Mesh/Mesh_poly_reduce, zuletzt aktualisiert am 04.08.2016, zuletzt geprüft am 25.08.2018.

Bloch, Philipp (2016): 5 Beispiele für gelungene Gamification – Philipp Bloch – Medium. Online verfügbar unter <https://medium.com/@philippbloch/5-beispiele-f%C3%BCr-gelungene-gamification-92204515345>, zuletzt geprüft am 30.09.2018.

BMW Group (2015): BMW Arbeitsorganisation. Handbuch zu den Standards der BMW AO. Unter Mitarbeit von Markus Steidle, zuletzt geprüft am 22.09.2018.

BMW Group (2016a): Anlernmappe: Band 20_Takt 140_KBB Motorraum, zuletzt geprüft am 29.09.2018.

BMW Group (2016b): Arbeits- und Prüfanweisung. Anlernmappe und Standardarbeitsblätter in der Montage, zuletzt geprüft am 13.10.2018.

BMW Group (2017a): EFQM Broschüre 2017: Produktionssystem, Planung, Werkzeug-, Anlagenbau, zuletzt geprüft am 06.08.2018.

BMW Group (2017b): Werk München. Montage. Mindset-Trainings, zuletzt geprüft am 29.09.2018.

BMW Group (2018a): BMW-Konfigurator. Ihr perfekter BMW. Online verfügbar unter <https://www.bmw.de/de/ssl/configurator.html#/7J01/S0205,S07NH/G11/esl/new/>, zuletzt geprüft am 29.09.2018.

- BMW Group (2018b): Das BMW Produktionssystem. Wir integrieren Produkte und Technologien der Zukunft und schaffen Kundenbegeisterung in Serie. Unter Mitarbeit von Manuel Bayer. Hg. v. BMW Group, zuletzt geprüft am 06.08.2018.
- BMW Group (2018c): Strategie NUMBER ONE>NEXT Status Update. BMW Group: Strategieentwicklung. Hg. v. AU-1. München, zuletzt geprüft am 06.08.2018.
- Anbieter B (2018): Augmented Reality von ANBIETER B. BMW-CAP Workshop. Unter Mitarbeit von Gerhard Sailer. Hg. v. Robert Anbieter B GmbH. Garching, München, zuletzt geprüft am 27.08.2018.
- Caudell, T. P.; Mizell, D. W. (1992 - 1992): Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In: Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences. Kauai, HI, USA, 07.01.1992 - 10.01.1992: IEEE, 659-669 vol.2, zuletzt geprüft am 15.10.2018.
- Chen, Jessie Y.C.; Fragomeni, Gino (2018): Virtual, Augmented and Mixed Reality: Interaction, Navigation, Visualization, Embodiment, and Simulation. Cham: Springer International Publishing (10909).
- Craig, Alan B. (2013a): Chapter 1 - What Is Augmented Reality? In: Alan B. Craig (Hg.): Understanding Augmented Reality. Boston: Morgan Kaufmann, S. 1–37. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780240824086000011>.
- Craig, Alan B. (2013b): Chapter 5 - Content Is Key! — Augmented Reality Content. In: Alan B. Craig (Hg.): Understanding Augmented Reality. Boston: Morgan Kaufmann, S. 151–183. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780240824086000059>.
- Craig, Alan B. (2013c): Chapter 9 - The Future of Augmented Reality. In: Alan B. Craig (Hg.): Understanding Augmented Reality. Boston: Morgan Kaufmann, S. 255–265. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780240824086000096>.
- ANBIETER A (2018): Présentation Solutions 4.0 for Industry. München, 18.06.2018, zuletzt geprüft am 03.10.2018.
- Dragolea, Larisa; Cotirlea, Denisa (2009): Benchmarking - a valid strategy for the long term? In: *Annales Universitatis Apulensis Series Oeconomica* (11(2)), zuletzt geprüft am 07.08.2018.
- Edrawsoft (2017): Impact Effort Matrix Templates. Online verfügbar unter <https://www.edrawsoft.com/impact-effort-matrix-templates.php>, zuletzt geprüft am 12.11.2018.
- Fite-Georgel, Pierre (2011): Is there a reality in Industrial Augmented Reality? In: 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2011). Basel, Switzerland, 26-29 October 2011. 2011 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Basel, 10/26/2011 - 10/29/2011. Piscataway, NJ: IEEE, S. 201–210.
- Fraga-Lamas, Paula; Fernandez-Carames, Tiago M.; Blanco-Novoa, Oscar; Vilar-Montesinos, Miguel A. (2018): A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard. In: *IEEE Access* 6, S. 13358–13375. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2808326.
- Gartner (Hg.) (2018): Gartner Hype Cycle 2018. Most emerging technologies are 5-10 years away. Online verfügbar unter <https://www.smartinsights.com/managing-digital-marketing/managing-marketing-technology/gartner-hype-cycle-2018-most-emerging-technologies-are-5-10-years-away/>, zuletzt geprüft am 30.08.2018.
- GS Lexikon (2018): Content Definition. Online verfügbar unter https://www.gruenderszene.de/lexikon/begriffe/content?interstitial_click, zuletzt geprüft am 19.10.2018.

- Hartbrich, Iestyn (2014): Datenbrille: Das Handbuch auf der Nase. Online verfügbar unter <https://www.zeit.de/2014/36/datenbrille-service-reparatur>, zuletzt aktualisiert am 13.09.2014, zuletzt geprüft am 13.10.2018.
- Hirsch-Kreinsen, Hartmut; Ittermann, Peter; Niehaus, Jonathan (2015): Digitalisierung industrieller Arbeit. Arbeiten und Lernen in der digitalisierten Welt: Nomos.
- Ishizaka, Alessio; Nemery, Philippe (2013): Multi-criteria Decision Analysis. Methods and Software. 1. Aufl. s.l.: Wiley. Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=593377>.
- Kim, Kangsoo; Billinghurst, Mark; Bruder, Gerd; Duh, Henry Been-Lirn; Welch, Gregory F. (2018): Revisiting Trends in Augmented Reality Research: A Review of the 2nd Decade of ISMAR (2008-2017). In: *IEEE transactions on visualization and computer graphics*. DOI: 10.1109/TVCG.2018.2868591.
- Klein, Georg; Murray, David (2007): Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces. University of Oxford. Active Vision Laboratory Department of Engineering Science, zuletzt geprüft am 14.10.2018.
- Koren, Yoram (2010): The global manufacturing revolution. Product-process-business integration and reconfigurable systems. Unter Mitarbeit von Rodney Hill. Hoboken, NJ: Wiley a John Wiley & Sons Inc (Wiley series in systems engineering and management). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/academiccompletetitles/home.action>.
- Korn, Oliver; Funk, Markus; Schmidt, Albrecht (2015): Towards a gamification of industrial production. In: Jürgen Ziegler (Hg.): EICS'15. Proceedings of the 2015 ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems : June 23-26, 2015, Duisburg, Germany. the 7th ACM SIGCHI Symposium. Duisburg, Germany. New York, New York: Association for Computing Machinery, S. 84–93.
- KPMG (2018): Global Automotive Executive Survey 2018. Online verfügbar unter www.kpmg.com/GAES2018, zuletzt geprüft am 22.09.2018.
- Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (2012): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- MAGIX Fastcut (2018): Automatischer Videoschnitt in Sekunden – MAGIX Fastcut kostenlos downloaden. Online verfügbar unter <https://www.gratis-software-tools.de/fastcut/>.
- Mazuryk, Tomasz; Gervautz, Michael (1996): Virtual Reality. History, Applications, Technology and Future. Technical Report. Vienna University of Technology, Austria, Wien. Institute of Computer Graphics, zuletzt geprüft am 01.11.2018.
- Mehring, Britta (2017): Seriennaher Einsatz von Smart Glasses in internationalen Automobilwerken. Bachelorarbeit. Ruhruniversität Bochum, Bochum. Institute Product and Service Engineering, zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- Memex (2018): Utility Film - Werkerführung und Qualifizierung. Hg. v. memex GmbH. Online verfügbar unter <https://www.memex.eu/unternehmen?view=featured>, zuletzt geprüft am 23.10.2018.
- Milgram, Paul; Takemura, Haruo; Utsumi, Akira; Kishino, Fumio (1995): Augmented reality. A class of displays on the reality-virtuality continuum. In: Hari Das (Hg.). *Photonics for Industrial Applications*. Boston, MA, Monday 31 October 1994: SPIE (SPIE Proceedings), S. 282–292.
- Nguyen, Phuc Anh (2018): Storyboard Authoring Tool for AR-based Assembly Training. München.

North, Klaus (2016): Wissensorientierte Unternehmensführung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Palmarini, Riccardo; Erkoyuncu, John Ahmet; Roy, Rajkumar; Torabmostaedi, Hosein (2018): A systematic review of augmented reality applications in maintenance. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 49, S. 215–228. DOI: 10.1016/j.rcim.2017.06.002.

ANBIETER D (2018a): PTC's Vision for AR in the enterprise, zuletzt geprüft am 03.10.2018.

ANBIETER D (2018b): Über uns | ANBIETER D. Online verfügbar unter <https://www.AnbieterD.com/de/about>, zuletzt geprüft am 30.08.2018.

Anbieter D (2018): Anbieter D Studio Tutorials and FAQs. Online verfügbar unter https://support.AnbieterD.com/help/AnbieterD/studio/en/#page/Studio_Help_Center%2FTutorialWelcome.html%23, zuletzt geprüft am 09.11.2018.

REFA (1989): Methodenlehre der Betriebsorganisation. 2. Aufl. München: Hanser.

Reisinger, Gerhard; Komenda, Titanilla; Hold, Philipp; Sihn, Wilfried (2018): A Concept towards Automated Data-Driven Reconfiguration of Digital Assistance Systems. In: *Procedia Manufacturing* 23, S. 99–104. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.03.168.

Riedl, Alfred; Schelten, Andreas (1997): Handlungsorientiertes, selbstgesteuertes Lernen-Erfahrungen mit der Leittextmethode. In: *REFA Aus-und Weiterbildung* 9 (2), S. 38–41.

Salomo, Linda (2018): Dokumentation UX-Design Workshop. FG-7-L-26. München, 24.09.2018, zuletzt geprüft am 12.11.2018.

Schlund, Sebastian (2017a): Assistenzsysteme in der Produktion I. TU Wien - Institut für Managementwissenschaften. Wien, 05.10.2017, zuletzt geprüft am 22.09.2018.

Schlund, Sebastian (2017b): Assistenzsysteme in der Produktion. Einordnung von Assistenzsystemen in der Produktion. TU Wien. Wien, 12.10.2017, zuletzt geprüft am 14.10.2018.

Schneider, Lisa (2017): „Investitionen in Neues“, 26.01.2017 (04), zuletzt geprüft am 24.09.2018.

Schwan, Ben (2018): Was vom Hype bleibt: AR-Brille Magic Leap One ausprobiert. Heise Medien. Online verfügbar unter <https://www.heise.de/newsticker/meldung/AR-Brille-Magic-Leap-One-ausprobiert-Nach-dem-Hype-4131935.html>, zuletzt aktualisiert am 14.10.2018, zuletzt geprüft am 14.10.2018.

Seiwert, Martin; Fritz, Martin; Klesse, Hans-Jürgen (2018): Neues Produktionssystem: VW spart 1500 Euro pro Auto. Online verfügbar unter <https://www.wiwo.de/unternehmen/auto/neues-produktionssystem-revolutionen-der-autoindustrie/7339232-2.html>, zuletzt aktualisiert am 22.09.2018, zuletzt geprüft am 22.09.2018.

Senderek, Roman; Geisler, Kartin (Hg.) (2015): Assistenzsysteme zur Lernunterstützung in der Industrie 4.0. Proceedings der Pre-Conference Workshops der.

sixsigmablackbelt.de (2013): Paarweiser Vergleich Nutzwertanalyse. Unter Mitarbeit von Roland Schnurr. Online verfügbar unter <https://www.sixsigmablackbelt.de/paarweiser-vergleich/>, zuletzt geprüft am 09.10.2018.

Socher, Ramona (2018): Secrets of HoloLens 2: What We've Learned So Far. Hg. v. Wearable Technologies. <https://www.wearable-technologies.com/>. Online verfügbar unter <https://www.wearable-technologies.com/2018/05/secrets-of-HoloLens-2-what-weve-learned-so-far/>, zuletzt geprüft am 14.10.2018.

- Strahinger, Susanne; Leyh, Christian (2017): Gamification und Serious Games. Grundlagen, Vorgehen und Anwendungen (Edition HMD). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-16742-4>.
- Suvak, Janine (2014): Learn Unity 3D Programming with UnityScript. Unity's JavaScript for Beginners. Berkeley, CA, s.l.: Apress (Technology in action). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4302-6587-0>.
- Tönnis, Marcus (2010): Augmented Reality. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Töpfer, Armin (1997): Benchmarking Der Weg zu Best Practice. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Treichel, Alois (2018): Baureihenarchiv für BMW Fahrzeuge · Entwicklungscodes · bimmerarchiv.de. Alois Treichel. Online verfügbar unter <https://www.bimmerarchiv.de/e-code/>, zuletzt aktualisiert am 26.09.2018, zuletzt geprüft am 26.09.2018.
- Ubimax (2018): Ubimax – Lösungen. Online verfügbar unter <https://www.ubimax.com/de/loesungen/>, zuletzt aktualisiert am 15.10.2018, zuletzt geprüft am 22.10.2018.
- Anbieter D by ANBIETER D (2017): Anbieter D Model Target Generator Workflow. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?reload=9&v=0CIWhxf94wk>, zuletzt geprüft am 03.10.2018.
- Wang, X.; Ong, S. K.; Nee, A. Y. C. (2016): A comprehensive survey of augmented reality assembly research. In: *Adv. Manuf.* 4 (1), S. 1–22. DOI: 10.1007/s40436-015-0131-4.
- Warnecke, Hans-Jürgen (1995): Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb. Technik, Organisation, Betriebswirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-79963-1>.
- Werrlich, S.; Eichstetter, E.; Nitsche, K.; Notni, G. (2017a): An Overview of Evaluations Using Augmented Reality for Assembly Training Tasks. In: *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering* 11 (10), S. 1074–1080.
- Werrlich, Stefan; Lorber, Carolin; Nguyen, Phuc-Anh; Notni, Gunther (2016): Assembly Training: Comparing the effects of headmounted displays and face-to-face training, zuletzt geprüft am 17.06.2018.
- Werrlich, Stefan; Nguyen, Phuc-Anh; Franco Yanez, Carlos Emilio (2018): Design Recommendations for HMD based Assembly Training Tasks, zuletzt geprüft am 17.06.2018.
- Werrlich, Stefan; Nguyen, Phuc-Anh; Notni, Gunther (2017b): Evaluating the training transfer of Head-Mounted Display based training for assembly tasks, zuletzt geprüft am 17.06.2018.
- Werrlich, Stefan; Nitsche, Kai; Notni, Gunther (2017c): Demand Analysis for an Augmented Reality based Assembly Training. In: Stefan Werrlich, Kai Nitsche und Gunther Notni (Hg.): Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments. the 10th International Conference. Island of Rhodes, Greece, 21.06.2017 - 23.06.2017. ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments; University of Texas at Arlington; National Science Foundation; Association for Computing Machinery; PETRA. New York, NY, USA: ACM (ICPS), S. 416–422, zuletzt geprüft am 17.06.2018.
- Westerfield, Giles; Mitrovic, Antonija; Billinghurst, Mark (2015): Intelligent Augmented Reality Training for Motherboard Assembly. In: *Int J Artif Intell Educ* 25 (1), S. 157–172. DOI: 10.1007/s40593-014-0032-x.

Winkelhake, Uwe (2017): Die digitale Transformation der Automobilindustrie. Treiber - Roadmap - Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (Handbuch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54935-3>.

wirtschaftslexikon24.com (2018): Industrielle Produktion. Online verfügbar unter <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/industrielle-produktion/industrielle-produktion.htm>, zuletzt aktualisiert am 13.05.2017, zuletzt geprüft am 22.09.2018.

Zangemeister, Christof (2014): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. Teilw. zugl.: Berlin, Univ., Diss., 1970. 5., erw. Aufl. Norderstedt: Books on Demand.

Zendler, Andreas; Seitz, Cornelia; Fest, Andreas; Klaudt, Dieter (2018): Unterrichtsmethoden im Kontext bedeutsamer Lerntheorien. In: Andreas Zendler (Hg.): Unterrichtsmethoden für den Informatikunterricht: Mit praktischen Beispielen für prozess- und ergebnisorientiertes Lehren. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 143–157. Online verfügbar unter https://doi.org/10.1007/978-3-658-20675-8_5.

Zühlke, Detlef (2011): Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen. Useware-Engineering für technische Systeme: Springer-Verlag.

8.2 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: AUFBAU DER DIPLOMARBEIT	2
ABBILDUNG 2: EIN PRODUZIERENDES UNTERNEHMEN HAT DREI BASELEMENTE: GESTALTEN, FERTIGEN UND VERKAUFEN (ANGELEHNT AN KOREN 2010, S. 24).....	5
ABBILDUNG 3: VERÄNDERUNG DER ANFORDERUNGEN DES MARKTES HINZU INDIVIDUALISIERTEN PRODUKTEN (SCHLUND 2017A, S. 15; IN ANLEHNUNG AN KOREN 2010).....	7
ABBILDUNG 4: VERÄNDERUNG DER INNOVATIONSAUSGABEN IN VERSCHIEDENEN INDUSTRIESEKTOREN (SCHNEIDER 2017)	8
ABBILDUNG 5: DIE WICHTIGSTEN TRENDS BIS 2025 LAUT DER GLOBAL AUTOMOTIVE EXECUTIVE SURVEY (KPMG 2018)	9
ABBILDUNG 6: BMW PRODUKTIONSSTANDORTE WELTWEIT (BMW GROUP 2017A).....	10
ABBILDUNG 7: LEITBILD: STRATEGIE NUMBER ONE - NEXT (BMW GROUP 2018C)	11
ABBILDUNG 8: TOP-ZIELE DES BMW-PRODUKTIONSRESSORTS (BMW GROUP 2017A).....	11
ABBILDUNG 9: DAS WPS-RAD - AUßEN: VERHALTENSGRUNDSÄTZE; MITTE: PROZESSGRUNDSÄTZE; ZENTRUM: FLEXIBILITÄT (BMW GROUP 2017A, S. 26).....	12
ABBILDUNG 10: FUNKTIONEN DER MONTAGE (LOTTER UND WIENDAHL 2012, S. 2).....	13
ABBILDUNG 11: BRANCHENÜBERGREIFENDE KOSTENVERURSACHUNG DER WICHTIGSTEN UNTERNEHMENSBEREICHE (ANGELEHNT AN LOTTER UND WIENDAHL 2012, S. 12)	14
ABBILDUNG 12: AUSWAHLKRITERIEN FÜR MONTAGESYSTEME (LOTTER UND WIENDAHL 2012, S. 9)	15
ABBILDUNG 13: EINGLIEDERUNG DER MONTAGE IN DAS BMW-PRODUKTIONSSYSTEM (BMW GROUP 2018B)	15
ABBILDUNG 14: EXEMPLARISCHER AUFBAU EINER MONTAGELINIE.....	17
ABBILDUNG 15: ENTWICKLUNG DER ANZAHL VERSCHIEDENER DERIVATE IN DER BMW GROUP (ANGELEHNT AN TREICHEL 2018, S. 1)	19
ABBILDUNG 16: ENTWICKLUNG DER INTERNEN NETZLEISTUNG BEI ANPASSUNG DER BUSTECHNOLOGIE IN FAHRZEUGEN (WINKELHAKE 2017, S. 15).....	20
ABBILDUNG 17: EXEMPLARISCHER AUFBAU MEHRERER KAROSSENTAKTE UND DEN ZUGEHÖRIGEN ARBEITSPLÄTZEN AM MONTAGEBAND.....	22

ABBILDUNG 18: STRUKTUR UND EINGLIEDERUNG DER MONTAGEINFORMATIONEN	22
ABBILDUNG 19: GRUNDSTRUKTUR DER BMW ARBEITSORGANISATION IM PERSONALINTENSIVEN BEREICH (BMW GROUP 2015, S. 18)	23
ABBILDUNG 20: ANLERNPROZESS NEUER MITARBEITER (BMW GROUP 2015, S. 18)	24
ABBILDUNG 21: INHALTE EINER ANLERNMAPPE (BMW GROUP 2016A)	25
ABBILDUNG 22: AUSZUG AUS DER ANLERNHILFE, DIE ZUR UNTERSTÜTZUNG DES ANLERNPROZESSES DIENT. OBEN SIND DIE DERIVATSBEZEICHNUNGEN ABGEBILDET, AUF DIE DIESER MONTAGESCHRITT ZUTRIFFT (BMW GROUP 2016A)	26
ABBILDUNG 23: EXEMPLARISCHER ANLAUF EINES NEUEN FAHRZEUGES: ANZAHL DER QUALIFIZIERTEN MITARBEITER IM ZEITVERLAUF	27
ABBILDUNG 24: QUALIFIZIERUNGSMETHODEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER KOMPLEXITÄT DER ARBEITSAUFGABE (ANGELEHNT AN LOTTER UND WIENDAHL 2012, S. 402)	29
ABBILDUNG 25: REFA 4-STUFEN METHODE (ANGELEHNT AN REFA 1989, S. 133)	30
ABBILDUNG 26: BEISPIEL FÜR VR-TRAINING (QUELLE: BMW 2018)	34
ABBILDUNG 27: BEISPIEL EINES DESKTOP-BASIERTEN VIRTUELLEN TRAININGS (QUELLE: BMW 2018)	35
ABBILDUNG 28: BEISPIEL AR-BASIERTES TRAINING (WERRLICH ET AL. 2017A, S. 1074)	35
ABBILDUNG 29: ÜBERSICHT MOBILER WERKERASSISTENZSYSTEME	38
ABBILDUNG 30: DAS REALITÄTS-VIRTUALITÄTS-KONTINUUM BESCHREIBT DAS SPEKTRUM DER REALITÄT VON VOLLKOMMEN REAL BIS VOLLKOMMEN VIRTUELL (MILGRAM ET AL. 1995, S. 283)	39
ABBILDUNG 31: MIXED REALITY KONTINUUM: IMMERSION IN DIE VIRTUALITÄT UND VERORTUNG AKTUELLER VISUELLER ASSISTENZSYSTEME (ANGELEHNT AN MILGRAM ET AL. 1995, S. 283; BMW 2016; BILDQUELLEN: BMW 2016, TECHCRUNCH 2018, WEBSEITEN DER BRILLENHERSTELLER)	40
ABBILDUNG 32: SENSOREN UND KAMERAS EINER MICROSOFT HOLOLENS (WERRLICH ET AL. 2016, S. 7)....	41
ABBILDUNG 33: VEREINFACHTER AUFBAU EINER AR-PIPELINE (ANGELEHNT AN FRAGA-LAMAS ET AL. 2018)	43
ABBILDUNG 34: GEWINNBRINGENDER EINSATZ VON IAR ENTLANG DER WERTSCHÖPFUNGSKETTE MIT BEISPIELPROJEKTEN (ANGELEHNT AN FRAGA-LAMAS ET AL. 2018, S. 13361; ANBIETER D 2018A, S. 8)	46
ABBILDUNG 35: ÜBERLAGERUNG AUSGEWÄHLTER ANWENDUNGSFELDER MIT DEN KOMPONENTEN EINES AR- SYSTEMS. INNEN: GERINGER AUFWAND; AUßEN: HOHER AUFWAND (ANGELEHNT AN ANBIETER D 2018A, S. 15; UM ASSEMBLY TRAINING ERWEITERT)	47
ABBILDUNG 36: GARTNER HYPE CYCLE - ENTWICKLUNG DER TECHNOLOGIEPROGNOSE FÜR AUGMENTED REALTY ZWISCHEN 2005 UND 2018 (ANGELEHNT AN GARTNER 2018)	49
ABBILDUNG 37: STEIGENDES INTERESSE DER FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT IM ZEITRAUM 1995-2018 ZU DEN THEMEN "AUGMENTED REALITY" UND "AUGMENTED REALITY AND CONTENT GENERATION". REPRÄSENTATIV AUSGEDRÜCKT DURCH DIE ANZAHL DER VERÖFFENTLICHUNGEN AUF DER WISSENSPLATTFORM SCIENCE DIRECT	50
ABBILDUNG 38: DIE WISSENSTREPPE NACH NORTH (NORTH 2016, S. 37)	52
ABBILDUNG 39: SCHEMATISCHE STRUKTUR EINES DIGITALEN ASSISTENZSYSTEMS (REISINGER ET AL. 2018, S. 102)	53
ABBILDUNG 40: CONTENT-GENERIERUNGSPROZESS FÜR EIN AR-BASIERTES WERKERASSISTENZSYSTEM ZUR LERNUNTERSTÜTZUNG	54
ABBILDUNG 41: VEREINFACHTER CONTENT-GENERIERUNGSPROZESS, BEI DEM DER TRAINER DIE AUFGABEN DES AR EXPERTEN ÜBERNEHMEN KANN	55
ABBILDUNG 42: BENCHMARKING - MÖGLICHKEITEN DER DIFFERENZIERUNG (BERGAUER 2009, S. 63)	57
ABBILDUNG 43: ARTEN DES BENCHMARKING KLASSIFIZIERT NACH VERGLEICHSPARTNER (TÖPFER 1997, S. 79)	57
ABBILDUNG 44: DAS XEROX-BENCHMARK MODELL (ANGELEHNT AN ANAND UND KODALI 2008)	58
ABBILDUNG 45: ABLAUF DES BENCHMARKING, ANGELEHNT AN DEM KERNTHEMEN-MODELL VON DRAGOLEA UND COTIRLEA (2009)	59

ABBILDUNG 46: EXEMPLARISCHES UI DER ANWENDUNG MIT GEÖFFNETER MONTAGESCHRITTÜBERSICHT MIT 15 SCHRITTEN (NGUYEN 2018, S. 12)	63
ABBILDUNG 47: POSITION DES UI IN DER REALEN WELT, DER AVATAR EMBLY UND EIN EINGEBLENDETES 3D-OBJEKT (EIGENER SCREENSHOT)	63
ABBILDUNG 48: DIE SECHS FEATURES DER ANWENDUNGSAPPLIKATION IM ÜBERBLICK (ANGELEHNT AN NGUYEN 2018, S. 6)	64
ABBILDUNG 49: DAS 4-STUFIGE TRAININGSMODELL MIT ZUSÄTZLICHEM QUIZLEVEL ZUR LERNZIELKONTROLLE (ANGELEHNT AN WERRLICH ET AL. 2017B, S. 2).....	65
ABBILDUNG 50: AUGMENTIERTES SICHTFELD WÄHREND DES QUIZLEVELS (WERRLICH ET AL. 2017B, S. 3) ..	65
ABBILDUNG 51: VEREINFACHTE DARSTELLUNG DES IST-AUTORENPROZESSES BASIEREND AUF UNITY3D....	67
ABBILDUNG 52: POLYGONREDUKTION AM BEISPIEL EINER KUH (BLENDER3D 2006).....	68
ABBILDUNG 53: OBERFLÄCHE DES UNITY3D-EDITORS (QUELLE: SCREENSHOT BMW 2018).....	69
ABBILDUNG 54: GRÜNE WÜRFEL SIND „CUBE COLLIDER“, DIE JEWEILS EINEM BAUTEIL/WERKZEUG ZUGEORDNET SIND (QUELLE: SCREENSHOT BMW 2018).....	71
ABBILDUNG 55: VEREINFACHTE DARSTELLUNG DES SOLL-AUTORENPROZESSES.....	72
ABBILDUNG 56: UI DES GEWÜNSCHTEN AUTORENPROGRAMMES (NGUYEN 2018)	73
ABBILDUNG 57: GENERIERUNG EINER ANIMATION IN DEM AUTORENPROGRAMM MIT EINBLENDUNG EINER ANIMATIONS-PALETTE UND TIMELINE (NGUYEN 2018)	74
ABBILDUNG 58: WECHSEL ZWISCHEN EINEM ABGESCHLOSSENEN UND EINEM NEUEN ARBEITSSCHRITT (NGUYEN 2018)	75
ABBILDUNG 59: TABELLARISCHE ÜBERSICHT DER ARBEITSSCHRITTE UND EXEMPLARISCHE VERTAUSCHUNG DER SCHRITTE 1 UND 2 (NGUYEN 2018).	75
ABBILDUNG 60: VIRTUELLE REGISTRIERUNG UND FESTLEGUNG DER TUNNELZIELE (NGUYEN 2018, S. 45) ..	76
ABBILDUNG 61: UI DES MODELLOPTIMIERERS 3DJUMP UND DIE KOMPRESSIONSAUSWAHLSTUFEN FÜR DEN EXPORT (UNTEN) (QUELLE: SCREENSHOT WORKSHOP)	81
ABBILDUNG 62: DER AUTORENPROZESS MIT ANBIETER A UND UNITY	81
ABBILDUNG 63: PROJEKT EDITOR ZUR ERSTELLUNG DER JOBCARDS; BEFÜLLUNG EINES ARBEITSSCHRITTES MIT CONTENT (QUELLE: SCREENSHOT WORKSHOP)	82
ABBILDUNG 64: UI DES ANBIETER A PLAYERS AUF DEM TABLET; RECHTS SIND DIE JOBCARDS ABGEBILDET, LINKS WERDEN ZUSÄTZLICHE FUNKTIONEN, WIE ZUM BEISPIEL DER TRACKING ANLERNMODUS DARGESTELLT (ANBIETER A 2018).....	83
ABBILDUNG 65: DER AUTORENPROZESS DER ANBIETER B	84
ABBILDUNG 66: OBERFLÄCHE DER 3D-AUTORENSOFTWARE CORTONA3D RAPIDAUTHOR (QUELLE: WORKSHOP ANBIETER B).....	85
ABBILDUNG 67: DARSTELLUNG EINES ARBEITSSCHRITTES IN XML-CODE MIT DEM ANBIETER B XML-EDITOR (QUELLE: WORKSHOP ANBIETER B).....	86
ABBILDUNG 68: DAS UI DES TRACKING TOOLS SYNC, BASIEREND AUF RE'FLEKT ONE (ANBIETER B 2018).....	87
ABBILDUNG 69: CAP CLIENT AUF EINEM TABLET MIT ANGEPASSTEM UI (ANBIETER B 2018).....	88
ABBILDUNG 70: DER AUTORENPROZESS MIT ANBIETER C	89
ABBILDUNG 71: PINS - ERSTELLEN EINES NEUEN ARBEITSSCHRITTES; LINKS: BEREITS BEFÜLLTER ARBEITSSCHRITT MIT ZWEI POIS; RECHTS: NEUER UNBEFÜLLTER ARBEITSSCHRITT (QUELLE: WORKSHOP ANBIETER C).....	90
ABBILDUNG 72: UI DES PROGRAMMS STEPS; LINKS DIE SCHRITTÜBERSICHT UND DIE OPTIONSFELDER, RECHTS DIE ANIMATIONS-VORLAGEN (QUELLE: WORKSHOP ANBIETER C).....	91
ABBILDUNG 73: STEPS - FUNKTION ZUR UMKEHRUNG DER ARBEITSSCHRITTE. LINKS VORHER, RECHT NACHHER (QUELLE: WORKSHOP ANBIETER C).....	91
ABBILDUNG 74: DER ANBIETER D-AUTORENPROZESS MIT CREO ILLUSTRATE UND ANBIETER D STUDIO....	93
ABBILDUNG 75: UI DES 3D-EDITORS; FESTLEGUNG DES ANIMATIONS-PFADES ÜBER DIE TIMELINE (QUELLE: WORKSHOP ANBIETER D).....	94

ABBILDUNG 76: UI VON ANBIETER D STUDIO, LINKS SIND DIE PROJEKTDATEN GEORDNET NACH 3D UND 2D INHALTEN ABGELEGT, RECHTS KÖNNEN DIE EIGENSCHAFTEN DES ANGEWÄHLTEN OBJEKTES VERÄNDERT WERDEN (QUELLE: WORKSHOP ANBIETER D)	95
ABBILDUNG 77: MODEL-BASED TRACKING - LINKS: TRACKING MODELL NICHT GEFUNDEN, RECHTS: TRACKING-MODELL GEFUNDEN (QUELLE: WORKSHOP ANBIETER D)	96
ABBILDUNG 78: UI IN ANBIETER D VIEW MIT EINBLENDUNG EINER ANIMATION; RECHTS: ÖFFNUNG DES ADMINISTRATOR MODUS FÜR DIE VIRTUELLE REGISTRIERUNG UND ABSPIELEN DER ANIMATION (QUELLE: WORKSHOP ANBIETER D).....	96
ABBILDUNG 79: DER „CUSTOMIZED“ ANBIETER D-AUTORENPROZESS MIT THINGWORX-TEMPLATE ZUR VEREINFACHTEN CONTENT-ORGANISATION	97
ABBILDUNG 80: TEMPLATE ZUR VEREINFACHTEN CONTENT-VERWALTUNG; FÜR JEDE KACHEL IST EINE VERLINKUNG NOTWENDIG. LEERE FELDER WERDEN FARBlich HERVORGEHOBEN. (QUELLE: WORKSHOP ANBIETER D).....	98
ABBILDUNG 81: IN-SITU AUTORENPROZESS MIT ANBIETER E	99
ABBILDUNG 82: ANBIETER E: TOOLLISTE MIT EINER AUSWAHL AN SMARTSYMBOLS (ANBIETER E 2018)	100
ABBILDUNG 83: VERSCHIEBUNG, VERDREHUNG UND SKALIERUNG EINES PFEILES MIT GESTENSTEUERUNG (SCREENSHOT ANBIETER E 2018)	101
ABBILDUNG 84: BEISPIEL – FEINGEWICHTUNG DES UNTERPUNKTES VIDEO DES HAUPTKRITERIUMS „FUNCTIONS IN EDITOR“	103
ABBILDUNG 85: BEISPIEL DER GEWICHTUNGSMETHODE "PAARWEISER VERGLEICH", AUCH PRÄFERENZANALYSE GENANNT (SIXSIGMABLACKBELT.DE 2013)	104
ABBILDUNG 86: 1.KRITERIUM - CAD-PIPELINE; INNEN – SCHLECHT AUSGEPRÄGT; AUßEN – GUT AUSGEPRÄGT	106
ABBILDUNG 87: 2.KRITERIUM - FUNCTIONS OF EDITOR	107
ABBILDUNG 88: 4.KRITERIUM - USER EXPERIENCE WÄHREND DES AUTORENPROZESSES	108
ABBILDUNG 89: 4.KRITERIUM - DEPLOYMENT	109
ABBILDUNG 90: 5.KRITERIUM - FUNKTIONEN DER ENDAPPLIKATION.....	109
ABBILDUNG 91: 6.KRITERIUM - USER EXPERIENCE PLAYER	111
ABBILDUNG 92: 7.KRITERIUM - TRACKING	111
ABBILDUNG 93: 8.KRITERIUM - SOFTWARE OPERATION AND INTEGRATION IN THE BMW LANDSCAPE	113
ABBILDUNG 94: 9.KRITERIUM: BEWERTUNG DER KOSTENSTRUKTUR DER ANBIETER: 1- TEUER, 5 - GÜNSTIG	114
ABBILDUNG 95: VERGLEICH ALLER ANBIETER IN DEN VERSCHIEDENEN KATEGORIEN: OBEN - UNGEWICHTET; UNTEN - MIT FEINGEWICHTUNG	115
ABBILDUNG 96: DIE ERGEBNISSE DES FEINGEWICHTETEN BENCHMARKS IM ÜBERBLICK (SIEHE ANHANG C) 115	
ABBILDUNG 97: EINFLUSS DER GEWICHTUNGSVERFAHREN AUF DEN GESAMTNUTZWERT DER ANBIETER....	117
ABBILDUNG 98: VERGLEICH DER BEIDEN ANWENDUNGSFÄLLE: 1. UNIVERSELLE „VERTRÄGLICHKEIT“ MIT DEN FACHLICHEN UND TECHNISCHEN ANFORDERUNGEN; 2. PRÄFERENZ AUF VEREINFACHTE CONTENTERSTELLUNG MIT FOKUS AUF 2D-CONTENT, WIE VIDEOS.....	118
ABBILDUNG 99: ÜBERSICHT UND KATEGORISIERUNG DER MÖGLICHEN EFFIZIENZKRITERIEN	121
ABBILDUNG 100: PROZESS ZUR ERSTELLUNG EINER ANLERNHILFE MIT DREI SCHRITTEN.....	124
ABBILDUNG 101: PAPIER-BASIERTE ANLERNHILFE MIT DREI EXEMPLARISCHEN MONTAGESCHRITTEN	125
ABBILDUNG 102: AUFBAU EINES STANDARDISIERTEN MONTAGEVIDEOS	127
ABBILDUNG 103: VERWENDETE SYMBOLIK IN TRAININGSVIDEOS (ANGELEHNT AN BMW 2016).....	127
ABBILDUNG 104: PROZESS ZUR EDITIERUNG EINES MONTAGEVIDEOS, EINGEORDNET IN DEN GESAMTEN VIDEOERSTELLUNGSPROZESS.....	128
ABBILDUNG 105: EINBINDUNG VON ZWEI MONTAGEVIDEOS IN EINE POWERPOINT-PRÄSENTATION	129
ABBILDUNG 106: WORKFLOWERSTELLUNG MIT DEM FRONTLINE CREATOR VON UBIMAX (UBIMAX 2018)	130

ABBILDUNG 107: AUTORENPROZESS DES SPATIAL MEDIA PLAYERS (SMP); IM UNTEREN ABSCHNITT SIND DIE TEILPROZESSE DER WORKFLOW-ERSTELLUNG DARGESTELLT	134
ABBILDUNG 108: VIRTUELLE REGISTRIERUNG MIT DEM SMP: IM EDITORMODUS WERDEN DIE NUMMERIERTEN STECKNADELN (MIT DEM VERLINKTEN CONTENT) AN DEN POIS POSITIONIERT	134
ABBILDUNG 109: TRAININGSMODUS DES SMP: 1. ANZEIGE DER POIS; 2. AUSWAHL EINES POIS VIA BLICKSTEUERUNG (GAZE); 3. GEÖFFNETER POI: VIDEO WIRD SOFORT ABGESPIELT; 4. ÖFFNEN DES BILDES MIT BLICK AUF DAS BILDSYMBOL; 5. ÖFFNEN DER TEXTINFORMATION MIT BLICK AUF I-SYMBOL	135
ABBILDUNG 110: VEREINFACHTER AUTORENPROZESS DURCH EIN WEBBROWSER-BASIERTES AUTORENTOOL: CONTENT WIRD VIA DRAG&DROP VERLINKT; ICONS WERDEN GRÜN BEI VERKNÜPFTEN CONTENT; TEXT WIRD IM AUTORENTOOL EINGEGEBEN	136
ABBILDUNG 111: UX DES TRAINEE MODES: OBEN LINKS: DREI SMARTOBJECTS IN SZENE, OBERHALB DES MOTORS SCHWEBT EIN TEXTINFORMATIONSFELD; UNTEN LINKS: NAVIGATIONSZIELE ZU BAUTEILEN/WERKZEUGEN; RECHTS: HERVORGEHOBENES SMARTOBJECT (PFEIL) MIT VERKNÜPFTEM CONTENT (GEÖFFNETES VIDEO UND ZUSÄTZLICHER TEXTUELLER INFORMATION.	137
ABBILDUNG 112: WORKFLOW-ERSTELLUNG: CONTENT-VERLINKUNG INNERHALB EINES ARBEITSSCHRITTES MIT XML-CODE IN VISUAL STUDIO (SCREENSHOT VISUAL STUDIO).....	138
ABBILDUNG 113: UX DER ENDANWENDUNG FÜR DEN TRAINEE. ABGEBILDET SIND DIE DREI MONTAGESCHRITTE MIT TEXTINFORMATION UND BILDANZEIGE.....	139
ABBILDUNG 114: OBEN: ÜBERGREIFENDE PROZESSKETTE ZUR ERSTELLUNG EINES AR-SZENARIOS MIT CREO ILLUSTRATE UND ANBIETER D STUDIO. UNTEN: DIE EINZELNEN PROZESSSCHRITTE ZUM IMPORT VON CAD-DATEN.....	140
ABBILDUNG 115: WORKFLOW-ORIENTIERTE ZEITMESSUNG ZUR ERSTELLUNG EINES MONTAGETRAININGS MIT DREI MONTAGESCHRITTEN; *ERGEBNISSE VON ANBIETER D UND ANBIETER C TEILWEISE GESCHÄTZT (CAD-IMPORT ZEITEN AUS BENCHMARK-WORKSHOP ÜBERNOMMEN)	146
ABBILDUNG 116:RELATIVER ZEITLICHER ANTEIL ZUR ERSTELLUNG DER EINZELNEN CONTENT-FEATURES; .	146
ABBILDUNG 117: KLICKANZAHL DER 30 PROBANDEN AUF DIE EINZELNEN FEATURES DES UI DER ANWENDUNG BMW AS-IS (WERRLICH ET AL. 2018).....	149
ABBILDUNG 118: ERSTELLUNGS-AUFWAND-NUTZEN-VERHÄLTNIS DER VERSCHIEDENEN QUALIFIZIERUNGSANSÄTZE	152
ABBILDUNG 119: EINORDNUNG DER WICHTIGSTEN PROZESSSCHRITTE ZUR ERSTELLUNG EINES AR-TRAININGS NACH IMPLEMENTIERUNGS-AUFWAND UND ERWARTETEM NUTZEN.....	154

8.3 Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: HAUPTKRITERIEN DES ANFORDERUNGSKATALOGS MIT STICHPUNKTARTIGER ERLÄUTERUNG DER WICHTIGSTEN INHALTE.....	79
TABELLE 2: GEWICHTUNG DER HAUPTKRITERIEN MIT DREI VERSCHIEDENEN GEWICHTUNGSVERFAHREN	117
TABELLE 3: ÜBERSICHT DER VERSCHIEDENEN QUALIFIZIERUNGSVARIANTEN, KLASSIFIZIERT NACH MEDIUM, HARDWARE UND NUTZERANWENDUNG	123
TABELLE 4: VOR-UND NACHTEILE DER VERSCHIEDENEN ENDGERÄTE BEI DER ERSTELLUNG UND DURCHFÜHRUNG VON VIDEO-BASIERTEN TRAININGS	132
TABELLE 5: ÜBERSICHT DER CONTENT-ERSTELLUNGSVARIANTEN: DARSTELLBARER CONTENT UND DIE NOTWENDIGEN ERSTELLUNGSTOOLS, INKLUSIVE DER TOOLANZAHL	141
TABELLE 6: ÜBERSICHT DER CONTENT-ERSTELLUNGSVARIANTEN: AUFWAND DER TRAININGSERSTELLUNG BEI NEUERSTELLUNG, ÄNDERUNG DER WORKFLOWSEQUENZ UND ÄNDERUNG EINES BAUTEILS.....	142
TABELLE 7: ÜBERSICHT DER CONTENT-ERSTELLUNGSVARIANTEN: WIEDERVERWERTBARKEIT VON TRAININGSMATERIAL	143

TABELLE 8: ÜBERSICHT DER CONTENT-ERSTELLUNGSVARIANTEN: AUFLISTUNG ANFALLENDER ERSTELLUNGSKOSTEN	144
TABELLE 9: LITERATURÜBERBLICK ZUR NUTZENBEWERTUNG VON PAPIER-, VIDEO- UND AR-BASIERTE TRAININGS.....	148

8.4 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
ALM	Anlernmappe
AP	Anlaufproduktion
APA	Arbeits- und Prüfanweisung
AR	Augmented Reality
ARTESAS	Advanced Augmented Reality Technologies for Industrial Service Applications
ARVIKA	Augmented Reality in Entwicklung, Produktion und Service
AWP	Anwesenheitsplanung im SAP
BA	Betriebsanweisung
BBG	Baugruppenbestätigung
BI	Bewertungsindex
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge Coupled Device (deutsch: ladungsgekoppeltes Bauteil)
CMS	Content Management System
CPU	Computational Processing Unit
DHP	Dichtheitsprüfung
FDP	Fahrdynamische Prüfung
FIZ	Forschungs- und Innovationszentrum
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphic Processing Unit
HCI	Human Computer Interaction
HD	High Definition
HHD	Hand-held Display
HMD	Head-Mounted Display
HPU	Holographic Processing Unit
IAR	Industrial Augmented Reality
IMU	Inertial Measuring Unit
IoT	Internet of Things
JDA	Joint Development Agreement
KO	Knock-Out
LEMO	Leistungsoptimierung an Montagelinien
MAPP	Multiple Assembly Planning and Process System
MR	Mixed Reality
MTM	Methods-Time Measurement
nHD	Grafische Displayauflösung von 640x360 Pixel (1/9 von Full HD)
POI	Point of Interest
PTAM	Parallel Tracking and Mapping
PVL	Prozessvorläufer
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
SAB	Standardarbeitsblatt
SAP EWM	SAP Extended Warehouse Management
SD	Small Definition
SDK	Software Development Kit
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SOP	Start of Production

TVG	Taktvorgabe/Teilevorgang
UEQ	User Experience Questionnaire
UI	User Interface
USB	Universal Serial Bus
UX	User Experience
VR	Virtual Reality
VS	Vorserienfahrzeug
WPS	Wertschöpfendes Produktionssystem
XML	Extensible Markup Language
ZMD	Zentrale Montagedaten

9 Anhang

Sperrvermerk

Der Anhang dieser Arbeit beinhaltet vertrauliche Informationen, die der Geheimhaltung unterliegen. Aus diesem Grund ist der Anhang gesperrt und darf ohne vorherige schriftliche Zustimmung der BMW Group nicht vervielfältigt oder veröffentlicht werden. Dieser Zustimmungsvorbehalt endet am 12.12.2023.