

Exposé

zum Promotionsvorhaben an der Technischen Universität München

Stand: 26.09.2022

Kompetenzanforderungen der Additiven Fertigung im Bauwesen

Explorativ-empirische Studie innerhalb des DFG-geförderten Vorhabens TRR277

Name des Promovenden:

Tobias Ludwig, M.Ed. (bB)

Promotionsführende Einrichtung:

TUM School of Social Sciences and Technology
Professur für Technikdidaktik

Betreuer:

Prof. Dr. Daniel Pittich

Zweitkorrektor:

N.N.

Mentor:

Prof. Dr. Alfred Riedl

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung Forschungslücke Ausgangssituation	3
2	Forschungsfragen und Zielsetzung	4
3	Theoretischer Bezugsrahmen	5
3.1	Theoretischer Hintergrund	5
3.2	Theorie-integratives Arbeitsmodell	9
3.3	Arbeitsmodell AMC-relevanter Kompetenzen	12
4	Forschungsmethodisches Vorgehen	14
4.1	Studiendesign	14
4.2	Feldzugang	14
4.3	Methodisches Vorgehen	15
5	Zeit- Arbeitsplan	17
6	Literatur	18

1 Einleitung | Forschungslücke | Ausgangssituation

Bereits in den 1980er-Jahren wurde das erste additive Verfahren entwickelt. Davon ausgehend haben sich weitere additive Fertigungstechnologien und -verfahren unter Verwendung unterschiedlicher Materialien ausgeprägt sowie kontinuierlich verbessert, so dass sich heute mit leistungsstarker Hard- und Software der Anspruch an Haltbarkeit, Qualität und Stabilität zunehmend steigert (Zeyn, 2017, S.1). Additive Fertigung (Additive Manufacturing; kurz: AM) zählt mittlerweile in zahlreichen Branchen, wie beispielsweise dem Maschinenbau, der Medizintechnik oder der Luft- und Raumfahrttechnik durchaus zum Stand der Technik (Gebhardt et al., 2019, S. 9ff).

Begriffsklärung und Abgrenzung

In AM – mitunter als 3D-Druck bezeichnet – erfolgt die Herstellung eines Bauteils „allein durch den digital gesteuerten schichtenweisen Werkstoffauftrag, ohne vorangehenden Formenbau oder nachlaufenden [...] Umformprozess“ (Kloft et al., 2021, S.222). In Gegenüberstellung hierzu erfolgt in der subtraktiven (zerspanenden) Fertigung eine vom Ausgangsmaterial abtragende Bearbeitung, wodurch deren Effizienz kohärent zur Menge des Materialabtrags ist (Zeyn, 2017, S.1). Bei additiven Bauteilen wiederum wird Material nur dort aufgetragen, wo es strukturell oder funktionell erforderlich ist. Somit lassen sich frei geformte, individualisierte Bauteile ressourcenoptimiert fertigen (Kloft et al., 2019, S.929f). Beide Verfahren verbindet die Verwendung zuvor generierter CAD-Modelle.

Additive Fertigung im Bauwesen (AMC)

Auch für eine der bislang am wenigsten digitalisierten Branche, dem Bauwesen, sind bereits in unterschiedlichen (internationalen) Projekten die Potentiale und vor allem die Machbarkeit eines konsequenten Ausbaus der additiven Fertigung nachgewiesen (SFB Transregio TRR277). Zentraler Vorteil dieser Fertigungstechnologie für das Bauwesen ist, dass Automatisierung und Individualisierung nicht im Widerspruch zueinanderstehen und Bauwerke von hoher Gestaltungsfreiheit (äußere Formgebung) sowie Ressourceneffizienz (inneren Strukturaufbau) erstellt werden können (Kloft et al., 2019, S.222f; Kloft et al., 2021, S.929f). Damit kann AMC als ein Meilenstein in der Weiterentwicklung der überwiegend tradierten Bauprozesse, wie bspw. dem Schalungsbau angesehen werden (Kloft et al., 2021, S.929f).

Kompetenzen im technisch-produktiven Wandel

In der Vergangenheit haben technologische Entwicklung und Innovationen mehrfach zu Veränderungen der Wirtschaftssektoren geführt. Ähnliches lässt sich für den aktuellen technisch-produktiven Wandel und den damit einhergehenden Kompetenzen und Kompetenzgefügen der involvierten Menschen feststellen. Beispielsweise haben die Anforderungen sowie Komplexität an Facharbeiter:innen von vorwiegend operativen Tätigkeiten hin zu prozessbezogenen Problemlösungen stark zugenommen (Kurz, 2002, S.601ff; Pittich et al., 2017, S.167ff). Auch aus

prognostischen Befunden im Kontext beruflicher Facharbeit lassen sich Veränderungen wie eine zunehmende Prozessorientierung durch die voranschreitende Digitalisierung ableiten (Pittich et al., 2017, S.167ff). Diesbezügliche Veränderung gehen u.a. mit Tätigkeiten komplexer Analysen sowie Fehler- und Schwachstellenbeseitigung einher, da nur so die operative Handlungsfähigkeit in automatisierten und individualisierten Prozessen sichergestellt werden kann (Zinke et al., 2014, S.4). Hierfür sind umfangreiche Kompetenzen sowie fachliches Verständnis der vielschichtigen prozessbezogenen Zusammenhänge notwendig.

Kompetenzen im Kontext von AMC als Forschungsdesiderat

Aktuell werden die AMC-technologischen Entwicklungen und Innovationen sowie die damit verbundenen planungs- und produktionsbezogenen Veränderungen weitestgehend getrennt von den diesbezüglichen Handhabungs- bzw. Problemlöseanforderungen bzw. Kompetenzbedarfen der involvierten Fachexpert:innen bearbeitet. Dies stellt ein Forschungsdesiderat dar, welchem sich über das angestrebte Promotionsvorhaben angenommen wird. Um zukünftig die innovativen Produkte und Verfahren sowie die Potentiale von AMC im Rahmen der gesamten Wertschöpfungskette vollumfänglich ausschöpfen zu können, müssen hierfür in unmittelbarer Anbindung an deren Entwicklungen die diesbezüglichen Kompetenzanforderungen erforscht werden. Die fundierte Erschließung technischer Kompetenzen bzw. der erkennbaren Kompetenzbedarfe ist dabei eine Zukunftsaufgabe (technikdidaktischer) Forschung, da diese die Grundlage für die Entwicklung zukünftiger Curricula, Bildungsgänge und Lernumgebungen bilden. Daraus ergeben sich die nachfolgenden Fragestellungen.

2 Forschungsfragen und Zielsetzung

Im Kern des Vorhabens stehen drei zentral leitende Forschungsfragen:

1. Wie stellen sich die aktuellen Handhabungs-, Problemlöseprozesse im Kontext von AMC dar?
2. Wie stellt sich die Informationsgenerierung und -nutzbarmachung zur Sicherung einer operativen Handlungsfähigkeit in AMC-Umgebungen dar?
3. Wie stellen sich die Tätigkeits- und Kompetenzprofile von Menschen in exemplarischen AMC-Umgebungen dar?

Dabei greift 1) die Tätigkeiten sowie Tätigkeitsanforderungen involvierter Fachexpert:innen auf, wovon ausgehend 2) die operative Sicherung des AMC-Prozesses adressiert, um daraus letztendlich 3) die notwendigen Kompetenzbedarfe in AMC zu analysieren und generieren. Ziel ist es, entlang der aktuell entwickelten AMC-Technologien und -Verfahren, die damit einhergehenden Kompetenzanforderungen zu erschließen.

3 Theoretischer Bezugsrahmen

Die Umsetzung benötigt adäquate Transformationen zu einem integrativen Ansatz, welcher relevante Aspekte aus der Theorie (Abschnitt 3.1) aufgreift und in einen theorie-integratives Arbeitsmodell (Abschnitt 3.2) überführt. Dieses soll zum einen die neuartigen AMC-Prozesse in Ihrer Komplexität und Zusammenhänge explorieren und zum anderen über ein anschlussfähiges Arbeitsmodell die Diagnose und Explikation AMC-relevanter Kompetenzen (Abschnitt 3.3) ermöglichen.

3.1 Theoretischer Hintergrund

Die Bezugstheorien adressieren dabei ein 1) theorie-gestütztes sowie empirisch-fundiertes Konzept zu Kompetenzen und deren Diagnostik 2) den MTO-Ansatz aus der Arbeits- und Organisationspsychologie, 3) die Strukturierung des Additiven Fertigungsprozesses aus der Qualitätssicherung sowie 4) eine Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse.

1) Der Ansatz der Technikdidaktik stellt ein wissenschaftlich haltbares und zugleich handhabbares Kompetenzkonzept¹ dar (Tenberg et al., 2019, S.7). Als basistheoretische Rahmung liegt hier das Kompetenzverständnis nach Erpenbeck und Rosenstiel als „Dispositionen selbstständigen Handelns“ zu Grunde (Tenberg et al., 2019, S.94). Davon ausgehend werden u.a. Kompetenzklassen über fachlich-methodische (FMK), sozial-kommunikative (SKK) sowie personale Kompetenzen (PK) unterschieden. Erstere stehen dabei im technikdidaktischen Fokus und werden von der Beziehung beruflich-technischen Handelns und dem dabei umgesetzten Wissen² bestimmt (Tenberg et al., 2019, S.100). FMK beschreiben die „Dispositionen einer Person, bei der Lösung von sachlich-gegenständlichen Problemen geistig und physisch selbstorganisiert zu handeln, d.h. mit fachlichen und instrumentellen Kenntnissen, Fertigkeiten und Fähigkeiten kreativ Probleme zu lösen, Wissen sinnorientiert einzuordnen und zu bewerten; das schließt Dispositionen ein, Tätigkeiten, Aufgaben und Lösungen methodisch selbstorganisiert zu gestalten, sowie die Methoden selbst kreativ weiterzuentwickeln“ (Tenberg et al., 2019, S.97). Fachlich und methodische Kenntnisse stehen demnach im Zentrum des selbstgesteuerten Problemlösens (Tenberg et al., 2019, S.98). Aus diagnostischer Sicht bieten diese Problemlöseprozesse in Verbindung mit dem Rekonstruktionsansatz die Möglichkeit handlungsdeterminierende Dispositionen (Wissen) zu erheben (Pittich D., 2013, S.84). Entlang

¹ In Tenberg, R. (2011). Vermittlung fachlicher und überfachlicher Kompetenzen in technischen Berufen: Theorie und Praxis der Technikdidaktik. Stuttgart: Steiner.

² Die Explikation der FMK erfolgt anhand einer Curricularen Matrix über berufliche Handlungen – Performanz – und dem damit korrespondierenden Wissen – Sach-, Prozess-, Reflexionswissen – (Tenberg et al., 2020, S.50)

der Explikation beruflicher Arbeitstätigkeiten anhand eines Arbeitsablaufplans³ geht dieser retrospektive, kompetenztheoretische Diagnoseansatz von einer Rekonstruktion an Schadensbildern entlang der Analyseschritte Ursachen, Behebung und Vermeidung aus (Pittich D., 2013, S.84; S.92; S.151). Dadurch wird ein qualitativ hohes, rezipierendes Abbild dieser komplexen Verständnisse erzeugt und repräsentiert somit eine Methode der handlungsbezogenen Wissensdiagnostik (Pittich D., 2013, S.84f). Der Rekonstruktionsansatz greift hierbei ebenfalls auf das Kompetenzverständnis nach Erpenbeck und Rosenstiel zurück.

2) Der MTO-Ansatz (Mensch, Technik und Organisation) untersucht gegenseitige Abhängigkeiten sowie deren Zusammenwirken als ganzheitliche Analyse für Unternehmen (Ulich, 2011, S.86). Dabei sind einerseits neue Vorgehensweisen auf Basis des soziotechnischen Systemansatzes und der Handlungsregulationstheorie entwickelt sowie andererseits bereits bestehende Verfahren, wie z.B. VERA, RHIA und KABA integriert worden (Ulich, 2011, S.86). Die konkrete Analyse erfolgt sukzessiv auf den vier Ebenen Unternehmen, Organisationseinheit, Gruppe und Individuum über insgesamt sieben Analyseelemente mit definierten Aspekten und Erhebungs- bzw. Bewertungsinstrumenten (Abbildung 1).

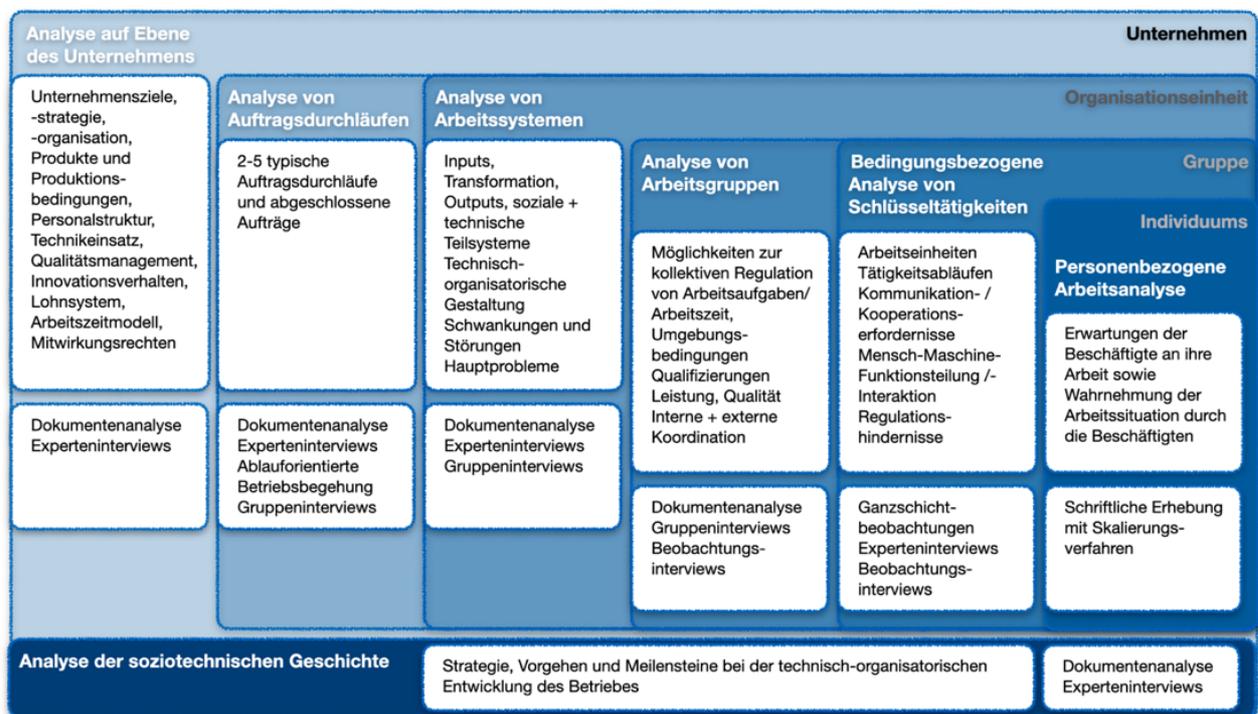


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Ebenen und Analyseelemente mit definierten Aspekten und Erhebungs- bzw. Bewertungsinstrumenten des MTO-Konzepts (vgl. Ulich, 2011, S.88)

³ Der Arbeitsablaufplan enthält die Kategorien: Arbeitsschritt; Hilfsmittel, Werkzeug, etc.; Anmerkung (Pittich D., 2013, S. 92)

Das Konzept orientiert sich zunächst am betrieblichen Umfeld, der Unternehmensstruktur sowie dessen Zielen als auch Strategie und ist somit zentrale Voraussetzung für die weiteren Analysen. Davon ausgehend werden Organisationseinheiten u.a. nach Formen der funktionalen Trennung gegliedert und hierzu prozessorientierte Auftragsdurchlauf- und strukturbezogene Arbeitssystemanalysen⁴ durchgeführt. Mit der Analyse der Gruppenarbeit werden zugleich die Schlüsseltätigkeiten ermittelt und diese über subjektive Wahrnehmungen des Individuums ergänzt (Ulich, 2011, S.87). Ferner werden die Meilensteine, das Vorgehen als auch die bisherige Strategie als Analyse der soziotechnologischen Geschichte herangezogen.

3) Da in anderen Branchen die eingesetzten AM-Technologien und -Verfahren mittlerweile durchaus Stand der Technik sind, gibt es hierzu aus Sicht der Qualitätssicherung bereits entsprechende grundlegende Normungen. Insbesondere über DIN SPEC 17071:2019-12 sind die Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse für additive Fertigungszentren festgelegt. Die Prozesskette gliedert sich demnach in Pre-processing, In-processing und Post-processing mit jeweils entsprechend relevanten Bereichen (Abbildung 2).

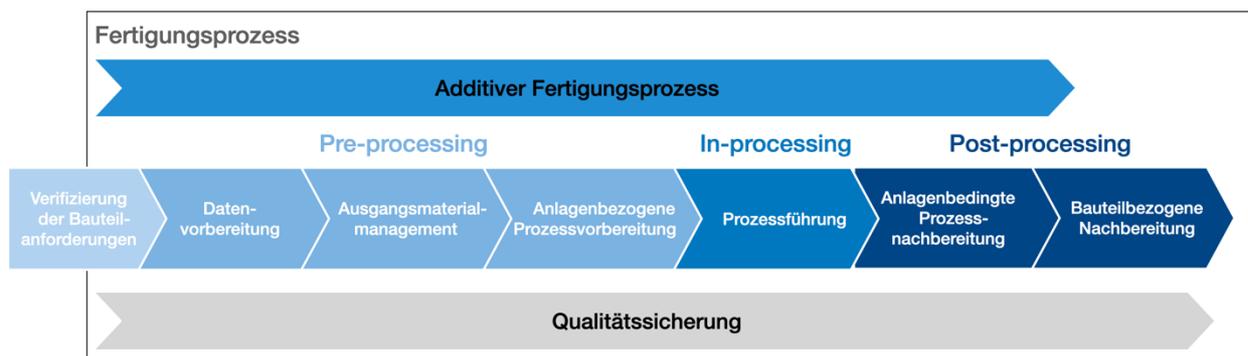


Abbildung 2: Qualitätsgesicherten Fertigungsprozesses mit relevanten Bereichen der Prozesskette (DIN SPEC 17071:2019-12; vgl. Bild 1 S. 7)

Die relevanten Bereiche der Prozesskette werden dabei definiert als:

- „Datenvorbereitung: Digitale Abläufe, die vor der additiven Fertigung stattfinden;
- Ausgangsmaterialmanagement: Materialflüsse, die vor der additiven Fertigung stattfinden;

⁴ Weiterführende Recherchen haben ergeben, dass das Arbeitssystem des MTO-Konzepts eine inhaltliche Kohärenz mit DIN EN ISO 6385 „Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen“ aufzeigt. Dieses wird darin definiert als „System, welches das Zusammenwirken eines einzelnen oder mehrerer Arbeitender/Benutzer mit den Arbeitsmitteln umfasst, um die Funktion des Systems innerhalb des Arbeitsraumes und der Arbeitsumgebung unter den durch die Arbeitsaufgaben vorgegebenen Bedingungen zu erfüllen“ (DIN EN ISO 6385:2004, S.8). Auch der Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (kurz: REFA) greift auf das Arbeitssystem dieser DIN zurück und beschreibt dies als Kernbaustein der Arbeitsorganisation über die sieben Systemelemente Mensch, Arbeits-/Betriebsmittel, Arbeitsaufgabe, Arbeitsablauf, Input, Output und Umgebungseinflüsse (refa-consulting.de/refa-lexikon).

- Anlagenbezogene Prozessvorbereitung: Manuelle Aktivitäten, die im unmittelbaren Umfeld der Fertigungsanlage erfolgen und der Initiierung der Prozessführung dienen;
- Prozessführung: Maschinelles Ablauf, bei dem Bauteile additiv erzeugt werden;
- Anlagenbedingte Prozessnachbereitung: Aktivitäten, die im Umfeld der Fertigungsanlage erfolgen und nachgelagert zur Prozessführung durchgeführt werden;
- Bauteilbezogene Nachbereitung: Aktivitäten, die bauteilbezogen nach der Prozessführung außerhalb des unmittelbaren Umfelds der additiven Fertigungsanlage erfolgen [...]"

(DIN SPEC 17071:2019-12, S.6f). Diese sechs Bereiche werden in der Norm über jeweilige Elemente sowie Schritten spezifiziert, jedoch zum Teil mit dem Vermerk „je nach Verfahren zutreffend“ bzw. „je nach Materialform zutreffend“ (vgl. DIN SPEC 17071:2019-12, S.7; S.9; S.12).

4) Die Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse (Failure Mode and Effects Analysis; kurz: FMEA) ist eine Methode zur Vermeidung von Produkt- und Prozessfehlern für Unternehmen und ist in der präventiven Qualitätssicherung verortet (Werdich, 2012, S.1). Die FMEA unterstützt dabei das systematische Dokumentieren von Fehlerzusammenhängen und Qualitätseinflüssen sowie das Bemühen um Fehlervermeidung. Diese technische Risikoanalyse ist u.a. im Qualitätsmanagementprozess der Automobilindustrie eingebunden. Der europäische Verbund der Deutschen Automobilindustrie (VDA) und die nordamerikanische Automobilindustrie (AIAG) haben diesen Ansatz im Jahr 2019 einheitlich strukturiert und die Vorgehensweise zur Design-FMEA und Prozess-FMEA über sieben Schritte charakterisiert bzw. konkretisiert (Abbildung 3).

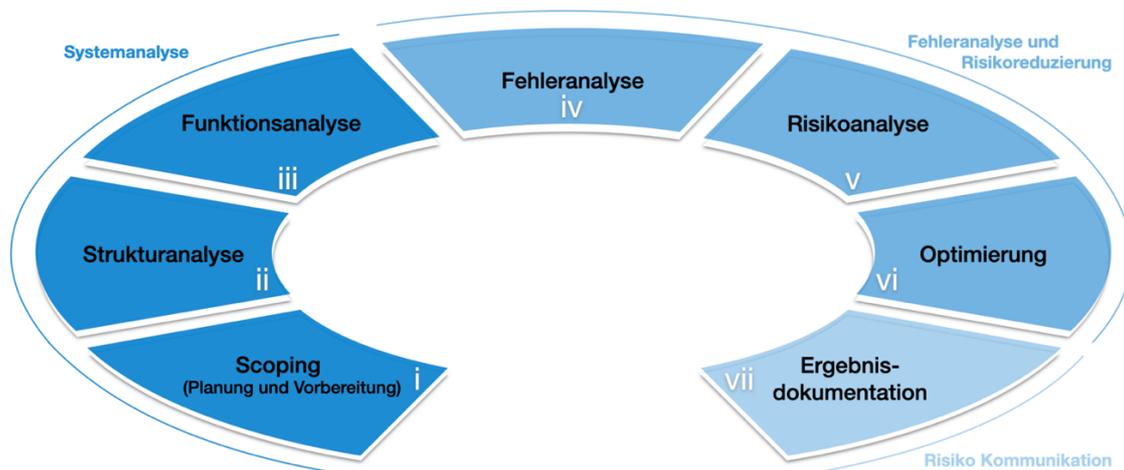


Abbildung 3: Sieben-Schritt-Ansatz zur FMEA (nach AIAG&VDA 2019)

Nachdem die i) Planung durchgeführt und der Betrachtungsumfang definiert ist, werden in der ii) Strukturanalyse alle Systemelemente erfasst sowie eine Systemstruktur erstellt. Davon ausgehend werden die iii) Funktionen jedes Systemelements festgelegt und deren Anforderungen ausdifferenziert. Über die iv) Fehleranalyse werden alle potentiellen Fehler erhoben und auf deren Ursache sowie Folge untersucht. Ausgehend davon dokumentiert die v)

Risikoanalyse aktuelle Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen als Ist-Zustand, welche Gesamt über die Risikoprioritätszahl (RPZ) bewertet werden. Der Soll-Zustand wird über die vi) Optimierung definiert und zugleich entsprechende (Optimierungs-)Maßnahmen festgelegt. In der vii) Ergebnisdokumentation werden u.a. die Wirksamkeit der getroffenen Maßnahmen sowie alle weiter Ergebnisse festgehalten und diskutiert.

3.2 Theorie-integratives Arbeitsmodell

Mit dem Ziel die Kompetenzanforderungen in AMC-Umgebungen zu erschließen, sind sukzessiv adäquate Transformationsschritte aus den Bezugstheorien (Abschnitt 3.1) in einen theorie-integratives Arbeitsmodell (Abbildung 4) notwendig, welches die Komplexität und Zusammenhänge eines AMC-Verfahrens exploriert. Dabei werden insbesondere die ersten beiden Ebenen mit den drei Analyseelementen des MTO-Konzeptes, der Arbeitsablaufplan aus dem Rekonstruktionsansatz, die Prozesskette des qualitätsgesicherten Additiven Fertigungsprozesses und alle Schritte der FMEA herangezogen.

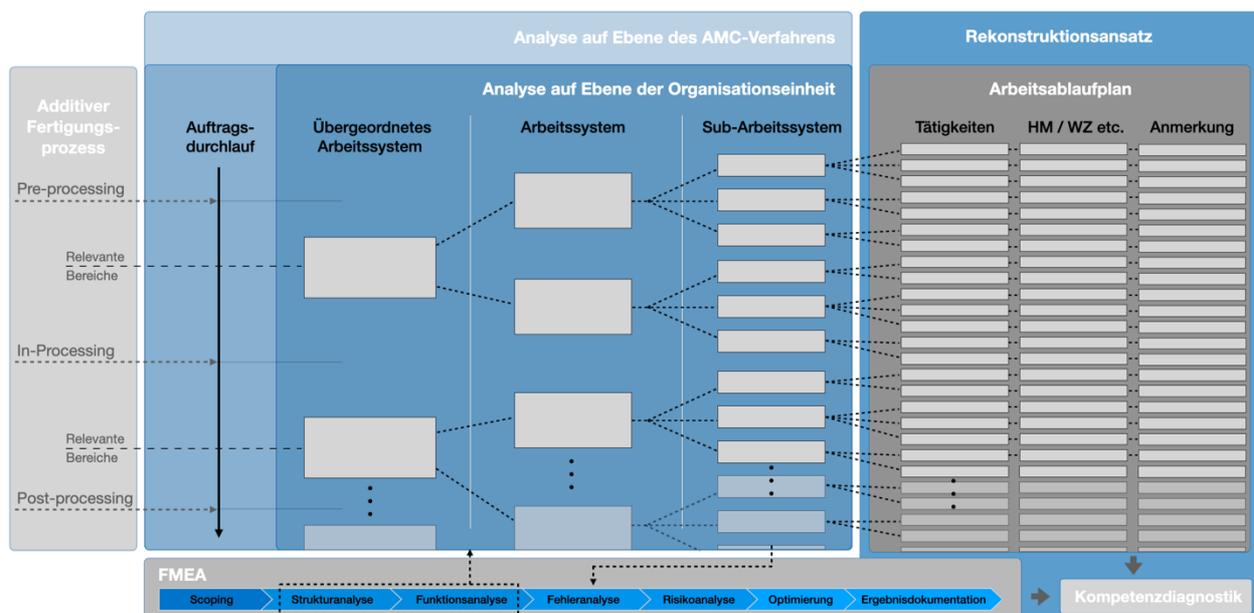


Abbildung 4: theorie-integratives Arbeitsmodell zur Analyse eines AMC-Verfahrens als konzeptionelle Integration der Bezugstheorien

Transformationsschritt 1:

Um wie im MTO-Konzept die zentralen Voraussetzungen für die weiteren Analysen festzulegen, wird die erste Ebene des Unternehmens auf ein spezifisches AM-Verfahren angewendet. Dabei werden insbesondere die Aspekte: Ziele, Strategie, Organisation, Bauteile, Produktionsbedingungen, Personalstruktur, Technikeinsatz und Arbeitszeitmodell erfasst und dokumentiert.

Transformationsschritt 2:

Auch die Ebene der Organisationseinheit des MTO-Konzeptes mit dem Analyseelement des Auftragsdurchlaufs ist für die Transformation relevant. Dabei wird der Auftragsdurchlauf des AM-Verfahrens über die Prozesskette und deren relevanter Bereiche aus DIN SPEC 17071:2019-12 deduktiv vorstrukturiert. Einerseits ist dies hilfreich, da hierüber Ankerpunkte aus bereits qualitätsgesicherten Prozessen für neu entwickelte Verfahren und deren spezifischen Abläufe gesetzt werden und hierüber eine Einordnung bzw. Zuordnung der Tätigkeiten erleichtert wird, andererseits stellt diese einheitliche Struktur eine Vergleichbarkeit der zu untersuchenden AMC-Verfahren her und bildet sozusagen ein Grundraster definierter Querlinien zu allen spezifischen Prozessen bzw. Durchläufen.

Transformationsschritt 3:

Da die AMC-technologischen Entwicklungen und Innovationen mit planungs- und produktionsbezogenen Veränderungen einhergehen, müssen im Weiteren alle aktuellen Tätigkeiten induktiv erschlossen werden. Hierfür stellt der Arbeitsablaufplan aus dem Rekonstruktionsansatz ein geeignetes, validiertes Instrument zur Explikation der Arbeitsschritte dar. Diese Arbeitstätigkeiten mit den dokumentierten Arbeits- und Betriebsmitteln (Hilfsmittel und Werkzeuge) sowie Anmerkungen können über die enthaltenen kognitiven Aspekte ergänzend für die Kompetenzanalyse bzw. -diagnostik herangezogen werden. Damit die Generierung von Tätigkeiten einheitlich erfolgt, bedingt es einer definitorischen Setzung. Demnach gilt als Arbeitsschritt ein Verb (nach Duden auch: „Tätigkeitswort“) in Verbindung mit einem Substantiv. Erstes beschreibt dabei die Art der Tätigkeit, zweites den Umfang. Das Substantiv ist in diesem Zusammenhang so zu wählen, dass es den kleinstmöglichen physischen Mehrwert im Prozess beschreibt. Ein Beispiel hierfür ist, dass die Tätigkeit „Ausgangsmaterialien wiegen“ im Grunde genommen die gleiche Tätigkeit wie „Quarzsand wiegen“ ist, der Umfang des Arbeitsschrittes sich jedoch enorm unterscheidet.

Transformationsschritt 4:

Eine entscheidende konzeptionelle Integration und sozusagen das Bindeglied aller verwendeten Konzepte und Ansätze sind die Arbeitssysteme. Das Arbeitssystem nach MTO, DIN EN ISO 6385 sowie REFA weisen eine inhaltlich-theoretische Kohärenz auf und werden daher komplementär definiert als *System, welches das Zusammenwirken des Menschen mit einem Arbeits-/Betriebsmittel als Transformationsprozess vom Input zum Output beschreibt, um die Funktion des Systems zu erfüllen. Es charakterisiert sich über einen Arbeitsauftrag mit einem Arbeitsablauf, welcher unter bestimmten Umgebungsbedingungen ausgeführt wird* (Abbildung 5).

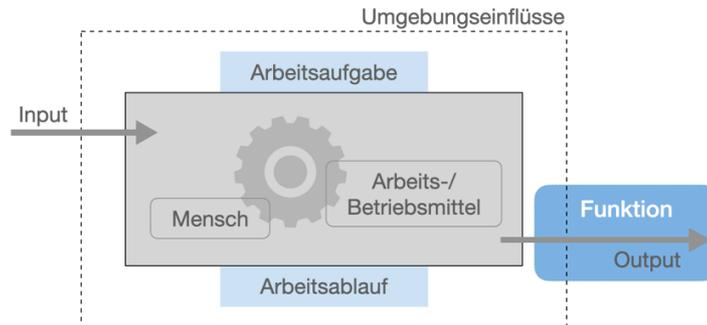


Abbildung 5: Arbeitssystem

Die kleinschrittig explizierten Arbeitstätigkeiten aus dem Arbeitsablaufplan stellen in diesem Zusammenhang den Arbeitsablauf als Transformationsprozess vom Input zum Output dar. Demnach wird über den Output – des nächstgrößeren physischen Mehrwerts im Prozess – das Sub-Arbeitssystem generiert. Diese Sub-Arbeitssysteme stellen wiederum den Arbeitsablauf der nächsten Ebene, der Arbeitssysteme, dar und werden ebenfalls über den nächst größeren Output festgelegt. Hierbei gilt, dass diese material-, bauteil- oder anlagenbezogene Outputs sind. Ausgehend von deren Ablauf resultieren übergeordnete Arbeitssysteme. Diese greifen zum einen die relevanten Bereiche des qualitätsgesicherten Prozesses sowie zum anderen die funktional gegliederten Organisationseinheiten des MTO-Ansatzes auf. Demnach erfolgt hier die Einordnung bzw. Zuordnung der Arbeitssysteme zu den übergeordneten Arbeitssystemen und sind dabei die deduktiv-induktive Schnittstelle. Die Benennung der Sub- und Arbeitssysteme erfolgt über ein Substantiv, welches durch den entsprechenden Output bestimmt ist, in Verbindung mit einem aussagekräftigen Verb. Jedes hierüber erstellte Systemelement hat innerhalb des Gesamt- bzw. Teilprozesses eine Funktion zu erfüllen. Diese Funktionen stellen definierte Anforderung an den Output dar und werden zu jedem Systemelement angegeben. Dabei lässt sich eine erste Reflexion der Sub- bzw. Arbeitssysteme feststellen, denn wenn keine Anforderungen expliziert werden können, ist der Output unzureichend.

Transformationsschritt 5:

Die Generierung von Arbeitssystemen unterschiedlicher Tiefe führt zugleich zur Systemstruktur (Schritt 2) mit Systemelementen und sozusagen zur Adaption des standardisierten Verfahrens zur FMEA. Die Funktionsanalyse (Schritt 3) der FMEA ist größtenteils bei der Erstellung der Arbeitssystemfunktionen erfolgt und kann darauf aufbauend fortgeführt werden. Die vorlaufende Planung (Schritt 1) der FMEA wird im methodischen Vorgehen verankert, wobei die allgemeine Betrachtungstiefe der Fehlerart auf die Arbeitssysteme festgelegt ist. Auf allen Systemebenen werden die Gesamten potentiellen Fehler, deren Ursache sowie Folge respektive erschlossen und vernetzt. Die Optimierung legt dabei ergänzend hierzu die Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen fest. Im Hinblick auf die Problemlöseprozesse bietet die FMEA insbesondere über die Schritte iv) - vi) die Anschlussfähigkeit zum Rekonstruktionsansatz und somit die Anschlussfähigkeit zur Diagnostik handlungsdeterminierter Dispositionen (Wissen).

3.3 Arbeitsmodell AMC-relevanter Kompetenzen

Ausgehend vom theorie-integrativen Arbeitsmodell zur Analyse des AMC-Verfahrens und dessen Anschlussfähigkeit werden über ein weiteres Arbeitsmodell AMC-relevanten Kompetenzen (Abbildung 5) diagnostiziert und expliziert. Dabei gleicht dieses einem Analyseraster entlang der im Rekonstruktionsansatz umgesetzten Diagnostik. Die Explikation AMC-relevanten Kompetenz erfolgt über das Instrument einer Curricularen Matrix, in welcher einer beruflichen Handlung das korrespondierende Wissen zugeordnet wird.

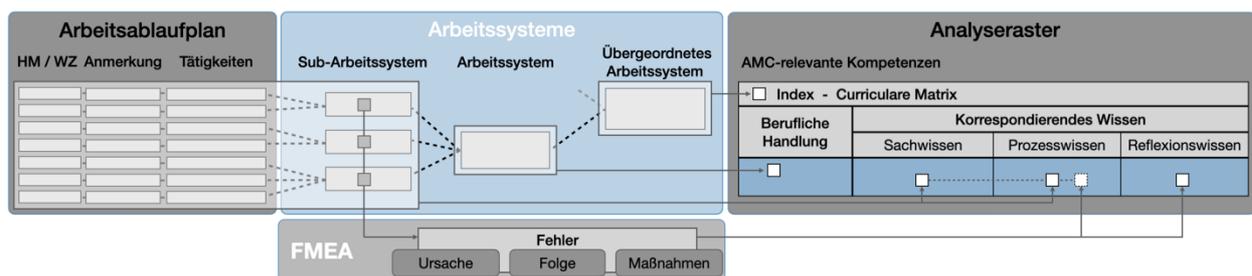


Abbildung 5: Arbeitsmodell AMC-relevanter Kompetenzen in Anlehnung an den Rekonstruktionsansatz

Die Curriculare Matrix wird auf Ebene der übergeordneten Arbeitssysteme, d.h. zu jedem relevanten Bereichen aus der DIN SPEC 17071:2019-12 erstellt. Die beruflichen Handlungen (Performanz) spiegeln sich in den Arbeitssystemen als Aggregat der Sub-Arbeitssysteme und den darin enthaltenen Tätigkeitsabfolgen wider. Aus wissensdiagnostischer Perspektive greift der Rekonstruktionsansatz handlungsdeterminierende Dispositionen in Folge von drei Wissensarten⁵ 1) Sach-, 2) Prozess- sowie 3) Reflexionswissen auf. Diese werden entlang derer definitorischen Setzung als

1) Sachwissen ist „ein anwendungs- und umsetzungsunabhängiges Wissen über Dinge, Gegenstände, Geräte, Abläufe, Systeme etc. Es ist Teil fachlicher Systematiken und daher sachlogisch- hierarchisch strukturiert und ist die gegenständliche Voraussetzung für ein eigenständiges, selbstreguliertes Handeln (Tenberg et al. 2019, S.107).“

2) Prozesswissen ist „ein anwendungs- und umsetzungsabhängiges Wissen über berufliche Handlungssequenzen. [...] Prozesswissen ist immer Teil handlungsbezogener Systematiken und daher prozesslogisch-multizyklisch strukturiert, wird durch zielgerichtetes und feedbackgesteuertes Tun erworben und ist damit eine funktionale Voraussetzung für ein eigenständiges, selbstreguliertes Handeln (Tenberg et al. 2019, S.107f).“

3) Reflexionswissen ist „ein anwendungs- und umsetzungsunabhängiges Wissen, welches hinter dem zugeordneten Sach- und Prozesswissen steht. Als Reflexionswissen bildet es die

⁵ Das Reflexionswissen wird im Rekonstruktionsansatz als „Konzeptuelles Wissen“ beschrieben und entspricht weiterhin gleicher Definition.

theoretische Basis für das vorgeordnete Sach- und Prozesswissen und steht damit diesen gegenüber auf eine Metaebene (Tenberg et al. 2019, S.108).“

analysiert und generiert. Zur Identifizierung werden das Formblatt des Arbeitsablaufplans herangezogen, welches zudem die „Verwendung der einschlägigen Fachsprache herbei[ge]führt (Pittich 2013, S.92).“ Aufgrund der spezifischen Tätigkeitsausrichtung im Arbeitsablaufplan können hierüber nur Sach- und Prozesswissen abgegriffen bzw. analysiert werden (Pittich, 2013, S. 70). Die Sub-Arbeitssysteme geben dabei insbesondere Aufschluss über das prozesslogisch-multizyklisch strukturierte Prozesswissen. Der Rekonstruktionsansatz geht weiter von der analytischen Handlungsrekonstruktion entlang der Schritte „Ursachen“, „Behebung“ und „Vermeidung“ aus, wodurch möglichst tiefe, verständnisorientierte Begründungszusammenhänge erhoben werden (Pittich, 2013. S.90f). Diese Aspekte werden in der FMEA über alle potentiellen Fehler, deren jeweilige Ursache, Folge, Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen sowie den getroffenen Maßnahmen zur Fehlerbehebung umfangreich erschlossen. Dies stellt eine wissensfokussierte Reflektion beruflicher Handlungen mit deren ursächlichen komplexen Zusammenhänge dar (Pittich, 2013; S.85, S.91) und führt über die Analyse nach definitorischer Setzung zu Ergänzungen des Prozesswissens sowie dem Reflexionswissen.

4 Forschungsmethodisches Vorgehen

Für die Beantwortung der Forschungsfragen und der Umsetzung der Arbeitsmodelle gilt es, ein geeignetes Studiendesign (Abschnitt 4.1) sowie den Feldzugang in AMC-Umgebungen (Abschnitt 4.2) festzulegen. Für die Durchführung ist ein entsprechendes methodisches Vorgehen (Abschnitt 4.3) zu konzipieren und pilotieren.

4.1 Studiendesign

Da sich die spezifischen AMC-Verfahren mit neuen Technologien für das Bauwesen noch in Entwicklung befinden, liegen bislang kaum tragfähige Grundlagenbefunde vor. Wenngleich in Kontext von AM aus arbeitspsychologischer und produktionstechnischer Richtung inzwischen einzelne empirische Zugänge vorgenommen wurden, können hier nur spezifische Befunde weiterführen, die in der Baudomäne und deren Gegebenheiten und Technologien verankert sind und die hier vorliegenden interdependenten Zusammenhänge in ihrer Komplexität explorieren. Die Untersuchungsmethodik ist daher aufgrund des schmalen Forschungsstandes im Thema Kompetenzbedarfe der Additiven Fertigung (im Bauwesen) und der damit einhergehenden Grundlagenorientierung explorativ-empirisch ausgerichtet.

4.2 Feldzugang

Ausgangspunkt für den empirischen Zugang stellt dabei das DFG-geförderte Projekt TRR 277 der TU Braunschweig und TU München dar. Segmentiert in drei Focus Areas: A „Materials an Processes“, B „Computational Modeling and Process Control“ und C „Design and Construction“ wird hier die gesamte AMC-Prozesskette bearbeitet. Der Fokus dieser Studie liegt im Schwerpunktbereich A, welcher über insgesamt acht Teilprojekte entlang der Werkstoffbereiche Massivbau A01-A04, mit Faserbewehrung A05, Stahlbau A06 und A07 sowie Holzbau A08 über vier unterschiedliche Druck-Verfahren entwickelt (Abbildung 6).

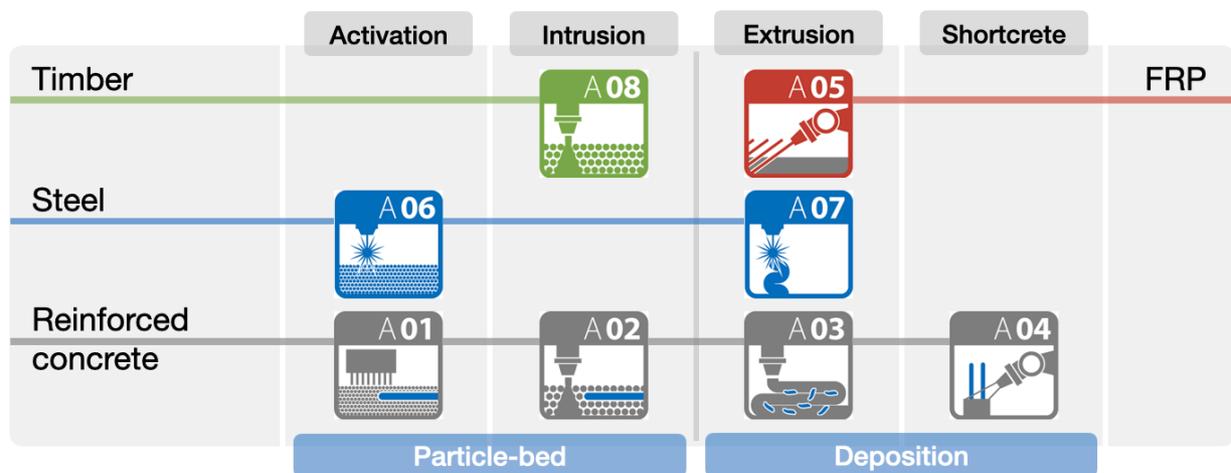


Abbildung 6: TRR277 – Teilprojekte der Focus Area A mit AMC-Verfahren, Technologie und Material (– englisch)

Verortung und Fokussierung der jeweiligen Teilprojekte des Schwerpunktbereiches A⁶:

A01 ist im Partikelbett-3D-Druck verortet und erforscht die selektive Zementaktivierung (SCA). Dabei werden insbesondere die Funktionalisierung der Partikeloberfläche, Partikelbettverdichtung und Verstärkungsimplementierung fokussiert.

A02 ist ebenfalls im Partikelbett-3D-Druck zuzuordnen und erforscht diesbezüglich die selektive Zementleim-Intrusion (SPI). Entscheidend sind hierbei die Partikelsynthese und Integration der WAAM-Verstärkung sowie die Funktionalisierung der Partikeloberfläche.

A03 untersucht die Extrusion von düsenah gemischtem Beton im Depositions-3D-Druck. Dabei werden u.a. den Herausforderungen der individuellen Abstufung in der Dichte und in der Rate der 3D-Faserbewehrung begegnet.

A04 entwickelt integrierte additive Fertigungsverfahren für bewehrte Spritzbeton-3D-Druckelemente (SC3DP). Das Teilprojekt ist ebenfalls im Depositions-3D-Druck verortet und fokussiert darüber hinaus eine präzise Oberflächenqualität.

[A05 erforscht grundsätzlich kein additives Fertigungsverfahren, ist jedoch Verfahren bei der Extrusion zugeteilt und entwickelt hierüber die Integration von individualisierter, vorgefertigter Faserbewehrung für die additive Fertigung mit Beton.]

A06 erforscht die Grundlagen der Konstruktion und der mechanischen Belastbarkeit von AM-Stahlelementen für das Bauwesen. Dabei wird das Verfahren des Laser Powder-Bed Fusion (LPBF) verwendet.

A07 ist ebenfalls im Werkstoffbereich Stahl zugeordnet und untersucht über additive Draht- und Lichtbogenfertigung (kurz: WAAM; Wire and Arc Additive Manufacturing) die Herstellung von komplexen individualisierten Stahlkomponenten.

A08 entwickelt über die Intrusion von Leim im Partikelbett-3D-Druck Konstruktionsholz in Einzelschichtbauweise (ILF).

4.3 Methodisches Vorgehen

Im Feldzugang wird ein Erhebungs-Analysezyklus sukzessiv mit der Beantwortung der Fragestellungen verbunden. Dieser Zyklus wird von der Analyse des theorie-integrativen Arbeitsmodells hergeleitet und ist in insgesamt vier Phasen gegliedert. Neben der Planung und Vorbereitung in Phase 0 werden dabei die neuen Verfahren und deren Prozesse insbesondere in den drei zentralen Phase I-III detailliert sowie strukturiert in ihrer Komplexität erschlossen. Um in der Erhebungs-Analyse-Schleife Verifizierungen als auch ggf. Vertiefungen zu erreichen werden die Phasen individuell durch Interviews und Besprechungen begleitet. Mit der

⁶ Eine detaillierte Beschreibung der jeweiligen Teilprojekte befindet sich auf der Projekt-Homepage (<https://www.tu-braunschweig.de/trr277/projects/amc-structure/a-projects>)

anschließenden Phase IV werden die Daten entlang des Arbeitsmodells AMC-relevanten Kompetenzen analysiert bzw. generiert (Abbildung 7).

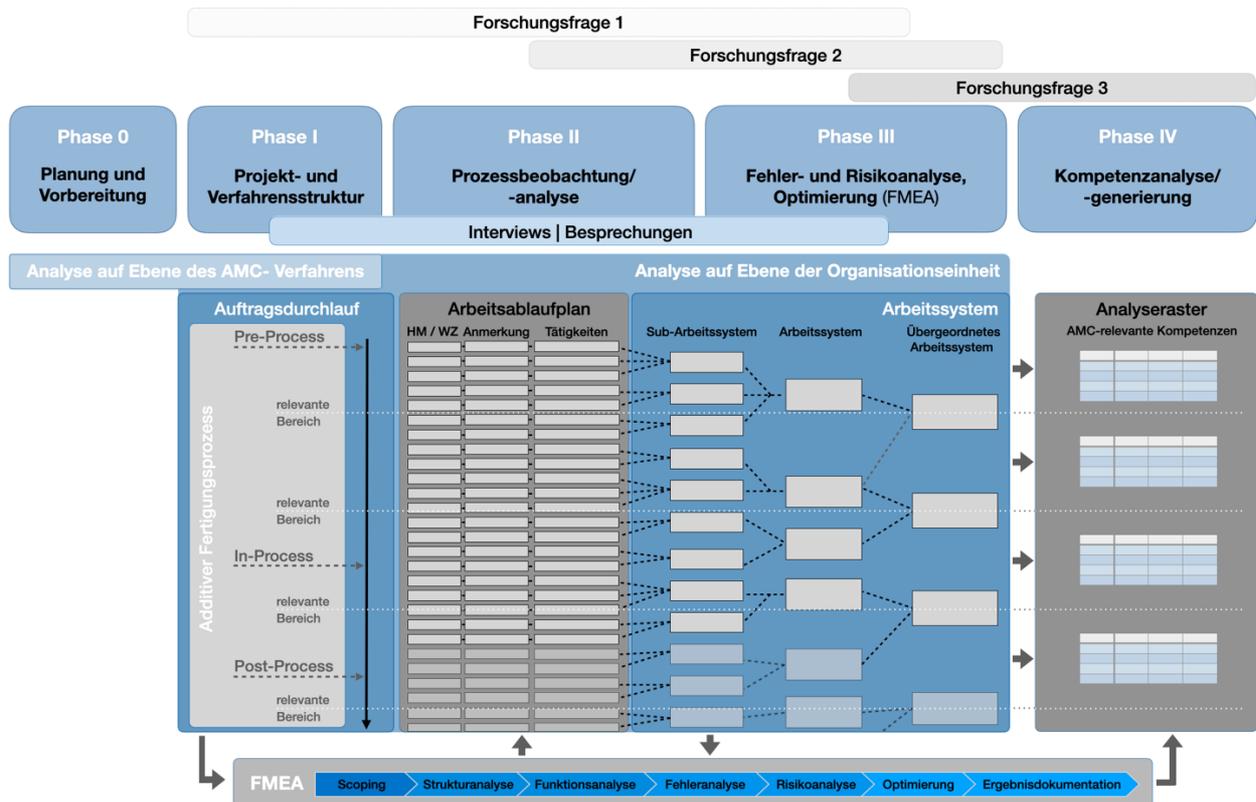


Abbildung 7: Methodisches Vorgehen unter Herleitung des theorie-integrativen Arbeitsmodells und sukzessiver Beantwortung der Forschungsfragen

Mit Phase 0 werden zunächst organisatorische Abstimmungen, wie bspw. die Kontaktaufnahme zum jeweiligen Teilprojekt und terminlichen Planung der anstehenden Erhebungsphase I-III vorgenommen. Neben dieser Planung wird auch die Vorbereitung zur nächsten Phase eingeleitet, indem eine Guideline zur deduktiven Prozessstrukturierung und der Erfassung der Rahmenbedingungen durch das jeweilige Teilprojekt angehängt wird.

Um die grundlegende Projekt- und Verfahrensstruktur der Phase I zu erfassen, werden in einem ersten Schritt die relevanten Daten bzgl. der Analyse auf Ebene des AMC-Verfahrens aus dem TRR277-Vollantrag der Projekt-Homepage sowie der Inhalte aus den TRR277-Quartalmeetings entnommen. Ergänzend dazu erfolgt im nächsten Schritt ein Meeting mit dem Teilprojekt, in welchem ihr AMC-Verfahren entlang der Kategorien aus der Guideline präsentiert wird. Eine nachfolgende Besprechung sollte dabei zur Vervollständigung dieser Daten dienen.

In Phase II ist eine ablauforientierte Prozessbeobachtung vorgesehen, in welcher der gesamte Prozess vom Design bis zum fertigen Bauteil in der exemplarischen AMC-Umgebung durchlaufen, gefilmt und dokumentiert wird. Neben der Verifizierung der Ergebnisse aus Phase I, können anhand der Prozessbeobachtung sowie Videoanalyse ein Maschinenbaum erstellt und

die Arbeitsschritte in den Arbeitsablaufplan expliziert werden. Die ausgefüllten Instrumente werden mit den Forschenden rückbesprochen und davon ausgehend die Arbeitssysteme mit deren Systemstruktur gebildet.

In Phase III wird das Format eines Workshops für die Durchführung der Fehler-, Risikoanalyse und den Optimierungen aus der FMEA genutzt. Hier werden zusammen mit den jeweiligen Experten anhand der Software APIS das Formblatt zu allen möglichen Fehlern, deren Ursache sowie Folge dokumentiert und vernetzt. In diesem Zug gilt es auch die Fehler sowie Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen mit der Risikobewertung und Optimierungen festzuhalten. Somit können die kritischen Bereiche, Schnittstellen sowie Fehlerpotentiale des gesamten AMC-Prozesses identifiziert werden und u.a. auf die Informationsgenerierung sowie -nutzbarmachung zur Sicherstellung einer operativen Handlungsfähigkeit eingegangen werden.

Abschließend erfolgt in Phase IV die Kompetenzanalyse bzw. -generierung aus den erhobenen Daten. Über das Arbeitsmodell AMC-relevanter Kompetenzen (Abschnitt 3.3) werden die handlungsdeterminierenden Dispositionen generiert und sozusagen in Kompetenzprofile überführt, welche den Kompetenzanforderungen in AMC-Umgebungen entsprechen. Die Umsetzung des Promotionsvorhabens erfolgt entlang eines Zei-Arbeitsplans.

5 Zeit- Arbeitsplan

Das Promotionsvorhaben ist mit dem Start im Juli 2020 auf dreieinhalb Jahre angesetzt und voraussichtlich Ende 2023 abgeschlossen. Die zeitliche Gliederung erfolgt in drei Arbeitspakete (AP), welche der Logik der Abschnitte 3 und 4 folgen (Abbildung 8). Im Zeit-Arbeitsplan werden Meilensteine gesetzt.

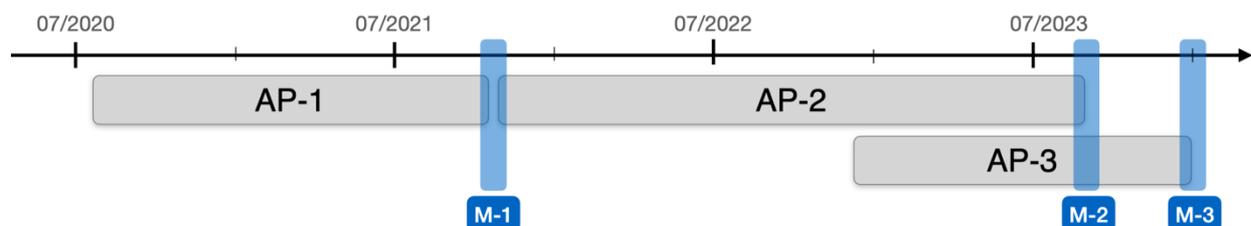


Abbildung 8: Zeit-Arbeitsplan zum Promotionsvorhaben mit Arbeitspaketen und Meilensteinen

AP-1 adressiert das Ziel einer wissenschaftlichen Erschließung des theoretischen Bezugsrahmens sowie die konzeptionelle Integration relevanter Aspekte in ein Arbeitsmodell. In diesem Zusammenhang gilt es ebenfalls das Forschungsmethodischen Vorgehen auszuarbeiten und zu pilotieren.

Ziel des AP-2 ist die vollständige Datenerhebung in den exemplarischen AMC-Umgebungen über das methodische Vorgehen entlang der spezifischen AMC-Verfahren und Technologien des Feldzugangs. Dabei wird jeweils die Untersuchungsmethodik aus Abbildung 7 umgesetzt.

AP-3 bündelt letztendlich die erhobenen Daten über deren Auswertung über das Arbeitsmodell AMC-relevanter Kompetenzen. Ziel dabei ist die Beantwortung der letzten Forschungsfrage, in welcher die Kompetenzanforderungen im Kontext von AMC und daher die Tätigkeits- und Kompetenzprofile in AMC-Umgebungen ausgearbeitet sind.

M-1: Pilotierter methodischer Ansatz mit Arbeitsmodell

M-2: Vollständig durchgeführte Datenerhebung

M-3: AMC-Kompetenzanforderungen in Form von Kompetenzprofilen

6 Literatur

AIAG & VDA (2019). Automotive Industry Action Group (Hg.) FMEA-Handbuch (deutsch). 1. Ausgabe. ISBN13 978-1605343679

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2004). DIN EN ISO 6385:2004-05. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2019). DIN SPEC 17071:2019-12. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Gebhardt, A.; Kessler, J.; Schwarz, A. (2019). Produktgestaltung für die Additive Fertigung. München: Hanser. ISBN: 978-3-446-45285-5

Kurz C. (2002). Innovation und Kompetenzen im Wandel industrieller Organisationsstrukturen. Mitteilungen aus der Arbeitsmarkt- und Berufsforschung Jg. 35, S.601-615, Heft 4

Kloft H.; Gehlen, C.; Dörfler K.; Hack, N.; Henke, K.; Lowke, D.; Mainka, J.; Raatz, A. (2021): TRR 277: Additive Fertigung im Bauwesen. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG. Bautechnik 98, S. 222-230, Heft 3. DOI: 10.1002/bate.202000113

Kloft, H.; Hack, N.; Mainka, J.; Brohmann, L.; Herrmann, E.; Ledderose, L.; Lowke D. (2019): Additive Fertigung im Bauwesen: erste 3-D-gedruckte und bewehrte Betonbauteile im Shotcrete-3-D-Printing- Verfahren (SC3DP). Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG. Bautechnik 96, S. 929-938, Heft 12. DOI: 10.1002/bate.201900094

Pittich, D. (2013). Diagnostik fachlich-methodischer Kompetenzen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag

- Pittich, D.; Tenberg, R.; Lensing, K. (2017). Technikdidaktische Herausforderungen im Übergang zu Industrie 4.0. Die vierte industrielle Revolution und ihre Herausforderungen für die Hochschuldidaktik. Bielefeld: wbv, S. 167-182
- Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung REFA.
<http://refa-consulting.de/refa-lexikon>
- SFB Transregio TRR 277. <https://www.tu-braunschweig.de/trr277>
- Tenberg, R. (2011). Vermittlung fachlicher und überfachlicher Kompetenzen in technischen Berufen: Theorie und Praxis der Technikdidaktik. Stuttgart: Steiner
- Tenberg, R. & Pittich, D. (2017). Ausbildung 4.0 oder nur 1.2? Analyse eines technisch betrieblichen Wandels und dessen Implikationen für die technische Berufsausbildung. Journal of Technical Education (JOTED), Jg. 5 (Heft 1), S. 27-46
- Tenberg, R.; Bach, A.; Pittich, D. (Hg.) (2019). Didaktik technischer Berufe. Band 1 - Theorie & Grundlagen. Franz Steiner Verlag. Stuttgart: Franz Steiner Verlag
- Tenberg, R.; Bach, A.; Pittich, D. (Hg.) (2020). Didaktik technischer Berufe. Band 2 - Praxis & Reflexion. Franz Steiner Verlag. Stuttgart: Franz Steiner Verlag
- Ulich E. (2011). Arbeitspsychologie. 7. überarbeitete Auflage. Zürich: vdf Hochschulverlag / Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag für Wirtschaft. ISBN: 978-3-7281-4042-5
- Werdich M. (Hg.) (2012). FMEA – Einführung und Moderation. 2., überarbeitete und verbesserte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien; Vieweg+Teubner. ISBN 978-3-8348-2217-8
- Zeyn, H. (2017). Industrialisierung der Additiven Fertigung: Digitalisierte Prozesskette - von der Entwicklung bis zum einsetzbaren Artikel - Industrie 4.0 (1. Auflage). Berlin Wien Zürich: Beuth Verlag GmbH. (Hg.) DIN Deutsches Institut für Normung e.V. ISBN: 978-3-4102-6919-9
- Zinke, G.; Schenk, H.; Wasiljew, E. (2014). Berufsfeldanalyse zu industriellen Elektroberufen als Voruntersuchung zur Bildung einer möglichen Berufsgruppe. Bonn: Bundesinstitut für Berufsbildung. Abschlussbericht