

Anwendung agiler Entwicklungsprinzipien für die Herstellung von Ersatzteilen mit additiven Fertigungsverfahren

J. Montero ^{1,2}, A. Atzberger ², T.S. Schmidt ², M. Bleckmann ¹, J. Holtmannspötter ¹,
K. Paetzold ²

¹ Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB), Erding

² Institut für Technische Produktentwicklung (ITPE),
Universität der Bundeswehr München, Neubiberg

Die Herstellung von Ersatzteilen mittels additiver Fertigungsverfahren hat in den letzten Jahren zunehmend an Aufmerksamkeit erlangt. Herausforderungen bei der Konstruktion von Ersatzteilen bestehen insbesondere durch unklare Rahmenbedingungen wie fehlende Spezifikationen. Somit kann das enorme Potential gedruckter Ersatzteile derzeit oftmals nur in geringem Maße genutzt werden. Für die Reproduktion eines Ersatzteils gibt es drei Herangehensweisen, die sich stark voneinander unterscheiden, deren gemeinsames Ziel es jedoch ist, die Virtualisierung des Bauteils als auch die schlussendliche Fertigung effizient und effektiv zu gestalten. Ein weiterer Aspekt ist die Verlagerung des Arbeitsaufwands von der Fertigungs- auf die Konstruktionsseite. Aufgrund von aufkommenden Unsicherheiten während des gesamten Prozesses als auch des iterativen Charakters des Re-Designs für additive Fertigungsverfahren ist die Anwendung von agilen Prinzipien aus der Hardwareentwicklung ein Denkansatz, um die vorherrschenden Unsicherheiten bewältigen zu können. Außerdem sollen dadurch Synergien zwischen der Konstruktions-, der Fertigungs- sowie der Prüfabteilung geschaffen werden.

Keywords: Additive Fertigungsverfahren metallischer Bauteile; Agile Entwicklung physischer Komponenten; AM-Ersatzteil-Prozess

1 Motivation

In den letzten Jahren ist das Interesse an additiver Fertigung (Additive Manufacturing, AM) in verschiedensten Branchen stark angestiegen [1]. Der zunehmende Reifegrad von Technologien wie selektives Laserschmelzen (SLM), selektives Lasersintern (SLS) oder direkte Metallabscheidung (Direct Metal Deposition, DMD) ermöglicht den Einsatz von Bauteilen aus Werkstoffen wie Titan- oder Aluminiumlegierungen mit hervorragenden mechanischen Eigenschaften. Das Militär hat einen Bedarf an Ersatzteilen für unterschiedlichste Ausrüstungsgegenstände an den verschiedensten Einsatzorten. Dies führt zu einer aufwändigen Logistik und führt immer wieder zu Engpässen in der Ersatzteilversorgung. Die vermehrte Nutzung von AM ist für das Militär daher eine interessante Möglichkeit zur Vereinfachung und Verbesserung der Logistik [2], [3]. In der Praxis gestaltet sich der Druck von Ersatzteilen mittels AM gerade bei anspruchsvollen und sicherheitsrelevanten Strukturen als schwierig. Insbesondere wenn Ersatzteile in weit entfernten Einsatzgebieten hergestellt werden sollen, treten viele Unsicherheiten auf. In der Regel liegt die Spezifikation eines Bauteils nicht oder nur in Teilen vor. Daher ist es Aufgabe des Konstruktionsteams, die fehlenden Informationen in ausreichendem Maße zu sammeln. Starre, planorientierte Ansätze wie das V-Modell [4] unterstützt durch das Stage-Gate-Modell [5] sind in solch einem Fall unzureichend. Das Vorgehen nach der agilen Entwicklungslogik hingegen erscheint sehr vielversprechend, da Veränderungen (erwartet und unerwartet) als Chance gesehen werden anstatt als Risiko, das vermieden werden sollte. Durch die kurzen iterativen Zyklen wird im Sinne einer Lernkurve Wissen generiert, das zur Wertschöpfung des finalen Produkts beiträgt [6].

An Methoden zum Re-Design und AM-Verfahren zur Herstellung von Ersatzteilen wird am Wehrwissenschaftlichen Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB) geforscht. In der Resortforschungseinrichtung der Bundeswehr in Erding ist das 3D-Druckzentrum der Bundeswehr eingerichtet worden. Anfragen für Ersatzteile aus Einsätzen erhält das WIWeB meist in Form von Bildern, Skizzen, Beschreibungen. In enger Absprache mit dem Nutzer werden dann entsprechende Ersatzteile entwickelt und entweder als Druckvorlage oder als gedrucktes Bauteil verschickt. Der Druck von Ersatzteilen im Einsatz ist derzeit aber nur für Kunststoffbauteile möglich.

Erste Erfahrungen mit dem Druck von Ersatzteilen sind sehr positiv. Für anspruchsvolle Konstruktionen besteht allerdings noch ein erheblicher Forschungsbedarf. Neben der Zuverlässigkeit von Druckprozessen und dem Verhalten von gedruckten Werkstoffen in der Nutzung sind insbesondere neue Entwicklungsprinzipien für die schnelle Realisierung gedruckter Ersatzteile gefragt.

2 Stand der Technik

2.1 Additive Fertigungsverfahren im Überblick

Additive Fertigung (AM)

Die *American Society for Testing and Materials* (ASTM) hat im Jahr 2009 das Komitee F42 für die additive Fertigung gegründet und definiert AM als „Prozess zur Verbindung von Materialien um Objekte aus dreidimensionalen (3D) Modelldaten herzustellen, in der Regel Schicht für Schicht, im Gegensatz zu subtraktiven Fertigungsmethoden“ [7].

In der Regel wird der Begriff „3D-Druck“ verwendet, da bei diesem Verfahren aus digitalen Daten das zu erstellende Bauteil durch das schichtweise Aufbringen des Werkstoffes entsteht. Derzeit wird AM häufig für Rapid Prototyping (RP) Anwendungen verwendet, da auf einfache Weise dargestellt werden kann, wie ein Produkt aussehen wird, auch wenn die Funktionalität stark begrenzt ist. Mit den Fortschritten in der Verbesserung der Prozesse sowie einem verbesserten Verständnis hinsichtlich der Eigenschaften und des Verhaltens der verwendeten Materialien, wird AM zunehmend auch zur Herstellung realer Funktionsteile angewendet [1]. Gegenwärtig gibt es einige AM-Verfahren, die nach dem verwendeten Material sowie der verwendeten Technologie unterschieden werden. Prakash et al. (2018) listen und kategorisieren die wichtigsten AM-Technologien [8]. Während es Vor- und Nachteile gibt, die alle AM-Prozesse gemeinsam haben, weisen die verschiedenen Technologien auch prozessbedingte Unterschiede auf, die der Nutzer bei der Auswahl eines für die Anwendung geeigneten Verfahrens in Betracht ziehen muss, wie in [9] dargelegt.

In diesem Fall ist es der Einsatz von AM für die Herstellung von Ersatzteilen im militärischen Bereich. Militärische Systeme werden über Jahrzehnte und nicht selten weit über die ursprünglich geplante Nutzungsdauer eingesetzt. Daher sind nicht vorrätige Ersatzteile auch nicht mittelfristig lieferbar. Hinsichtlich der Logistik birgt die Verwendung von AM somit eine deutliche Zeiteinsparung.

AM-Verfahren: SLM und FDM

In dieser Studie wird das SLM-Verfahren zur Herstellung von Metallteilen und das FDM-Verfahren (Fusion Deposition Modeling) zur Herstellung von Kunststoffteilen verwendet. SLM ist eine Technologie, die Pulver einer Metalllegierung als Ausgangsmaterial verwendet. In dieser Studie wird Pulver der Aluminiumlegierung (AlSi10Mg) verwendet. Beim SLM wird ein Bauteil im Pulverbett mittels Laser aus 3D-Daten schichtweise generiert. Abbildung 1, links zeigt eine schematische Darstellung des SLM-Prozesses. Hierbei wird für die jeweilige Schicht das Pulver mittels eines Beschichters aufgebracht und mit dem Laser punktuell in den zu bauenden Geometrien aufgeschmolzen [10]. Es existieren schnellere Varianten dieses Verfahrens mit mehreren Laserstrahlen [11]. FDM wird zur Herstellung von Kunststoffteilen eingesetzt und trägt über einen beheizten Extruder ein thermoplastisches Material auf. Der Thermoplast liegt zunächst drahtförmig als Filament vor. Dieses Filament wird durch einen Zuführmechanismus in einen beheizten Extruder gefördert. Das geschmolzene Material wird durch eine Düse extrudiert und auf einer Bauplattform Schicht für Schicht bis zur Fertigstellung des gewünschten Objekts abgelegt. Das Prozessschema ist in Abbildung 1, rechts dargestellt [12].

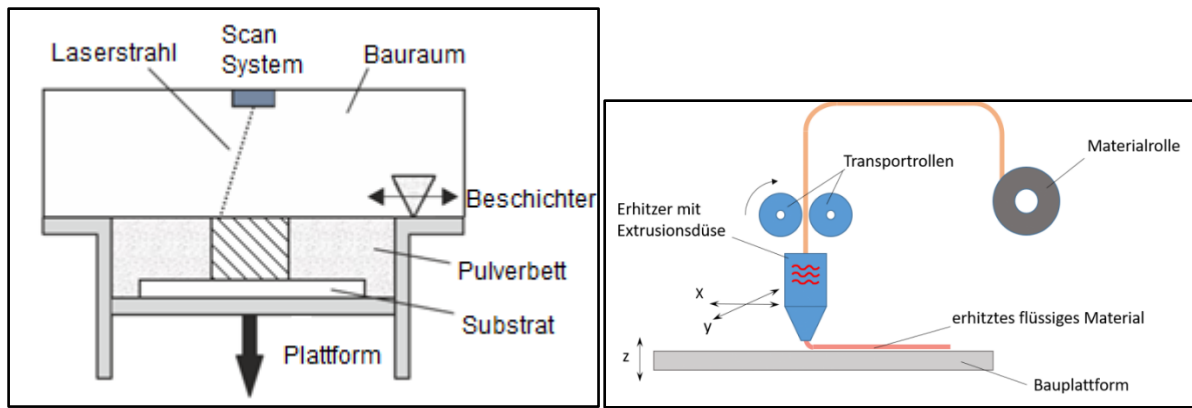


Abbildung 1: Darstellung der Wirkweise des SLM (links) sowie des FDM (rechts) nach [13, 14]

Reverse Engineering für AM

Aufgrund der Weiterentwicklung und der kommerziellen Verfügbarkeit von 3D-Laserscannern und vielen anderen 3D-Scan- und Softwaretechnologien wurde in den letzten Jahren die Rekonstruktion von digitalen Modellen aus realen physischen Objekten deutlich vereinfacht [15]. Dieser Prozess wird als Reverse Engineering (RE) im Bereich des Computer Aided Design (CAD) bezeichnet [16]. Ziel des RE ist es, die vorhandenen Merkmale und geometrischen Beziehungen ausgehend von den erfassten Rohdaten einer beliebigen 3D-Scantechnologie in ein Objekt zu replizieren. Der wichtigste Bestandteil des RE liegt in der korrekten Identifizierung der Merkmale des ursprünglichen Bauteils, da am Ende die Funktionalität des Bauteils direkt davon abhängt.

Da das Bauteil mittels AM hergestellt werden soll, muss zudem auf eine Fertigbarkeit unter AM-Gesichtspunkten geachtet werden. Derzeit fehlen noch integrierte Ansätze für RE-Prozesse mit dem Fokus auf AM, da es viele Arten von Merkmalen gibt, die verbessert oder auch eliminiert werden können, wenn man die Vorteile dieser Fertigungsart berücksichtigt. Die nachfolgende Betrachtung folgt den Richtlinien von Montero et al. (2018) [3], die eine Reihe von aufeinander folgenden Digitalisierungsschritten vom Scannen bis zur Fertigung vorschlagen und dem Konstrukteur so die Möglichkeit geben, das Bauteil entsprechend zu modifizieren und sich somit die Vorteile des AM zunutze zu machen.

2.2 Agile Entwicklung

Der Begriff *Agilität* ist definiert als „die Fähigkeit, schnell und kooperativ auf Veränderungen in unvorhersehbaren Umwelten (zumeist reaktiv) einzugehen, um Bedarfe effizient und effektiv zu befriedigen.“ [6]. Diese Projektmanagementmethodik stellt einen Gegenpol zu traditionellen Ansätzen wie dem V-Modell oder dem Stage-Gate-Ansatz dar [5], [17]. Der entscheidende Unterschied zwischen der klassischen und der agilen Projektmanagementmethodik liegt darin, dass beim klassischen Vorgehen davon ausgegangen wird, dass die Anforderungen und die Informationsbedarfe sowie die Kundenwünsche zu Projektbeginn hinreichend be-

kannt sind. Die agile Entwicklung hingegen geht davon aus, dass sich anfängliche Anforderungen im Verlauf der Entwicklung verändern können, und ist offen für Veränderungen bzw. passt diese an den aktuellen Entwicklungsstand an.

Agile Entwicklungsansätze stammen ursprünglich aus der Softwareentwicklung. Im Jahr 2001 wurde von 17 Programmierern das „Agile Manifest“ als Grundlage für die agile Arbeitsweise formuliert, da sie die vorherrschenden Prozessstandards als zu innovationshemmend, bürokratisch und unflexibel ansahen [18]. Das Manifest beruht auf vier Werten und zwölf Prinzipien und legt dar, wie in einem unsicheren und volatilen Entwicklungskontext zielführend vorgegangen werden kann. Aufbauend auf dieser Methodik wurden verschiedenen Methoden für die Softwareentwicklung wie beispielsweise Scrum oder Kanban entwickelt. Vermehrt werden agile Ansätze auch in der Entwicklung physischer Produkte eingesetzt, wobei hierbei die Einschränkungen der Körperlichkeit (Constraints of Physicality, CoP) im Vergleich zu reinen Softwareprodukten eine Herausforderung darstellen [19].

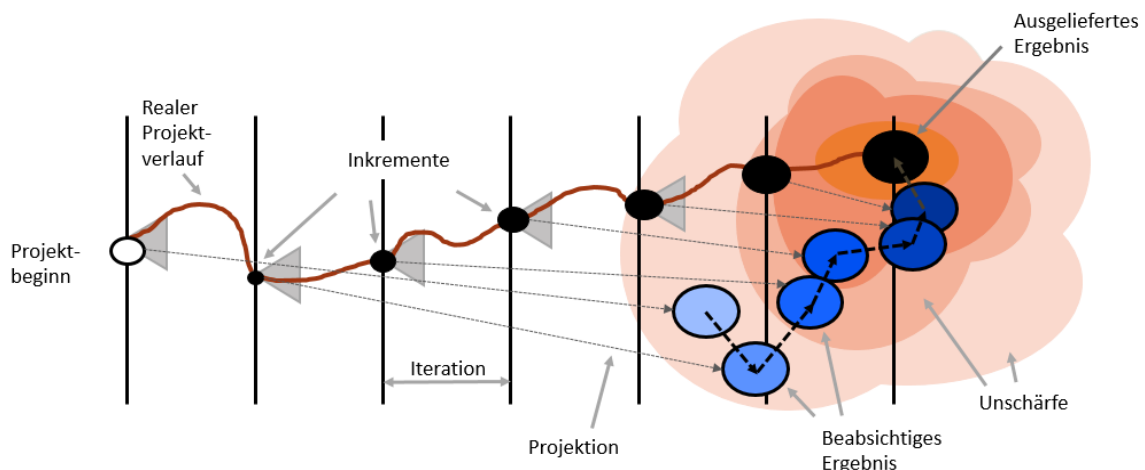


Abbildung 2: Grundlogik des agilen Entwickelns nach dem Unschärfemodell [20]

Das Unschärfemodell nach Oestereich und Weiss (2008) stellt das Vorgehen eines agilen Entwicklungsprozesses in seiner Grundlogik dar, wie in Abbildung 2 dargestellt. Hierbei wird das Projekt in Iterationen unterteilt und am Ende jeder Iteration wird ein Inkrement, also ein Prototyp, generiert. Auf Basis dessen wird dem Kunden das Ergebnis gezeigt und mittels des Feedbacks das Gesamtkonzept überdacht und entsprechend angepasst. So reduziert sich von Iteration zu Iteration die Unschärfe, da der Kunde durch die Inkremente ein genaueres Bild des finalen Produkts erhält. Dieses Vorgehen fordert eine aktive Kommunikation mit dem Kunden, schlussendlich ist der Kunde dadurch aber Teil der Entwicklung und erhält am Ende des Projekts genau das Produkt, das er für seine Zwecke benötigt. Dieses Vorgehen ist kommunikationsintensiv und - in der Hardwareentwicklung vor allem durch die Prototypenerstellung - zeitaufwändig. Schmidt et al. (2018) zeigen auf, dass eine Implementierung unter der Prämisse, die harten Faktoren (Zeit, Kosten, Qualität) zu optimieren, nicht sinnvoll ist. Hingegen sind eine gesteigerte Transparenz in der Entwicklung, ein verbessertes Kundenverständnis sowie gesteigertes projektbezogenes Commitment eine direkte Folge [21]. Betrachtet man diese Erkenntnis unter dem Aspekt von Mittel-Zweck-Beziehungen, so sind diese „weichen“ Faktoren

das direkte Ergebnis der Anwendung agiler Prinzipien, welche auf lange Sicht gesehen einen Einfluss auf die harten Faktoren besitzen.

In der Hardwareentwicklung stellen die CoP die größte Herausforderung in der Erzeugung der Inkremente dar. Das Erzeugen eines Inkrements resp. Prototyps am Ende einer Iteration stellt jedoch das Kernelement agiler Entwicklung dar, um Unsicherheiten zu minimieren sowie ein verbessertes Verständnis für das Produkt zu entwickeln. Schmidt et al. haben für die agile Produktentwicklung eine angepasste Version der Media-Richness-Theorie (MRT) hergeleitet, die in Abbildung 3 zu sehen ist.

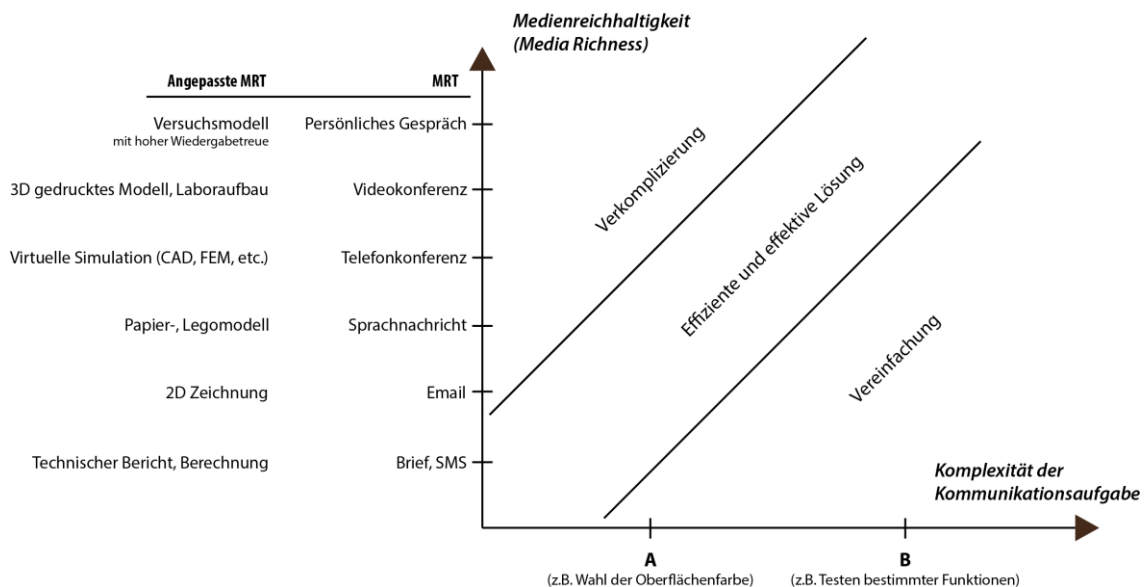


Abbildung 3: Angepasste Media-Richness-Theorie [22]

Mittels dieser MRT kann eruiert werden, welches Medium für eine bestimmte Art von Kommunikationsaufgabe zweckmäßig ist bzw. in der angepassten Form welche Art von Prototyp für eine bestimmte, zu testende Unsicherheit sinnvoll ist. Wendet man diese Theorie in der agilen Entwicklung an, so ist dies ein probates Mittel, um die CoP zu überkommen, da nicht am Ende einer Iteration ein potentiell auslieferbarer Prototyp das Ergebnis sein muss, um eine gewisse Unsicherheit zu testen.

3 Forschungsvorgehen

Die folgend dargestellte Untersuchung entstammt aktueller Forschungsarbeiten des WIWeB zur schnellen Erstellung von Ersatzteilen für die Bundeswehr. Einer der Autoren ist Teil des Konstruktionsteams am WIWeB und hat somit tiefgreifende Kenntnisse über den Prozess und die entsprechende Umsetzung. Da dieses Forschungsgebiet mit vielen Neuerungen einhergeht, sind die bisherigen Erkenntnisse großteils mittels Aktionsforschung (action research) erzielt worden. Ein Prozess wird eingeführt, getestet, wiederholt diskutiert und entsprechend der Erkenntnisse angepasst, wobei die Forschenden Teil der Umsetzung sind.

In einem ersten Schritt wird das ursprüngliche Vorgehensmodell bei einer solchen Anwendung näher erläutert, bevor im nächsten Schritt eine optimierte Variante des Prozesses anhand der

Fallstudie vorgestellt wird. Anhand der Fallstudie werden mögliche agile Entwicklungsansätze sowie deren Anwendung exemplarisch aufgezeigt und deren Anwendbarkeit auf das spezielle Gebiet der Ersatzteilherstellung diskutiert.

4 Beschreibung des gewählten Fallbeispiels

Im militärischen Bereich sind einzelne Systeme wie Geländefahrzeuge und andere militärische Gerätschaften über einen langen Zeitraum im Einsatz. In einem fortgeschrittenen Stadium ihres Lebenszyklus werden die Ersatzteile jedoch nicht mehr produziert. Oftmals gibt es auch wesentliche Änderungen in der Nutzung der Systeme und Verlängerungen der Nutzungszeiträume. Somit sind die ursprünglichen Konzepte zur Ersatzteilbevorratung hinfällig und einzelne Bauteile sind nicht mehr verfügbar. Zu diesem Zeitpunkt sind die Gerätschaften bereits mehrere Jahrzehnte alt. Konstruktionsunterlagen und Fertigungsmittel, wie z.B. Gussformen sind daher oft nicht mehr verfügbar. Insbesondere bei militärischen Anlagen ist aufgrund von geringen Stückzahlen und der langen Produktionszeit (oftmals mit Konstruktionsänderungen während der Bauzeit) die erforderliche technische Dokumentation nicht oder nur teilweise verfügbar. Um neue Produktionstechnologien, wie z.B. AM nutzen zu können, sind aber durchgängig digitale 3D-Daten der Bauteile erforderlich. Daher ist es notwendig, verschiedenste technische Dokumentation zu kombinieren, um daraus geeignete 3D-Daten zu erzeugen. Oftmals ist es dazu notwendig, die Randbedingungen und die technischen Anforderungen an das Bauteil zu eruieren. Der RE Prozess wird dadurch deutlich aufwändiger und komplexer. Die Konstruktionsabteilung stehen teilweise vor der Herausforderung ein neues Bauteil zu erstellen, ohne alle genauen (funktionalen und geometrischen) Randbedingungen für das Bauteil zu kennen.



Abbildung 4: Originaler, abgenutzter Ventildeckel

Das in dieser Fallstudie behandelte Bauteil war eine Anfrage von Soldaten der Bundeswehr aus einem Auslandseinsatz. Es handelt sich dabei um einen Ventildeckel für Mehrzweck-Dieselgeneratoren, siehe Abbildung 4. Diese Art von Ersatzteil ist für gewöhnlich im Einsatz schwer zu erhalten, da es sich um ein Bauteil handelt, welches für eine bestimmte Anwendung

entwickelt wurde, nicht modular aufgebaut ist und dessen Ausfall nur selten vorkommt. Daher werden solche sowie weitere abgekündigte Bauteile in der Regel nicht bevorratet. Aus diesen Gründen ist dieser Ventildeckel daher gut geeignet mittels AM hergestellt zu werden. Der hier vorgestellte Prozess ist nicht auf Rüstungsgüter beschränkt, sondern kann auch in anderen Bereichen angewendet werden.

5 AM Ersatzteilherstellungsprozess bisher (V1)

Zur Erstellung von Ersatzteilen haben Montero et al. (2018) bereits ein Ersatzteilproduktionschema für AM in einer ersten Variante entwickelt und vorgestellt [3]. Dieses Schema basiert auf verschiedenen aufeinander folgenden Digitalisierungsstufen (DS) und beschreibt alle Aufgaben, die bei einer Überarbeitung eines Ersatzteils durch eine Konstruktionsabteilung durchgeführt werden müssen.

Das Scannen des Modells ist der erste Digitalisierungsschritt (DS1) des Schemas, hier wird ein Datensatz bestehend aus einer Punktwolke erzeugt, der abhängig von der Technologie des verwendeten 3D-Scanners ist. Je dichter diese Punktwolke ist, desto höher ist die Detailtreue und somit die Qualität der Datei, was einen entscheidenden Einfluss auf die nachfolgenden Stufen hat. Für gewöhnlich weist das Ergebnis von DS1 Lücken oder Ungenauigkeiten auf, die je nach verwendetem Scannertyp charakteristisch sind. Auch müssen die Datenmengen reduziert werden. Deshalb wird in DS2 diese Punktwolke softwareseitig repariert, Glättungsalgorithmen werden angewendet und die Bereiche, die der Konstrukteur im Vergleich zum Originalobjekt als fehlerhaft oder unvollständig identifiziert hat, werden modifiziert. Ist die Reparatur abgeschlossen, folgt Teilprozess DS3, welcher den RE Kernprozess darstellt, da die im Modell enthaltenen Merkmale und geometrischen Abhängigkeiten identifiziert werden. In DS3 treten für gewöhnlich die größten Schwierigkeiten auf, da die einschlägigen RE Ansätze nicht ausreichend sind, vor allem bei einer großen Anzahl an Merkmalen sind diese unzureichend. Daher ist man in diesem Schritt auf das Können des Konstrukteurs angewiesen, der weiß, welche geometrischen Beziehungen wichtig sind und welche Merkmale berücksichtigt werden sollten. Als Ergebnis dieser Stufe entsteht eine CAD-Datei, die in der folgenden Stufe noch weiter angepasst wird. In Teilprozess DS4 modifiziert der Konstrukteur das Modell und eliminiert diejenigen Merkmale, die nicht funktional sind und die Integrität des Bauteils nicht beeinträchtigen.

Der Ansatz von Atzberger et al. (2018) sieht vor, nach subtraktiven Merkmalen gezielt zu suchen und diese zu reduzieren, um die Komplexität des AM-Modells zu verringern; im Gegenzug soll das Modell nach additiven Merkmalen optimiert werden. Auf diesem Weg verändert sich das standardisierte Konstruieren hin zu AM-angepasstem Konstruieren, sodass das Bauteil von vornherein für die Herstellung mit AM optimiert wird und somit Eigenschaften bzw. Merkmale, abhängig von den Vorgaben des Konstrukteurs, direkt eingearbeitet werden. Die DS3 und DS4 werden somit zusammengelegt, was zu einer deutlichen Zeitersparnis und einer vereinfachten Handhabung des Prozesses führt. Diese Anpassung auf die Herstellung für AM

ist das sogenannte „Redesign für AM“. Es kann der Fall auftreten, dass im Rahmen der Anpassung an den AM-Prozess Merkmale hinzugefügt werden müssen, um spezielle Anforderungen zu erfüllen, die mittels AM allein nicht erreichbar sind. Beispielsweise muss im Falle einer mechanischen Oberflächenveredelung bei der Herstellung eine bestimmte Menge an Material zusätzlich aufgetragen werden, dass im folgenden Nachbehandlungsschritt abgefräst werden kann. In diesem Teilprozess können ebenfalls Optimierungen hinsichtlich der Topologie, der Form sowie der Größe vorgenommen werden.

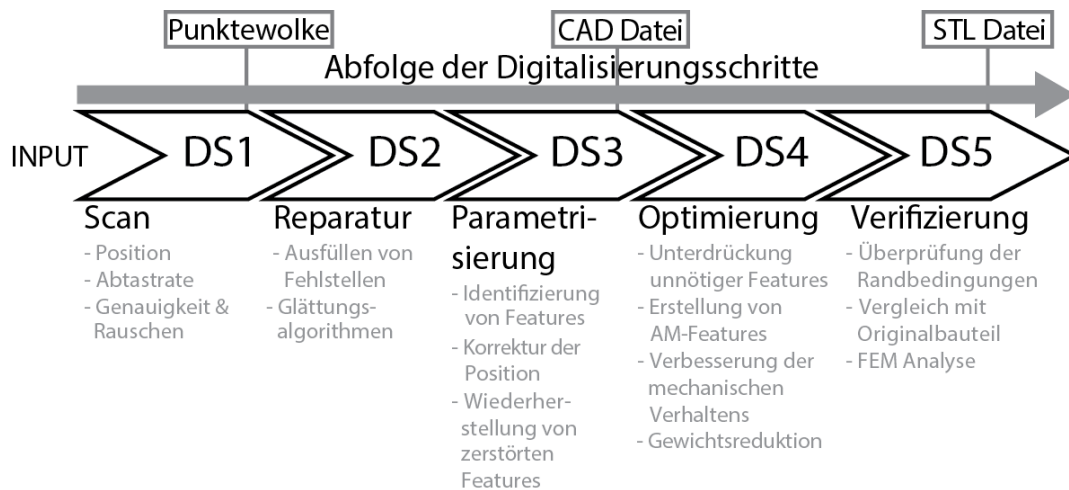


Abbildung 5: Bisheriger AM-Prozess zur Ersatzteilherstellung [3]

Abschließend wird das Bauteil in Teilprozess DS5 virtuell verifiziert, indem die zu erfüllenden Rahmenbedingungen und Übereinstimmung der geometrischen Maße mit denen des Originalmodells geprüft wird. Zusätzlich ist eine Simulation mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) eine Möglichkeit, sich zu vergewissern, dass das Bauteil die Anforderungen erfüllt. Am Ende dieses Schrittes erhält man als Ergebnis eine STL-Datei, die nun der Fertigung übergeben werden kann. Eine Darstellung des gesamten Redesign-Prozesses ist in Abbildung 5 dargestellt.

Zum Scannen des Objekts wurde in dieser Fallstudie ein ROMER Absolute Arm mit einem Hexagon HP-L20.9 3D-Laserscanner verwendet. Als weitere Werkzeuge kamen in DS1, DS2 und DS5 die Software-Produkte PolyWorks® Suite, in DS3 SolidWorks® und in DS4 SolidWorks® und ANSYS® zum Einsatz.

6 Optimierter AM Ersatzteilherstellungsprozess (V2)

Im Zuge dieser Arbeiten wurde der zuvor dargestellte Digitalisierungsprozess erweitert. Das Resultat ist ein dreistufiger AM-Ersatzteil-Prozess und in Abbildung 6 als Schaubild dargestellt. In der ersten Phase, der Entwurfsphase, erfolgt die Virtualisierung des Ersatzteils, gefolgt von der Herstellungsphase, in der das Bauteil produziert wird, bevor es in der Prüfphase auf Konformität und Funktionalität überprüft wird. Die verfügbaren Daten über das Bauteil fließen als Eingangsgröße in das System ein und die zugehörige Dokumentation wird nach erfolgreichem Test in einem Datenarchiv gespeichert.

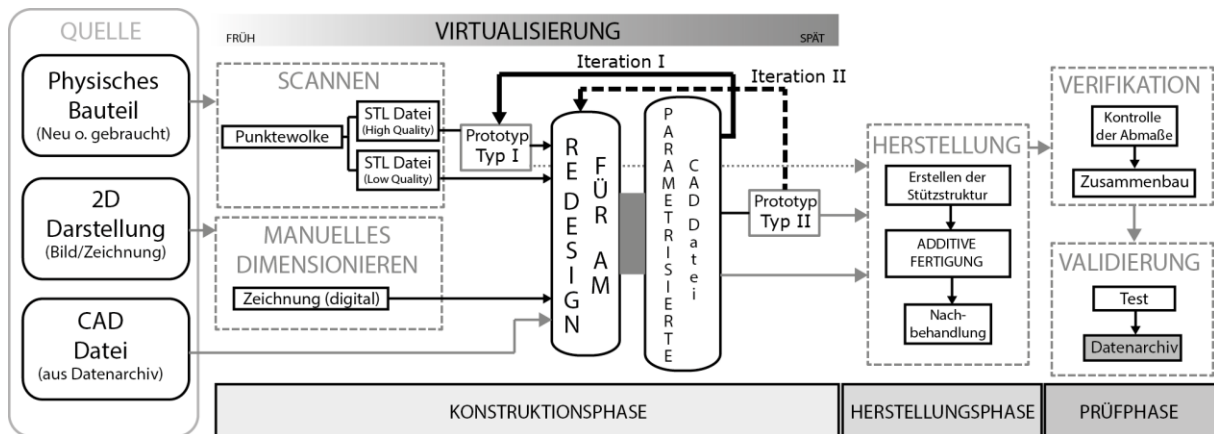


Abbildung 6: Schaubild des dreistufigen AM-Ersatzteil-Prozesses mitsamt Iterationen

Als Eingangsgröße können entweder ein defektes Bauteil, ein Bild bzw. eine Skizze mit den entsprechenden Abmaßen oder, falls vorhanden, eine CAD-Datei mit allen notwendigen Informationen fungieren. Aufgrund des Alters der Bauteile ist die Existenz von CAD-Daten jedoch eher die Ausnahme. Am häufigsten ist das entsprechende Bauteil nicht mehr vorrätig und daher wird die defekte Komponente oftmals direkt zur Verfügung gestellt, ohne entsprechende weiterführende Dokumentation. In der Entwurfsphase (zu einem frühen Zeitpunkt in der Virtualisierung) wird das Bauteil zunächst, wie im bisherigen Vorgehen, eingescannt, sofern es physisch vorhanden ist, oder aber es wird anhand einer Beschreibung eine digitale CAD-Datei erstellt. Im Ergebnis liegt eine Datei mit einer Punktwolke vor, in der keine weiteren Parametermanipulationen außer dem Glätten der Oberflächen sowie dem Auffüllen von unerwünschten Löchern erlaubt. Diese Punktwolke (STL-Datei) fungiert als erstes virtuelle Inkrement.

An dieser Stelle wird ein neues Konzept eingeführt, das Prototypen von 3 Kategorien umfasst. Anstatt innerhalb einer Iteration ein finales Bauteil anzustreben, werden mit alternativen Fertigungsmethoden, die weniger zeit- und kostenintensiv sind als die finale Fertigungsmethode, Prototypen erzeugt. Sie sind ein Mittel, um unerwartete und erwartete Unsicherheiten zu testen und vor der finalen Herstellung zu klären. Tabelle 1 erklärt die Unterschiede der 3 Typen, die in nachfolgenden Absätzen in den Prozess eingeordnet werden. Durch die Erzeugung eines Modells in verkleinertem Maßstab ist es möglich, gewissenhaft beurteilen zu können, wie das Ersatzteil physisch aussehen wird. Daher ist es für den Konstrukteur einfacher zu entscheiden, ob er Anpassungen vornehmen sollte, um es für das AM-Herstellungsverfahren zu optimieren. Der verkleinerte Maßstab ist ausreichend, da dieser Prototyp nur den Zweck erfüllt, grobe Unsicherheiten hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit bzw. der groben Abmessungen des Modells zu testen. Daher ist es schneller und kostengünstiger, ein Miniaturmodell als ein Modell in realer Größe zu drucken. Oftmals sind die Ergebnisse des Scans von so geringer Qualität, dass das Bauteil auch ohne die Realisierung dieses Prototyps komplett neu gestaltet werden muss.

Tabelle 1: Übersicht über die verschiedenen Prototypenvarianten

	Material (Verfahren)	Größe	Erfahrungsgewinn	Kosten	Herstellungsdauer
Prototyp 1	Plastik (FDM)	2:1	•	\$	•
Prototyp 2	Plastik (FDM)	1:1	••	\$	••
Prototyp 3	Metall (SLM)	1:1	•••	\$\$\$	•••

Die Virtualisierung erreicht ihren kritischen Punkt, wenn es zum so genannten Redesign für AM kommt. Hier werden die Eigenschaften des Bauteils für eine Herstellung mittels AM angepasst, ergo nicht-funktionale Eigenschaften (wie z.B. Angusstützten bei einem Gussprozess) werden eliminiert und eine parametrisierte CAD-Datei, die für zukünftige Änderungen herangezogen werden kann, wird generiert. Nach diesem zeitintensiven Teilprozess hat die Virtualisierung eine gewisse Reife erreicht. Von hier aus können drei Wege gewählt werden, um das Bauteil herzustellen. Die einfachste, aber gleichzeitig auch risikoreichste Variante ist, die Datei direkt in die Produktion zu übermitteln und das Bauteil mittels AM herstellen zu lassen. Alternativ – je nach erwarteten Restunsicherheiten – kann ein weiterer (relativ günstiger und schnell herstellbarer) Prototyp von Typ 1 erzeugt werden, um Lernkurveneffekte auszunutzen. Als dritte Option ist es zudem möglich, einen Prototyp Typ 2 herzustellen. Diese Art von Prototyp weist bereits den realen Maßstab des Ersatzteils auf, wird jedoch ebenfalls mit dem FDM-Verfahren hergestellt. Dadurch kann das Ersatzteil mit den realen Abmessungen bereits bis auf funktionale Tests eingehend geprüft werden und somit können Abweichungen und Designfehler in versteckten Konturen entdeckt werden. Der Prototyp vom Typ 2 kann nicht so schnell hergestellt werden wie das des Typs 1, unter finanziellen Gesichtspunkten sind diese im Vergleich zur AM-Herstellung jedoch noch immer um ein Vielfaches günstiger und der Erkenntnisgewinn über das resultierende Bauteil deutlich höher als bei Typ 1.

Wenn ein Prototyp vom Typ 2 vorliegt, ist die Endphase der Virtualisierung erreicht und damit das Ende der Konstruktionsphase. Der Begriff Virtualisierung rührt daher, dass im Modell kontinuierlich geometrische Eigenschaften und Merkmalen ergänzt und abgesichert werden. Der Konstrukteur kann somit durch dem wachsenden Erkenntnisgewinn einfacher und weniger fehleranfällig das Bauteil in seiner finalen Form auslegen. Ist das zu erstellende Ersatzteil in der frühen Phase der Virtualisierung noch ein Foto, so hat das Modell in der späten Phase der Virtualisierung bereits deutlich an Genauigkeit und Detailumfang gewonnen, sodass es physisch durch eine RP-Lösung hergestellt werden kann, die es ermöglicht, Unsicherheiten über das Ersatzteil drastisch zu reduzieren, bevor es zeit- und kostenintensiv mit der finalen Fertigungsmethode erzeugt wird. In der Fertigungsphase ist die Erstellung der Stützstruktur das erste, was an dem parametrisierten Modell vorgenommen werden muss. Ist dies erfolgt, kann das Teil mittels AM gefertigt werden und in einem letzten Schritt kann die Nachbehandlung, (z.B. Wärmebehandlung, Nachfräsen von Konturen, Oberflächenbehandlung, ...) erfolgen. Das

Bauteil, das in dieser Phase erzeugt wird, besitzt die funktionalen Eigenschaften, die an das Bauteil gestellt werden. Deshalb ist es wichtig, zwischen dem in der Herstellungsphase produzierten AM-Bauteil und dem in der Konstruktionsphase zu differenzieren, da die in den Iterationen 1 und 2 hergestellten Bauteile keine funktionalen Eigenschaften besitzen und nur geometrische Prototypen sind.

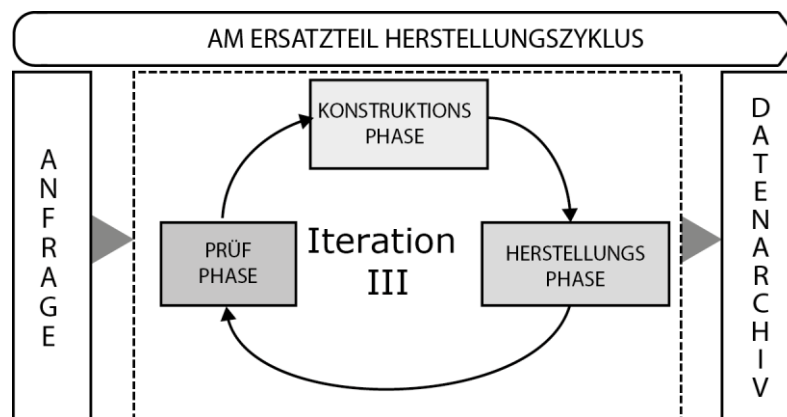


Abbildung 7: Vereinfachte Darstellung des gesamten AM-Ersatzteilprozesses mit dem dreistufigen AM-Prozess als übergeordneter Iteration (Typ 3)

Die finale und entscheidende Phase ist die Prüfphase, da hierbei sichergestellt wird, dass das Bauteil die bei der Konstruktion gewählten Maße einhält sowie die funktionalen Eigenschaften hinsichtlich Festigkeit, Steifigkeit, Betriebsbeanspruchungen, etc. erfüllt. Ist das Objekt Teil einer Baugruppe, so wird dieses probeweise eingesetzt und verifiziert, ob es die Anforderungen als Ersatzteil erfüllt. Anschließend wird eine Validierung durchgeführt, die aus einer Reihe von Praxistests besteht. Die Speicherung des digitalen Modells im Datenarchiv für AM-Ersatzteile beendet den Prozess. Der dreistufige AM-Ersatzteil-Prozess kann als Zyklus angesehen werden, der durch eine Anfrage zur Herstellung eines Ersatzteils mittels AM initiiert und durch die Auslieferung des physischen und Archivierung der virtuellen Resultate beendet wird (vgl. Abbildung 7). Unter Berücksichtigung des zuvor angewandten Iterationskonzepts wird davon ausgegangen, dass nach jeder Produktion eines Ersatzteils mittels AM eine Iterationsschleife auf einer höheren Prozessebene durchgeführt wurde als die beiden im vorherigen Abschnitt beschriebenen Iterationen 1 und 2. Dies ist die so genannte Iteration 3, die abgeschlossen ist, wenn ein Bauteil den dreistufigen AM-Ersatzteil-Prozess durchlaufen hat. Es kann der Fall eintreten, dass bei der Herstellung eines bestimmten Ersatzteils die Iteration vom Typ 3 mehr als einmal durchgeführt werden muss, da das Bauteil nicht die gewünschten Anforderungen erfüllt, weil in einer der Phasen ein Fehler unterlaufen (z.B. Konstruktions-, Fertigungs- oder Stützstrukturfehler). Dann ist es erforderlich, eine zusätzliche Iteration durchzuführen, um den Fehler auszubessern und das Bauteil erneut herzustellen.

7 Diskussion

Im Folgenden werden die Herausforderungen und Erkenntnisse der Anwendung des dreistufigen AM-Ersatzteil-Konzepts anhand der dargestellten Fallstudie erläutert. Der zuvor gezeigte Ventildeckel eines Dieselgenerators (vgl. Abbildung 4) wurde redesigned und mittels AM produziert. Hinsichtlich der Iterationen wurden in dieser Fallstudie zwei Typ 1 Prototypen (in einem Maßstab von 2:1) sowie zwei Typ 3 Prototypen hergestellt (vgl. Abbildung 8). Wäre ein Typ 2 Prototyp einem Typ 3 Prototyp vorangegangen, so wären wahrscheinlich sowohl Herstellungskosten als auch Zeit eingespart worden. Ist mehr als ein Typ 3 Prototyp vonnöten, so deutet dies auf Fehler im Prozess hin. Im Rahmen der Fallstudie konnte durch das zusätzliche Herstellen eines Typ 3 Prototyps das Iterationskonzept angepasst werden und das Konzept eines Typ 2 Prototyps wurde in das Schema implementiert, da die Herstellung eines Typ 2 Prototyps viele Unsicherheiten frühzeitig reduziert hätte.

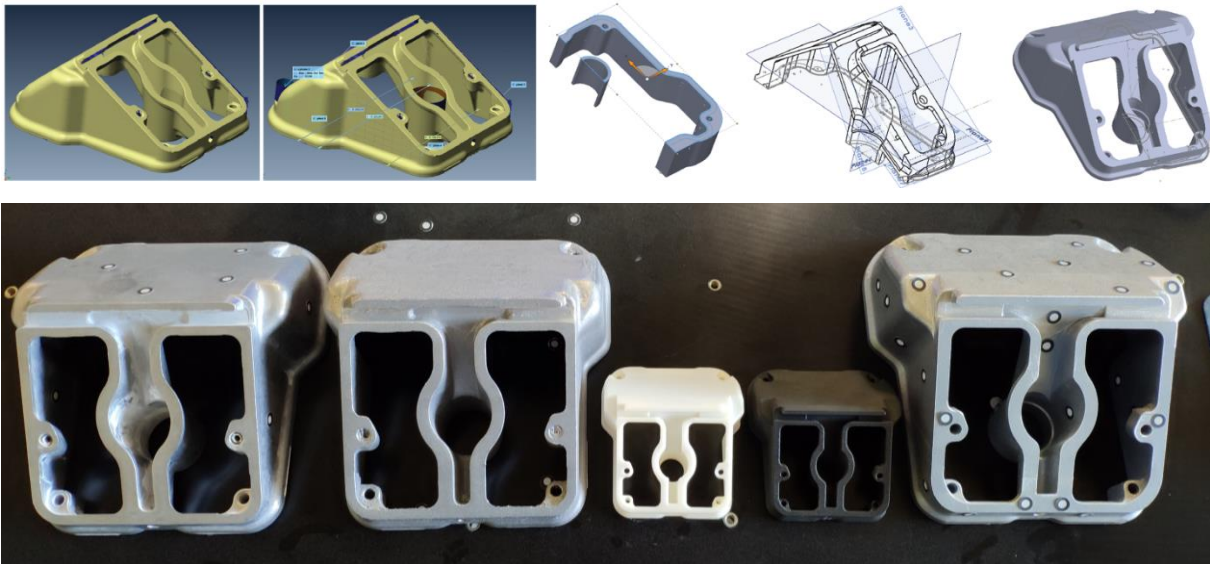


Abbildung 8: Digitale Entwicklung des Ventildeckels (oben), gefertigte Bauteile (unten); v.r.: Originalbauteil, Typ 3-Prototyp (I), Typ 1-Prototyp (zweimal), finaler Typ 3-Prototyp (II)

Abbildung 8 stellt den Ablauf der Virtualisierung vom Scannen bis zur Parametrisierung (oben) sowie den Ablauf der Prototypenerstellung (unten) dar. Der ursprüngliche, zu ersetzende Ventildeckel ist ganz links dargestellt, daneben der erste unzureichende Typ 3 Prototyp, als nächstes folgen die beiden Typ 1 Prototypen sowie das finale Bauteil, ergo das Ergebnis der zweiten Typ 3 Iteration (rechts). Im Rahmen dieser Fallstudie ist die fehlerhafte Herstellung des ersten Typ 3 Prototyps auf ein vorschnelles Übersenden der CAD-Datei an die Fertigung direkt nach dem Scan-Prozess zurückzuführen. Das Resultat waren unzureichende Eigenschaften hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit und der versteckten Konturen. Deshalb durchlief das Bauteil nochmals das „Redesign für AM“, indem 2 Prototypen vom Typ 1 erzeugt wurden. Nach der zweiten Typ 1 Iteration wurde eine weitere Iteration mit einem Typ 2 Prototyp für nicht mehr notwendig angesehen. Das Endergebnis des gesamten AM-Prozesses ist nicht nur ein funktionales Ersatzteil, sondern eine für AM optimierte Komponente.

Der entscheidende Vorteil der Anwendung anhand des neuen Konzepts ist in Abbildung 9 zu sehen. Hierbei sind die beiden Typ 3 Prototypen abgebildet. Der erste Prototyp (links) weist im Vergleich zum zweiten, welcher nochmals für AM redesigned wurde und mittels zwei Typ 1 Prototypen optimiert wurde, deutliche Unterschiede auf. Die bemerkenswertesten Verbesserungen sind in der Kreisform der Löcher, dem Abschluss der schrägen Flächen, den Verstärkungen in den als kritisch betrachteten Bereichen und in der Gleichmäßigkeit und Kontinuität der Querschnitte zu beobachten.

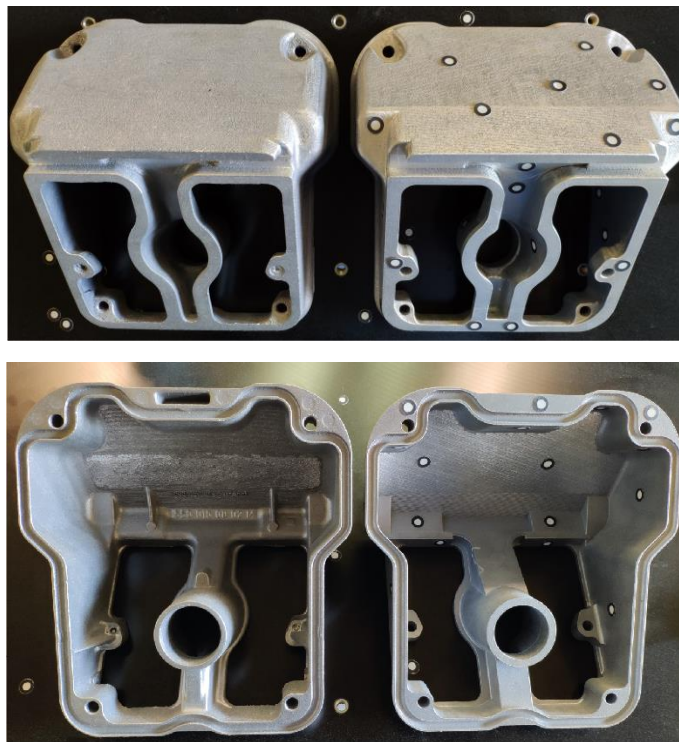


Abbildung 9: Vergleich der Iterationsschleifen vom Typ 3

Die Verwendung von Prototypen zum frühzeitigen Erkenntnisgewinn und testen von Unsicherheiten ist unkonventionell für die Ersatzteilerstellung. Die Fertigung mittels metallischer AM ist jedoch noch ein neues Anwendungsgebiet, bei dem eine iterative und inkrementelle Vorgehensweise zweckmäßig ist. Daher wird auf Grundlage der Erkenntnisse der Fallstudie dringend empfohlen, dem dreistufigen AM-Ersatzteil-Prozess mit dem implementierten Iterationskonzept zu folgen. Das Erzeugen von Typ 1 und 2 Prototypen führt zu einer signifikanten Verbesserung während des Redesigns und minimiert dadurch die Unsicherheiten. Somit wird das Risiko von Fehlern oder Ausfällen während der AM-Produktionsphase deutlich reduziert bzw. vermieden, was im schlechtesten Fall sehr zeit- und kostenintensiv sein kann.

Die agilen Entwicklungsansätze sollen dabei helfen, den Prozess der Ersatzteilerstellung dahingehend zu beschleunigen, als dass auf bestimmte Informationen nicht gewartet werden muss (z.B. durch Reklamation vom Nutzer), sondern bereits erste Erkenntnisse durch das Produzieren von Prototypen erlangt werden können. Da die Informationsgrundlage anfangs teilweise sehr spärlich ist, kann somit der Prozess der Virtualisierung bereits begonnen werden und erste Prototypen erstellt werden, ohne enorme finanzielle Ausgaben zu verursachen.

Zwar umfasst dieser Ansatz nicht alle Möglichkeiten agiler Entwicklung, jedoch kann unter Berücksichtigung der besonderen Entwicklungsregularien seitens der Bundeswehr (z.B. Zulassungsbestimmungen) zumindest die Anwendung einiger Prinzipien den Prozess optimieren.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Obwohl es aus wirtschaftlicher Sicht darum geht, den Aufwand und die Kosten zur Erstellung eines Ersatzteils so gering wie möglich zu halten, der maßgeblich durch die Anzahl der Typ 3 Prototypen bestimmt wird, ist deren vermehrte Herstellung aufgrund der Neuartigkeit und Komplexität (Anpassung einer bestehenden Konstruktion auf ein anderes Fertigungsverfahren mit veränderten Materialeigenschaften) der Aufgabe teilweise nicht vermeidbar. Wie in der Fallstudie dargestellt hat sich durch das Anwenden von Iterationen und dem Erzeugen von Prototypen die Teilequalität mittels der Prototypen signifikant verbessert (vgl. Abbildung 9). Um das Feld der Ersatzteilherstellung mittels AM zu erweitern, kann das Durchführen von vermehrten Typ 3-Iteration jedoch hilfreich sein, da der Erkenntnisgewinn sehr hoch ist, wodurch sich Ideen für die Erstellung eines Leitfadens ableiten lassen. Dieser Erfahrungsgewinn sollte jedoch idealerweise in einem Datenarchiv gespeichert werden, auf das jederzeit zugegriffen werden kann. Eine mögliche Herangehensweise wäre die Anwendung des Repository Tree-Models [23]. Dadurch werden die verschiedenen Varianten versionsweise abgespeichert und es kann zudem gesehen werden, welche Varianten bereits ausgetestet wurden und an welchem Punkt diese nicht mehr weiterverfolgt wurden. Dieses Modell erhöht die Nachvollziehbarkeit und wäre somit ein geeigneter Schritt für ein komplett organisiertes Online-Dateiverwaltungs-Tool.

Der dargestellte dreistufige Prozess sollte prinzipiell stets bei der Herstellung eines AM-Ersatzteils angewendet werden, da durch das Iterationskonzept die Qualität des Bauteils optimiert wird. Das Redesign muss speziell an eine Fertigung mittels AM angepasst werden. Daher sind Leitfäden für ein solches Redesign notwendig und zweckmäßig. Metallisches AM ist bereits heutzutage eine zweckmäßige Option, wenn defekte Bauteile keine Zertifizierungen benötigen, und löst das Problem von nicht mehr verfügbaren Ersatzteilen. Aus militärischer Sicht liefert die Untersuchung einen Beitrag, um Maschinen und Gerätschaften schneller mit qualitativen Ersatzteilen zu versorgen, die nicht mehr verfügbar sind.

Literaturverzeichnis

- [1] T. Wohlers and R. Campbell, "Wohlers Report 2017: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry," Fort Collins, 2017.
- [2] S. Guertzen, "Military Applications For The Emerging Technology Of 3D Printing," *Additive Manufacturing*, 2017. [Online]. Available: <https://www.digitalistmag.com/digital-supply-networks/2017/08/09/military-applications-for-emerging-technology-of-3d-printing-05281588>.

-
- [3] J. Montero, K. Paetzold, M. Bleckmann, and J. Holtmannspoetter, "Re-design and re-manufacturing of discontinued spare parts implementing additive manufacturing in the military field," in *Proceedings of the 15th International Design Conference DESIGN 2018*, 2018, pp. 1269–1278.
- [4] VDI Gesellschaft Produktion und Logistik, "VDI 2221 - Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte." VDI Handbuch, Düsseldorf, 1986.
- [5] R. G. Cooper, *Winning at New Products: Creating Value Through Innovation*. New York: Basic Books, 2011.
- [6] A. Böhmer, A. Beckmann, and U. Lindemann, "Open Innovation Ecosystem - Makerspaces within an Agile Innovation Process," in *Proceedings of the ISPIM Innovation Summit: Changing the Innovation Landscape*, 2015, pp. 1–11.
- [7] ASTM F2792-12a, "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (Withdrawn 2015)," West Conshohocken, PA, 2012.
- [8] K. S. Prakash, T. Nancharai, and V. V. S. Rao, "Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing - An Overview," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 3873–3882, 2018.
- [9] S. Ford and M. Despeisse, "Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges," *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 1573–1587, Nov. 2016.
- [10] S. Bremen, W. Meiners, and A. Diatlov, "Selective Laser Melting," *Laser Tech. J.*, vol. 9, no. 2, pp. 33–38, 2012.
- [11] D. Buchbinder, W. Meiners, N. Pirch, K. Wissenbach, and J. Schrage, "Investigation on reducing distortion by preheating during manufacture of aluminum components using selective laser melting," *J. Laser Appl.*, vol. 26, no. 1, p. 012004, Feb. 2014.
- [12] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, "Printing Processes," in *Additive Manufacturing Technologies*, Boston, MA: Springer US, 2010, pp. 187–222.
- [13] B. Graf, M. Schuch, R. Kersting, A. Gumenyuk, and M. Rethmeier, "Additive Process Chain using Selective Laser Melting and Laser Metal Deposition," in *Lasers in Manufacturing Conference*, 2015.
- [14] 3D-Druckcenter, "FDM Verfahren (Fused Deposition Modelling)." [Online]. Available: <http://3d-druckcenter.at/fdm/>.
- [15] M. Gregor, F. Budzel, A. Štefánik, and D. Plinta, "3D Laser Scanning in Digitization of Current Production Systems," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 41, no. 3, pp. 86–93, 2008.
- [16] T. Varady and R. Martin, "Reverse Engineering," in *Handbook of Computer Aided Geometric Design*, Elsevier, 2002, pp. 651–681.
- [17] VDI Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, "VDI 2206 - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme." VDI Handbuch, Berlin, 2004.
- [18] K. Beck and et al., "Manifesto for Agile Software Development," 2001. [Online]. Available: agilemanifesto.org.
- [19] T. S. Schmidt and K. Paetzold, "Agilität als Alternative zu traditionellen Standards in der Entwicklung physischer Produkte: Chancen und Herausforderungen," in *Design for X (DfX) Symposium*, 2016, pp. 255–267.

- [20] B. Oestereich and C. Weiss, *APM - Agiles Projektmanagement*. dpunkt Verlag, 2008.
- [21] T. S. Schmidt, S. Weiss, and K. Paetzold, "Expected vs. Real Effects of Agile Development of Physical Products: Apportioning the Hype," in *International Design Conference - Design 2018*, 2018, pp. 2121–2132.
- [22] T. S. Schmidt, A. I. Böhmer, A. Wallisch, K. Paetzold, and U. Lindemann, "Media Richness Theory in Agile Development: Choosing Appropriate Kinds of Prototypes to Obtain Reliable Feedback," in *23th International ICE Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE'17)*, 2017.
- [23] T. S. Schmidt, G. Gerdzhikov, and K. Paetzold, "Set-based Design in Agile Development: Reinterpreting the Repository Tree," in *International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE'18)*, 2018.