

M. SC. SASCHA HARTIG, WISSENSCHAFTLICHER MITARBEITER UND DOKTORAND AM LAFT,
HELMUT-SCHMIDT-UNIVERSITÄT

UNIV.-PROF. DR.-ING. JENS WULFSBERG, LEITER DES LEHRSTUHL FERTIGUNGSTECHNIK,
HELMUT-SCHMIDT-UNIVERSITÄT / UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR HAMBURG

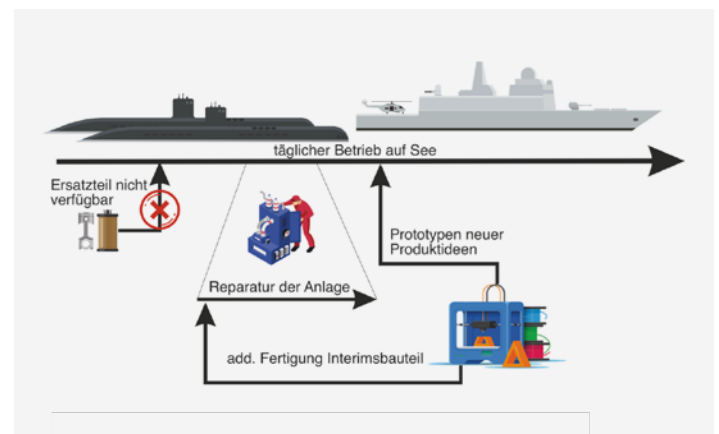
Konzept zur Integration Additiver Fertigung zur Unterstützung zeitweise autark operierender Systeme am Beispiel der Deutschen Marine

ABSTRACT

Additive Fertigungstechnologien bieten einen großen Vorteil für zeitweise autark agierende Systeme wie Schiffe und Boote der Deutschen Marine. Hierbei werden die Verfahren umgangssprachlich meist mit dem Begriff 3D-Druck beschrieben. Durch technische Normen werden die Additiven Fertigungsverfahren jedoch kategorisiert und differenziert. Diese Einteilung ist lediglich für Fachpersonal zielführend. Bei der Integration und Nutzung dieser Fertigungstechnologie ist diese Diskrepanz zwischen zu simplen und zu spezifischen Begriffsdefinitionen störend. Für eine reibungslose Einführung innerhalb von industriellen und militärischen Strukturen wird eine Logik benötigt, die eine Kommunikation zwischen Fach- und Nichtfachpersonal ermöglicht. Das im Artikel vorgestellte Ebenensystem, welches die Additiven Fertigungsverfahren in vier Level einteilt, soll diese Diskrepanz überwinden. Dabei sind Level 1 – Verfahren für kleine autarke Systeme wie Boote vorgesehen und Level 2 – Systeme mit gehobener Komplexität für Schiffe mit einem höheren Platz und Ressourcenangebot geeignet. Diese unteren beiden Levelstufen sollen den Autarkiegrad erhöhen und wirken sich unmittelbar positiv auf die Seeausdauer aus. Verfahren mit höherer Komplexität in Level 3 und 4 optimieren die Versorgungskette, um die Zeit der Nachversorgung und Abhängigkeit der Schiffe und Boote zu minimieren, sodass Hafenliegezeiten minimiert werden können und Kosten für Logistik, Transit, Zoll, Hafen etc. eingespart werden können.

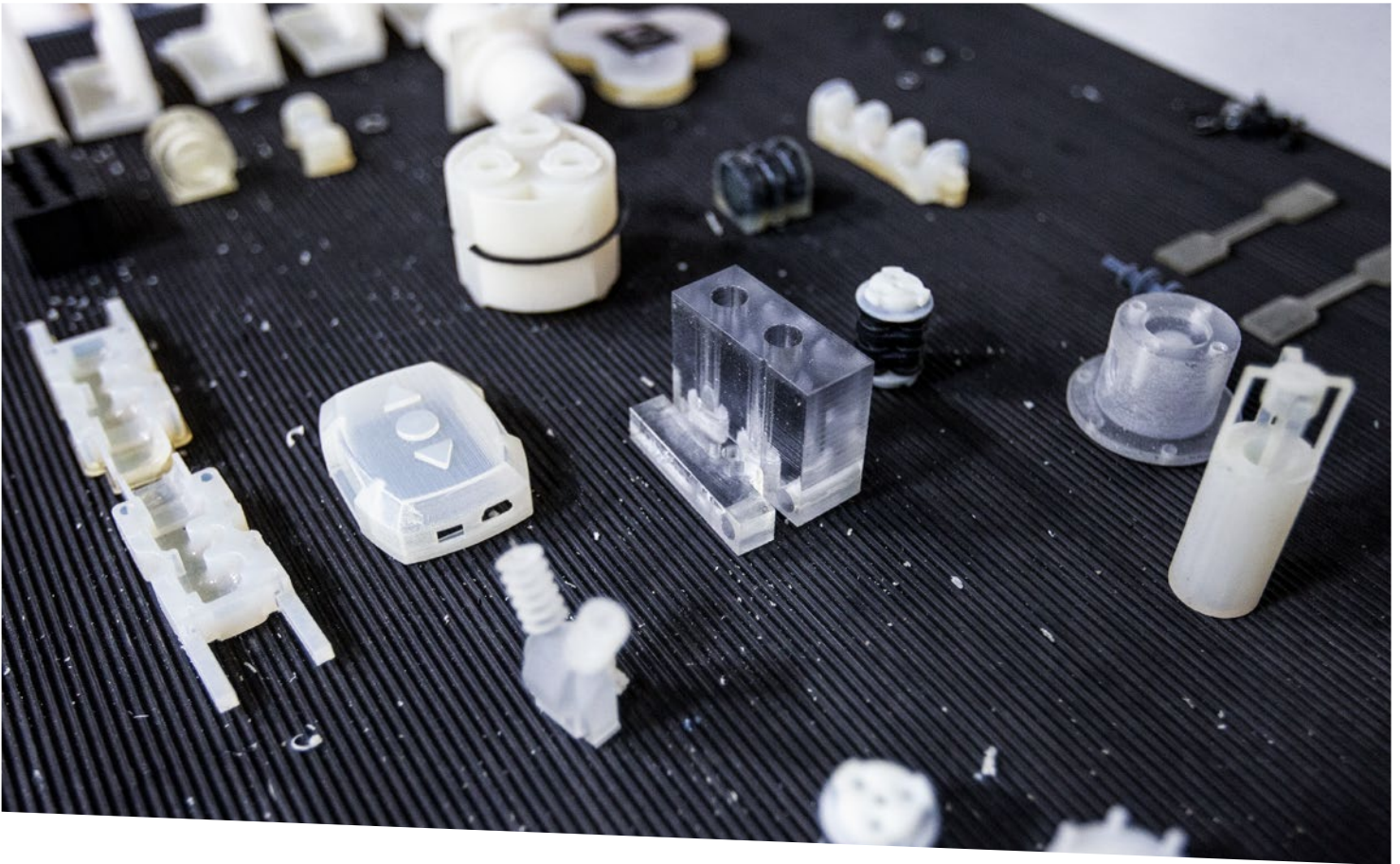
EINLEITUNG UND MOTIVATION

Die Additiven Fertigungsverfahren, auch 3D-Druck genannt, beinhalten eine Vielzahl von schichtweise aufbauenden Fertigungsverfahren. Jedes dieser Verfahren weist unterschiedliche Vor- und Nachteile in Bezug auf Bauteileigenschaften, Prozesszeiten etc. für einen spezifischen Fall auf.



Die Additive Fertigung weist ein großes Potenzial für die Unterstützung zeitweiser autark operierender Systeme auf. Zeitweise autarke Systeme zeichnen sich über den Aspekt aus, dass sie über einen gewissen Zeitraum ohne Eingangs- und Ausgangsgrößen operieren können. Auf das System Schiff oder Boot übertragen bedeutet dies, dass sie z.B. in diesem Zeitraum ohne materielle Versorgung operieren können, ohne dass ihre Funktion eingeschränkt ist.

Zur Steigerung der Autarkie trägt die eigene Herstellung der benötigten Güter bei. Dieser Aspekt der Interimsbauteilfertigung ist in Abbildung 1 dargestellt. Hier werden unter Zuhilfenahme der Additiven Fertigung die nicht verfügbaren Ersatzteile mittels sogenannter Interimsbauteile ersetzt. Auf diese Weise kann die Anlage weiterhin in Betrieb gehalten werden, bis das herkömmliche Ersatzteil über die konventionellen Versorgungswege verfügbar ist. Durch diese eigenverantwortliche Herstellung ist es möglich, die Systeme länger unter voller Bereitschaft operieren zu lassen. Interimsbauteile unterscheiden sich von ordinären Ersatzteilen insoweit, dass



▲ Vorstellung des 3D-Druckers in der Helmut-Schmidt Universität der Bundeswehr in Hamburg.

Foto: Bundeswehr/Torsten Kraatz

◀ Abb. 1: Additive Fertigung zur Steigerung des Autarkiegrades seegehender Einheiten.

Grafik: Sascha Hartig

sie nicht durch den Originalhersteller produziert wurden, jedoch vergleichbare Eigenschaften aufweisen. Hierbei besteht aber nicht die Einschränkung darauf, dass diese Interimsbauteile den ordinären Ersatzteilen in den physischen Eigenschaften unterliegen müssen. Sie sind lediglich als Ersatzteil durch den Hersteller oder den Anlagenbetreiber nicht als solches geprüft und zertifiziert oder vergleichbares. Untersuchungen und Versuche zu diesem Thema wurden von verschiedenen Nationen und Organisationen durchgeführt (siehe dazu 1-3). In der Studie von Boer (4) wird in einer Untersuchung der Königlichen Niederländischen Armee auf die Vorteile wie geringere Lieferzeiten, Vermeidung von Abfall, reduzierter Energieverbrauch sowie Optimierung der Lagerkapazitäten eingegangen. Ein Hauptaugenmerk liegt aber auch hier bei der Einsatzbereitschaft der genutzten Anlagen und Systeme. In der Studie von Westerweel

et al (5) zusammen mit der Niederländischen Armee wird dazu traditionelle Auftragsfertigung mit der Additiven Fertigung analytisch verglichen. Somit ist es möglich, in einer numerischen Analyse den Punkt zu ermitteln, bei dem die Additive Fertigung auch wirtschaftlicher ist. Wenn die Einsatzbereitschaft von Systemen und Anlagen eine übergeordnete Rolle spielt, treten diese finanziellen Aspekte in den Hintergrund.

Die Grundlagen zu den einzelnen Verfahren und deren Eigenschaften sind durch die Lehrbuchliteratur wie (6) oder (7) erfasst und umfassend dokumentiert. Jedoch stellen sich bei der Transition des Wissens in die Anwendung und somit zum Anwender Probleme dar, die durch die Grundlagenliteratur derzeit nicht vollständig abgedeckt werden. Diese Lücke führt dazu, dass ohne tiefgreifendes Verständnis für die verschiedenen Additiven Verfahren eine Kommunikationsproblematik entsteht. Durch den, gemeinhin genutzten Oberbegriff „3D-Druck“ wird eine sehr große Anzahl an Verfahren bezeichnet, der keinerlei Hintergrund zu der spezifischen Anwendung vermittelt. Verfahrensspezifische Prozessnamen wie Multi-Jet Modeling (MJM) oder Selektives Laserstrahlschmelzverfahren (SLM) werden wiederum vermehrt nur

LITERATURVERZEICHNIS

- (1) Ludwig, Ina, Loock J, Kosubek T, Steinmeier O, Franke C. Studie zur Bedarfsermittlung von Additiven Fertigungsmethoden mit Fokus auf die maritime Wirtschaft in der erweiterten Metropolregion Hamburg (2019).
- (2) Knabel J. 'Maersk will 3D-gedruckte Ersatzteile auf Schiffen drucken' (2014). <https://3druck.com/visionen-prognosen/maersk-will-3d-gedruckte-ersatzteile-auf-schiffen-drucken-5920749/>.
- (3) Made In Space. 'Additive Manufacturing Facility: 3D Printing The Future in Space' (2019). <https://madeinspace.us/blog/2019/03/20/2019-3-28-additive-manufacturing-facility-3d-printing-the-futurein-space/>.
- (4) Boer J den, Lambrechts W, Krikke H. Additive manufacturing in military and humanitarian missions: Advantages and challenges in the spare parts supply chain. *J. Clean. Prod.* 257, 120301 (2020).
- (5) Westerweel B, Basten RJJ, van Houtum G-J. Traditional or Additive Manufacturing? Assessing Component Design Options through Lifecycle Cost Analysis. *Eur. J. Oper. Res.* 270(2), 570–585 (2018).
- (6) Fritz AH (Ed.). *Fertigungstechnik*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2018).
- (7) Gebhardt A. *Additive Fertigungsverfahren: additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. (5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage Edition). Hanser, München (2016).

von Fachkräften innerhalb der damit betrauten Abteilung genutzt. Da dieses Wissen innerhalb einer Struktur, innerhalb einer Firma, Streitkraft oder ähnlichen Organisationen nicht außerhalb der involvierten Abteilung vorhanden ist, muss für eine abteilungsübergreifende Kommunikation eine vereinfachte Logik geschaffen werden, welche eine Kommunikation über den Einsatz Additiver Fertigungsmöglichkeiten ohne ein tieferes Verständnis für alle Prozesse ermöglicht. Normen wie DIN 8580 (8) dokumentieren die genormten Fachbegriffe und die zu nutzende Fachterminologie und EN ISO 17296 (9) bieten nachfolgend einen Überblick über die Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe sowie in Teil 3 (10) über die Haupteigenschaften. Nichtsdestotrotz bieten diese Normungen kein verallgemeinerndes Grundkonzept. Ein solches Konzept zur vereinfachten Einteilung der Verfahren kann bei der Integration in eine industrielle oder militärische Struktur genutzt werden, um mit allgemeinerem Verständnis die für die Organisationsstruktur spezifische Verteilung darzustellen und die Nutzung Additiver Verfahren zu ermöglichen.

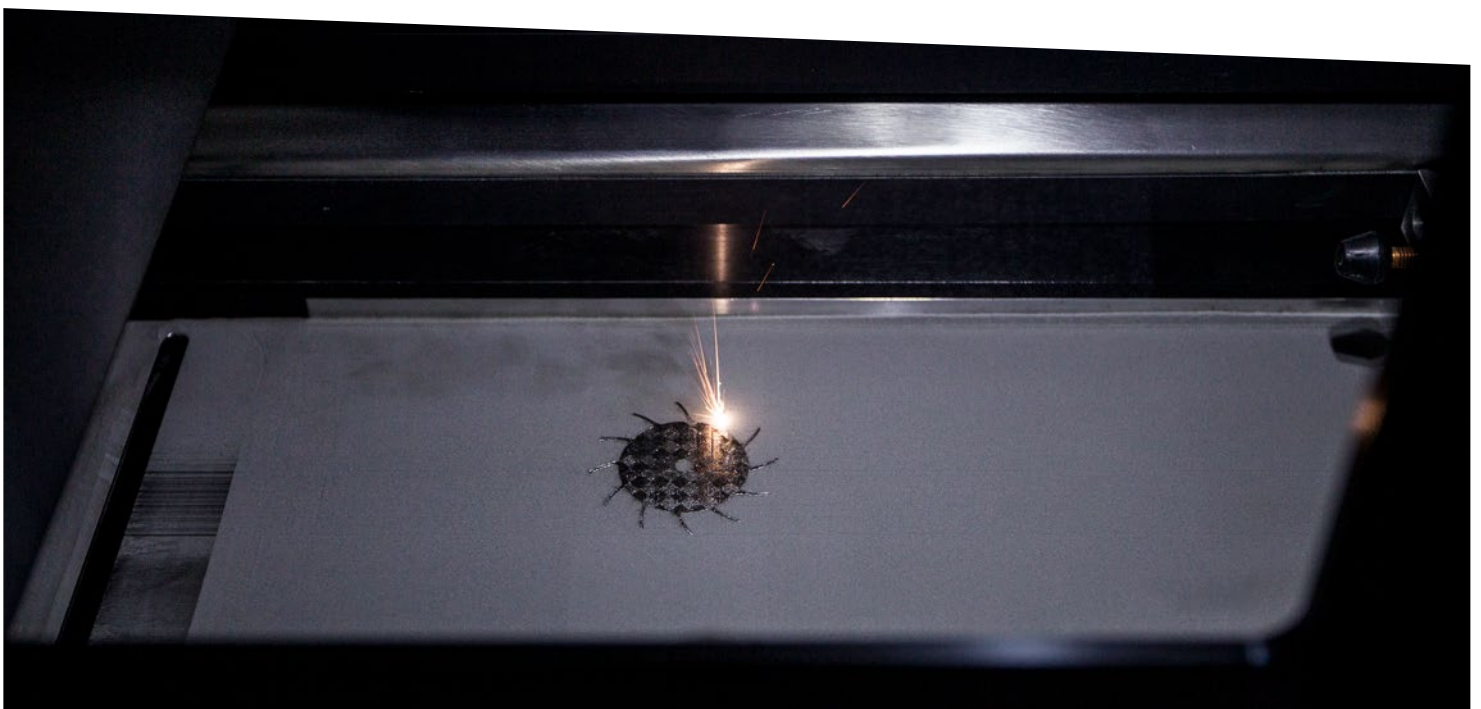
STAND DER TECHNIK

Eine Einteilung der Verfahren ist auf verschiedene Art und Weise möglich. Nach Gebhardt (7) können die Maschinen für die Additive Fertigung in Fabber (Digital Fabricator), Desktop Printer, Professional 3D-Drucker, Production 3D-Drucker und Industrial 3D-Drucker eingeteilt werden. Die Einteilung der Verfahren erfolgt in einem mehrstufigen System, so wird zuerst nach Aggregatzustand, wie Feststoff, Flüssigkeit und Gas, unterschieden. In der zweiten Stufe erfolgt die Zuordnung dann auf Grundlage der Erscheinung des Halbzeuges, wie z.B. Draht, Pulver, Folie, Paste. In der dritten Ebene wird unterschieden nach dem physikalischen Mechanismus der Schichtbildung, unter anderem Aufschmelzen und Erstarren, Verkleben durch Binder, etc. In der letzten Ebene wird die generische Bezeichnung des Additiven Fertigungsverfahrens genutzt.

Diese Aufteilung wurde in Anlehnung an die DIN 8580 erstellt. Die genannte Norm kategorisiert die Additiven Fertigungsverfahren in die Gruppe 1 Urformen ein und untergliedert diese in Freistrah-Bindemittelauftrag, Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung, Materialextrusion, Freistrah-Materialauftrag, Pulverbettbasiertes Schmelzen und badbasierte Photopolymerisation. Nach DIN EN ISO/ASTM 52900 (11) wird nach einstufigen und mehrstufigen Additiven Fertigungsverfahren mit nachfolgender Unterteilung nach Art des Werkstoffes unterschieden. Die Verfahren werden anschließend anhand des Verschmelzungszustandes, des Ausgangsmaterials, der Materialverteilung, des Additive Manufacturing – Grundprinzips und der Prozesskategorie unterschieden. Auch das System des Wohlers Report (9), welches sich an der ISO/ASTM 52900 ausrichtet, unterscheidet die Verfahren nach Prozess und Material, sodass die beschriebenen Neuerungen im Markt spezifisch nach diesen Kriterien unterschieden werden können.

KONZEPT FÜR FRAMEWORK ZUR INTEGRATION DER ADDITIVEN FERTIGUNG

Die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Einteilungsverfahren sind für eine Kommunikation auf Fachebene im Bereich Additiver Fertigung und daran anschließend wichtig für einen konsistenten Informationsaustausch. Aufgrund der großen Komplexitätsdiversität von einfachen Fused Filament Fabrication (FFF) Druckern im Hobby und Heimanwenderbereich bis zum hochkomplexen Mehrlaser Selektiven Laserschmelzverfahren im industriellen Bereich kommt es bei der Integration dieser Verfahren in einer Organisation zu Kommunikationsproblemen aufgrund des unterschiedlichen Wissenstandes. So kann in einer Organisationsstruktur wie der Deutschen Marine die Problematik aufkommen, dass an Bord im FFF-Verfahren Teile aus thermoplastischem Kunststoff hergestellt werden und im Bereich des zentralen 3D-Druckzentrums der Bundeswehr Teile wiederum aus thermoplastischem

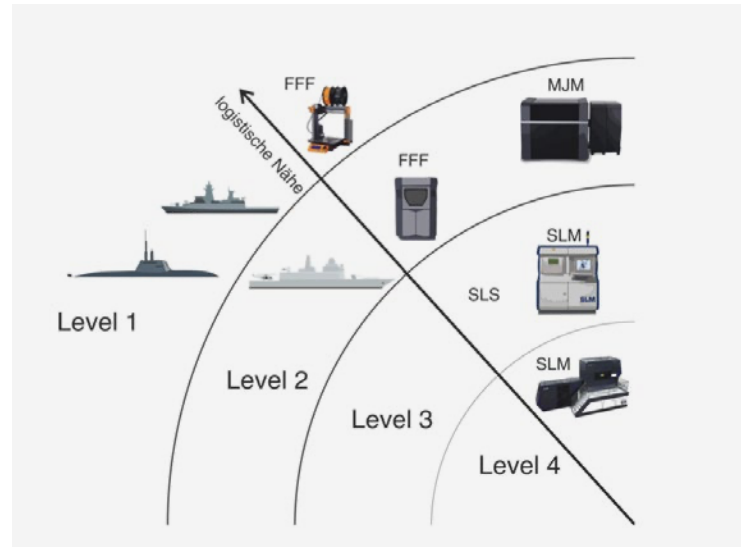


► Abb. 2: Levelsystem in einer prinzipiellen Skizze mit den Beispielverfahren Fused Filament Fabrication (FFF) mit einfachen Kunststoffen in Level 1 und höherwertigen Kunststoffen in Level 2 sowie Multi Jet Modeling (MJM), Selektiven Lasersintern (SLS), Selektives Laserstrahlschmelzen (SLM) in Level 3 und 4, wobei Verfahren im vierten Level zertifizierte Bauteile generieren.

Grafik: Sascha Hartig

◀ Vorstellung des 3D-Druckers in der Helmut-Schmidt-Universität der Bundeswehr in Hamburg.

Foto: Bundeswehr/Torsten Kraatz



Kunststoff gefertigt werden, jedoch mittels selektiven Lasersinterverfahren (SLS). Ohne das Fachwissen über die beiden Verfahren fehlt dem Verantwortlichen z.B. für Logistik oder Beschaffung die Möglichkeit, den Aufwand für die Herstellung abschätzen zu können. Weiterhin fehlt ihm die Information, ob ein gefordertes Bauteil im jeweiligen Verfahren herstellbar ist.

Um für diese Informationslücke eine Brücke zu schlagen, wird eine Einteilungslogik der Verfahren in ein Ebenenmodell vorgestellt. Die Ebenen sind hierbei als Level bezeichnet, welche von Level 1 bis Level 4 unterteilt werden. Ziel der Einteilung ist es, ausgehend von zeitweise autarken Systemen wie Booten und Schiffen, Raumstationen, etc. ein umhüllendes Unterstützungssystem zu errichten. Dieses soll eine bedarfsorientierte, schnelle Versorgung ermöglichen, welche durch Additive Fertigung unterstützt wird. Dabei sollen Additive Verfahren im System sowie in unmittelbarer und mittelbarer logistischer Nähe zu diesem etabliert werden. Durch ein solches Einteilungssystem kann bei ausgeschöpften Mitteln der Verfahren im System, z.B. an Bord eines Bootes, auf die nachgeordneten Ebenen zurückgegriffen werden, welche die vorläufige Bedarfsdeckung durch Additive Fertigung unmittelbar umsetzt. Die ggf. nötige Beschaffung des Ersatzteils bei Nichtverfügbarkeit wird eingeleitet, der Weiterbetrieb der Anlage durch das Interimsbauteil sichergestellt. Bei Eintreffen des herkömmlichen Ersatzteils werden die Teile ausgetauscht und der Originalzustand hergestellt. Abbildung 2 zeigt eine solche Einteilung. Boote sind dabei aufgrund ihrer Platzbeschränkung dem Level 1-System mit verringerter Komplexität und geringem Platzbedarf zugeordnet. Level 2 werden größere Einheiten wie Fregatten oder Einsatzgruppenversorger zugewiesen.

Die beiden dickeren Kreise zeigen die Systemgrenze von Booten auf Level 1 und Schiffen auf Level 2 im Vergleich zum Land (Level 3 und 4). Die Einordnung der Verfahren auf den Level 1 bis 4 ermöglicht es, Anwendungsfälle eines zu bestimmenden Komplexitätsgrades erfolgreich umzusetzen. Weiterhin kann ein Anwendungsfall eines niedrigeren Levels auch immer durch ein Verfahren eines höheren Levels durchgeführt werden. Dagegen kann ein Anwendungsfall mit einem hohen Komplexitätsgrad, welches z.B. mindestens ein Level

2-Verfahren voraussetzt, nicht durch ein Level 1-Verfahren ziel führend umgesetzt werden. Jedoch dient ein Level 1-Verfahren innerhalb einer Produktentwicklung dem Zweck der Validierung von Teilfunktionen des Anwendungsfalles und zur schnellen Prototypenentwicklung, um den Prozess zu beschleunigen. Weiterhin zeigt die Herstellung auf einem geringeren Level ggf. die Notwendigkeit der wiederholten Produktion des Teils auf einem höheren Level auf und verdeutlicht somit qualitative Unterschiede. Die Wahrung geforderter Qualitätsstandards sind jedoch entsprechend des geforderten Qualitätsmanagementplans, insbesondere für zertifizierungspflichtige Bauteile, unerlässlich.

Vertreter der unteren beiden Level ermöglichen dennoch zeitweise autark operierenden Systemen die eigenverantwortliche Herstellung von Teilen und somit eine von der Außenversorgung unabhängige Deckung des Bedarfs. Wenn komplexere Bauteile benötigt werden, helfen Level 3- und 4-Verfahren durch die Verkürzung der Lieferzeiten die logistische Lieferkette zu optimieren, und unterstützen hierdurch dabei, ein verfügbares Versorgungszeitfenster des Schiffes einzuhalten. Das Generieren auf konventionellen Beschaffungswegen nicht verfügbarer Teile führt zu Einhaltung von Versorgungszeitfenstern und zudem zu einem höheren Klarstand in der gesamten Flotte, da so der gesteuerte Ausbau von anderen Einheiten minimiert wird.

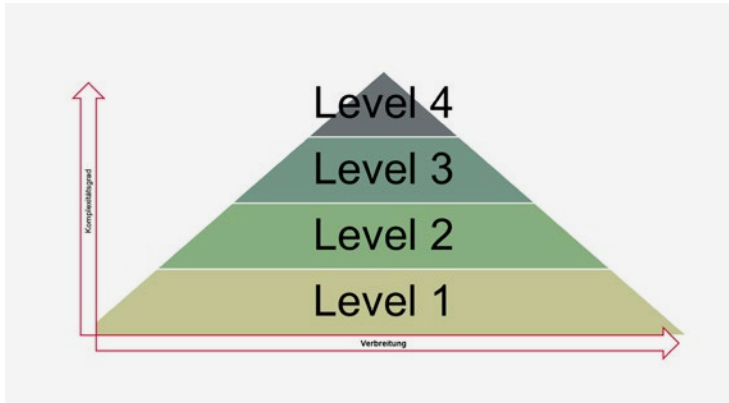
Die Einteilung der Verfahren in die jeweiligen Level erfolgt über Randbedingungen wie z. B. Bauraumgröße, Investitionsbedarf, Wartungsaufwand, Qualitätssicherungsmöglichkeiten, Zertifizierungsmöglichkeiten, Vorkenntnisse des Personals und Weitere.

Eine schematische Darstellung des Levelsystems zeigt Abbildung 3. Nach der Einteilungslogik entsteht hierdurch eine Pyramide. Auf der horizontalen Achse ist hierbei die Verbreitung

LITERATURVERZEICHNIS

- (8) DIN 8580 Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung, Beuth Verlag GmbH, (2019).
- (9) EN ISO 17296-2 Additive Fertigung – Grundlagen – Teil 2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe, Beuth Verlag GmbH.
- (10) EN ISO 17296-3 Additive Fertigung – Grundlagen – Teil 3: Haupteigenschaften und entsprechende Prüfverfahren (ISO 17296-3:2014), Beuth Verlag GmbH.
- (11) DIN EN ISO/ASTM 52900:2018-06, Additive Fertigung_ - Grundlagen_ - Terminologie (ISO/ASTM DIS_ 52900:2018); Deutsche und Englische Fassung prEN_ISO/ASTM 52900:2018, Beuth Verlag GmbH.

in Form der Anzahl an Systemen, die diese Stufe nutzen, aufgetragen. Auf der Vertikalen ist die Komplexität des Verfahrens aufgetragen. Mit steigender Komplexität wird es weniger Anlagen, Systeme und Anwendungsfälle in der Nutzung bei der Bundeswehr geben.



▲ Abb. 3: Pyramide zur Einteilung der Level, steigender Komplexitätsgrad in der vertikalen Ausrichtung und mengenmäßigen Verbreitung in der horizontalen Auftragung.
Grafik: Sascha Hartig

Additive Verfahren im Level 1 zeichnen sich unter anderem dadurch aus:

- dass sie eine geringe Komplexität im Bezug auf die Nutzung aufweisen,
- einen Platzbedarf von unter 1m x 1m x 1m aufweisen,
- die Bediener nur einen einwöchigen anlagenunspezifischen Lehrgang benötigen,
- auch auf kleinen Einheiten mit Bootsstruktur nutzbar sind.

Anlagen, die Level 2 zugeordnet werden, besitzen:

- eine gehobene Komplexität im Bezug auf die Nutzung,
- die Eigenschaft höherfeste Polymere verarbeiten zu können,
- Peripheriegeräte wie z.B. Waschstationen,
- höhere Anforderungen an die Ausbildung, welche zum Teil anlagenspezifische Kenntnisse vermittelt,
- hohe Anforderung an den Aufstellort in Form von Platzbedarf, Energieversorgung oder Belüftung.

Level 1 und 2 sind mit ihren Eigenschaften so konzipiert, dass eine Nutzung an Bord von Booten und Schiffen der Deutschen Marine möglich ist. Hierbei sind die Aufstellungsvoraussetzungen für eine dauerhafte Integration in den aktuell geltenden Vorschriften noch nicht berücksichtigt.

Verfahren in Level 3 sind gekennzeichnet durch:

- ein erhöhtes Sicherheitsrisiko für das Bedienpersonal aufgrund des Ausgangsmaterials, wie z.B. Pulververfahren,
- hohe Anforderungen an Peripheriegeräte für die Vor- und Nachbereitung des Prozesses, wie z.B. CNC-Fräsen, Öfen, Entbinderstationen und Weitere,
- beträchtlicher Aufwand bei der zum Teil anlagenspezifischen Schulung des Bedienpersonals und
- erheblicher Platzbedarf sowie Voraussetzungen bei den Aufstellbedingungen, wie z. B. Fundament, Schutzgasspeicher.

Die Verfahren der Ebene „Level 4“ mit der höchsten Komplexität unterscheiden sich dazu noch im:

- integrierten oder abschließenden qualitätsgesicherten Prüfprozess, sodass eine Herstellung zertifizierter Bauteile möglich ist,
- eine mögliche Kleinserienfertigung,
- einem nochmals erhöhten Bedarf im Bezug auf Investitionskosten, Aufstellort und -bedingungen, Bedienpersonal, welches eine industrieäquivalente, teils anlagenspezifische, Ausbildung vorweist sowie einen Zertifizierungsprozess durchlaufen hat.

Die genannten Kriterien für die Einteilung sind an dieser Stelle nicht vollständig und dienen vielmehr als erster Anhaltspunkt wie eine Einteilung aufgebaut werden kann. Zukünftig gilt es nun, diese Kriterien innerhalb einer Organisationsstruktur zu bestimmen und zu etablieren.

Durch das im obigen Beispiel dargestellte Levelsystem kann z.B. der Logistiker verstehen, dass ein Bauteil, welches kurzfristig beschafft werden soll, vom gegebenen Komplexitätsgrad ein Level 2-Verfahren benötigt und gegebenenfalls auch durch ein Level 3-Verfahren gefertigt werden könnte. Somit ist eine Herstellung nur auf großen Einheiten wie Fregatten oder Einsatzgruppenversorgern entsprechend der Ausrüstungsanforderungen auf Level 2 möglich. Alternativ könnte das Bauteil im Additiven Fertigungszentrum der Bundeswehr oder der Industrie mit Level 3-Verfahren hergestellt werden.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Gruppe der Additiven Verfahren umfasst eine Vielzahl von verschiedenen Fertigungsverfahren. Dabei führt eine Nutzung des umgangssprachlichen Begriffs 3D-Druck zu Schwierigkeiten bei einer notwendigen Kommunikation. Das vorgestellte Levelsystem schafft hier Abhilfe und vermindert Informationsverlust und Verständnisprobleme. Da die nach Stand der Technik vorgestellten Normen ebenso ein sehr spezifisches Wissen voraussetzen, muss eine Brücke zur Vereinheitlichung der Kommunikation geschlagen werden, sodass die Integration der neuen Fertigungstechnologie besser forciert werden kann. Die dazu vorgestellte Logik teilt die Verfahren organisationspezifisch in vier Ebenen ein. Mit den ersten beiden Leveln werden die zeitweisen autark operierenden Systeme selbst zur Teilegenerierung befähigt, um Bedarfe kurzzeitig zu decken, bis die Regelversorgung möglich ist. Mit den beiden nachgeordneten Leveln wird die logistische Versorgung im Bereich der Lieferzeit und Verfügbarkeit optimiert.

Ein Einteilungskonzept kann die angesprochenen Kommunikationsprobleme minimieren und so zu einer friktionsärmeren Einführung der Additiven Fertigungstechnologien führen. Hierbei wurde der grundsätzliche Nutzen Additiver Fertigung in verschiedenen Einsatz- und Übungsszenarien bereits von verschiedenen Nationen gezeigt und als positiv bewertet. In einem nächsten Schritt kann nun eine geordnete Einführung und Integration der Technologie in die Truppe anhand des beschriebenen Levelkonzepts erfolgen.