



Berichte
des Deutschen Zentrums
für Schienenverkehrsforschung

Bericht 28 (2022)

3D-Druck als Mittel der Bauteilbeschaffung

Analyse der Einsatzbereitschaft, des Potenzials und der Grenzen additiver
Fertigungsverfahren in der Schienenverkehrsindustrie
(Zusammenfassung)

Impressum

HERAUSGEBER

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

August-Bebel-Straße 10
01219 Dresden

www.dzsf.bund.de

DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

HIWW Hamburger Institut für Wertschöpfungssystematik und Wissensmanagement UG (haftungsbeschränkt)
Silker Weiche 5
21465 Reinbek

AUTOREN

Patrick P. Grames
Lennart M. Hildebrandt
Marc Fette
Pascal Krenz
Manuel Moritz
Dr.-Ing. Tobias Redlich
Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg

ABSCHLUSS DER STUDIE

Februar 2020

REDAKTION

DZSF

Philipp Streek, Forschungsbereich Umwelt und nachhaltige Mobilität

PUBLIKATION ALS PDF

<https://www.dzsf.bund.de/Forschungsergebnisse/Forschungsberichte>

ISSN 2629-7973

[doi: 10.48755/dzsf.220016.02](https://doi.org/10.48755/dzsf.220016.02)

Dresden, September 2022

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	3
1 Stand der Technik aktueller 3D-Druck-Verfahren	4
2 Verfahren zur Überprüfung der Bauteile	5
3 Szenarioanalyse zur Entwicklung der zukünftigen Einsatzmöglichkeiten additiver Fertigungsverfahren	8
4 Identifikation von Anpassungsbedarfen und Entwicklung von Handlungs- empfehlungen	9
Fazit und Ausblick	13
Abbildungsverzeichnis.....	13
Tabellenverzeichnis.....	13

Einleitung

Schienenfahrzeuge befinden sich mitunter über einen sehr langen Zeitraum im Einsatz. Dieser Zeitraum kann die Dauer der Herstellung von Ersatzteilen für einzelne Fahrzeuge überschreiten, so dass die Ersatzteilversorgung nicht mehr oder nicht kostengünstig sichergestellt werden kann. Um diesem Zustand zukünftig entgegen zu wirken, wird nach alternativen Fertigungsverfahren gesucht, mit denen schnell und kostengünstig Ersatzbauteile in kleiner Losgröße hergestellt werden können. Die Verfahren des 3D-Drucks bzw. der additiven Fertigung könnten hierfür das Mittel der Wahl sein. Bereits heute sind additiv gefertigte Bauteile im Schienenverkehr im Einsatz. Dabei handelt es sich jedoch fast ausschließlich um Bauteile, die keine Sicherheitsrelevanz besitzen oder keine sicherheitsrelevanten Funktionen übernehmen. Gründe hierfür liegen beispielsweise in der noch unzureichend erforschten Prozesssicherheit in der Fertigung sowie bei einer noch nicht zufriedenstellenden Reproduzierbarkeit der Endgeometrie eines 3D-Bauteils. Um das zukünftige Potenzial der additiven Fertigung im Schienenverkehr abzuschätzen hat das Deutsche Zentrum für Schienenforschung eine Studie initiiert, deren Kernaussagen im vorliegenden Kurzbericht in vier Abschnitten zusammenfassend dargestellt sind.

Das Ziel der Studie war es, den Stand von Wissenschaft und Technik sowie gängige additiven Fertigungsverfahren zu beschreiben (Abschnitt 1), geeignete Verfahren zur Qualitätskontrolle vorzuschlagen (Abschnitt 2) und absehbare Trends sowie Unterschiede zwischen traditionell und additiv gefertigten Bauteilen zu erfassen (Abschnitt 3). Dabei lagen die Schienenverkehrsindustrie und die dortige Anwendung der Verfahren im Fokus der Betrachtung. Mit Hilfe dieser Verfahren zur Qualitätskontrolle sollen typische fertigungstechnische Fehlerquellen erkannt werden, wodurch der weitere Einsatz der Technologien ermöglicht werden soll. Zusätzlich wurden bestehende Regelwerke auf Hemmnisse für die Verbreitung von additiver Fertigung im Schienenverkehr untersucht und Handlungsempfehlungen herausgearbeitet, die den weiteren Einsatz befördern sollen (Abschnitt 4). Der Kurzbericht endet mit einem Fazit und einem Ausblick hinsichtlich der additiven Fertigung als Mittel zur Bauteilbeschaffung.

1 Stand der Technik aktueller 3D-Druck-Verfahren

Bevor inhaltliche Fragen in der Studie beantwortet wurden, sind im ersten Schritt zu Beantwortung der Frage, ob sich die additive Fertigung als Mittel zur Bauteilbeschaffung im Kontext des Schienenverkehrs eignet, zunächst die aktuell gängigen Fertigungsverfahren identifiziert und der jeweilige Stand der Literatur dargestellt worden. Hierfür wurde eine Technologiematrix (vgl. Abbildung 1) der additiven Fertigung mit typischen damit verbundenen Nutzungsfeldern und dazugehörigen Fertigungsverfahren erstellt.

Die Leitfrage des Abschnitts lautete: „Welche 3D-Druckverfahren werden industriell in welchen Nutzungsfeldern eingesetzt?“

2018-I-6-1217, Bericht 2 (2019) 3D-Druck als Mittel zur Bauteilgewinnung		Auftraggeber: Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung			
Einordnung der Verfahren nach phys. Wirkprinzip	Polymerisation	Polymerisation/ Schmelzen & Verfestigen	Verkleben & Verfestigen	Schmelzen & Verfestigen	
Name des additiven Verfahrens	Stereo-lithographie	Multi-Jet Modeling	Binder-Jetting	Fused Deposition Modeling	(Selektives) Laser-Sintern
Abkürzung	SLA	MJM (auch MJF)	BJ	FDM (auch FLM, FFF)	SLS
Werkstoffe					
Kunststoff	♦	♦	♦	♦	♦
Metall bzw. Legierungen			♦		♦
Keramik	♦		♦		♦
Sand			♦		♦
Papier					
Werkstoffbeispiele	Harze	UV-härtende Kunststoffe	Gipspulver, Cyanacrylat, Polyol + Isocyanat	PC, PLA, ABS, NYLON, PEEK, PEI	alle sinterbaren Materialien
Relative Bewertung					
mechan. Eigenschaften 1)	-	-	--	+	++
therm. Eigenschaften 1)	-	-	-	++	++
chem. Eigenschaften 1)	o	--	--	++	++
Post Processing durchführbar	-	-	o	o	o
Genauigkeit	++	++	o	-	+
Oberflächenqualität	++	++	o	-	o
Bearbeitbarkeit	o	+	o	o	+
Werkstoffauswahl	-	-	+	+	+
Größtmögl. Bauraumgröße	+	o	--	++	+
Gesamtverfahrenskosten	-	-	+	+	-
Technische Spezifikationen					
Multimaterialfähig?	nein	ja	nein	ja	begrenzt
Stützstrukturen notwendig? 2)	ja	Ja	nein	ja	nein
Bauteilisotropie 3)	isotrop	gering anisotrop	isotrop	stark anisotrop	anisotrop

Abbildung 1: Technologiematrix zum Vergleich additiver Verfahren (Ausschnitt)

Insgesamt sind die folgenden zehn industriellen Verfahren analysiert und bewertet worden:

1. Stereolithographie (SLA)
2. Multi-Jet Modeling (MJM)
3. Binder-Jetting (BJ)
4. Fused Deposition Modeling (FDM)
5. Selektives Lasersintern (SLS)
6. Laserstrahlschmelzen (LBM)
7. Elektronen-Strahl-Schmelzen (EBM)
8. Directed Energy Deposition (DED)
9. Kaltgas-Spritzen (CS)
10. Schicht-Laminat-Verfahren (LLM)

Die identifizierten Verfahren unterscheiden sich in den zu nutzenden Ausgangsmaterialien, im eigentlichen Fertigungsprozess und in der Bewertung der Charakteristika der gefertigten Bauteile. Im Wesentlichen wird zwischen metallischen und nicht-metallischen (vor allem Polymere) Ausgangswerkstoffen unterschieden. Die Verfahren, die zwar alle auf dem schichtweisen Aufbau von Strukturen basieren, variieren dahingehend, dass beispielsweise das Fused Deposition Modeling (FDM) als ein Aufschmelzverfahren eines drahtförmigen Kunststoffes durch einen Extruder geschieht. Während das Laserstrahlschmelzen (LBM) als ein Aufschmelzverfahren eines Metallpulvers durch einen Laserstrahl verstanden wird.

Neben dem aktuellen Stand der Wissenschaft bezüglich der Verfahren wurde auch auf technische und verfahrensspezifische Aspekte, wie beispielsweise mechanische und thermische Eigenschaften oder Oberflächenqualität sowie die Gesamtverfahrenskosten Bezug genommen. Alle Verfahren haben hier im Wesentlichen gemein, dass sie durch den beschriebenen schichtweisen Aufbau eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Anisotropie, also richtungsabhängige mechanische Eigenschaften aufweisen.

Außerdem sind die einzelnen Verfahren nach den zu verwendenden Materialien und nach der Häufigkeit der Nutzung unterteilt, dargestellt. Sehr gute mechanische, thermische und chemische Eigenschaften können hier insbesondere beim SLS, LBM, EBM, DED und CS gefunden werden. Ebenfalls gut bis sehr gut ist die anschließende Bearbeitbarkeit des Bauteils nach einem dieser Fertigungsprozesse. Hervorragende Oberflächengenauigkeiten sind dagegen insbesondere bei der SLA und dem MJM zu finden, die im Gegensatz dazu bei anderen Bewertungsgrößen nur durchschnittlich oder sogar schlecht bis sehr schlecht zu bewerten sind. Als Ergebnis ist neben der textuellen Beschreibung der einzelnen Verfahren eine Technologiematrix entwickelt worden, mit deren Hilfe die wesentlichen spezifischen Verfahrenseigenschaften aller zehn betrachteten additiven Fertigungsverfahren verglichen werden können (vgl. Abbildung 1).

2 Verfahren zur Überprüfung der Bauteile

Aufbauend auf dem Stand der Technik erfolgte die Identifikation von Anforderungen an Bauteile im Schienenverkehr, die Beschreibung und das Aufzeigen von Methoden zur Bauteilüberwachung und eine Zuordnung der Methoden zu den einzelnen Fertigungsverfahren. Abschließend fand eine Bewertung des Einsatzes von additiv gefertigten Bauteilen im Schienenverkehr statt.

Die Leitfrage lautete: **„Was sind die (kontextsensitiven) Schwachstellen additiver Verfahren und wie erfolgt die Bauteilüberwachung?“**

Für die Identifikation von Anforderungen im Schienenverkehr wurden zum einen Anforderungen an im Schienenverkehr eingesetzte Bauteile durch entsprechende Normen und Standards herausgearbeitet und durch unterschiedliche Bauteilkategorien beschrieben, die die einzelnen Verfahren abbilden müssen, damit sie im Schienenverkehr eingesetzt werden können und dürfen.

Als Anforderungen für einen vereinfachten Zulassungsprozess gilt der Grundsatz der gleichen „Form-Fit-Function“ eines Bauteils, welches ein anderes, aber gleichartiges Bauteil ersetzen soll. Dies erschwert jedoch die Nutzung von Potenzialen der additiven Fertigung (z. B. Topologieoptimierung), was sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit der gesamten Prozesskette auswirkt. Nach aktuellem Stand ist diese Anforderung jedoch unabdingbar.

Generelle und allgemeine Anforderungen stellen die einzelnen TSIs (hier TSI WAG, TSI LOC&PAS, TSI SRT) an die Sicherheit, an die Zuverlässigkeit, an die Gesundheit, an den Umweltschutz und an die tech-

nische Kompatibilität, welche abgesehen von der Einführung von innovativen Lösungen eingehalten werden müssen. Hierzu zählt auch Beständigkeit gegen unterschiedliche Umwelteinflüsse. Keine der dort genannten Anforderungen stellt ein Ausschlusskriterium für die additive Fertigung dar.

Individuelle Anforderungen stellen die Schweißnormen des Schienenverkehrs, worunter insbesondere die metallische additive Fertigung fällt. Die Verfahren sind dem Laserauftragschweißen und dem Mehrlagenschweißen zuzuordnen, welche wiederum im Bereich des Schienenverkehrs nicht gemäß Normen zugelassen sind. Auflösen lässt sich dieser Konflikt aber durch direkte Abstimmung zwischen Kunde und Hersteller, weshalb die Verfahren regelmäßig doch zum Einsatz kommen. Ebenfalls sind individuelle Anforderungen des Brandschutzes durch additiv gefertigte Bauteile zu erfüllen. Diese sind insbesondere im metallischen Bereich, aber auch im FDM und dem SLS durch Hochleistungsthermoplaste erfüllbar.

Neben der Identifikation von Anforderungen sind Bauteilklassen entwickelt worden, die bei der Anwendung des in der Studie dargestellten Klassifizierungsprozesses zukünftig bei der Einstufung eines Bauteils helfen und dem Nutzer Hinweise auf die Art und Intensität der damit verbundenen Prüfverfahren bietet.

Auf den entwickelten Bauteilkategorien aufbauend sind verschiedene Prüfverfahren für additiv gefertigte Bauteile identifiziert worden, die miteinander korrelieren. Zusätzlich sind Fähigkeitslücken in den aktuellen Prüfverfahren aufgezeigt worden. Die Möglichkeit des Einsatzes individueller Prüfverfahren für einzelne Fertigungsverfahren ist in einer Technologiematrix (vgl. Anhang) dargestellt.

Aus der Zuordnung der Prüfmethode zu einzelnen Fertigungsverfahren (vgl. Tabelle 1, Tabelle 2) geht dabei hervor, dass zerstörende, funktionsprüfende und optische Prüfverfahren (Sichtprüfung) bei allen additiven Fertigungsverfahren angewendet werden können. Insbesondere für den Grundsatz des „Form-Fit-Funktion“ ist hierdurch ein breites Set an Prüfmethode gegeben, um diese Anforderung sicherzustellen. Bei der Erstellung von Prüfkörpern ist jedoch zu beachten, dass diese tatsächlich auch Gefüge- und Materialeigenschaften eines zu prüfenden Bauteils repräsentieren, weshalb hierfür beispielsweise die Aufbaustrategie berücksichtigt werden muss

TABELLE 1: PRÜFMETHODEN FÜR NICHTMETALLISCHE ADDITIVE FERTIGUNGSVERFAHREN

Prüfmethode	Stereo-litographie	Multi-Jet Modeling	Binder-Jetting	Fused Deposition Modeling	(Selektives) Laser-Sintern
Zerstörende Prüfverfahren	x	x	x	x	x
Sichtprüfung	x	x	x	x	x
Online-Prozessüberwachung		x			
Funktionsprüfung	x	x	x	x	x

x *Das Prüfverfahren ist für jeweiliges additives Fertigungsverfahren geeignet und anwendbar*

TABELLE 2: PRÜFMETHODEN FÜR METALLISCHE UND WEITERE ADDITIVE FERTIGUNGSVERFAHREN

Prüfmethode	Laser-Strahl-Schmelzen	Elektronen-Strahl-Schmelzen	Directed Energy Deposition	Kaltgas-Spritzen	Schicht-Laminat-Verfahren
Zerstörende Prüfverfahren	x	x	x	x	x
Sichtprüfung	x	x	x	x	x
Online-Prozessüberwachung	x	x	x	x	
Funktionsprüfung	x	x	x	x	x
Computertomographie	x	x	x		
Farbeindringverfahren	x	x	x		
Magnetpulververfahren	x	x	x		
Ultraschall	x	x	x		
Massenspektrometrie	x	x	x	x	
Wirbelstromtechnik	x	x	x		
Röntgenprüfung	x	x	x		

x Das Prüfverfahren ist für jeweiliges additives Fertigungsverfahren geeignet und anwendbar

Im metallischen Bereich liegt die Anzahl an möglichen Prüfverfahren noch weit höher. Jedoch ist die Zuordnung oder Einschränkung einzelner Prüfmethoden insbesondere in einem frühen Entwicklungsstadium eines neuen Fertigungsverfahrens oder eines neuen Bauteils nicht empfehlenswert, um das Erfüllen der jeweiligen geometrischen und technischen Anforderungen auch vollständig sicherzustellen. Die Prüfkosten steigen dadurch jedoch erheblich. Dies wird auch dadurch beeinflusst, dass bis zum Erreichen einer spezifischen Prozessqualifikation weiterhin mit einer 100 %-Prüfung an additiv gefertigten, sicherheitsrelevanten Bauteilen zu kalkulieren ist.

Neben der aktuell noch zu entwickelnden und industriell zu implementierenden Online-Prozessüberwachung ist auch der Umgang mit dynamischen Prüfverfahren bei additiven Fertigungsverfahren noch nicht ausreichend verbreitet. Hier wird empfohlen, das Wissen des Schienenverkehrs für Prüfprozesse einzubringen, um auch solche, für den Schienenverkehr wichtige Prüfungen, zu ermöglichen. Die Lebensdauer von schwingungsbelasteten Bauteilen kann durch Nachbehandlungsprozesse erhöht werden.

Durch die noch relative Neuartigkeit der Technologien existieren noch rechtliche Handlungsunsicherheiten im Umgang mit der additiven Fertigung. Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es noch keine bzw. nur wenige Normen oder Standards bezüglich Produkthaftung und Muster-/Datenschutz/IP-Recht. Hierzu werden aber derzeit neue Dokumente veröffentlicht.

3 Szenarioanalyse zur Entwicklung der zukünftigen Einsatzmöglichkeiten additiver Fertigungsverfahren

Anknüpfend an die vorangegangenen Ergebnisse ist im nächsten Schritt eine integrative Bewertung des Einflusses der Entwicklung der additiven Fertigung von Bauteilen auf deren Einsatz und Nutzung im Schienenverkehr durchgeführt worden.

Die Leitfrage in diesem Studienabschnitt lautete: „**Welche technologischen Trends gibt es und inwiefern wirken sich diese auf den Anwendungskontext aus?**“

Ein besonderer Fokus lag dabei auf der potenziellen Zukunftsfähigkeit der Verfahren, die sich durch eine Betrachtung der derzeitigen Entwicklungstendenzen der einzelnen Verfahren abschätzen lässt. Hierfür wurde einerseits eine quantitative Analyse nach der Häufigkeit der veröffentlichten wissenschaftlichen Artikel sowie Patente je Verfahren durchgeführt. Andererseits wurden Teile dieser Quellen ebenfalls inhaltlich ausgewertet, um Rückschlüsse auf die wahrscheinlichsten Entwicklungsrichtungen der Verfahren zu erhalten. Die detaillierten Auswertungen hierzu sind in der eigentlichen Studie und in der Technologiematrix aufgeführt.

Zusammenfassend ist zur Gewinnung kunststoffbasierter Bauteile festgestellt worden, dass die Verfahren „Selektives Lasersintern (SLS)“ und „Fused Deposition Modeling (FDM)“ die vielversprechendsten Aussichten haben, sich in der Industrie breit zu etablieren. Das SLS überzeugt durch Bauteile, die vorteilhafte Bauteilcharakteristika, wie beispielsweise geringe Anisotropie, aufweisen. Fused Deposition Modeling liegt, neben ebenfalls guten Bauteilcharakteristika, vor allem dadurch im Fokus, dass sich durch die Kombination diverser Ausgangsmaterialien Bauteile fertigen lassen, die überdurchschnittliche Brandschutz Eigenschaften besitzen – ein für den Schienenverkehr hochrelevanter Vorteil.

Im Bereich der metallischen, additiven Fertigung zeichnet sich eine zukünftig prägende Rolle der Verfahren „Laserstrahlschmelzen (LBM/SLM)“ und „Laserauftragschweißen (DED/DMD)“ ab. Das LBM überzeugt dabei durch seine Stärken im filigranen Arbeitsbereich und damit einer Genauigkeit und Möglichkeit zur Erzeugung von Bauteilen in guten Toleranzbereichen, die der konventionellen Fertigung, im metallischen Bereich, am nächsten kommen. Die damit einhergehenden noch eher kleinen Bauräume, in denen dieses Verfahren arbeitet, hemmen die Entwicklungsprognose nur leicht. Diesbezüglich sticht das DED hervor, da es gänzlich ohne klassischen Bauraum auskommt und „direkt am freien Werkstück“ angewendet wird. Daher eignet sich das Verfahren ideal für Reparatur- und Ausbesserungsarbeiten an großen und sehr großen Werkstücken. Das DED kehrt die Vor- und Nachteile des LBM um und kombiniert hohe Auftragsraten und etwas schlechterer Oberflächenbeschaffenheit und damit höherem Nacharbeitsaufwand. Die Tatsache, dass sich DED aber sogar in etablierte Fräszentren integrieren lässt und damit ohne Umrüsten an einem gefrästen Werkstück eingesetzt werden kann, eröffnet vielversprechende Möglichkeiten – für Arbeitsbereiche, in denen dann die Bindung an einen Arbeitsraum wieder tolerierbar ist.

Im Bereich der Qualitätssicherung sowie bei Prüfverfahren und Normierung steht die additive Fertigung den konventionellen Verfahren noch nach. Derzeit fehlen auditierte und verlässliche Qualifikationsketten für Endprodukte, woran in der Industrie derzeit zwar gearbeitet wird, deren weitverbreitete Einführung aber frühestens mittelfristig erfolgen wird. Während die Vorteile der additiven Fertigung offensichtlich in der zügigen Herstellung beispielsweise von Demonstratoren liegen, ist die formale Herausforderung diese als zertifiziertes Serienprodukt zu vertreiben, daher weit größer. Derzeit wird noch häufig der Kunstgriff unternommen, Bauteile als Prototypen zu bezeichnen und damit jegliche Haftungsansprüche an den Nutzer abzutreten. Ein erster Schritt hin zu etabliertem Qualitätsmanagement kann die Etablierung von Online-Prozessüberwachung sein. So können qualifizierte Wertschöpfungsketten geschaffen werden und die zeit- und kostenaufwendige (zerstörungsfreie oder zerstörende) Prüfung der Bauteile kann herabskaliert werden. Dieser Schritt ist ein notwendiger, um die Wettbewerbsfähigkeit additiver Verfahren zu erhöhen und mittelfristig von deren technischen Vorteilen profitieren zu können.

Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass additive Fertigungsverfahren sehr interessante Möglichkeiten für die Industrie liefern. Dabei muss aber immer auch berücksichtigt werden, dass konventionelle Fräs-, Dreh-, Schweiß- und Gießtechnik umfassend erprobte und etablierte Verfahren hervorgebracht hat, die teilweise auf Jahrzehnte und Jahrhunderte industrieller Anwendung zurückreichen. Die additive Fertigung wird den konventionellen Verfahren aber weiterhin in den kleinen Bereichen der Halbzeug- und Prototypenherstellung Konkurrenz machen. Dort ist es durch additive Fertigung bereits heute möglich technische (z. B. Funktionsintegration, Gießformfreiheit usw.) und wirtschaftliche Vorteile (Effizienz, iterative Produktentwicklung und -herstellung usw.) gegenüber konventionellen Verfahren zu erzielen. Derzeit ist aber nicht davon auszugehen, dass die additive Fertigung die etablierten Verfahren gänzlich und für alle Bereiche der Fertigung übertreffen wird.

Für Vertreter der Industrie besteht derzeit noch die Chance Verfahren soweit zu integrieren und damit zu etablieren, dass diese hierdurch zu einer Standardisierung in großem Maßstab beitragen könnten. Es sollten jetzt eigene Potenziale genau analysiert werden und dann eine Schwerpunktsetzung auf wenige, vielversprechende Verfahren gefasst werden. So kann es erreicht werden einen eigenen Business Case zu generieren und damit die Skalierbarkeit und Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens zu erhöhen. Aus technischer Sicht bieten die oben genannten vier Verfahren hierzu die vielversprechendsten Entwicklungsszenarien.

4 Identifikation von Anpassungsbedarfen und Entwicklung von Handlungsempfehlungen

Im letzten Schritt wurden zur Beantwortung der Frage, ob sich die additive Fertigung als Mittel zur Bauteilbeschaffung im Kontext des Schienenverkehrs eignet, vorhandene Regelwerke auf Hemmnisse für die Etablierung der additiven Fertigung im Schienenverkehr geprüft und Handlungsempfehlungen, um diese Einführung zu befördern, entwickelt. Neben den relevanten Regelwerken sind zusätzlich weitere Einflussfaktoren identifiziert worden, für die ebenfalls Handlungsempfehlungen entwickelt wurden.

Die Leitfrage lautete: „**Welche Regelwerke sind von Relevanz bzgl. der Einführung des 3D-Drucks zur Ersatzteilbeschaffung und wo besteht konkreter Anpassungsbedarf?**“

Als Ergebnis der Analyse und der Entwicklung der Handlungsempfehlungen wurde festgestellt, dass das aktuelle Regelwerk im Schienenverkehr die Einführung additiv gefertigter und sicherheitsrelevanter Komponenten im Wesentlichen nicht verhindert, aber durch die erst seit einigen Jahren vorherrschende Popularität des Verfahrens auch nicht strukturiert und regelt.

Anpassungsbedarf im Regelwerk gibt es hinsichtlich nicht anwendbarer Berechnungsgrundlagen und der Vorgabe der selben Funktions- und Leistungsmerkmale von Austauschbauteilen, wodurch wesentliche Potenziale der Technologie (z. B. Topologieoptimierung, Leichtbau) nicht nutzbar sind. Außerdem sind das Laserauftragschweißen und das Mehrlagenschweißen, nicht für den Schienenverkehr zugelassen, sondern es muss eine anlassbezogene Abstimmung zwischen Kunde und Hersteller erfolgen. Gerade aber diese beiden Verfahren fassen die metallische additive Fertigung am besten zusammen und könnten als Normengrundlage für sie fungieren. Der zentrale identifizierte Anpassungsbedarf kann in Tabelle 3 eingesehen werden.

TABELLE 3: IDENTIFIZIERTER ANPASSUNGSBEDARF IM REGELWERK MIT LÖSUNGSVORSCHLÄGEN

Zusammenfassung des identifizierten Anpassungsbedarfs	Lösungsvorschlag
Durch nicht anwendbare Berechnungsgrundlagen und Vorgabe der selben Funktions- und Leistungsmerkmale (z. B. VO (EU) Nr. 321/2013, RIL 2008/57/EG) bisher nur Austausch und vereinfachte Neuzulassung über gleiche Form, Passung und Funktion eines sicherheitsrelevanten, additiv gefertigten Bauteils möglich, wodurch wesentliche Potenziale der Technologie (z. B. Topologieoptimierung, Leichtbau) nicht nutzbar sind.	Berechnungsgrundlagen (insbesondere die FKM-Richtlinie) um Eigenschaften der additiven Fertigung (z. B. Anisotropie) erweitern oder neue Berechnungsmodelle entwickeln und für additive Fertigung Vorgabe derselben Funktions- und Leistungsmerkmale anpassen, um Potenzialnutzung zu ermöglichen.
Laserauftragschweißen und Mehrlagenschweißen, welche am meisten die additive Fertigung beschreiben, sind noch nicht für den Schienenverkehr zugelassen.	Schweißverfahren dürfen grundsätzlich zwischen Kunde und Hersteller abgestimmt werden.
Arbeitsproben im Sinne der DIN EN 15085-4 und DIN EN ISO 15613 als Schweißprüfung durch Schweißfacharbeiter mittels additiver Fertigung nicht möglich oder nicht praktikabel.	Normen müssen um additiv gefertigte Prüfkörper und das Wegfallen eines Schweißfacharbeiters in der additiven Fertigung erweitert werden.
Prüfung von Schweißzeugnissen nach DIN EN 15085-5 durch Einzelnahtbetrachtung für additive Fertigung nicht anwendbar.	Erweiterung der Norm um Prüfmethode der additiven Fertigung oder Verweis auf EN ISO 17296-3 und den VDI 3405 Blatt 1 und 2.
Im Regelwerk oder in den einzelnen Unternehmen beschriebene oder verwendete Instandhaltungs- und Arbeitspläne sehen den Einsatz der additiven Fertigung nicht vor.	Ausrüstungsgegenstände und Werkzeuge müssen um Eigenschaften und Verfahren der additiven Fertigung erweitert werden.
Ausschluss von Schweißarbeiten an einigen Bauteilen durch Liste nach der DIN 27201-6.	Additive Fertigungsverfahren bei genannten Bauteilen nicht praktikabel, Ausschluss akzeptieren.

Die Wirtschaftlichkeit der additiven Fertigungsverfahren ist ein weiterer Einflussfaktor. Kleine und mittelständische Unternehmen haben nur bedingt die Möglichkeit, hohe Investitionskosten (Anlagenbeschaffung, Personalqualifizierung) aufzubringen, während sich bei großen Unternehmen eine hohe Preissensitivität abzeichnet.

Ferner sind fehlende Standardisierung durch zu viele, verschiedene Verfahren und die herausfordernde Materiallage sowie die innerbetriebliche Nichtdurchgängigkeit technischer Prozesse hemmende Einflussfaktoren. Sozio-ökonomische Faktoren, wie Ablehnungsverhalten und Risikoaversion bei verschiedenen Akteuren hemmen die Etablierung der Verfahren ebenfalls.

Aus dem identifizierten Anpassungsbedarf sind unterschiedliche Handlungsempfehlungen abgeleitet worden (vgl. Tabelle 4). Zum einen ist eine Etablierung einer Prozessqualifikation in der Bauteilherstellung anzustreben. Hierfür sollten durch das Eisenbahn-Bundesamt, industrielle Hersteller und Anwender sowie durch Gremien zunächst eine generische Prozessqualifikation für einzelne Bauteile geschaffen und weitere Präzedenzfälle entwickelt werden. Hierfür empfiehlt sich eine Reduzierung der Verfahrens- und Materialkomplexität durch Beschränkung auf ausgewählte Verfahren (LBM, SLM, SLS und FDM). Anschließend ist hieraus mittelfristig eine spezifische Prozessqualifikation entlang der gesamten Prozesskette inklusive einer Materialspezifikation und -qualifikation sowie spezifische Prüfverfahren zu schaffen. Außerdem sollte eine Vereinheitlichung des Sprachgebrauchs (z. B. des Begriffs der „Arbeitsprobe“) durch das Eisenbahn-Bundesamt und entsprechende Gremien in den Regelwerken angestrengt werden. Ebenfalls könnten auf diesem Wege Verweise auf bereits bestehende und etablierte Prüfverfahren, die auch für additiv gefertigte Bauteile angewendet werden können in die Regelwerke aufgenommen werden.

Ferner ist die Erstellung von Berechnungsgrundlagen, Regelwerken und Standardisierungen notwendig. Hierzu wird empfohlen, dass das Eisenbahn-Bundesamt mittelfristig gemeinsam mit entsprechenden Gremien Anpassungen der FKM-Richtlinie hinsichtlich spezifischer Eigenschaften der additiven Fertigung (z. B. Anisotropie) oder die Entwicklung neuer Berechnungsgrundlagen anstrebt. Der Wissensaufbau im Bereich der schwingungsbelasteten, additiv gefertigten Teile sollte vorangetrieben werden sowie Standards für die personelle Aus- und Weiterbildung und Zertifizierung von Herstellern geschaffen werden. Mittelfristig sollte eine Anpassung des Regelwerks hinsichtlich der Vorgabe der selben Funktions- und Leistungsmerkmale und der daraus resultierenden gleichen Form von Austauschbauteilen überdacht werden, um Potenziale der additiven Fertigung besser nutzen zu können.

Zur Verbesserung des spezifischen Know-hows empfiehlt sich als Maßnahme für das Eisenbahn-Bundesamt das kurzfristige Aufbauen einer Wissensplattform zwischen Behörden, Universitäten und Unternehmen zum Teilen von Wissen und Informationen und zur Abbildung der Wissenshol- und Bringschuld. Alternativ oder zusätzlich ist die Durchführung eines Workshops zur additiven Fertigung im Schienenverkehr (ggf. als jährliche Konferenz) mit abschließender Herausgabe eines Konferenzbands möglich.

Zur Verbesserung der Durchgängigkeit technischer Prozesse sollten durch Hersteller, Anwender und Gremien mittelfristig vereinheitlichte Standards zwischen Soft- und Hardwareherstellern im Bereich der CAx-Techniken schaffen. Zum Abbau von sozio-ökonomischen Ablehnungstendenzen und zur Wahrung des geistigen Eigentums wird empfohlen, dass das Eisenbahn-Bundesamt bereits vorhandenes, normatives Wissen in Bezug auf rechtliche Fragestellungen innerhalb der Behörde verfügbar macht. Dies sollte auch für Unternehmen gelten, die das Wissen innerhalb der eigenen Organisation verbreiten können. Ebenfalls wird kurz- bis mittelfristig eine Entwicklung und Optimierung eines einheitlichen und standardisierten Vorgehens zur vereinfachten Umsetzung der CSM-Methode für die additive Fertigung empfohlen.

TABELLE 4: ZUSAMMENGEFASSTE WESENTLICHE HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Handlungsempfehlung	Adressat	Zeithorizont	Maßnahmen
Etablierung einer Prozessqualifikation in der Bauteilherstellung	EBA Hersteller Anwender Gremien	kurzfristig	Generische Prozessqualifikation für einzelne Bauteile schaffen und weitere Präzedenzfälle entwickeln. Reduzierung der Verfahrens- und Materialkomplexität durch Beschränkung auf LBM, SLM, SLS und FDM.
	EBA Hersteller Anwender Gremien	mittelfristig	Schaffung einer spezifischen Prozessqualifikation entlang der gesamten Prozesskette inklusive einer Materialspezifikation und -qualifikation sowie spezifische Prüfverfahren.
	EBA Gremien	kurzfristig	Anpassung des Regelwerks bezüglich der Begrifflichkeit von Arbeitsproben, dem Verfahrensablauf der additiven Fertigung und Ergänzung um oder Verweis auf bereits vorhandene Prüfmethoden.
Erstellung von Berechnungsgrundlagen, Regelwerken und Standardisierungen	EBA Gremien	kurzfristig	Anpassung der FKM-Richtlinie hinsichtlich spezifischer Eigenschaften der additiven Fertigung (z. B. Anisotropie) oder Entwicklung neuer Berechnungsgrundlagen. Unterstützung beim Wissensaufbau schwingungsbelasteter, additiv gefertigter Teile.
	EBA Gremien	mittelfristig	Anpassung des Regelwerks hinsichtlich der Vorgabe der selben Funktions- und Leistungsmerkmale und der daraus resultierenden gleichen Form von Austauschbauteilen, um Potenziale der additiven Fertigung besser nutzen zu können.
	EBA Hersteller Anwender	kurzfristig	Bessere Einbindung und Unterstützung der Gremienarbeit zur Unterstützung der Normenentwicklung und für Wissenstransfer.
	EBA Gremien	kurzfristig	Schaffung von Standards für personelle Aus- und Weiterbildungsformate und Entwicklung von Zertifizierungsverfahren für Hersteller.
Verbesserung des spezifischen Know-hows	EBA	kurzfristig	Aufbau einer Open Source Wissensplattform zwischen Behörden, Universitäten und Unternehmen zum Teilen von Wissen und Informationen und zur Abbildung der Wissenshol- und Bringschuld.
	EBA	kurzfristig (Alternative)	Durchführung eines Workshops zur additiven Fertigung im Schienenverkehr (ggf. als jährliche Konferenz) mit abschließendem Konferenzband.

Handlungsempfehlung	Adressat	Zeithorizont	Maßnahmen
Verbesserung der Durchgängigkeit technischer Prozesse	Hersteller Anwender Gremien	kurz- bis mittelfristig	Verbesserung der Durchgängigkeit technischer Prozesse durch Schaffung von Standards zwischen Soft- und Hardwareherstellern im Bereich der CAx-Techniken.
Abbau von menschlichen Ablehnungstendenzen und Wahrung des geistigen Eigentums	EBA Hersteller Anwender	kurzfristig	Verbreitung normativen Wissens in Bezug auf rechtliche Fragestellungen zum Abbau menschlicher Ablehnungstendenzen.
	EBA Hersteller Anwender Gremien	kurz- bis mittelfristig	Entwicklung und Optimierung eines einheitlichen und standardisierten Vorgehens zur vereinfachten Umsetzung der CSM-Methode für die additive Fertigung.

Fazit und Ausblick

Während der Studie sind Einschätzungen zu Fähigkeiten der additiven Fertigung und zur Förderung der Einführung und Verbreitung additiver Fertigungsverfahren im Schienenverkehr entstanden. Motor dieses Prozesses wird die bereits erfolgte technologische Entwicklung einzelner Verfahren und deren absehbare Weiterentwicklung in den kommenden Jahren sein. Zusätzlich kommt der Weiterentwicklung der Technologie das Breite Interesse von Anwendern und potenziellen Anwendern in Behörden, Industrie und Forschung entgegen. Bei Umsetzung der in dieser Studie vorgestellten kurz- bis langfristigen Handlungsempfehlungen ist eine Nutzbarmachung der Verfahren der additiven Fertigung als Mittel zur Bauteilbeschaffung im Schienenverkehr wahrscheinlich. Zukünftig ist hierbei insbesondere der Einsatz des „Laserschmelzen (LBM/SLM)“ und „Laserauftragschweißen (DED/DMD)“ im metallischen und des „Selektiven Lasersintern (SLS)“ und „Fused Deposition Modeling (FDM)“ im kunststofftechnischen Bereich am vielversprechendsten.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Technologiematrix zum Vergleich additiver Verfahren (Ausschnitt)4

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Prüfmethode für nichtmetallische additive Fertigungsverfahren.....6

Tabelle 2: Prüfmethode für metallische und weitere additive Fertigungsverfahren.....7

Tabelle 3: Identifizierter Anpassungsbedarf im Regelwerk mit Lösungsvorschlägen..... 10

Tabelle 4: Zusammengefasste wesentliche Handlungsempfehlungen..... 12