

Naht und Parametersatz — Additive Metallfertigung und das Gewerk Metalltechnik

- [Naht und Parametersatz](#)
 - [Abstract](#)
 - [1 Einleitung](#)
 - [2 Gegenstandsbestimmung](#)
 - [3 Achse I — Verfahrenstechnik: die Kopplungslinie](#)
 - [4 Achse II — Werkstoffkunde: zwei Gefügeherkünfte](#)
 - [5 Achse III — Normung: zwei Qualifikationsregime](#)
 - [6 Achse IV — Berufsbildung: wohin die additive Fertigung institutionell sortiert wurde](#)
 - [7 Achse V — Betriebswirtschaft: Zugangsschwellen und die Reparaturnisse](#)
 - [8 Achse VI — Arbeitsschutz: ein bekanntes und ein neues Regime](#)
 - [9 Synthese: die Risiko-Verfügungs-Lage](#)
 - [10 Über den Lehrbuchstand hinaus: vier Vorschläge](#)
 - [11 Interessenlage und Offenlegung](#)
 - [12 Limitationen](#)
 - [13 Schluss](#)
 - [14 Literatur- und Quellenverzeichnis](#)

Naht und Parametersatz

Additive Metallfertigung und das Gewerk Metalltechnik — eine transdisziplinäre Untersuchung der Verfügungsverschiebung zwischen Handwerk, Norm und Anlagenhersteller

Kennung: FORSCH-PROV0467 (vorläufig)

Autor: Thomas Schüller

Affiliation: unabhängig, ohne institutionelle Affiliation; privat finanziert

Werkmarke: Thomas Schüller · Syntagma Forschung · Wien

Korrespondenz: forschung@tschueller.com

ORCID: 0009-0003-9799-6747

Stand: 19. Oktober 2026 · Version 1.0

Lizenz: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Werkform: Vollwerk, sechs Achsen gleichgewichtig, bilingual DE+EN

Abstract

Die additive Fertigung von Metall wird überwiegend als Verfahrensfrage behandelt: als Problem der Schmelzbaddynamik, der Pulverqualität, der Eigenspannung, der Bauteilqualifizierung. Die vorliegende Arbeit verschiebt die Frage. Sie untersucht nicht, wie additive Metallverfahren funktionieren, sondern was sie mit einem bestehenden Gewerk machen — mit der Metalltechnik als historisch gewachsener Wissens-, Ausbildungs- und Verantwortungsordnung.

Der Ausgangsbefund ist eine Diskrepanz zwischen zwei Qualifikationsregimen. Das Schweißregime — EN ISO 3834 für den Betrieb, EN ISO 14731 für die Aufsicht, EN ISO 9606 für die ausführende Person, EN ISO 15614 für das Verfahren — bindet Verfahrensverantwortung an benannte Personen und an ein dokumentiertes, übertragbares, prüfbares Verfahrensdokument. Das AM-Regime — ISO/ASTM 52920 für die Produktionstätte, ISO/ASTM TS 52930 für die Anlage — bindet sie an einen Standort und an eine qualifizierte Maschine. Für die ausführende Person existiert keine genormte, portable Entsprechung zur Schweißerprüfung. Der Prozessparameter, der im Schweißregime als WPS dokumentiert und mit dem Menschen portabel ist, ist im Pulverbettverfahren regelmäßig Eigentum des Anlagenherstellers.

Daraus ergibt sich eine Asymmetrie, die sich als Instanz des Risiko-Verfügungs-Theorems lesen lässt: Die Haftung für das Bauteil (ρ) bleibt beim Fertigungsbetrieb, die Verfügung über den Prozessparameter (δ) wandert zum Anlagenhersteller. Die Arbeit zeigt, dass diese Asymmetrie nicht gleichmäßig über die additiven Metallverfahren verteilt ist, sondern mit der Entfernung vom Lichtbogen systematisch wächst. Sie entwickelt dafür eine Kopplungsachse vom manuellen Auftragschweißen über WAAM und DED bis zum Pulverbett und Binder Jetting, prüft diese Achse an sechs Disziplinen — Verfahrenstechnik, Werkstoffkunde, Normung, Berufsbildung, Betriebswirtschaft, Arbeitsschutz — und schließt mit einer Vier-Quadranten-Matrix der Risiko-Verfügungs-Lage sowie mit konkreten Vorschlägen: einem personengebundenen Verfahrensdokument für die additive Fertigung in Analogie zur WPS, einer Korrektur der österreichischen Modulzuordnung und einem Argument für offene Parametersätze als Voraussetzung prüfbarer Fertigung.

Ein empirischer Befund aus der österreichischen Ausbildungsordnung stützt die These institutionell: Das Spezialmodul „Additive Fertigung“ gehört nicht zum Modullehrberuf Metalltechnik, sondern zum Lehrberuf Mechatronik, und ist mit dem Grundmodul Metalltechnik nur in Verbindung mit drei von neun Hauptmodulen kombinierbar — nicht mit dem Hauptmodul Schweißtechnik, dem verfahrensnächsten von allen.

Schlagworte: Additive Metallfertigung, Metalltechnik, WAAM, Directed Energy Deposition, Pulverbettverfahren, EN ISO 3834, ISO/ASTM 52920, Verfahrensqualifizierung, Lehrberuf, Prozessparameter, Risiko-Verfügungs-Asymmetrie, Arbeitsschutz, Reparaturfertigung.

1 Einleitung

1.1 Warum nicht noch ein Verfahrensreview

Zur additiven Fertigung von Metall liegt umfangreiche Literatur vor. Verfahrensphysik, Werkstoffverhalten, Defektbildung, Prozessüberwachung und Bauteilqualifizierung sind in Übersichtsarbeiten gut erschlossen; die vorliegende Arbeit setzt diesen Stand voraus und wiederholt ihn nicht. Was in dieser Literatur systematisch wenig Raum einnimmt, ist die Frage, in welchem Verhältnis additive Metallverfahren zu dem Gewerk stehen, das Metall bislang bearbeitet hat.

Dieses Verhältnis ist nicht trivial. Die Metalltechnik ist kein Anwendungsfeld, das eine neue Technologie einfach aufnimmt, sondern eine eigene Wissensordnung mit eigener Verantwortungsarchitektur. Sie verfügt über eine Berufsausbildung mit gesetzlich festgelegtem Berufsbild, über ein Prüf- und Aufsichtswesen, über eine Normenfamilie, die bestimmt, wer unter welchen Bedingungen eine tragende Naht legen darf, und über eine Haftungszurechnung, die an Personen und nicht an Geräte gebunden ist. Wenn in dieses Gefüge ein Fertigungsverfahren eintritt, dessen zentrale Prozessgröße nicht dokumentiert, sondern lizenziert wird, ist das eine Veränderung der Ordnung und nicht bloß eine Erweiterung des Werkzeugkastens.

Die Arbeit fragt deshalb: Was geschieht mit der Verfügung über Prozesswissen, wenn Metall additiv gefertigt wird? Wer trägt das Risiko für ein Bauteil, und wer kann über die Bedingungen entscheiden, unter denen es entstanden ist? Und welche institutionellen Spuren hat diese Verschiebung bereits hinterlassen — in Normen, in Ausbildungsordnungen, in Kostenstrukturen, in der Arbeitsschutzpraxis?

1.2 Abgrenzung

Die Arbeit behandelt **nicht**:

- die Verfahrensphysik additiver Metallverfahren in Übersichtsform — dafür existiert einschlägige Literatur, auf die verwiesen wird;

- Prozessfenster, Parametersätze oder Fertigungsanleitungen in einer Tiefe, die eine Reproduktion erlaubt;
- die Polymer-, Keramik- und Biodomänen der additiven Fertigung;
- Rüstungs-, Waffen- und Verteidigungsanwendungen als Entwicklungsfeld.

Sie behandelt **wohl**:

- die Relation zwischen additiven Metallverfahren und den etablierten metallverarbeitenden Verfahren als Kompetenz-, Norm- und Verantwortungsfrage;
- die normative Architektur beider Regime im direkten Vergleich;
- die berufsbildungsrechtliche Zuordnung der additiven Fertigung in Österreich;
- die betriebswirtschaftliche Lage kleiner und mittlerer Fertigungsbetriebe gegenüber dieser Technologie;
- die Arbeitsschutzlage im Vergleich zum etablierten Schweißrauchregime;
- die daraus folgende Risiko-Verfügungs-Lage als analytisches Modell.

1.3 Methodik

Die Arbeit ist ein narratives, transdisziplinäres Review mit Modellbildung. Sie stützt sich primär auf begutachtete Literatur, auf publizierte Normtexte und Normvorschauen, auf behördliche Erhebungen und auf Rechtsquellen (österreichisches Bundesgesetzblatt, Ausbildungsordnungen). Wo Marktzahlen verwendet werden, wird die Quellengattung offengelegt; Zahlen aus kommerzieller Marktforschung werden als solche gekennzeichnet und nicht gegen begutachtete Befunde aufgerechnet.

Die Normtexte selbst sind kostenpflichtig und werden hier nicht im Wortlaut wiedergegeben. Die Arbeit referiert ihren Anwendungsbereich und ihre Architektur, wie sie aus öffentlich zugänglichen Normvorschauen, Normungsübersichten und Fachpublikationen hervorgehen. Wer einen

konkreten Nachweis führen muss, braucht den Volltext; dieser Vorbehalt gilt für jede Aussage über Normeninhalte in dieser Arbeit.

Die Modellbildung in Abschnitt 8 ist analytisch, nicht empirisch validiert. Die Kopplungsachse (Modell 1) ordnet Verfahren nach einem qualitativen Kriterium; die eingezeichneten Verläufe sind Darstellungen eines strukturellen Zusammenhangs, keine Messwerte. Das ist eine Limitation und in Abschnitt 11 als solche verzeichnet.

1.4 Ethische Abgrenzung auf Werkebene

Die additive Metallfertigung ist eng mit Verteidigungs-, Marine- und Luftfahrtprogrammen verflochten. Mehrere der einschlägigen Qualifikationsleitfäden stammen aus diesem Umfeld, ein Teil der Verfahrensentwicklung ist staatlich-militärisch gefördert, und mehrere Anbieter nennen Verteidigung ausdrücklich als Zielmarkt. Diese Verflechtung ist für die Verfügungsfrage relevant und wird deshalb beschrieben: Sie erklärt, warum Qualifikationsregime entstanden sind, wie sie entstanden sind, und wer die Entwicklung finanziert hat.

Die Arbeit beschreibt diese Lage, sie entwickelt sie nicht fort. Sie enthält keine Prozessfenster, keine Parametersätze, keine Konstruktions- oder Fertigungshinweise mit Waffenrelevanz und keine Empfehlungen für rüstungsnahe Anwendung. Diese Abgrenzung gilt für das gesamte Werk und für alle daraus abgeleiteten Arbeiten.

2 Gegenstandsbestimmung

2.1 Metalltechnik als Gewerk

„Metalltechnik“ bezeichnet in dieser Arbeit nicht die Materialwissenschaft der Metalle, sondern das Gewerk: den Zusammenhang aus Berufsausbildung, Berufsausübung, Prüfwesen und Verantwortungszurechnung, in dem Metall industriell und handwerklich bearbeitet wird.

In Österreich ist dieses Gewerk als Modullehrberuf organisiert. Die Metalltechnik-Ausbildungsordnung in der Fassung von 2022 sieht ein für alle verbindliches Grundmodul und neun Hauptmodule vor; die Ausbildung in Grundmodul und gewähltem Hauptmodul dauert dreieinhalb Jahre, mit einem weiteren Haupt- oder Spezialmodul vier Jahre. Die neun Hauptmodule sind Maschinenbautechnik, Fahrzeugbautechnik, Metallbau- und Blechtechnik, Stahlbautechnik, Schmiedetechnik, Werkzeugbautechnik, Zerspanungstechnik, Schweißtechnik und — seit 2022 — Sicherheitstechnik.

Dieser Zuschnitt ist für die Fragestellung bedeutsam, weil er die Verfahrenslandschaft des Gewerks abbildet: spanende Formgebung, spanlose Formgebung, Füge- und Trenntechnik, Umformung, Wärmebehandlung, Oberflächenschutz. Jede dieser Verfahrensgruppen hat ihre eigene Kompetenzkette aus Werkstoffkenntnis, Maschinenbedienung, Prüfverfahren und Fehlerbeurteilung. Und jede Gruppe hat eine eigene Antwort auf die Frage, wo das Verfahrenswissen liegt.

2.2 Additive Metallverfahren

Die Prozesskategorien der additiven Fertigung sind in ISO/ASTM 52900 terminologisch festgelegt. Für Metall sind im industriellen Maßstab relevant:

Verfahrens- klasse	Kurzzeichen	Wärmequel- le	Ausgangs- form	Typische Ab- schmelz- bzw. Auf- baurate
Pulverbett- schmelzen mit Laser	PBF-LB/M	Laser	Pulver 20–50 µm	niedrig, bau- raumgebun- den
Pulverbett- schmelzen mit Elektro- nenstrahl	PBF-EB/M	Elektronen- strahl	Pulver 45–105 µm	niedrig bis mittel
	DED-LB/M	Laser		mittel

Verfahrens- klasse	Kurzzeichen	Wärmequel- le	Ausgangs- form	Typische Ab- schmelz- bzw. Auf- baurate
Gerichtete Energieein- bringung, Pul- ver			Pulver, dü- sengeführt	
Gerichtete Energieein- bringung, Draht	DED-LB, DED- EB	Laser, Elek- tronenstrahl	Draht	mittel bis hoch
Lichtbogen- basierte DED (WAAM)	DED-Arc	Lichtbogen (GMAW, GTAW, PAW)	Schweißdraht	hoch
Binder Jetting	BJT	kein Schmel- zen beim Auf- bau	Pulver + Bin- der, Sintern	mittel, mehr- stufig

Die Tabelle ordnet nach einem Kriterium, das für diese Arbeit zentral ist: nach der Nähe der Wärmequelle und des Zusatzwerkstoffs zu dem, was im Gewerk bereits beherrscht wird. Ein Lichtbogen, ein Schweißdraht und ein Schutzgas sind Gegenstände, mit denen eine Fachkraft für Schweißtechnik täglich umgeht. Ein 25-µm-Pulver aus einer Nickelbasis-legierung in einer Inertgaskammer ist es nicht.

2.3 Die Unterscheidung, auf die es ankommt

Die gängige Gegenüberstellung additiver und konventioneller Fertigung ist eine Verfahrensunterscheidung: Material wird aufgetragen statt abge-
tragen. Für die Frage dieser Arbeit ist eine andere Unterscheidung trag-
fähiger — die nach dem **Ort des Verfahrenswissens**.

Im klassischen Schweißen liegt das Verfahrenswissen in drei aufeinander bezogenen Formen vor:

1. **verkörpert** in der Fachkraft, deren Fertigkeit in einer befristeten, personengebundenen Prüfung festgestellt wird;
2. **dokumentiert** in der Schweißanweisung (WPS), die aus einer Verfahrensprüfung (WPQR) hervorgeht und zwischen Betrieben übertragbar ist;
3. **beaufsichtigt** durch eine benannte Person mit definierter Verantwortung und Weisungsbefugnis.

Im Pulverbettverfahren liegt es überwiegend in einer vierten Form vor: **einprogrammiert** in einen Parametersatz, der mit der Maschine ausgeliefert wird, vom Hersteller entwickelt wurde, als geistiges Eigentum behandelt wird und den Betrieb nur als Anwendungslizenz erreicht. Diese vierte Form hat kein Gegenstück in der Verantwortungsarchitektur des Gewerks.

3 Achse I – Verfahrenstechnik: die Kopplungslinie

3.1 WAAM als Scharnier

Lichtbogenbasierte additive Fertigung ist, verfahrensphysikalisch betrachtet, mehrlagiges Auftragschweißen mit Bahnplanung. Der Draht wird durch einen elektrischen Lichtbogen aufgeschmolzen und schichtweise auf ein Substrat oder die vorhergehende Lage abgelegt; als Lichtbogenprozesse kommen Metall-Schutzgasschweißen, Wolfram-Inertgasschweißen und Plasmaschweißen zum Einsatz, die Bewegung übernimmt üblicherweise ein Industrieroboter oder ein Portal mit Manipulator.

Diese Verwandtschaft ist mehr als eine Analogie. Sie hat praktische Folgen:

- **Anlagentechnik.** WAAM-Aufbauten lassen sich aus vorhandenen Schweißstromquellen und Robotern errichten. Der Investitionssprung ist eine Größenordnung kleiner als beim Pulverbett.
- **Zusatzwerkstoff.** Schweißdraht ist ein genormtes, breit verfügbares Handelsprodukt mit jahrzehntelang dokumentierter Metallurgie. Das unterscheidet ihn grundlegend von gasverdüstem Pulver enger Korngrößenverteilung.
- **Fehlerbilder.** Bindefehler, Poren, Einbrandkerben, Verzug und Eigenspannung sind in der Schweißtechnik bekannte und klassifizierte Erscheinungen mit etablierten Beurteilungsregeln.
- **Parameterzugang.** Drahtvorschub, Schweißstrom, Lichtbogenspannung, Vorschubgeschwindigkeit, Zwischenlagentemperatur und Schutzgas sind am Gerät einstellbar und im Betrieb messbar. Sie sind nicht hinter einer Softwarelizenz verborgen.

Der letzte Punkt ist der entscheidende. Die Prozessgrößen, die über die Qualität eines WAAM-Bauteils entscheiden, sind dieselben Größen, die eine Schweißaufsichtsperson ohnehin verantwortet. Eine Untersuchung an EH36-Stahl zeigt, dass Aufbaustrategie und Bahnmuster die Eigenspannung und den Verzug stärker beeinflussen als die eingebrachte Energie — die höchsten Eigenspannungen traten beim In-Out-Muster auf, die niedrigsten beim Zickzack-Muster. Das ist ein Befund über Bahnplanung, also über eine Größe, die im Betrieb liegt, nicht beim Anlagenhersteller.

Eine Arbeit der TU Graz am Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik demonstriert die gewerkliche Anschlussfähigkeit noch deutlicher: Dort wurde mit dem Cold-Metal-Transfer-Prozess untersucht, wie sich bestehende Stahlbauteile durch gezielten Materialauftrag verstärken lassen, und die erzielten Härtewerte über ÖNORM EN ISO 18265 in Stahlgüte-Äquivalente überführt. Das ist Stahlbau mit additiven Mitteln, beurteilt mit den Prüfmitteln des Stahlbaus.

3.2 Die Gegenseite: Pulverbett

Im Pulverbettverfahren verschiebt sich die Lage. ISO/ASTM TS 52930 beschreibt die additive Fertigung in ihrer Einleitung ausdrücklich als maschinenzentrierten Prozess und legt empfohlene Praktiken für die maschinenbezogene Prozessqualifizierung bei der Serienfertigung metallischer Bauteile mit PBF-LB/M fest. Der Qualifizierungsgegenstand ist die Anlage.

Das ist technisch begründet. Die Prozessgrößen beim Pulverbettsschmelzen — Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Spurabstand, Schichtdicke, Belichtungsstrategie, Strahldurchmesser, Strahlversatz, Schutzgasströmung, Sauerstoffgehalt — stehen in einem nichtlinearen, materialspezifischen Zusammenhang mit der Schmelzbaddynamik und damit mit Porosität, Bindefehlern und Gefüge. Ein Parametersatz ist das Ergebnis umfangreicher Versuchsreihen und nicht durch Erfahrungswissen am Gerät zu ersetzen.

Die Folge ist eine strukturelle Intransparenz, die auch in der Normungslandschaft als Lücke verzeichnet ist. Die Standardisierungs-Roadmap der US-amerikanischen Normungsarbeit führt Parametersteuerung ausdrücklich als Lücke, und das NIST stellt fest, dass es keine standardisierte Programmiersprache nach Art von G-Code für Werkzeugmaschinen gibt und dass Belichtungsstrategien von Anlagenherstellern uneinheitlich implementiert werden — mit der Folge, dass dieselbe nominelle Strategie auf verschiedenen Anlagen zu deutlich verschiedener Bauteilqualität führen kann.

Das ist eine bemerkenswerte Aussage: Die Prozessbeschreibung ist nicht nur nicht offen, sie ist zwischen Anlagen nicht einmal eindeutig.

3.3 DED als Übergangsfeld

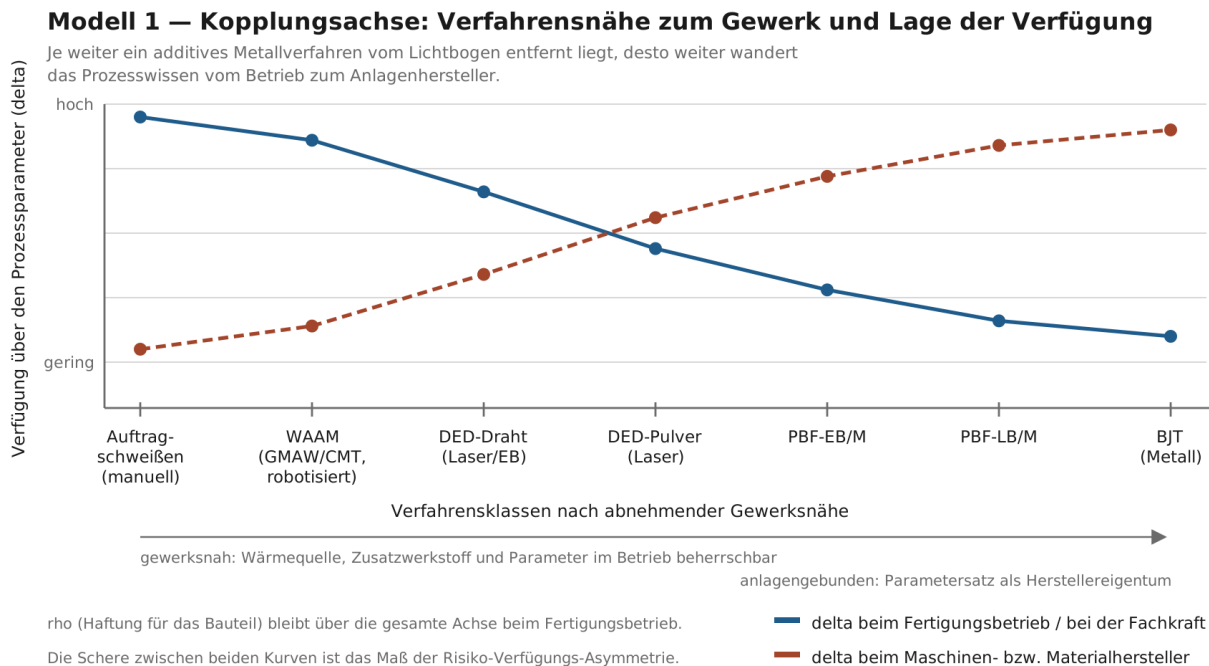
Zwischen beiden Polen liegt die gerichtete Energieeinbringung mit Laser. Sie teilt mit dem Pulverbett den Werkstoff (bei Pulver-DED), die Wärmequelle und die Lieferantenbindung an Parametersätze; sie teilt mit dem Schweißen die offene Prozesszone, die Zugänglichkeit des Bauteils wäh-

rend des Prozesses und vor allem die Anwendung auf bestehende Bauteile.

Gerade diese letzte Eigenschaft macht DED zum praktisch wichtigsten Übergangsfeld. Der Reparaturauftrag — eine verschlissene Dichtfläche, eine ausgebrochene Werkzeugkante, eine abgetragene Turbinenschaufelspitze — ist in der Metalltechnik ein vertrauter Vorgang, bisher mit Auftragschweißen bearbeitet. DED ersetzt dabei nicht ein Verfahren durch ein fremdes, sondern verfeinert ein vorhandenes: geringerer Wärmeeintrag, kleinere Wärmeeinflusszone, weniger Verzug, geringere Aufmischung, bessere metallurgische Anbindung bei gleichzeitig höherer Prozesskontrolle.

Die Literatur zur Werkzeuginstandsetzung berichtet erhebliche Standzeitgewinne gegenüber konventionellen Reparaturverfahren — in einer häufig zitierten Untersuchung um den Faktor 3,4 bis 8,0. Für die Verfügungsfrage ist dabei weniger die Zahl interessant als die Sache: Reparatur ist der Anwendungsfall, in dem das Gewerk seine eigene Kompetenz behält, weil die Beurteilung des Grundwerkstoffs, die Vorbereitung der Fügezone und die Nachbearbeitung im Betrieb bleiben.

3.4 Modell 1



Die Kopplungsachse ordnet die Verfahrensklassen nach abnehmender Gewerksnähe und trägt zwei gegenläufige Verläufe auf: die Verfügung über den Prozessparameter beim Fertigungsbetrieb und die beim Anlagen- beziehungsweise Materialhersteller. Die Haftung für das Bauteil bleibt über die gesamte Achse beim Fertigungsbetrieb. Die sich öffnende Schere zwischen den beiden Kurven ist das Maß der Asymmetrie, die in Abschnitt 8 formalisiert wird.

Die Darstellung ist qualitativ. Sie behauptet keine metrische Skala, sondern eine Ordnung — und diese Ordnung ist der Gegenstand der folgenden fünf Achsen, die sie je aus ihrer Disziplin prüfen.

4 Achse II — Werkstoffkunde: zwei Gefügeherkünfte

4.1 Was die Metalltechnik gewohnt ist

Die Werkstoffkunde des Gewerks ist überwiegend eine Werkstoffkunde vorverarbeiteter Halbzeuge. Ein Vergütungsstahl kommt als gewalzte Stange, ein Baustahl als Blech, ein Schmiedeteil mit faserorientiertem Gefüge aus der Umformung. Die Kennwerte dieser Halbzeuge sind genormt, richtungsabhängig beschrieben und über Lieferbedingungen zugesichert. Die Fachkraft bearbeitet einen Werkstoff, dessen Gefüge sie nicht erzeugt hat.

Die Ausnahme ist genau das Schweißen. Dort erzeugt die Fachkraft ein Erstarrungsgefüge — Schweißgut mit dendritischer Erstarrung, dazu eine Wärmeeinflusszone mit verändertem Grundwerkstoffgefüge. Die Schweißmetallurgie ist deshalb der einzige Teil der gewerblichen Werkstoffkunde, in dem Erstarrung, Abkühlgeschwindigkeit, Zwischenlagentemperatur, Aufhärtung und Eigenspannung praktisch beherrscht werden müssen.

4.2 Was die additive Metallfertigung erzeugt

Jedes schmelzbasierte additive Metallverfahren erzeugt ein Erstarrungsgefüge — und zwar eines, das über hunderte oder tausende Zyklen wiederholter lokaler Aufschmelzung und Wiedererwärmung entsteht. Daraus folgen Eigenschaften, die gegenüber Walz- und Schmiedegefüge systematisch anders sind:

Merkmal	Walz-/Schmiedegefüge	Schweißgut	Additiv erzeugtes Gefüge
Kornform	umgeformt, oft gestreckt	dendritisch, lagenweise	dendritisch, häufig epitaktisch über Lagen hinweg
Anisotropie			

Merkmal	Walz-/Schmiedegefüge	Schweißgut	Additiv erzeugtes Gefüge
	umformbedingt, bekannt	quer zur Naht ausgeprägt	ausgeprägt in Aufbaurichtung
Eigenspannung	aus Wärmebehandlung	aus Nahtfolge	aus Schicht- und Bahnfolge, oft hoch
Typische Fehler	Seigerung, Dopp- lung	Poren, Bindefehler, Risse	Bindefehler, Keyhole-Poren, Mikrorisse
Kennwertlage	genormt, zugesichert	über WPQR nachgewiesen	bauteil-, lagen- und orientierungsabhängig

Das entscheidende Wort in der letzten Zeile ist „zugesichert“. Für Walz- und Schmiedewerkstoffe gibt es Lieferbedingungen; für Schweißgut gibt es die Verfahrensprüfung; für additiv erzeugte Werkstoffzustände gibt es in vielen Fällen nur die Bauteilprüfung selbst.

4.3 Das Nachbeglaubigungsproblem

In der Praxis wird die Lücke durch Nachbehandlung geschlossen: Spannungsarmglühen, Lösungsglühen, heißisostatisches Pressen, mechanische Endbearbeitung der Funktionsflächen. Diese Schritte sind nicht Zugaben, sondern konstitutiver Teil der Prozesskette; ohne sie ist die Kennwertlage vieler additiv erzeugter Bauteile nicht belastbar.

Für die Verfügungsfrage ist bemerkenswert, dass diese Nachbehandlungsschritte wieder vollständig im Gewerk liegen. Wärmebehandlung, Zerspanung, Oberflächenbearbeitung und Prüfung sind etablierte Kompetenzen der Metalltechnik. Der Betrieb verliert die Verfügung über den Aufbauprozess und behält sie über die gesamte Nachkette — und über die Haftung für das Ergebnis.

4.4 Die Pulverfrage

Der Zusatzwerkstoff selbst ist beim Pulververfahren eine eigene Verfügungsebene. Pulver für das Laser-Pulverbett liegt typischerweise in einer Korngrößenverteilung zwischen etwa 20 und 50 μm , für das Elektronenstrahl-Pulverbett grober zwischen etwa 45 und 105 μm . Die Pulverqualität beeinflusst Bau-zu-Bau-Konsistenz, Defektfreiheit, mechanische Kennwerte und die Reproduzierbarkeit zwischen Anlagen.

Pulver wird wiederverwendet. Dabei verändern sich Oberflächenoxidzusammensetzung, Morphologie und Fließverhalten; eine Untersuchung an zwei Nickelbasislegierungen fand bei wiederverwendetem gegenüber jungfräulichem Pulver eine leicht veränderte Oberflächenzusammensetzung. Für den Betrieb bedeutet das: Die Rückverfolgbarkeit der Pulvercharge, die Zahl der Wiederverwendungszyklen und das Siebregime sind qualitätsbestimmende Größen, die dokumentiert werden müssen — und die, anders als der Parametersatz, tatsächlich im Betrieb liegen.

Das Bild, das sich über diese Achse ergibt, ist differenzierter als die Verfügungsthese allein: Werkstoffseitig behält der Betrieb mehr Kontrolle, als die Parameterfrage vermuten lässt. Die Asymmetrie ist auf die Aufbau-phase konzentriert.

5 Achse III — Normung: zwei Qualifikationsregime

5.1 Das Schweißregime

Die Qualitätsanforderungen an das Schmelzschweißen metallischer Werkstoffe sind in der Normenreihe EN ISO 3834 geregelt, gestuft nach um-

fassenden, Standard- und elementaren Anforderungen. Die Reihe ist kein alleinstehendes Dokument, sondern Knotenpunkt eines Systems:

- **Aufsicht.** EN ISO 3834 verlangt, dass der Hersteller über geeignetes Schweißaufsichtspersonal verfügt, dessen Aufgaben und Verantwortlichkeiten klar definiert sein müssen und das über ausreichende Befugnis verfügt, erforderliche Maßnahmen zu veranlassen. Aufgaben und Verantwortung dieser Person sind in EN ISO 14731 geregelt.
- **Ausführung.** Schweißerinnen und Schweißer werden nach EN ISO 9606 geprüft, Bedienerinnen und Bediener mechanisierter und automatischer Prozesse nach ISO 14732. Diese Prüfung ist an die Person gebunden, befristet und zwischen Betrieben portabel.
- **Verfahren.** Die Schweißanweisung (WPS) muss durch eine Verfahrensprüfung qualifiziert sein; der zugehörige Nachweis (WPQR) folgt EN ISO 15614.
- **Prüfung.** Personal der zerstörungsfreien Prüfung wird nach EN ISO 9712 zertifiziert.

Dieses System wird von zahlreichen Produkt- und Anwendungsnormen in Bezug genommen, unter anderem EN 1090 für Stahl- und Aluminiumtragwerke, EN 15085 für Schienenfahrzeuge, EN 13445 für Druckbehälter und ISO 17660 für Betonstahl. Wer in diesen Feldern fertigt, kommt an der Normenfamilie nicht vorbei.

Das strukturelle Merkmal ist: **Verfahrensverantwortung ist an benannte Personen gebunden, und Verfahrenswissen ist ein dokumentiertes, übertragbares, prüfbares Artefakt.**

5.2 Das AM-Regime

Die entsprechende Architektur der additiven Fertigung ist jünger und anders geschnitten.

ISO/ASTM 52920:2023 legt Anforderungen für Bauteilhersteller fest, die additive Verfahren einsetzen, unabhängig vom verwendeten Werkstoff und Verfahren; die Norm spezifiziert Kriterien für AM-relevante Prozesse

sowie qualitätsrelevante Merkmale entlang der Prozesskette und definiert Tätigkeiten und Abläufe innerhalb einer AM-Produktionsstätte. Sie setzt ein bestehendes Qualitätsmanagementsystem voraus und ergänzt es. Umwelt-, Gesundheits- und Arbeitsschutzaspekte sind ausdrücklich nicht umfassend abgedeckt; dafür wird auf Herstellerrichtlinien und weitere Normen der Reihe verwiesen.

ISO/ASTM TS 52930:2021 regelt Installations-, Betriebs- und Leistungsqualifizierung (IQ/OQ/PQ) für PBF-LB-Anlagen; eine entsprechende Technische Spezifikation für PBF-EB-Anlagen ist 2025 erschienen. ISO/ASTM 52904 adressiert den Pulverbettprozess für kritische Anwendungen. Für die zerstörungsfreie Prüfung an additiv gefertigten Bauteilen liegen die Technischen Berichte ISO/ASTM TR 52905 und TR 52906 vor; ISO/ASTM 52948 klassifiziert Unregelmäßigkeiten in metallischen Pulverbettbauteilen.

Die Norm selbst benennt die Re-Qualifizierungspflicht bei Änderungen am qualifizierten additiven System — genannt werden unter anderem Hardware, Firmware, Energiequelle, Maschinenreparatur, Maschinenverlagerung und Spezifikationen des Ausgangswerkstoffs. Jede dieser Änderungen ist auf ihre Qualitätswirkung zu bewerten; wo eine Wirkung festgestellt wird, ist erneut zu qualifizieren.

Diese Liste ist aufschlussreich. Sie enthält Firmware. Ein Softwarestand des Anlagenherstellers ist damit ein qualifizierungsrelevanter Zustand des Fertigungsprozesses — und zwar einer, über den der Betrieb nicht verfügt.

5.3 Die Leerstelle

Was in der AM-Normenfamilie keine Entsprechung hat, ist die Personenschicht des Schweißregimes.

Es existiert keine der EN ISO 14731 vergleichbare, genormte Qualifikation einer AM-Aufsichtsperson mit definierter Verantwortung und Weisungsbefugnis. Es existiert keine der EN ISO 9606 vergleichbare, personengebundene, befristete und portable Prüfung der ausführenden Fach-

kraft. Was stattdessen existiert, sind Rollendefinitionen innerhalb eines Qualitätsmanagementsystems, betriebliche Schulungsnachweise und ein heterogener Markt branchen- und herstellerspezifischer Personenzertifikate.

Für den einzelnen Betrieb bedeutet das: Kompetenz ist nicht transportabel. Eine Fachkraft, die auf einer Anlage eines Herstellers qualifiziert gearbeitet hat, bringt in einen anderen Betrieb mit anderer Anlage keinen formalen Nachweis mit, der dem Schweißerpass entspräche. Für den Berufsstand bedeutet es: Es gibt keine Instanz, an der sich eine eigenständige, herstellerunabhängige Berufskompetenz der additiven Metallfertigung festmachen ließe.

5.4 Die branchenspezifischen Umgehungen

Dass diese Lücke in der Praxis Druck erzeugt, zeigt sich daran, wie sie umgangen wird. Für WAAM nennt die einschlägige Literatur mehrere etablierte Zertifizierungspfade außerhalb der AM-Normenfamilie: ASME Boiler and Pressure Vessel Code Abschnitt IX, QW-600; AWS D20.1 als Spezifikation für die Fertigung metallischer Bauteile mittels additiver Fertigung; API Standard 20S für additiv gefertigte metallische Bauteile. Für den maritimen Bereich existiert ein Klassifikationsleitfaden von DNV, für den militärischen Luftfahrtbereich ein Papier der britischen Militärflugzeugbehörde. Für WAAM speziell hat BSI 2020 mit PAS 6012 einen von Innovate UK geförderten Leitfaden veröffentlicht.

Die Schlussfolgerung, die sich aus dieser Aufzählung ziehen lässt, ist bemerkenswert: **Die zugänglichsten Qualifizierungspfade für lichtbogenbasierte additive Fertigung führen über Schweißcodes, nicht über AM-Normen.** Wer WAAM qualifizieren will, nutzt den Apparat, der für das Schweißen gebaut wurde — weil dieser Apparat Personen und Verfahren qualifiziert und nicht nur Anlagen.

5.5 Modell 2

Modell 2 — Zwei Qualifikationsregime im Vergleich

Das Schweißregime qualifiziert Personen und Verfahren, das AM-Regime qualifiziert Standorte und Anlagen.

Schweißregime (Gewerk) Fusionsschweißen metallischer Werkstoffe	AM-Regime (Anlage) Industrielle additive Fertigung
Betrieb EN ISO 3834-2/-3/-4 Qualitätsanforderungen an die Schweißfertigung	Betrieb ISO/ASTM 52920 Anforderungen an Prozesse und Produktionsstätten
Person (Aufsicht) EN ISO 14731 Schweißaufsichtsperson mit definierter Verantwortung	Person (Aufsicht) keine genormte Entsprechung zu ISO 14731 Rollen sind zu definieren, nicht zu zertifizieren
Person (Ausführung) EN ISO 9606 / ISO 14732 Schweißerprüfung: personengebunden, befristet, portabel	Person (Ausführung) keine genormte, portable Personenqualifikation Kompetenz gilt betriebs- und anlagenbezogen
Verfahren EN ISO 15614 -> WPQR -> WPS dokumentiert, übertragbar, prüfbar	Anlage / Verfahren ISO/ASTM TS 52930 (IQ/OQ/PQ), 52904 Parametersatz häufig Herstellereigentum
Prüfung EN ISO 9712 (ZfP-Personal)	Prüfung ISO/ASTM TR 52905 / TR 52906 (ZfP an AM-Teilen)

Strukturbefund
Im Schweißregime trägt eine benannte Person die Verfahrensverantwortung. Im AM-Regime trägt sie der Standort — die Person wird zur Bedienerin einer qualifizierten Anlage.

5.6 Die Qualifizierungskosten als Zugangsschranke

Die Lücke hat einen Preis. Das NIST beschreibt drei Wege zur Qualifizierung: statistisch gestützt durch umfangreiche empirische Prüfung, äquivalenzbasiert durch Nachweis der Gleichwertigkeit mit einem bereits qualifizierten Werkstoff oder Verfahren, und modellbasiert durch rechnerische Vorhersage mit minimaler Verifikationsprüfung. Es stellt zugleich fest, dass die hohen Kosten der statistisch gestützten Qualifizierung Unternehmen dazu bewegen, die gewonnenen Daten proprietär zu halten.

Das ist ein Rückkopplungsmechanismus: Die Teuerung der Qualifizierung erzeugt das Interesse an Geheimhaltung, die Geheimhaltung verhindert die gemeinsame Datenbasis, deren Fehlen die Qualifizierung teuer hält. Eine Fachpublikation beziffert den Aufwand für die Qualifizierung neuer Parameter für anspruchsvollere Serienbauteile mit dynamischen Lastfällen auf schnell mehr als 200.000 Euro — eine Größenordnung, die für einen Betrieb mit zehn Beschäftigten jede eigene Parameterentwicklung ausschließt.

Hier schließt sich der Kreis zur Verfügungsfrage. Die Asymmetrie ist nicht nur eine Folge von Lizenzpolitik, sondern auch eine Folge von Prüfkosten. Wer nicht über sechstellige Qualifizierungsbudgets verfügt, nimmt den Parametersatz, den er bekommt.

6 Achse IV — Berufsbildung: wohin die additive Fertigung institutionell sortiert wurde

6.1 Der österreichische Befund

Die bisherigen Achsen haben die Verfügungsverschiebung technisch und normativ beschrieben. Die Berufsbildung liefert dafür einen institutionellen Beleg, der sich an Rechtsquellen prüfen lässt.

Der Modullehrberuf Metalltechnik umfasst neun Hauptmodule und vier Spezialmodule. Das Spezialmodul „**Additive Fertigung (Additive Manufacturing AM)**“ ist keines dieser vier. Es gehört zum Lehrberuf Mechatronik und ist in der Mechatronik-Ausbildungsordnung geregelt. Für die Metalltechnik ist es nur auf dem Umweg über § 8 Abs. 4 des Berufsausbildungsgesetzes zugänglich: Danach ist eine Kombination des Grundmoduls Metalltechnik und der Hauptmodule Maschinenbautechnik, Werkzeugbautechnik oder Zerspanungstechnik mit dem Spezialmodul Additive Fertigung des Lehrberufes Mechatronik möglich.

Drei von neun Hauptmodulen. Die sechs anderen sind ausgeschlossen — darunter:

- **Schweißtechnik**, das Hauptmodul, dessen Verfahren mit WAAM verfahrensidentisch ist;
- **Stahlbautechnik**, in der additive Verstärkung bestehender Tragwerksteile erforscht wird;

- **Schmiedetechnik**, das Umformgewerk, dessen Gefügeerzeugung dem additiven Erstarrungsgefüge gegenübersteht;
- **Metallbau- und Blechtechnik, Fahrzeugbautechnik, Sicherheitstechnik.**

Die zugelassenen Kombinationen folgen einer erkennbaren Logik — es sind die drei Module, die am stärksten von CNC-gesteuerter Maschinenbedienung und Werkzeugbau geprägt sind. Die additive Fertigung wurde institutionell als **Maschinenbedienungskompetenz** einsortiert, nicht als **Werkstoff- und Fügekompetenz**.

6.2 Das Berufsprofil bestätigt die Zuordnung

Diese Lesart lässt sich am Inhalt des Spezialmoduls prüfen. Das Berufsprofil nennt als Tätigkeiten unter anderem: das Erstellen und Optimieren von Stützkonstruktionen; das Anwenden betriebsspezifischer Software einschließlich Datenexport aus der Konstruktion; die Vorbereitung der Fertigungsprozesse, etwa durch Finite-Elemente-Analyse zur Topologieoptimierung, AM-Simulation zur Geometrieeinhaltung, Bauraumoptimierung und Bauteilorientierung; das Bedienen der betriebsspezifischen Maschinen und Anlagen; das Anpassen der Parameter während der Fertigung; das Durchführen und Überwachen des Fertigungsprozesses; das Nachbearbeiten additiv gefertigter Bauteile einschließlich Entfernen der Stützkonstruktionen, Oberflächenbehandlung, Wärmebehandlung und mechanischer Bearbeitung sowie das Prüfen der Bauteile; schließlich Wartung und Instandhaltung der Systeme.

Als Beispiele für die während der Fertigung anzupassenden Parameter nennt das Berufsprofil Druckgeschwindigkeit, Schichthöhe und Massedurchsatz beim Druckkopf.

Das sind Prozessgrößen der Materialextrusion. Ein Massedurchsatz am Druckkopf existiert im Pulverbettverfahren nicht, und eine „Druckgeschwindigkeit“ ist dort keine sinnvolle Steuergröße. Das Berufsprofil des einzigen additiven Spezialmoduls der österreichischen Lehrberufsland-

schaft ist, seinen eigenen Beispielen nach zu schließen, **für den Polymerdruck geschrieben.**

Daraus folgt nicht, dass das Modul wertlos wäre — Stützkonstruktionen, Bauteilorientierung, Topologieoptimierung und Nachbearbeitung sind verfahrensübergreifend relevant. Es folgt aber, dass die metallspezifische Kompetenz — Erstarrungsmetallurgie, Eigenspannung, Pulverhandhabung, Inertgasführung, Pulverrückverfolgbarkeit, Defektbeurteilung an additiven Gefügen — im Berufsbild nicht abgebildet ist.

6.3 Die Größenordnungen

Der Modullehrberuf Metalltechnik gehört zu den am häufigsten erlernten Lehrberufen Österreichs. Die Verteilung auf die Hauptmodule zeigt zugleich, welche Teile des Gewerks von der Modulzuordnung betroffen sind.

Hauptmodul	Lehrlinge (Größenordnung)	AM-Spezialmodul kombinierbar
Maschinenbautechnik	ca. 4.800	ja
Zerspanungstechnik	ca. 1.800	ja
Metallbau- und Blechtechnik	ca. 1.480	nein
Stahlbautechnik	ca. 800	nein
Werkzeugbautechnik	ca. 760	ja
Schweißtechnik	ca. 490	nein
Fahrzeugbautechnik	ca. 360	nein
Schmiedetechnik	ca. 70	nein
Sicherheitstechnik (seit 2022)	einstellig	nein
Gesamt Metalltechnik	ca. 10.100	—

Die Zahlen stammen aus der Berufsinformation der Arbeitsmarktverwaltung und sind als Größenordnung zu lesen, nicht als Stichtagswerte. Die Gesamtzahl ist im Jahrzehnt vor der Erhebung von annähernd 11.500 auf rund 10.100 zurückgegangen.

Zwei Beobachtungen:

Erstens erreicht die Kombinationsmöglichkeit rechnerisch rund 7.400 der etwa 10.100 Lehrlinge, also die Mehrheit — aber nicht jene Teilgewerke, deren Verfahren der additiven Metallfertigung am nächsten stehen. Die rund 490 Lehrlinge der Schweißtechnik, deren Lichtbogenkompetenz unmittelbar WAAM-anschlussfähig wäre, sind ausgeschlossen.

Zweitens ist das Hauptmodul Schweißtechnik mit knapp fünf Prozent der Lehrlinge ohnehin ein kleines Modul. Die gewerkliche Basis, die den gewerksnächsten additiven Pfad tragen könnte, ist schmal — und wird institutionell nicht adressiert.

6.4 Bewegung an den Rändern

Die Lage ist nicht statisch. In der Steiermark wurde das Spezialmodul Additive Fertigung auf eine Initiative der Mechatroniker-Innung hin an der Berufsschule Eibiswald in den Unterricht aufgenommen. Das zeigt, dass die Umsetzung an einzelnen Standorten vorangetrieben wird — und zugleich, über welchen Kanal: über die Mechatronik.

6.5 Was daraus folgt

Die berufsbildungsrechtliche Zuordnung ist keine Nebensächlichkeit. Berufsbilder bestimmen, welche Kompetenz als berufskonstitutiv gilt, welche Prüfungen abgelegt werden, welche Inhalte in Berufsschulen unterrichtet werden und welchen Anspruch eine Fachkraft am Arbeitsmarkt geltend machen kann. Wenn die additive Metallfertigung dem Gewerk nicht als Werkstoffverfahren, sondern als Anlagenbedienung zugeordnet wird, dann wird genau jene Kompetenzform institutionalisiert, die mit der Verfügungsasymmetrie korrespondiert: die Fähigkeit, eine qualifizierte Anlage zu betreiben, nicht die Fähigkeit, ein Verfahren zu verantworten.

Normung und Berufsbildung zeigen damit dasselbe Muster aus zwei unabhängigen Richtungen. Das ist der stärkste Beleg dieser Arbeit, weil die beiden Quellenarten institutionell nicht voneinander abhängen.

7 Achse V — Betriebswirtschaft: Zugangsschwellen und die Reparaturenische

7.1 Zur Quellenlage

Marktzahlen zur additiven Metallfertigung sind mit Vorsicht zu behandeln. Für das Jahr 2025 kursieren Schätzungen des globalen Metall-AM-Marktes, die von rund 6,0 über 6,7 bis zu 17,2 Milliarden US-Dollar reichen — eine Spanne von annähernd dem Dreifachen. Die Abweichungen erklären sich aus unterschiedlichen Abgrenzungen (Anlagen, Werkstoffe, Dienstleistungen, Bauteile) und aus dem Umstand, dass die Berichte Verkaufsprodukte kommerzieller Marktforschung sind. Keine dieser Zahlen wird hier als Befund geführt.

Belastbarer ist ein Strukturbefund aus der jährlichen Branchenerhebung: Im Jahr 2025 wuchsen AM-Dienstleistungen um 15,5 Prozent, während die Anlagenverkäufe nur um 3,6 Prozent zulegten. Die Wertschöpfung verlagert sich von der Maschine zur Dienstleistung. Für den Fertigungsbetrieb ist das die ökonomisch relevante Information: Der Markt, in den er eintreten könnte, ist ein Dienstleistungsmarkt.

7.2 Die Eintrittsschwelle

Drei Kostenblöcke bestimmen den Zugang.

Anlagen. Industrielle Metall-AM-Systeme liegen in einer Preisspanne, die in der Branchenliteratur mit etwa 500.000 bis über 4 Millionen US-Dollar angegeben wird; hinzu kommen Peripherie für Pulverhandhabung, Inertgasversorgung, Nachbearbeitung und Prüfung. Das ist eine Größenord-

nung, die kleine und mittlere Betriebe — nach derselben Quelle rund 70 Prozent der Fertigungsunternehmen weltweit — faktisch ausschließt.

Werkstoff. Für AM geeignete Metallpulver werden mit einem Vielfachen des Preises konventioneller Massenwerkstoffe angesetzt; die Literatur nennt Faktoren im Bereich des Zwanzig- bis Fünffzigfachen. Diese Angabe stammt aus Marktforschung und ist entsprechend zu gewichten, bildet aber ein in der Praxis gut bekanntes Verhältnis ab.

Nachbearbeitung. Der Anteil der Nachbearbeitung — Wärmebehandlung, Trennen vom Bauraum, Stützenentfernung, Zerspanung, Oberflächenbearbeitung, Prüfung — an den Gesamtkosten wird mit 30 bis 60 Prozent angegeben. Auch hier gilt der Quellenvorbehalt; die Größenordnung wird jedoch durch die werkstoffkundliche Argumentation in Abschnitt 4 gestützt: Die Nachkette ist kein Anhängsel, sondern konstitutiv.

Dazu kommt der in Abschnitt 5.6 genannte Qualifizierungsaufwand für eigene Parametersätze. In Summe ergibt sich eine Schwelle, die nicht aus einem einzelnen Posten besteht, sondern aus deren Addition.

7.3 Wo der Break-even liegt

Die Faustregeln der Verfahrenswahl sind seit langem stabil und werden durch die additive Fertigung nicht aufgehoben: Bei einfachen Geometrien und steigender Stückzahl bleibt die konventionelle Route — Guss, Umformung, Zerspanung — wirtschaftlich überlegen. Additive Verfahren zahlen dort ein, wo Geometriekomplexität, Bauteilkonsolidierung, Personalisierung oder Werkzeuglosigkeit tatsächlich genutzt werden.

Eine Fallstudie zur metallischen Materialextrusion fand gegenüber der CNC-Bearbeitung eine Kostenreduktion von etwa 13,7 Prozent, wies zugleich aber die Nachbearbeitungsschritte — Entbindern, Sintern, Zerspanung — als wesentlichen Kostentreiber aus. Das ist ein charakteristisches Ergebnis: Der Vorteil ist real, aber schmal und von der Nachkette abhängig.

Für die Verfügungsfrage folgt daraus eine unbequeme Konsequenz. Die Anwendungen, in denen additive Metallfertigung wirtschaftlich klar überlegen ist, sind überwiegend hochwertige, geometrisch komplexe Bauteile in regulierten Branchen — also genau jene, in denen der Qualifizierungsaufwand am höchsten und die Parameterbindung am stärksten ist. Der wirtschaftliche Anreiz führt in den Quadranten der größten Asymmetrie.

7.4 Die Reparaturenische

Es gibt eine Ausnahme, und sie ist für kleine und mittlere Betriebe die interessanteste.

Reparatur und Instandsetzung verschobener Kostenlogik: Hier konkurriert das additive Verfahren nicht mit einer effizienten Serienroute, sondern mit einer Neuteilbeschaffung, deren Lieferzeit und Preis durch Gießerei- oder Schmiedevorlauf, Werkzeugherstellung oder schlicht die Nichtverfügbarkeit des ursprünglichen Herstellers bestimmt sind. Für große Bauteile — Armaturengehäuse, Ofenverteiler, Rohrformstücke, Spannelemente — nennt die Branchenliteratur konventionelle Beschaffungszeiten von mehreren Monaten.

Für die Wirtschaftlichkeit der Reparatur selbst liegen Einzelbefunde vor: Die Instandsetzung von Antriebswellen mittels gerichteter Energieeinkbringung wurde mit etwa der Hälfte der Kosten einer Neuherstellung angesetzt; für Werkzeuge und Formen werden gegenüber konventionellen Reparaturverfahren Standzeitgewinne um den Faktor 3,4 bis 8,0 berichtet. Diese Zahlen stammen aus Einzelstudien und sind nicht verallgemeinerbar, markieren aber die Richtung.

Entscheidend ist die Verfügungslage. In der Reparatur bleibt der Betrieb Herr des Vorgangs: Er beurteilt den Grundwerkstoff, legt die Fügezonenvorbereitung fest, wählt den Zusatzwerkstoff, führt die Nachbearbeitung durch und verantwortet die Prüfung. Bei lichtbogenbasierter Ausführung liegt zusätzlich der Prozessparameter im Betrieb. Das ist der einzige Anwendungsfall, in dem Risiko und Verfügung beieinanderbleiben — und zugleich derjenige mit der niedrigsten Investitionsschwelle.

7.5 Ersatzteile ohne Hersteller

Eine verwandte Konstellation verdient eigene Erwähnung: Bauteile, deren ursprünglicher Hersteller nicht mehr existiert oder die betreffende Komponente nicht mehr unterstützt. Hier entfällt die konventionelle Route vollständig, und die additive Fertigung konkurriert nicht mit einem günstigeren Verfahren, sondern mit dem Ersatz der gesamten Anlage.

Für ein Gewerk, dessen klassische Stärke die Instandhaltung bestehender Technik ist, liegt hier eine Anschlussstelle, die weder große Serien noch Zertifizierungsapparate voraussetzt — sondern Werkstoffbeurteilung, Nachkonstruktion, Fertigung und Prüfung. Das sind vorhandene Kompetenzen.

8 Achse VI — Arbeitsschutz: ein bekanntes und ein neues Regime

8.1 Was das Gewerk bereits kann

Schweißrauch ist ein seit Jahrzehnten regulierter, messtechnisch erschlossener und organisatorisch beherrschter Gefahrstoff. Absaugung an der Entstehungsstelle, Atemschutz, Arbeitsplatzgrenzwerte, Expositionsminderungsprogramme und arbeitsmedizinische Vorsorge sind in metallverarbeitenden Betrieben eingeführte Praxis. Das Gewerk hat, anders formuliert, eine funktionierende Kultur im Umgang mit partikelförmigen und gasförmigen Prozessemissionen.

8.2 Was beim Pulververfahren hinzukommt

Die additive Metallfertigung mit Pulver bringt drei Gefährdungsarten, die in dieser Kombination neu sind.

Inhalative Exposition. Metallpulver für AM liegen im mikro- und teilweise submikronen Bereich. Legierungen auf Nickel-, Chrom- und Kobalt-

basis sind toxikologisch einschlägig: Nickelmetallpulver und Nickilverbindungen sind nach der europäischen CLP-Verordnung bei Inhalation als karzinogen der Kategorie 1 eingestuft, können bei längerer Exposition Organe schädigen und sind als atemwegs- und hautsensibilisierend der Kategorie 1 klassifiziert.

Dermale Exposition. Eine behördliche Gefährdungsbeurteilung an einer US-amerikanischen Pulverbett- und DED-Anlagenstätte fand bei Beschäftigten im Pulverbettraum nach der Arbeit erhöhte Gehalte an Chrom, Kobalt, Molybdän und Nickel auf Handgelenkabstrichen; persönliche Kleidung und persönliche Schutzausrüstung zeigten ebenfalls Kontamination, und Pulver hatte sich über die gesamte Produktionsfläche verteilt. Eine weitere Erhebung quantifiziert die Zunahme auf den Handgelenken im Verlauf von Arbeitsvorgängen mit bis zu 2,6 µg Chrom, 1,6 µg Kobalt und 5,2 µg Nickel je Handgelenkpaar.

Brand- und Explosionsgefahr. Feine Metallpulver sind reaktiv und unter bestimmten Bedingungen zündfähig; aufgewirbelte Staubwolken können brennen und explodieren. Ein dokumentierter Vorfall in einer additiven Fertigung in Massachusetts im Jahr 2013 — Brand und Explosion nach Entzündung von Titan- und Aluminiumpulver, eine verletzte Person — führte zu einer behördlichen Strafe von annähernd 65.000 US-Dollar wegen nicht beseitigter bekannter Zündquellen.

8.3 Der entscheidende Befund: das Risiko liegt in der Handarbeit

Mehrere unabhängige Erhebungen kommen zu einem übereinstimmenden Muster.

Die gemessenen Expositionswerte liegen in untersuchten Anlagen überwiegend unterhalb der jeweiligen Arbeitsplatzgrenzwerte. Eine Erhebung an acht Betrieben mit PBF-LB-, PBF-EB- und Binder-Jetting-Verfahren fand, dass die Anlagen und der Druckprozess selbst keine nano- und alveolengängigen Partikel freisetzen, weil es sich um geschlossene Systeme handelt — ebenso die meisten Entpulverungsstationen und Siebanlagen. Die Emissionsniveaus unterschieden sich nicht nach AM-Technik,

sondern nach Ausrüstung und Arbeitsroutinen in den manuellen Schritten vor und nach dem Druck. Spitzenwerte der Partikelkonzentration traten bei offener Pulverhandhabung sowie bei Wartung und Reinigung der Maschinen auf.

Eine Untersuchung an einer DED-Anlage mit Inconel 718 fand Partikelemissionen überwiegend im submikronen Bereich oberhalb der Hintergrundkonzentration, die gemessenen gesundheitsrelevanten Metalle lagen jedoch deutlich unter den einschlägigen Expositionsgrenzwerten.

Daraus folgt eine arbeitsschutzpraktisch bedeutsame Aussage: **Die Gefährdung ist nicht verfahrensimmun, sondern organisationsabhängig.** Sie entsteht nicht im geschlossenen Prozess, sondern beim Umgang mit dem Pulver — beim Befüllen, Entpulvern, Sieben, Reinigen, Warten, beim Trennen der Bauteile von der Bauplatte und beim Schleifen.

Das ist eine gute Nachricht für das Gewerk. Organisationsabhängige Gefährdungen sind genau die Klasse von Risiken, die es gewohnt ist zu beherrschen: durch Arbeitsanweisungen, Absaugung, Trennung von Bereichen, persönliche Schutzausrüstung, Reinigungsregime und Unterweisung. Die Kompetenz ist vorhanden; sie muss auf einen anderen Stoff übertragen werden.

8.4 Die normative Lücke an dieser Stelle

Bemerkenswert ist, dass ISO/ASTM 52920 Umwelt-, Gesundheits- und Arbeitsschutzaspekte ausdrücklich nicht umfassend abdeckt und für diese Inhalte auf Herstellerrichtlinien und weitere Normen der Reihe verweist. Die zentrale Qualifizierungsnorm der industriellen additiven Fertigung delegiert den Arbeitsschutz also teilweise an den Anlagenhersteller.

Für die Verfügungsfrage ist das ein weiterer Baustein: Nicht nur der Prozessparameter, auch ein Teil der Schutzmaßnahmenbeschreibung kommt als Herstellerdokument in den Betrieb — während die Verantwortung nach nationalem Arbeitnehmerschutzrecht unverändert beim Arbeitgeber liegt.

8.5 Die Umkehrung für WAAM

Für lichtbogenbasierte additive Fertigung fällt die Pulverproblematik weg. An ihre Stelle treten Schweißrauch, Lichtbogenstrahlung, Ozon und Schutzgasverdrängung — ein Gefährdungsprofil, für das im Gewerk vollständige Schutzkonzepte bestehen. Die lichtbogennahe additive Fertigung ist damit auch arbeitsschutzseitig die anschlussfähigere Variante, was die Kopplungsachse aus Abschnitt 3 von einer weiteren Seite bestätigt.

9 Synthese: die Risiko-Verfügungs-Lage

9.1 Zwei Größen

Die sechs Achsen lassen sich auf zwei Größen zusammenziehen.

ρ (rho) — Risikoträgerschaft. Wer haftet für das Bauteil: zivilrechtlich gegenüber dem Besteller, produkthaftungsrechtlich gegenüber Dritten, arbeitsschutzrechtlich gegenüber den Beschäftigten, und fachlich gegenüber der abnehmenden Stelle. In der Fertigungsdienstleistung ist das regelmäßig der Fertigungsbetrieb.

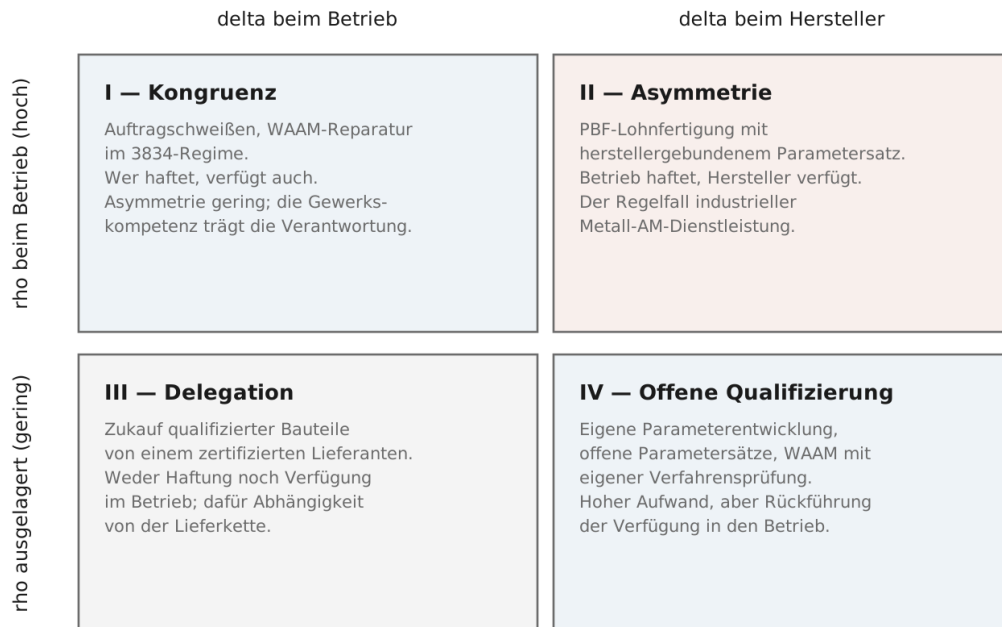
δ (delta) — Verfügung über die risikobestimmenden Größen. Wer kann den Prozess beschreiben, verändern, prüfen, reproduzieren und begründen: den Parametersatz, die Belichtungsstrategie, die Firmware, die Werkstoffspezifikation.

Die Kernaussage der Arbeit lautet: **Mit zunehmender Entfernung vom Lichtbogen wächst die Differenz zwischen ρ und δ , ohne dass ρ abnimmt.** Die Haftung wandert nicht mit der Verfügung.

9.2 Vier Konstellationen

Modell 3 — Vier Konstellationen der Risiko-Verfügungs-Lage

Achsen: Wer haftet für das Bauteil (rho) x wo liegt das Prozesswissen (delta).



Quadrant II ist die häufigste Lage kleiner und mittlerer Fertigungsbetriebe.

Quadrant IV ist der einzige Pfad, auf dem Verfügung durch eigene Arbeit zurückgewonnen wird.

Quadrant I — Kongruenz. Auftragschweißen und WAAM-Reparatur im Regime der EN ISO 3834. Der Betrieb haftet und verfügt. Das Verfahren ist über WPQR nachgewiesen, die ausführende Person über EN ISO 9606 geprüft, die Aufsicht über EN ISO 14731 benannt. Die Asymmetrie ist gering, weil das Qualifikationsregime sie strukturell ausschließt.

Quadrant II — Asymmetrie. Pulverbett-Lohnfertigung mit herstellergebundenem Parametersatz. Der Betrieb haftet, der Anlagenhersteller verfügt über die zentrale Prozessgröße und über die Firmware, deren Änderung eine Re-Qualifizierung auslösen kann. Dies ist der Regelfall industrieller Metall-AM-Dienstleistung.

Quadrant III — Delegation. Zukauf qualifizierter Bauteile von einem zertifizierten Lieferanten. Weder Haftung noch Verfügung liegen im Betrieb; dafür besteht vollständige Abhängigkeit von der Lieferkette und ein Verlust eigener Fertigungstiefe.

Quadrant IV — Offene Qualifizierung. Eigene Parameterentwicklung, offene Parametersätze, lichtbogenbasierte Verfahren mit eigener Verfahrensprüfung. Der Aufwand ist hoch; dafür kehrt die Verfügung in den Betrieb zurück. Dieser Quadrant ist der einzige Pfad, auf dem die Asymmetrie durch eigene Arbeit verringert wird statt durch Vertragsgestaltung umverteilt.

9.3 Warum das nicht nur ein Vertragsproblem ist

Es liegt nahe, die Asymmetrie vertraglich lösen zu wollen: durch Freistellungsklauseln, durch Garantiezusagen des Anlagenherstellers, durch Haftungsbegrenzungen gegenüber dem Besteller. Das greift aus drei Gründen zu kurz.

Erstens ist die arbeitsschutzrechtliche Verantwortung des Arbeitgebers nicht vertraglich abtretbar. Zweitens verlangt die fachliche Rechenschaft — gegenüber einer Prüfstelle, einer Behörde, einem Gericht — eine Verfahrensbeschreibung, die der Betrieb vorlegen und erläutern können muss; eine Lizenz ersetzt keine Beschreibung. Drittens ist die Asymmetrie epistemisch, nicht nur juristisch: Wer die Belichtungsstrategie nicht kennt, kann einen systematischen Fehler nicht als systematisch erkennen. Er sieht Ausschuss, nicht dessen Ursache.

9.4 Einordnung in die Werklinie

Die hier entwickelte Lage ist eine Domäneninstanz des allgemeinen Risiko-Verfügungs-Theorems, das in der Werklinie an anderer Stelle grundgelegt ist. Die Metalltechnik ist dabei ein besonders klarer Fall, weil sie über ein funktionierendes Gegenbeispiel im eigenen Haus verfügt: Das Schweißregime zeigt, dass eine Technologie mit erheblichem Gefährdungspotential und hoher Verfahrensabhängigkeit über ein personen- und dokumentengebundenes Qualifikationssystem geordnet werden kann. Die Frage ist nicht, ob so etwas möglich ist. Die Frage ist, warum es für die additive Fertigung nicht gebaut wurde.

10 Über den Lehrbuchstand hinaus: vier Vorschläge

Die folgenden Vorschläge gehen über den referierten Stand hinaus. Sie sind als Forschungs- und Gestaltungsdesiderate formuliert, nicht als gesicherte Befunde.

10.1 Ein Verfahrensdokument für die additive Fertigung

Die Schweißanweisung ist ein bemerkenswertes Artefakt: Sie macht ein komplexes, erfahrungsgebundenes Verfahren zu einem geschriebenen, prüfbar, zwischen Betrieben übertragbaren Dokument, dessen Gültigkeit durch eine Verfahrensprüfung begründet ist. Ihr Prinzip ist nicht verfahrensgebunden.

Vorgeschlagen wird die Entwicklung eines entsprechenden Dokuments für additive Verfahren — einer **additiven Verfahrensanweisung**, die aus einer additiven Verfahrensprüfung hervorgeht und folgende Eigenschaften hätte:

- **Vollständigkeit** in dem Sinn, dass alle risikobestimmenden Größen benannt sind, einschließlich der Softwarestände, deren Änderung die Gültigkeit beendet;
- **Übertragbarkeit** zwischen Betrieben und zwischen Anlagen desselben Typs, mit einem definierten Nachweisverfahren für die Gleichwertigkeit;
- **Prüfbarkeit** durch eine dritte Stelle, die das Dokument lesen und gegen das Bauteil halten kann;
- **Personenbindung** einer verantwortlichen Aufsicht mit definierter Befugnis.

Der Haupteinwand ist offensichtlich: Die vollständige Offenlegung des Parametersatzes kollidiert mit dem Geschäftsmodell der Anlagenhersteller. Der Einwand ist berechtigt und nicht ohne Weiteres aufzulösen. Ein gangbarer Mittelweg wäre eine zweistufige Lösung — ein betriebsöffentlicher Teil, der alle für die Verantwortungsübernahme und die Fehleranalyse

notwendigen Größen enthält, und ein hinterlegter Teil bei einer benannten Stelle, der im Prüf- oder Schadensfall zugänglich wird. Dieses Modell ist aus anderen Regelungsbereichen bekannt und wäre auf seine Übertragbarkeit zu untersuchen.

10.2 Eine Personenqualifikation für die additive Metallfertigung

Parallel dazu wäre eine der Schweißerprüfung entsprechende, personen-gebundene und portable Qualifikation zu entwickeln — nicht als Bedienerschein für eine Anlage, sondern als Nachweis einer Verfahrenskompetenz. Prüfgegenstand wären Werkstoffverhalten, Fehlerbilder und deren Ursachen, Pulver- beziehungsweise Draht-handhabung, Prozessüberwachung, Beurteilung von Prüfergebnissen und die Grenzen des Verfahrens.

Die Erfahrung des Schweißregimes spricht dafür, dass eine solche Prüfung befristet sein und einen praktischen Teil enthalten sollte. Sie wäre der institutionelle Ort, an dem eine herstellerunabhängige Berufskompetenz entstehen kann.

10.3 Eine Korrektur der Modulzuordnung

Für Österreich konkret: Die Kombinationsmöglichkeit des Spezialmoduls Additive Fertigung sollte auf die Hauptmodule Schweißtechnik, Stahlbau-technik, Metallbau- und Blechtechnik und Schmiedetechnik ausgeweitet werden, und das Berufsprofil des Spezialmoduls sollte um eine metallspezifische Schicht ergänzt werden — Erstarrungsmetallurgie, Eigenspannung und Verzug, Pulver- und Draht-handhabung, Schutzgasführung, Rückverfolgbarkeit des Zusatzwerkstoffs, Fehlerbeurteilung an additiven Gefügen, Schnittstelle zur zerstörungsfreien Prüfung.

Mittelfristig wäre zu prüfen, ob die lichtbogenbasierte additive Fertigung nicht sachgerechter als Erweiterung des Hauptmoduls Schweißtechnik zu führen wäre als über ein Spezialmodul eines anderen Lehrberufs. Verfahrensphysikalisch gehört sie dorthin.

10.4 Offene Parametersätze als Prüfbarkeitsvoraussetzung

Die Debatte über offene Parametersätze wird bislang überwiegend als Innovations- und Adoptionsfrage geführt: Geschlossene Parameter verlangsamten die Verbreitung, verhindern die Nutzung nicht vom Hersteller gelieferter Werkstoffe und erzwingen redundante Entwicklungsarbeit. Diese Argumente sind zutreffend, aber nicht die stärksten.

Das stärkere Argument ist die Prüfbarkeit. Eine Fertigung, deren zentrale Prozessgröße weder dem Betrieb noch einer Prüfstelle zugänglich ist, kann im Streitfall nicht vollständig rekonstruiert werden. Wo Bauteile sicherheitsrelevant sind, ist das ein strukturelles Defizit der Nachweiskette — unabhängig davon, wie gut das Qualitätsmanagementsystem im Übrigen geführt wird.

Dass die Lage nicht einheitlich ist, zeigt die Gegenbewegung bei einzelnen Anlagenherstellern, die offene Parametersteuerung neben validierten, gesperrten Einstellungen anbieten und Schnittstellen zu Maschinendaten öffnen. Diese Entwicklung wäre systematisch zu erfassen: Welche Anlagenklassen erlauben welchen Zugriff, zu welchen Bedingungen, mit welchen Folgen für Gewährleistung und Qualifizierung? Eine solche Erhebung existiert nach Kenntnis des Autors nicht und wäre ein eigenständiges Forschungsvorhaben.

10.5 Zusammenfassung der Desiderate

Desiderat	Adressat	Aufwand	Wirkung auf die Asymmetrie
Additive Verfahrensanweisung mit Hinterlegungsmodell	Normung (ISO/TC 261, CEN/TC 438)	hoch	strukturell
Personengebundene AM-Qualifikation	Normung, Prüfstellen, Sozialpartner	mittel	strukturell

Desiderat	Adressat	Aufwand	Wirkung auf die Asymmetrie
Erweiterung der Modulkombinationen (AT)	Berufsausbildungsrecht, Sozialpartner	gering	mittelbar, langfristig
Erhebung der Parameterzugänglichkeit nach Anlagenklasse	Forschung	gering bis mittel	erkenntnisschaffend

11 Interessenlage und Offenlegung

Der Autor betreibt eine Fertigungswerkstatt mit Schwerpunkt auf polymerbasierter additiver Fertigung und verfügt über eine Werkmeisterqualifikation im Maschinenbau sowie über abgeschlossene Ausbildungen in zwei weiteren Gewerken. Daraus ergibt sich ein praktisches Interesse an einer Fertigungslandschaft, in der kleine Betriebe über ihre Verfahren verfügen können. Diese Perspektive ist in der Fragestellung dieser Arbeit wirksam und wird hier offengelegt, statt neutral gesetzt zu werden.

Der Autor betreibt keine metallischen additiven Verfahren, steht in keinem Vertragsverhältnis zu Anlagen- oder Werkstoffherstellern der Metall-AM-Branche und hat für diese Arbeit keine Förderung, Auftragsvergabe oder Sachleistung erhalten. Die Arbeit ist privat finanziert.

Verwendete Marktzahlen stammen teilweise aus kommerzieller Marktforschung und aus Veröffentlichungen von Anbietern; sie sind im Text als solche gekennzeichnet. Normtexte wurden nicht im Volltext ausgewertet; siehe dazu Abschnitt 1.3 und die Limitationen.

Für die Erstellung dieser Arbeit wurde ein KI-Sprachmodell als Recherche- und Schreibwerkzeug eingesetzt. Die Auswahl der Fragestellung, die

Argumentationsführung, die Modellbildung und die Verantwortung für den Inhalt liegen beim Autor.

12 Limitationen

1. **Normtexte liegen nicht im Volltext zugrunde.** Die Aussagen über Normeninhalte stützen sich auf öffentlich zugängliche Normvorschauen, Normungsübersichten, Zertifizierungsliteratur und Fachpublikationen. Für einen belastbaren Einzelnachweis ist der jeweilige Volltext heranzuziehen. Das betrifft insbesondere die Aussage über die Leerstelle bei der Personenqualifikation in Abschnitt 5.3: Sie ist ein Negativbefund und als solcher nur so belastbar wie die Vollständigkeit der eingesehenen Normenübersichten.
2. **Die Kopplungsachse ist qualitativ.** Modell 1 stellt eine Ordnung dar, keine Messung. Eine Operationalisierung — etwa über die Zahl der betrieblich zugänglichen gegenüber der Zahl der gesperrten Prozessgrößen je Anlagenklasse — wäre möglich und steht aus.
3. **Die Berufsbildungsanalyse ist auf Österreich beschränkt.** Die deutsche, schweizerische und EU-weite Lage wurde nicht erhoben. Ob das beschriebene Zuordnungsmuster — additive Fertigung als Mechanik-Kompetenz — international wiederkehrt, ist eine offene und prüfbare Frage.
4. **Marktzahlen sind heterogen und teilweise interessengebunden.** Die in Abschnitt 7 genannten Größenordnungen sind nicht als Befunde zu lesen. Die Spannweite der Schätzungen für dasselbe Marktjahr ist in Abschnitt 7.1 offengelegt.
5. **Die Arbeitsschutzbefunde stammen aus einer begrenzten Zahl von Betriebserhebungen,** überwiegend aus Nordamerika und Skandinavien. Eine Übertragung auf kleine Betriebe mit weniger ausgebauter Infrastruktur ist nicht ohne Weiteres zulässig — im Gegenteil legt

der Befund, dass die Gefährdung an den manuellen Schritten hängt, nahe, dass die Lage in gering ausgestatteten Betrieben ungünstiger ist als in den untersuchten.

6. **Einzelstudien zur Reparaturwirtschaftlichkeit sind nicht verallgemeinerbar.** Die genannten Faktoren beziehen sich auf bestimmte Bauteile, Werkstoffe und Betriebsbedingungen.
7. **Die Vorschläge in Abschnitt 10 sind nicht erprobt.** Insbesondere das Hinterlegungsmodell für Parametersätze ist eine Analogiebildung, deren rechtliche und praktische Tragfähigkeit zu prüfen wäre.

13 Schluss

Die additive Fertigung von Metall wird in der öffentlichen und in weiten Teilen der fachlichen Debatte als Frage der Möglichkeiten verhandelt: welche Geometrien, welche Werkstoffe, welche Stückzahlen. Diese Arbeit hat eine andere Frage gestellt — die nach der Ordnung, in die das Verfahren eintritt.

Der Befund ist zweiteilig. Verfahrenstechnisch ist die additive Metallfertigung kein einheitlicher Gegenstand, sondern eine Reihe, die von einem gewerksnahen Pol — mehrlagiges Auftragschweißen mit Bahnplanung — zu einem anlagengebundenen Pol reicht, an dem die zentrale Prozessgröße nicht mehr im Betrieb liegt. Institutionell hat sich diese Reihe bereits niedergeschlagen: in einer Normenfamilie, die Standorte und Anlagen qualifiziert, wo die ältere Personen und Verfahren qualifiziert, und in einer Ausbildungsordnung, die die additive Fertigung der Maschinenbedienung zuordnet und sie den verfahrensnächsten Teilgewerken verschließt.

Dass beide Beobachtungen in dieselbe Richtung zeigen, obwohl sie aus unabhängigen Quellenarten stammen, ist das Hauptergebnis. Es gibt keinen Grund anzunehmen, dass diese Entwicklung notwendig war. Das Schweißregime beweist im selben Gewerk, dass ein hochgradig verfahren-

rensabhängiges, sicherheitsrelevantes Fertigungsverfahren über personengebundene Prüfungen und ein übertragbares Verfahrensdokument geordnet werden kann. Die Bauanleitung liegt vor. Sie wurde für die additive Fertigung nur nicht verwendet.

Für den einzelnen Betrieb lautet die praktische Folgerung nüchtern: Die Nische, in der Risiko und Verfügung beieinanderbleiben, ist die lichtbogennahe, reparatur- und instandsetzungsorientierte additive Fertigung. Sie ist die mit der niedrigsten Investitionsschwelle, dem bekanntesten Gefährdungsprofil, den zugänglichsten Qualifizierungspfaden und der größten Nähe zu vorhandener Kompetenz. Das ist kein Rückzug auf das Einfache, sondern die Stelle, an der ein Gewerk eine neue Technik aufnehmen kann, ohne dabei die Verfügung über die eigene Arbeit abzugeben.

14 Literatur- und Quellenverzeichnis

Normen und technische Spezifikationen

1. ISO/ASTM 52900 — Additive Fertigung: Grundlagen, Terminologie.
2. ISO/ASTM 52920:2023 — Additive manufacturing. Qualification principles. Requirements for industrial additive manufacturing processes and production sites. <https://www.iso.org/standard/76911.html>
3. ISO/ASTM TS 52930:2021 — Additive manufacturing. Qualification principles. Installation, operation and performance (IQ/OQ/PQ) of PBF-LB equipment. <https://www.iso.org/standard/79527.html>
4. ISO/ASTM TS 52949:2025 — Additive manufacturing of metals. Qualification principles. IQ/OQ/PQ of PBF-EB equipment.
5. ISO/ASTM 52904 — Additive manufacturing of metals. Powder bed fusion process to meet critical applications.
6. ISO/ASTM 52948:2026 — Additive manufacturing of metals. Powder bed fusion. Classification of imperfections.

7. ISO/ASTM TR 52905:2023 — Additive manufacturing of metals. Non-destructive testing and evaluation. Defect detection in parts.
8. ISO/ASTM TR 52906:2022 — Additive manufacturing. Non-destructive testing. Intentionally seeding flaws in metallic parts.
9. ISO 27548:2024 — Additive manufacturing of plastics. Environment, health and safety.
10. EN ISO 3834-1 bis -5 — Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweißen von metallischen Werkstoffen.
11. EN ISO 14731 — Schweißaufsicht: Aufgaben und Verantwortung.
12. EN ISO 9606 — Prüfung von Schweißern.
13. ISO 14732 — Schweißpersonal: Prüfung von Bedienern und Einrichtern.
14. EN ISO 15614 — Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren.
15. EN ISO 9712 — Zerstörungsfreie Prüfung: Qualifizierung und Zertifizierung von Personal.
16. ÖNORM EN ISO 18265 — Metallische Werkstoffe: Umwertung von Härtewerten.
17. BSI PAS 6012:2020 — Additive manufacturing. Wire arc. Guide. https://www.bsigroup.com/siteassets/pdf/en/insights-and-media/insights/brochures/pas_6012.pdf
18. AWS D20.1 — Specification for Fabrication of Metal Components using Additive Manufacturing.
19. API Standard 20S — Additively Manufactured Metallic Components for Use in the Petroleum and Natural Gas Industries.
20. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX, QW-600.
21. ASTM WK69732 — New Guide for Additive Manufacturing: Wire Arc Additive Manufacturing. <https://www.astm.org/workitem-wk69732>

Rechtsquellen (Österreich)

1. Metalltechnik-Ausbildungsordnung, BGBl. II Nr. 97/2022. https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA_2022_II_97/BGBLA_2022_II_97.html
2. Mechatronik-Ausbildungsordnung, BGBl. II Nr. 196/2019 i.d.F. BGBl. II Nr. 195/2021.
3. Berufsausbildungsgesetz (BAG), BGBl. Nr. 142/1969 i.d.g.F., insbesondere § 8 Abs. 4.
4. Wirtschaftskammer Österreich: Modulare Lehre Metalltechnik. <https://www.wko.at/oe/gewerbe-handwerk/metalltechniker/ausbildungsordnung-modulare-lehre>
5. Berufsprofil Spezialmodul Additive Fertigung (Lehrberuf Mechatronik). <https://www.mechatroniklehre.at/de/lehrberuf-mechatronik/spezialmodule/additive-fertigung>
6. AMS Berufslexikon: MetalltechnikerIn, Hauptmodule und Lehrlingszahlen. https://www.berufslexikon.at/berufe/3451-MetalltechnikerIn-Hauptmodul_Maschinenbautechnik/

Begutachtete Literatur

1. Ali, M. H.; Han, Y. S. (2023): A Finite Element Analysis on the Effect of Scanning Pattern and Energy on Residual Stress and Deformation in Wire Arc Additive Manufacturing of EH36 Steel. Materials 16(13), 4698. <https://doi.org/10.3390/ma16134698>
2. Sharifi, S. S.; Fritsche, S.; Holzinger, C.; Enzinger, N. (2023): Selection of Parameters for Optimized WAAM Structures for Civil Engineering Applications. Materials 16(13), 4862. <https://doi.org/10.3390/ma16134862>
3. Gierth, M.; Henckell, P.; Ali, Y.; Scholl, J.; Bergmann, J. P. (2020): Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminum Alloy AlMg5Mn with Energy-Reduced Gas Metal Arc Welding (GMAW). Materials 13(12), 2671. <https://doi.org/10.3390/ma13122671>

4. Li, L.; Zhang, X.; Liou, F. (2021): Experimental and Numerical Investigation in Directed Energy Deposition for Component Repair. *Materials* 14(6), 1409. <https://doi.org/10.3390/ma14061409>
5. Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>
6. Advanced Repairs of Metal Parts through Laser-Directed Energy Deposition: A Practical Review of Industrial Use Cases. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-025-11023-x>
7. A review on qualification and certification for metal additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*. <https://doi.org/10.1080/17452759.2021.2018938>
8. Process parameter optimization of metal additive manufacturing: a review and outlook. *Journal of Materials Informatics*. <https://doi.org/10.20517/jmi.2022.18>
9. Health hazards of particles in additive manufacturing: a cross-disciplinary study on reactivity, toxicity and occupational exposure to two nickel-based alloys. *Scientific Reports* (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47884-1>
10. Occupational exposure and health surveys at metal additive manufacturing facilities. *Frontiers in Public Health*. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1292420>
11. van Ree, M.; du Preez, S.; du Plessis, J. L. (2023): Emissions and Exposures Associated with the Use of an Inconel Powder during Directed Energy Deposition Additive Manufacturing. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 20(13), 6206. <https://doi.org/10.3390/ijerph20136206>
12. Skin, Clothing, and Surface Contamination with Metals at a Powder Additive Manufacturing Facility. *Safety* (2026) 12(2), 54. <https://doi.org/10.3390/safety12020054>
13. Evaluating the cost competitiveness of metal additive manufacturing: a case study with metal material extrusion. *Journal of Manufacturing*

Systems / Additive Manufacturing Letters. <https://doi.org/10.1016/j.cir-pj.2023.05.005>

14. A Review of Non-Powder-Bed Metal Additive Manufacturing: Techniques and Challenges. *Materials* (2024) 17(19), 4717. <https://doi.org/10.3390/ma17194717>

Behördliche und institutionelle Quellen

1. NIOSH (2025): Evaluation of Metals Exposure in a Metal Powder Additive Manufacturing Facility. Health Hazard Evaluation Report 2023-0034-3409. <https://www.cdc.gov/niosh/hhe/reports/pdfs/2023-0034-3409.pdf>
2. NIST: Qualification for Additive Manufacturing Materials, Processes, and Parts. <https://www.nist.gov/programs-projects/qualification-additive-manufacturing-materials-processes-and-parts>
3. NIST: AM Machine and Process Control Methods for Additive Manufacturing. <https://www.nist.gov/programs-projects/am-machine-and-process-control-methods-additive-manufacturing>
4. Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP-Verordnung), Einstufung von Nickelmetall und Nickelverbindungen.

Branchen- und Anbieterquellen (als solche gekennzeichnet)

1. Metal AM: Exploiting your metal Additive Manufacturing data assets. <https://www.metal-am.com/articles/exploiting-your-metal-additive-manufacturing-data-assets-faster-industrialisation-and-new-revenue-streams/>
2. Metal AM: Safety management in metal Additive Manufacturing. <https://www.metal-am.com/articles/safety-management-in-metal-3d-printing/>
3. AWS Welding Digest (2026): Beyond the Bead — Applying Wire Arc Additive Manufacturing to Large-Scale, High-Demand Components. <https://www.aws.org/magazines-and-media/welding-digest/2026/march/beyond-the-bead-applying-wire-arc-additive-manufacturing-to-largescale-highdemand-components>

4. Dyndrite: The Importance of Open Parameters in Additive Manufacturing. <https://www.dyndrite.com/blog/the-importance-of-open-parameters-in-additive-manufacturing>
5. EOS: Openness as the Engine of Software Innovation in Metal AM. <https://www.eos.info/content/blog/2026/software-openness-in-metal-additive-manufacturing-part-2>
6. Wohlers Report 2026, referiert nach Branchenberichterstattung (AM-Dienstleistungen +15,5 %, Anlagenverkäufe +3,6 % im Jahr 2025).
7. 3DPrint.com (2026): 3D Printing Predictions 2026 — Industrial Production in Metal Additive Manufacturing. <https://3dprint.com/322917/3d-printing-predictions-2026-industrial-production-in-metal-additive-manufacturing/>

Dieses Werk steht unter der Lizenz Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). Zitiervorschlag: Schüller, T. (2026): Naht und Parametersatz — Additive Metallfertigung und das Gewerk Metalltechnik. Syntagma Forschung, Wien. FORSCH-PRO-V0467, Version 1.0.