Gedruckter Rumpf

Thomas Schüller · Syntagma Forschung · ORCID 0009-0003-9799-6747 · Fassung 0.2 · 09.11.2026 · Alle Rechte vorbehalten

Gedruckter Rumpf

Additive Fertigung im Bootsbau — eine transdisziplinäre Vollaufarbeitung

Autor: Thomas Schüller — unabhängiger transdisziplinärer Forscher, ohne institutionelle Anbindung, privat finanziert **Slug:** gedruckter-rumpf · **Version:** v0.2 · **Stand:** 2026-11-09 **Lizenz:** CC BY 4.0 **Werkstruktur:** Vollwerk · **isPartOf:** FORSCH-0083 (ρ/δ-Risiko-Verfügungs-Asymmetrie, Domäneninstanz)

> **Quellen- und Verifikationsvorbehalt (steht bewusst am Kopf, nicht am Ende).** Ein Teil der in Kapitel 3, 4 und 10 referierten Kennzahlen stammt aus Herstellerangaben, Fachpresse und Konsortialmitteilungen. Diese Angaben sind als unternehmensseitige Behauptungen gekennzeichnet und bis zur Prüfung an der Primärquelle nicht als gesicherte Messwerte zu behandeln. Peer-reviewte Quellen sind mit DOI ausgewiesen, Normen mit Nummer und Ausgabestand; wo ein Ausgabestand nicht gesichert verifiziert wurde, ist dies vermerkt. Widersprüche zwischen Quellen — etwa die Massenangabe zum WAAMpeller in Abschnitt 4.4 — werden offengelegt statt geglättet. Interessenlagen der Publizierenden sind in Abschnitt 12.6 tabelliert.
>
> **Abgrenzungserklärung.** Das Feld der großformatigen additiven Fertigung maritimer Strukturen ist in erheblichem Umfang wehrtechnisch finanziert; mehrere der leistungsfähigsten Referenzobjekte sind Marine- oder Spezialkräfteplattformen. Diese Arbeit behandelt ausschließlich zivile Anwendungen: Sport-, Arbeits-, Fischerei-, Forschungs- und Rettungsfahrzeuge sowie Komponentenfertigung. Wehrtechnische Anwendungen, ballistische Auslegung, Signaturminderung und unbemannte Kampfplattformen sind nicht Gegenstand. Wo Kennwerte aus solchen Programmen stammen, ist die Herkunft benannt, die Anwendung aber ausgeschlossen.

---

1. Fragestellung, Methode, Abgrenzung

1.1 Fragestellung

F1 — Verfahrensfrage. Welche additiven Verfahren sind für welche Bauteilklasse im Bootsbau physikalisch und wirtschaftlich anschlussfähig, und wo liegen die Verfahrensgrenzen?

F2 — Skalierungsfrage. Unter welchen Bedingungen ist der einteilige Druck eines vollständigen Rumpfes möglich, und welche physikalische Beziehung begrenzt ihn? Diese Frage ist der Kern der Arbeit; Abschnitt 5.4 leitet dafür ein Kriterium her.

F3 — Nachweisfrage. Welche Regelwerke gelten, welche Nachweisketten existieren, und wo klafft die Lücke zwischen dem, was gebaut wird, und dem, was normativ nachweisbar ist?

F4 — Verfügungsfrage. Wer trägt das Risiko eines gedruckten Rumpfes, und wer verfügt über die Parameter, die dieses Risiko bestimmen? Diese Frage macht den Gegenstand zu einer Domäneninstanz der ρ/δ-Asymmetrie (FORSCH-0083).

1.2 Methodische Stellung

Die Arbeit folgt dem Lehrbuchverhältnis in drei Schritten: Synthese des Wissensstandes (Kap. 2–4, 9, 11), Bewertung seiner Belastbarkeit (Kap. 5, 6, 12.6), Überschreitung durch eigene Ableitung (Abschnitt 5.4 Schichtzeit-Kriterium, Abschnitt 7.4 Strategieentscheidung, Abschnitt 10.2 Amortisationsschwelle, Abschnitt 12.5 biologische Analogieprüfung).

Disziplinäre Linsen: Polymerphysik und Rheologie, Werkstoffkunde Metall, Strukturmechanik dünnwandiger Schalen, Fertigungstechnik, Normungs- und Zertifizierungsrecht, Produkthaftungsrecht, Industrieökonomik, Arbeits- und Wissenssoziologie, Ökobilanzierung, Meeresumweltschutz, vergleichende Biologie akkretiver Strukturbildung.

1.3 Nicht behandelt

Wehrtechnische Anwendungen; 3D-Betondruck maritimer Infrastruktur; Großschiffbau über 24 m Rumpflänge außer im Kapitel Komponenten- und Ersatzteilfertigung; Innenausbau; Antriebstechnik außer Propeller und Düsen.

---

2. Verfahrenstaxonomie

2.1 Begriffliche Grundlage

ISO/ASTM 52900:2021 definiert additive Fertigung als Fügen von Werkstoff zu Bauteilen aus 3D-Modelldaten, üblicherweise Schicht auf Schicht, in Abgrenzung zu subtraktiven und formativen Verfahren. Die Norm ordnet sieben Prozesskategorien; für den Bootsbau sind vier praktisch relevant, wobei die Relevanz nach Bauteilklasse stark zerfällt.

Entscheidend ist eine Unterscheidung, die im populären Sprachgebrauch verschwimmt: Ob additiv gefertigt wird, ist unabhängig davon, ob das *Endbauteil* oder das *Werkzeug* additiv gefertigt wird. Der überwiegende Teil der industriell etablierten Praxis betrifft bis heute den Werkzeugbau — Urmodell (Plug) und Form (Mold) —, nicht den Rumpf. Das ist keine Übergangserscheinung, sondern folgt aus der Ökonomie der Stückzahl (Kap. 10).

2.2 Materialextrusion im Großformat (LFAM / FGF)

Großformatige Materialextrusion ist das für Rumpfstrukturen dominierende Verfahren. Kennzeichen:

- **Granulatzuführung statt Filament.** Ein Einschneckenextruder verarbeitet Compound-Granulat. Das entkoppelt die Materialkosten vom Filamentaufschlag und erlaubt Durchsätze, die mit Filament nicht erreichbar sind.
- **Aufbauraten** von einigen kg/h bis mehreren hundert kg/h. Die Anlage der University of Maine wird mit rund 227 kg/h angegeben; Anlagen um 10 kg/h sind der Laborstandard der referierten Prozessstudien (DOI 10.1007/s40964-025-01183-5).
- **Strangquerschnitte** typisch 1–3 mm Höhe bei 4–12 mm Breite. Daraus folgen die untere Grenze der Wandstärkenauflösung und die Oberflächenwelligkeit.
- **Kinematik** entweder Portal (kartesisch, große Bauräume, hohe Steifigkeit) oder Sechsachsroboter (Freiformbahnen, nicht-planare Schichtung, kleinerer Arbeitsraum je Zelle). Erweiterungen um eine bewegte Werkstückaufnahme werden als „5D-Druck" vermarktet; sachlich ist es eine kinematische Erweiterung auf sieben und mehr gesteuerte Achsen mit dem Ziel, die Schichtnormale gegenüber der Hauptlastrichtung günstiger zu orientieren.
- **Hybridbetrieb** mit Fräskopf auf derselben Maschine ist bei Portalanlagen Standard, weil das Teil in Near-Net-Shape entsteht und Formflächen spanend nachgearbeitet werden müssen.

2.3 Drahtbasierte Lichtbogenauftragung (WAAM / DED-Arc)

WAAM nutzt eine Schweißstromquelle — GTAW/TIG, GMAW oder CMT — mit Drahtzusatzwerkstoff an einem Industrieroboter.

- **Aufbauraten** 1–6 kg/h für marineübliche Legierungen; für Titan werden bis 10 kg/h angegeben (Herstellernähe, nicht unabhängig verifiziert).
- **Bauräume** mehrere Meter Kantenlänge; für die Rotterdamer Anlage werden maximal 7 × 2 × 2 m genannt.
- **Werkstoffe** im Marinesegment vor allem Nickel-Aluminium-Bronze (NAB), Duplex- und Superduplexstähle, austenitische Stähle, Aluminiumlegierungen.
- **Nachbearbeitung** obligatorisch: CNC-Fräsen der Funktionsflächen, in der Regel Wärmebehandlung, zerstörungsfreie Prüfung.

WAAM ist im Bootsbau kein Rumpf-, sondern ein Komponentenverfahren: Propeller, Düsen, Wellenbockteile, Ruderbeschläge, Gussersatz. Der ökonomische Hebel liegt nicht in der Erstfertigung, sondern in Ersatzteilversorgung und Reparatur.

2.4 Pulverbett und Binder Jetting

PBF-LB und PBF-EB sind durch Bauraum und Kosten auf Kleinteile begrenzt: Beschläge, Hydraulikblöcke, Sensorträger, Impeller, korrosionsbeständige Sonderarmaturen. Binder Jetting ist maritim vor allem als Sandformverfahren für den Gussersatz relevant — additiv gefertigte Formen und Kerne für konventionell abgegossene Propeller und Gehäuse. Diese Route ist industriell reifer als der direkte Metalldruck, wird aber selten als „gedrucktes Bauteil" ausgewiesen, weil das Endprodukt ein Guss ist.

2.5 Kontinuierliche Faser

Verfahren mit kontinuierlicher Faserablage adressieren die Kernschwäche der Kurzfaserextrusion — fehlende Lastübertragung über größere Strecken. Reifegrad und Ablagerate sind gering, die Bahnplanung auf doppelt gekrümmten Rumpfflächen ist nicht trivial. Für Rumpfstrukturen ist der Ansatz ein Demonstrationsfeld, für hochbelastete Einzelbauteile — Ruderschaft, Beschlagverstärkung, lokale Krafteinleitung — ein realistischer Kandidat.

Tabelle 1 — Verfahrenszuordnung Bootsbau

Verfahren	Aufbaurate	Typischer Bauraum	Werkstoffe	Bauteilklasse	Regelwerk
LFAM/FGF, Portal	20–230 kg/h	bis 30 × 6,7 × 3 m	ABS-CF/GF, PETG, PA6-GF, PAEK-CF, PLA-CNF	Rumpf, Urmodell, Form, Aufbauten	ISO 12215-Reihe (mittelbar), DNV-ST-B203 Polymerteil
LFAM/FGF, Sechsachsroboter	5–60 kg/h	2–12 m Bauteillänge	HDPE-Compounds, PETG-Basalt, ASA-CF	Rumpf ≤ 12 m, Aufbauten, Konsolen	dto.
WAAM / DED-Arc	1–6 kg/h	bis ca. 7 × 2 × 2 m	NAB, Duplex, Al, Ti	Propeller, Düsen, Beschläge, Reparatur	DNV-ST-B203, BV NI662, IACS-Rahmen 2025
PBF-LB	0,02–0,2 kg/h	≤ 0,5 m Kantenlänge	Ti6Al4V, 316L, AlSi10Mg	Kleinbeschläge, Armaturen	DNV-ST-B203, ABS-Anforderungen
Binder Jetting (Sandform)	formabhängig	1–4 m Formkasten	Quarz-, Chromitsand	Gussformen Propeller/Gehäuse	konventionelles Gussregelwerk

Verfahren	Aufbaurate	Typischer Bauraum	Werkstoffe	Bauteilklasse	Regelwerk
Kontinuierliche Faser	< 1 kg/h	1–3 m	CF/GF in PA, PEEK	lokale Verstärkung	keine spezifische Norm

Aufbauraten und Bauräume aus Hersteller- und Institutsangaben; als Größenordnung belastbar, als Einzelwert prüfbedürftig.

---

3. Materialsysteme Polymer

3.1 Anforderungsprofil

Ein Rumpfwerkstoff im Freizeit- und Arbeitsbootbereich muss gleichzeitig leisten: ausreichende Steifigkeit bei dünner Wand, Schlagzähigkeit bei Grundberührung und Anlegestoß, geringe Wasseraufnahme über Jahrzehnte, UV-Beständigkeit, Beständigkeit gegen Antifouling und Reinigungsmittel, Fügbarkeit und Reparierbarkeit, sowie eine Dichte, die in Kombination mit der erforderlichen Wandstärke ein tragfähiges Verdrängungsbudget ergibt. Die letzte Bedingung ist die schärfste und wird regelmäßig unterschätzt.

3.2 Die Dichtefalle

Der zentrale werkstoffseitige Konflikt lautet: Ein extrudierter Massivwerkstoff hat keine Kernlage. Klassischer Bootsbau erzeugt Biegesteifigkeit über Sandwich — dünne, steife Deckschichten in großem Abstand um einen leichten Kern. Der einfach extrudierte Rumpf ersetzt das durch Materialdicke. Weil die Biegesteifigkeit einer Platte mit der dritten Potenz der Dicke, die Masse aber linear wächst, ist die Massivwand dem Sandwich bei gleicher Steifigkeit massenseitig unterlegen — je nach Kernstärke um einen Faktor zwischen etwa 2 und 5.

Die praktische Folge wurde beim Projekt Pioner 14 Active Dark Line (RISE / Cipax, ABB-Robotik) berichtet: Der einteilig gedruckte, seefähige Rumpf erforderte den Ausgleich zu hoher Materialdichte durch zusätzliche Auftriebskörper (Darstellung der Fachpresse auf Basis von Projektangaben). Das ist kein Detailproblem, sondern die konstruktive Kernaufgabe: Steifigkeit muss über *Geometrie* zurückgeholt werden — Rippen, Hohlkammern, geschlossenzellige Gitter, doppelwandige Bereiche —, nicht über Wandstärke.

Darin liegt zugleich der zentrale Verfahrensvorteil: Rippen, Sicken, integrierte Tankzonen, Kabelkanäle und Sitzstrukturen kosten in der Extrusion keine Werkzeugmehrkosten. Ein gedruckter Rumpf, der wie ein GFK-Rumpf konstruiert ist, ist ein schlechter gedruckter Rumpf.

3.3 Werkstofffamilien

ABS und ASA mit Kurzfaser. ABS-CF20 ist der Referenzwerkstoff des Werkzeugbaus: gute Verarbeitbarkeit, niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient durch Faseranteil, ausreichende Formstabilität für Laminierformen. ASA verbessert die UV-Beständigkeit. Für Endbauteile im Wasser sind Kälteschlagzähigkeit und Langzeitwasseraufnahme kritisch zu prüfen.

PETG und rezykliertes PETG. Verarbeitungsrobust, hydrolytisch vergleichsweise stabil, aus Rezyklat verfügbar. Compounds mit Holzmehl verschlechtern die Nassalterung. Ein Compound aus rezykliertem PETG mit Basaltkurzfaser wird herstellerseitig mit 108 MPa Zugfestigkeit längs und 36,5 MPa quer zur Schichtung angegeben, gegenüber 49,2 bzw. 9,7 MPa für ein HDPE-basiertes Marine-Compound, ferner mit über 90 % Festigkeitserhalt nach 24 Monaten Salzwasserlagerung und Wasseraufnahme unter 0,4 %. Die Prüfung erfolgte extern an der University of Maine (Prüfkennung UM-TC-23-1008). **Einordnung:** Die Werte stammen von einem Unternehmen, das den Werkstoff vermarktet und ihn in ein

wehrtechnisches Evaluationsverfahren eingebracht hat; die Prüfstelle ist unabhängig, die Auswahl der berichteten Kennwerte nicht. Als Größenordnung plausibel, als Auslegungsgrundlage ohne eigene Prüfung nicht verwendbar.

Polyolefine (HDPE, PP). Hohe Schlagzähigkeit, minimale Wasseraufnahme, gute Chemikalienbeständigkeit, gute Rezyklierbarkeit — und der niedrigste E-Modul der Kandidaten, dazu hoher Schwund und schlechte Lackierbarkeit. Für robuste Arbeitsboote mit hoher Stoßbelastung und moderater Steifigkeitsanforderung die naheliegende Familie; wo Formsteifigkeit gefragt ist, die schlechteste.

PA6 mit Glas- oder Kohlefaser. Hohe Festigkeit und Steifigkeit, gute Faserankopplung — und Feuchteaufnahme mit erheblicher Eigenschaftsänderung. Für dauernd im Wasser liegende Strukturen nur mit belastbaren Langzeitdaten vertretbar.

PAEK/PEKK mit Kohlefaser. Hochleistungsklasse, wirtschaftlich nur für Sonderbauteile. Die Verarbeitung langsam kristallisierender PAEK-Typen im LFAM ist untersucht (DOI 10.3390/polym16162364); die Arbeit zeigt, dass feste Schichtzeiten als Prozessvorgabe die Bauteilqualität nicht sichern — ein Befund, der für Abschnitt 5.4 zentral ist.

Biobasierte Systeme (PLA mit Zellulose-Nanofasern). Die University of Maine verfolgt PLA mit Zellulose-Mikro- und -Nanofasern mit dem Ziel eines vollständig biobasierten, rezyklierbaren Werkstoffsystems. Die Zielangabe, mit 50 % Holzanteil bei 227 kg/h aluminiumähnliche Eigenschaften zu erreichen, ist Programmziel, nicht erreichter Kennwert. Kritisch sind die Hydrolyseempfindlichkeit von PLA und die Wasseraufnahme der Zellulosephase — genau die Eigenschaften, die im Dauereinsatz entscheiden und in den vorliegenden Veröffentlichungen am schwächsten belegt sind.

Tabelle 2 — Richtwerte gedruckter Compounds (Zugfestigkeit)

Werkstoff	längs zur Bahn	quer zur Schichtung	Verhältnis quer/längs	Quelle / Status
rPETG + Basaltkurzfaser	108 MPa	36,5 MPa	0,34	Herstellerangabe, externe Prüfung UMaine
HDPE-Marine-Compound	49,2 MPa	9,7 MPa	0,20	Vergleichswert derselben Quelle
PA6-CF (LFAM)	100 % (Referenz)	27 %	0,27	DOI 10.3390/jmmp6020036
CF-ABS (LFAM, drei Richtungen)	20–81 MPa; E 3,2–9,8 GPa	—	stark richtungsabhängig	PMC12157892
ASA-CF (FGF, lange Faser)	75 MPa; E 7,5 GPa	reduziert	Interlayer verschlechtert sich mit Faserlänge	DOI 10.3390/polym16010060

Werte unterschiedlicher Prüfgeometrien und Prozessfenster, untereinander nicht normiert. Als Größenordnungsvergleich belastbar, als Auslegungsgrundlage ungeeignet.

Der wiederkehrende Befund über alle Quellen: **Das Verhältnis Quer- zu Längsfestigkeit liegt zwischen 0,20 und 0,35.** Für die Rumpfauslegung folgt daraus, dass die Schichtnormale niemals in einer Hauptzugrichtung liegen darf und dass die Bahnplanung Teil der Strukturauslegung ist, nicht Teil der Arbeitsvorbereitung.

3.4 Faserlänge: der nicht auflösbare Zielkonflikt

Längere Kurzfasern erhöhen Zugfestigkeit und Modul in Bahnrichtung, verschlechtern aber die Zwischenschichthaftung, weil sie die Grenzfläche mechanisch stören und als Rissinitiierungsflächen wirken (DOI 10.3390/polym16010060). Höhere Faseranteile senken zudem den

Wärmeausdehnungskoeffizienten und damit den Verzug — jenseits eines kritischen Anteils steigt aber die Porosität und die Festigkeit fällt wieder (Übersicht DOI 10.1002/app.53476).

Daraus folgt eine Auslegungsregel: **Der Faseranteil eines Rumpfcompounds ist nicht nach der Maximalfestigkeit zu wählen, sondern nach der Minimalanforderung in Schichtnormalenrichtung.** Der Werkzeugbau optimiert auf niedrigen Verzug, der Rumpfbau muss auf Interlayer-Zähigkeit optimieren. Dass in der Praxis vielfach dieselben Compounds für beides verwendet werden, ist eine Übernahme aus dem Werkzeugbau und keine Auslegungsentscheidung.

---

4. Materialsysteme Metall

4.1 Rolle im Bootsbau

Metallische additive Fertigung ersetzt im Bootsbau keinen Rumpf, sondern Guss und Schmiedeteil. Der Anwendungsraum: Propeller und Propellerreparatur, Düsen und Kortdüsen, Wellenböcke, Ruderbeschläge und -schäfte, Seeventile, Pumpenlaufräder, Wärmetauscherkomponenten, Sonderarmaturen.

4.2 Nickel-Aluminium-Bronze

NAB ist die marineseitig wichtigste Gruppe der Aluminiumbronzen und der Referenzwerkstoff für Propeller, Pumpengehäuse und Ventile. Vorteile: Meerwasserkorrosions- und Kavitationsbeständigkeit, gute Festigkeit, gute Schweißbarkeit. Für WAAM ist NAB günstig, weil das Legierungssystem thermisch tolerant ist und die im Prozess unvermeidliche Wiedererwärmung vorheriger Lagen nicht zu prohibitiver Eigenschaftsverschlechterung führt.

4.3 Prozessspezifische Fehlerbilder bei WAAM

- **Porosität**, überwiegend wasserstoffinduziert, aus Drahtoberfläche, Schutzgasführung und Feuchte.
- **Eigenspannungen und Verzug** durch hohen Wärmeeintrag; Gegenmaßnahmen sind Bahnplanung, Zwischenlagentemperaturführung, Spannvorrichtung, Wärmebehandlung.
- **Anisotrope Gefügeausbildung** durch gerichtete Erstarrung — säulenförmige Körner entlang des Temperaturgradienten, mit richtungsabhängigen Zähigkeitswerten.
- **Lagenweise Gefügeinhomogenität** durch wiederholte Wiedererwärmung: jede Lage ist für die darunterliegende eine Wärmebehandlung.

Die Konsequenz für die Nachweisführung: Bei WAAM ist die Prüfung des Werkstoffs am Bauteil oder an mitgefertigten Probekörpern zwingend, weil Werkstoffkennwerte ohne Prozessparameter bedeutungslos sind. Genau das ist der Grund, warum die Regelwerke (Kap. 9) den Prozess und nicht nur das Produkt qualifizieren.

4.4 Referenzfall Propeller und die Quellenlage

Der erste klassifikationsgesellschaftlich zugelassene, metallisch additiv gefertigte Marinepropeller ist der 2017 vorgestellte WAAMpeller, entstanden im Konsortium aus Damen Shipyards, RAMLAB (Port of Rotterdam), Promarin, Autodesk und Bureau Veritas. Der Propeller wurde aus NAB im WAAM-Verfahren aufgebaut, anschließend CNC-gefräst und am Schlepper Stan Tug 1606 im Vollmaßstab erprobt — Geschwindigkeitsfahrten, Pfahlzug und Crash-Stop. Bureau Veritas begleitete Entwicklung, Fertigung und Prüfung und erteilte die Klassezulassung am 30. November 2017.

Widersprüchliche Angaben, offengelegt: Der Durchmesser wird in verschiedenen Quellen mit 1.300 mm, 1.350 mm und 1.355 mm angegeben, die Masse mit rund 180 kg (Auslegungsangabe), rund 200 kg (installierte Endversion) und 400 kg (Vollmaßstabsprototyp). Die Streuung erklärt sich plausibel aus der