

Evolutionäre Konzeptselektion in der additiven Fertigung

Ein Erfahrungsbericht über strukturierte Ideengenerierung und zwei Runden systematischer Selbstkorrektur

Thomas Schüller · Syntagma Forschung · Wien

ORCID 0009-0003-9799-6747 · forschung@tschueller.com

Kennung FORSCH-PROV0438 · Version 3.4 · 24. September 2026 · Lizenz CC BY 4.0

Hinweis zur Publikationsfassung. Zwei Konzepte dieser Reihe stehen in einer laufenden Schutzrechtsprüfung. Ihre Verfahrensbeschreibungen sind in dieser Fassung zurückgehalten. Bewertung, Patentklasse und der gefundene Stand der Technik bleiben vollständig enthalten, weil die Methodik dieser Arbeit ohne sie nicht nachvollziehbar wäre. Die ungekürzte Fassung erscheint nach Abschluss der Prüfung.

Zusammenfassung

Berichtet wird über einen Ansatz zur strukturierten Generierung und Bewertung von Technologiekonzepten in der additiven Fertigung. Über vier Forschungszyklen wurden 164 Konzeptkandidaten erzeugt und in einem iterativen Verfahren aus Analyse, Hypothesenbildung, theoretischer Prüfung, Kritik und Rekombination auf 28 reduziert. Der methodisch aufschlussreichste Teil entstand nachträglich und in zwei Stufen. Ein Abgleich gegen Fachliteratur der Jahre 2020 bis 2026 berichtigte vier Bewertungen. Eine anschließende Patent- und Marktrecherche berichtigte neun weitere — darunter alle drei Konzepte, die nach der ersten Korrektur als maximal neu galten. Beide Runden sind vollständig dokumentiert. Nach der zweiten Runde behält ein einziges Konzept einen mittel bis weiten Anspruchsraum. Das in der ersten Runde beobachtete Strukturmuster — die belastbarsten Konzepte vereinen Fertigung und Messung im selben Prozessschritt — bleibt als Konstruktionsprinzip gültig, ist als Schutzrechtsposition aber teilweise besetzt.

Schlagworte: additive Fertigung, Konzeptselektion, Stand der Technik, Patentrecherche, mehrachsiger Druck, Multi-Material, In-Process-Verifikation

1. Ausgangslage

Die additive Fertigung hat drei Grenzen, die nicht auf Umsetzungsqualität zurückgehen, sondern auf die Architektur des Verfahrens. Kartesische Dreiachskinematik erzwingt planaren Schichtaufbau; daraus folgen Stützstrukturen bei Überhängen, richtungsabhängige Festigkeit und Treppenstufen an gekrümmten Flächen. Jede Verbesserung, die die Kinematik unangetastet lässt, bleibt inkrementell. Gesucht wurden daher Ansätze, die die Bewegungsgeometrie verändern, zusätzliche physikalische Effekte einbringen oder die Prozesskette an anderer Stelle umbauen.

2. Vorgehen

Die Untersuchung verlief in vier Zyklen zu je fünfzehn Iterationen: Zyklus I physikalische Maschinenkonzepte, Zyklus II KI-gestützte Prozessoptimierung, Zyklus III Hybride aus beiden, Zyklus IV mehrachsige Kinematik, Multi-Material und Funktionsintegration im Filamentdruck. Konzepte wurden aus neun fachlichen Perspektiven geprüft; eine kritische Rolle hatte die Aufgabe, physikalisch unplausibel, inkrementelle oder vorteilslose Konzepte zu verwerfen.

Bewertet wurde in sieben gewichteten Dimensionen: physikalische Plausibilität, Neuheit, Härte des adressierten Problems, Messbarkeit des Vorteils, Kapitalverträglichkeit, Zeit bis zur Marktfähigkeit und regulatorische Passierbarkeit. Plausibilität und Kapitalverträglichkeit erhielten das höchste Gewicht.

3. Ergebnis der Selektion

Von 164 Kandidaten überstanden 28 mindestens drei Kritikrunden. Physikalische Unplausibilität war seltener als erwartet. Häufigster Verwerfungsgrund war ungelöste Systemkomplexität: Ein Konzept mit hundert kooperierenden Kleinrobotern scheiterte an drei gleichzeitig ungelösten Teilproblemen; die Reduktion auf zwei koordinierte Arme ergab ein tragfähiges Konzept. Ein Mikrodüsenarray scheiterte an thermischem Übersprechen und wurde in verkleinerter Form mit Zwischenkühlung realisierbar.

4. Erste Korrekturrunde: Literaturabgleich

Die erste Fassung entstand ohne systematischen Abgleich mit dem Stand der Technik. Der nachgeholte Literaturabgleich berichtigte vier Konzepte:

Konzept	vorher	nachher	Grund
Magnetfeldgestützte Faserorientierung	9,1	7,4	Voxelweise Magnetausrichtung im Harzverfahren kommerziell verfügbar (Fortify Fluxprint); FDM-Machbarkeitsstudien publiziert
Mehrachsige Kinematik mit rotierendem Bauteil	8,7	8,0	Mehrachsiger nicht-planarer Druck aktiv publiziert (Fang et al. 2020: bis 6,35-fache Festigkeit); Anspruch verengt auf die Kinematikumkehr
Akustische Levitation als Stützersatz	7,8	6,9	Tragfähigkeit einer 40-kHz-Falle unter der Masse einer Extrusionsbahn von 0,4 mm × 20 mm

Konzept	vorher	nachher	Grund
In-Process-Spektroskopie am Druckkopf	8,2	8,6	Aufwertung: Funktionsintegration in der Literatur überwiegend über Tintenstrahlverfahren

5. Zweite Korrekturrunde: Patent- und Marktrecherche

Nach der ersten Runde galten drei Konzepte als maximal neu, weil die Fachliteratur keine Vorläufer zeigte. Die Patentrecherche widerlegte alle drei:

Konzept	vorher	nachher	Gefundener Prior Art	Anspruchsraum
Sensorgeregelte Gradientenextrusion	9,5	8,3	US12208450 beschreibt ausdrücklich den Druck eines Gradientenwerkstoffs mit Laserprofilometer und Doppler-Durchflusssensor; dichte Closed-Loop-Patentfamilie (US10647055 ff.)	eng-mittel
Simultaner Zweiarm-Biodruck	9,4	8,9	WO2015066705A1 (Bioprinter mit mindestens zwei gleichzeitig abscheidenden Armen); TwinPrint; Zweiroboter-System PMC8961309	mittel-weit
KI-gesteuerte elektrochemische Mikrostruktur	8,6	7,2	US10975485B2 (steuerbares Anoden-Array); LLNL US2025/0043452 (CMOS-Mikroanoden-Array)	eng

Sechs weitere Bewertungen fielen: reaktive Zweikomponenten-Extrusion (8,4 → 7,3; WO2016085992A1, US11724458, US12036738), Mikrodüsenarray für Thermoplastschmelze (8,2 → 7,5; US10654272B2), In-Process-Spektroskopie (8,6 → 8,3; US10691095, Voxel8), trimodale Sensorfusion (8,7 → 8,2; Closed-Loop-Familie), elektrochemische Grundidee (8,5 → 7,4). Die Plattformvision eines herstellernagnostischen AM-Betriebssystems (9,3 → 7,8) scheiterte nicht an Patenten, sondern am Markt: Oqton, Materialise CO-AM, 3YOURMIND, AMFG, Authentise und Siemens Opcentre bieten solche Abstraktionsschichten bereits an.

Positiv bestätigt wurde eine Marktlücke im Bereich der In-Process-Spektroskopie. Die Details sind in dieser Fassung bis zum Abschluss der Schutzrechtsprüfung zurückgehalten.

Die genannten Schutzrechte wurden anhand von Titeln, Abstracts und Beschreibungstexten bewertet. Rechtsstand und Umfang der erteilten Ansprüche wurden nicht geprüft.

6. Das Strukturmuster nach zwei Runden

Nach der ersten Korrektur zeigte sich: Die drei stärksten Konzepte vereinten jeweils Fertigung und Messung im selben Prozessschritt — Gradientenextrusion mit Eigenschaftsverifikation, Druck mit spektroskopischer Prozessüberwachung, Gerüstdruck mit gleichzeitiger Zellablage. Die zweite Runde relativiert diesen Befund, ohne ihn aufzuheben. Als Konstruktionsprinzip bleibt die Aufhebung der zeitlichen Trennung zwischen Herstellung und Prüfung tragfähig, und für regulierte Bereiche bleibt sie relevant: Wer die Materialeigenschaften jedes Bauteils während der Entstehung dokumentiert, erfüllt eine Anforderung, an der additive Fertigung in zulassungspflichtigen Anwendungen regelmäßig scheitert. Als Schutzrechtsposition ist das Prinzip jedoch teilweise besetzt. Der verwertbare Vorsprung verschiebt sich damit vom Patent zu Umsetzungsvorsprung, akkumulierten Prozessdaten und Zulassungsdokumentation.

7. Übertragbare Lehren

Recherche gehört vor die Bewertung. Der gewählte Ablauf — generieren, bewerten, dann recherchieren — erzeugte in zwei Runden dreizehn Berichtigungen.

Literatur, Patente und Markt sind getrennte Räume. Die erste Runde fand in der Literatur, was die Patentrecherche nicht gesucht hätte; die zweite fand im Patentbestand, was die Literatur nicht zeigte; die Marktrecherche fand ein Produktfeld, das in keinem der beiden Räume als Neuheitsfrage auftaucht. Keine der drei Recherchen ersetzt die anderen.

Angrenzende Verfahren gehören in jede Suche. Mehrere Vorläufer stammten aus Harzdruck, Organic Vapor Jet Printing oder Direct Ink Writing, nicht aus dem Filamentdruck.

Ein Vorläufer vernichtet selten den gesamten Anspruch. In den meisten Fällen blieb ein engerer, realer Raum. Eine ehrliche Verengung ist wertvoller als ein breiter Anspruch, der im Prüfungsverfahren zerfällt.

Erst anmelden, dann veröffentlichen. In Europa zerstört jede Vorveröffentlichung vor dem Anmeldetag die Neuheit eines Patents, auch eine eigene. Das österreichische Gebrauchsmuster gewährt eine Schonfrist von sechs Monaten.

Verworfenne Konzepte sind Ausgangsmaterial. Zwei der verbliebenen Ansätze entstanden aus der Reduktion gescheiterter Vorläufer.

8. Einschränkungen

Diese Arbeit ist eine strukturierte Konzeptexploration, keine experimentelle Untersuchung; kein Konzept wurde gebaut oder gemessen. Zahlenwerte stammen aus überschlägigen Abschätzungen und aus der zitierten Literatur. Die Aussagen zum Patentreum sind keine Freedom-to-Operate-Analyse und ersetzen keine patentanwaltliche Prüfung. Die Gewichtung ist auf eine kapitalarme Kleinstorganisation zugeschnitten; unter anderen Voraussetzungen verschiebt sich die Reihenfolge erheblich. Marktzahlen verschiedener Analysehäuser divergieren stark und sind als Größenordnungen zu lesen.

9. Schluss

Der wertvollste Teil dieser Untersuchung ist nicht die Konzeptliste, sondern die zweistufig dokumentierte Korrektur. Eine Methode, die systematisch Ideen erzeugt und bewertet, erzeugt ebenso systematisch überschätzte Neuheitsansprüche — und eine einzelne Recherchestufe reicht nicht, um sie zu erkennen. Die Korrekturen bleiben sichtbar, weil eine Dokumentation, die ihre Fehleinschätzungen tilgt, als Entscheidungsgrundlage unbrauchbar wird.

Literatur und Schutzrechte

Fang, G., Zhang, T., Zhong, S., Chen, X., Zhong, Z., Wang, C. C. L.: Reinforced FDM — multi-axis filament alignment with controlled anisotropic strength. *ACM Transactions on Graphics* 39 (2020).

Cheng, P. et al.: Recent progress in non-planar 3D printing of continuous fiber-reinforced composites. *Composites Part A* 194 (2025), 108900.

Hong, F. et al.: 5-axis multi-material 3D printing of curved electrical traces. *Additive Manufacturing* 70 (2023).

Zaidi, A. A. et al.: Advances in multi-material polymer 3D printing depositions. *Frontiers in Mechanical Engineering* 12 (2026).

Zhou, X. et al.: Heterogeneous material 3D printing. *International Journal of Extreme Manufacturing* 8 (2026), 062001.

Southeastern Louisiana University: Robotic Additive Manufacturing System — six-axis FFF with non-planar slicing (2026).

In-situ NIR monitoring of reactive resins in direct ink writing. *Additive Manufacturing* (2023).

Schutzrechte (Recherchestand September 2026, Rechtsstand ungeprüft):

WO2015066705A1 · US12208450 · US10647055 · US11260580 · US11465340 · US11820073 · US12311595 · US10394202 · US20150331402A1 · US10975485B2 · US2025/0043452 · US20170044680A1 · US20170145584A1 · US10501857 · US10691095 · US10654272B2 · US20090065471A1 · WO2016085992A1 · US11724458 · US12036738 · US6454972 · US4533521.

*Keine Investitionsempfehlung, keine Rechtsberatung, keine Freedom-to-Operate-Analyse.
Regulatorische Angaben Stand September 2026.*