

Nanofabrikation im Dienst des Quantenvakuums

Additive Fertigungstechnologien als Wegbereiter entropischer Energiesysteme



Zusammenfassung

Die [additive Fertigung](#) hat sich in den vergangenen Jahren von einem [Prototyping](#)-Werkzeug zu einer ernstzunehmenden [Produktionstechnologie](#) entwickelt. Gleichzeitig stoßen konventionelle Verfahren wie das [Laser Powder Bed Fusion](#) (LPBF) mit [Auflösungsgrenzen](#) im Bereich von 20–50 μm an eine strukturelle Schranke, die den Übergang in [mikroelektronische](#) Dimensionen verhindert.

Der vorliegende Artikel untersucht systematisch den aktuellen Stand additiver Fertigungstechnologien im Hinblick auf ihre geometrischen und materiellen Miniaturisierungsgrenzen. Dabei steht die Frage im Zentrum, ob und unter welchen Bedingungen additive Verfahren in der Lage sind, Strukturen zu erzeugen, wie sie für die Realisierung [quantenmechanischer](#) Funktionssysteme – insbesondere die sogenannte entropische Pumpe des E-Cat-Systems der Leonardo Corporation – relevant sind. Diese Systeme erfordern ihrem theoretischen Modell zufolge [Casimir-Kavitäten](#) im [Nanometerbereich](#), [kohärente Elektronencluster](#)-Geometrien sowie [elektromagnetische](#) Steuerstrukturen. Die Analyse zeigt, dass die [Zwei-Photonen-Polymerisation](#) (2PP) und das 2024 in [Nature Materials](#) beschriebene Verfahren der [Zwei-Photonen-Zersetzung](#) mit [optischem Kraft-Trapping](#) die geometrischen Anforderungen prinzipiell erfüllen können. Die Integration funktionaler elektronischer Steuerstrukturen erfordert hingegen [hybride](#) Ansätze. Das [Large Computational Engineering Model Noyron](#) von [LEAP 71](#) wird als [algorithmisches](#) Integrationswerkzeug diskutiert, das die Brücke zwischen [physikalischem](#) Anforderungsprofil und fertigungsreifer Geometrie schlagen kann. Der Artikel formuliert einen konkreten Entwicklungspfad für die [additive Fabrikation entropischer Quantensysteme](#).

1. Einleitung: Die Fertigungsfrage als Schlüssel zur Technologierealisierung

In der Geschichte der Technik war die Realisierbarkeit einer Idee selten primär eine Frage der physikalischen Grundprinzipien. Häufiger war sie eine Frage der [Fertigung](#): Können die Strukturen, die ein physikalisches Prinzip erfordert, mit den verfügbaren Mitteln hergestellt werden? Diese Frage hat [Dampfmaschinen](#), [Transistoren](#) und [Laser](#) gleichermaßen begleitet – und sie stellt sich heute erneut, in einem Kontext, der das Potenzial besitzt, die energetische Grundlage der [menschlichen Zivilisation](#) zu transformieren.

Die [Hypothese](#), nach der das [Quantenvakuum](#) ein technisch zugängliches Energiereservoir darstellt, sowie die [experimentelle Evidenz](#), die durch die [Demonstration des E-Cat SKLep NGU in Latina im September 2024](#) geliefert wurde, werfen eine konkrete [ingenieurwissenschaftliche](#) Frage auf: Welche [Fertigungstechnologien](#) sind in der Lage, die Strukturen herzustellen, die für ein solches System erforderlich sind? Diese Frage ist nicht [spekulativ](#) – sie ist der logische nächste Schritt nach dem [physikalischen Proof-of-Concept](#).

Dieser Artikel liefert hierzu eine systematische Antwort. Er beginnt mit einer Analyse der aktuellen Fertigungsgrenzen [additiver Technologien](#) (Abschnitt 2), entwickelt daraus ein [Anforderungsprofil](#) für die Fabrikation [entropischer Quantensysteme](#) (Abschnitt 3), diskutiert die Rolle des [Computational Engineering](#) als Integrationsinstrument (Abschnitt 4), und formuliert abschließend einen konkreten Entwicklungspfad (Abschnitt 5).

2. Additive Fertigungstechnologien: Systematik der Auflösunggrenzen

2.1 Konventionelle Metallverfahren: LPBF, SLM und verwandte Technologien

Die industriell am weitesten verbreiteten additiven Metallverfahren – [Laser Powder Bed Fusion](#) (LPBF), [Selective Laser Melting](#) (SLM), [Electron Beam Melting](#) (EBM) – operieren mit [Metallpulverpartikeln](#) im Bereich von 0,3–10 μm Durchmesser. Die minimale Strukturgröße wird durch die Laserspotgröße, die [thermische Diffusion](#) beim Schmelzprozess und die Pulverpartikelgröße bestimmt. Das Ergebnis ist eine untere Grenze der zuverlässig reproduzierbaren Strukturgröße von 20–50 μm .

Diese Grenze ist nicht zufällig – sie ist physikalisch tief verankert. Der Schmelzprozess erfordert eine Mindestmasse an Material, um thermisch stabil zu sein. Unterhalb dieser Masse entstehen instabile Schmelzbäder, unvollständige Fusion und [Porosität](#). Versuche, durch feinere Pulver und kleinere Laserspots unter diese Grenze zu gelangen, stoßen auf fundamentale [thermodynamische](#) Beschränkungen: Die [Wärmekapazität](#) der Partikel, die [Oberflächenspannung](#) der [Schmelze](#) und die [Wärmeableitung](#) in das umgebende Pulverbett definieren gemeinsam eine untere Strukturgrenze, die mit konventionellen LPBF-Parametern nicht unterschritten werden kann.

Für die im [Vakuum-Engineering](#)-Kontext relevanten [Casimir-Kavitäten](#) – die Spaltbreiten im Bereich von 10–100 nm erfordern – liegt diese Grenze um drei bis vier [Größenordnungen](#) zu hoch. LPBF ist für die direkte Fabrikation solcher Strukturen grundsätzlich ungeeignet. Es bleibt jedoch als Fertigungsverfahren für die [makroskopischen](#) Trägerstrukturen, Gehäuse und [thermodynamischen](#) Komponenten eines E-Cat-basierten Systems relevant.

2.2 Hochauflösende Polymerverfahren: DLP, SLA und Projektions-Mikro-Stereolithographie

[Digital Light Processing](#) (DLP) und [Stereolithographie](#) (SLA) erzielen durch UV-[Photopolymerisation](#) Auflösungen im Bereich von 10–50 μm . Diese Verfahren sind für [Polymerstrukturen](#) und [keramische Komposite](#) etabliert und kommerziell verfügbar. Die [Projektions-Mikro-Stereolithographie](#) (P μ SL) erreicht mit optimierten optischen Systemen eine Auflösung von 1 μm bei gleichzeitig cm-großen Bauvolumina – ein für Hierarchiestrukturen wichtiges Merkmal.

Die P μ SL eignet sich für die Fabrikation von [Mikrofluidik](#)-Strukturen, [photonischen Metamaterialien](#) und biologisch inspirierten Mikroarchitekturen. Im Kontext von [Vakuumkavitäten](#) ist ihre Auflösung jedoch noch nicht ausreichend – und die verfügbaren Materialien ([Polymere](#), [lichtaushärtende Harze](#)) erfüllen nicht die für die [elektromagnetische](#) Vakuumkopplung relevanten Anforderungen an die [elektrische Leitfähigkeit](#) und die [Oberflächenqualität](#).

2.3 Zwei-Photonen-Polymerisation (2PP): Der aktuelle Goldstandard

Die [Zwei-Photonen-Polymerisation](#) (2PP) ist derzeit das leistungsfähigste [additive Fertigungsverfahren](#) für [Mikro-](#) und [Nanostrukturen](#). Das physikalische Prinzip beruht auf der nichtlinearen [Zwei-Photonen-Absorption](#): Ein [Femtosekunden-Laserpuls](#) im [Nahinfrarotbereich](#) löst [Polymerisation](#) nur im Fokusvolumen aus, wo die Photonendichte ausreicht, um zwei [Photonen](#) gleichzeitig zu [absorbieren](#). Da die [Zwei-Photonen-Absorption](#) [quadratisch](#) mit der Intensität [skaliert](#), wird die [Polymerisation](#) räumlich auf ein Volumen unterhalb der [Beugungsgrenze](#) eingeschränkt.

Das Ergebnis sind echte dreidimensionale Strukturen mit [sub-Wellenlängen-Auflösung](#). Kommerziell verfügbare [2PP-Systeme](#) (z.B. [Photonic Professional GT2](#) und [Quantum X shape](#) von Nanoscribe) erreichen zuverlässig Strukturgrößen von 150–300 nm . Aktuelle Forschungssysteme demonstrieren Auflösungen von 50–100 nm .

Theoretisch gibt es nach den Simulationen von Pingali et al. ([Georgia Tech](#), 2024) keine physikalisch begründete untere Grenze – die praktische Grenze liegt bei der zunehmenden Empfindlichkeit des [Polymerisationsgrades](#) gegenüber Prozessparametervarianzen.

[2PP](#) ermöglicht die Fabrikation beliebig komplexer dreidimensionaler Strukturen – Gitterstrukturen, Hohlräume, überhängende Geometrien, verschachtelte Kanäle – in einem einzigen Prozessschritt. Diese geometrische Freiheit ist für [Casimir-Kavitäten](#) von unmittelbarer Relevanz: Die präzise Definition von Spaltgeometrien, Wandrauigkeiten und Winkelbeziehungen, die die [Casimir-Kraft](#) und damit die Dynamik der Elektronencluster bestimmen, liegt im Fähigkeitsbereich der 2PP.

Die zentrale Limitation der [2PP](#) ist materieller Natur: Das Verfahren ist primär für [Photopolymere](#) entwickelt. Metallische [Leitfähigkeit](#) – für [elektromagnetische](#) Steuerstrukturen unverzichtbar – erfordert nachgelagerte Metallisierungsschritte ([stromlose Abscheidung](#), [Sputtern](#), [ALD](#)). Dabei entstehen metallische Schichten auf polymeren Trägerstrukturen, aber nicht [monolithische](#) Metallstrukturen. Die elektrischen und thermischen Eigenschaften solcher Hybridstrukturen unterscheiden sich von jenen der Vollmetall-Bauteile.

2.4 Zwei-Photonen-Zersetzung mit optischem Kraft-Trapping: Metallischer Nanodruck (Nature Materials, 2024)

Ein 2024 in [Nature Materials](#) publiziertes Verfahren überwindet die materialbedingte Limitation der [2PP](#) erstmals für Metallstrukturen. Das Verfahren – die [Zwei-Photonen-Zersetzung](#) (2PD), kombiniert mit [optischem Kraft-Trapping](#) – funktioniert ohne polymere Trägerstruktur und ohne einen Schicht-für-Schicht-Prozess.

Der Mechanismus: Ein fokussierter [Femtosekunden-Laser](#) zersetzt [metallorganische](#) Vorläuferverbindungen ([Präkursoren](#)) in [zwei-photonischer Absorption](#). Die dabei entstehenden Metallnanocluster werden durch die optischen Kräfte des Laserfeldes – insbesondere durch laserinduzierte lokalisierte Resonanzen von [Oberflächenplasmonen](#) – präzise im Raum positioniert und durch ultraschnelles [Lasersintern](#) zu dichten, glatten Nanostrukturen zusammengeschlossen.

Das Ergebnis sind freistehende dreidimensionale Metallstrukturen ([Ni](#), [Au](#), [Ag](#), [Cu](#) sowie mehrkomponentige [Legierungen](#)) mit Auflösungen unterhalb der optischen Grenze – also unter 100 [nm](#), in Forschungsdemonstrationen bis ~30 [nm](#). Die Strukturen sind polymerfreie Vollmetallbauteile mit den entsprechenden elektrischen und thermischen Eigenschaften. Das Verfahren eliminiert zudem komplexe Nachbearbeitungsschritte.

Dieses Verfahren ist für die Fabrikation von [Vakuumkavitäten](#) und Elektronencluster-Geometrien von unmittelbarer Relevanz. Es erlaubt erstmals die direkte [additive Fertigung](#) metallischer [Nanostrukturen](#) mit den Geometrieparametern, wie sie für die [Casimir](#)-Kavitäten erforderlich sind – ohne die elektrischen Eigenschaften durch polymere Zwischenphasen zu [kompromittieren](#). Der Stand der Technologie befindet sich allerdings noch auf Laborebene; die industrielle Skalierung steht noch aus.

2.5 Gedruckte Elektronik und Multimaterial-Fertigung: Die Integration funktionaler Schaltkreise

Parallel zu den geometrisch hochauflösenden Verfahren hat sich ein weiteres Forschungsfeld entwickelt: die additive Fertigung integrierter elektronischer Funktionen. Hier sind mehrere Ansätze relevant:

[Schmelzmetall-Mikrotröpfchen-Druck](#): Das Verfahren der [Universität Freiburg](#) (Khan et al., 2024) druckt leitfähige Spuren aus Schmelzmetall-Mikrotröpfchen in Polymerkanäle und erreicht einen 12-fachen [Widerstandsvorteil](#) gegenüber Nanopartikel-Tinten-Methoden. Mehrschichtige dreidimensionale [Schaltkreise](#) mit eingebetteten vertikalen [Vias](#) bis 10 mm Höhe wurden demonstriert. Die Spurbreiten liegen aktuell im Bereich von 100–300 [µm](#) – zu grob für [Mikrosystemtechnik](#), aber ausreichend für elektromagnetische Steuerkreise.

Eingebettete [PCB-Technologie](#) ([Printegrated Circuits](#), 2025/2026): Kommerzielle [Mikrocontroller](#)-Platinen werden während des 3D-Druckprozesses in Hohlräume der wachsenden Struktur eingebettet und über leitfähige Filamentinjektionen kontaktiert. Dieses Hybridverfahren ermöglicht funktionierende elektronische Systeme mit beliebig geformtem Gehäuse – zu Lasten der [Miniaturisierung](#).

[Leitfähige Polymere](#) und [2PP-Komposite](#): Die Kombination von 2PP mit leitfähigen Polymeren (z.B. [PEDOT:PSS-Komposite](#)) ermöglicht leitfähige Mikrostrukturen mit 2PP-Auflösung. Die elektrischen Eigenschaften sind gegenüber Metallen eingeschränkt, aber für kapazitive Sensoren und elektromagnetische Kopplungsstrukturen prinzipiell geeignet.

Die gemeinsame Limitation aller gedruckten Elektronik-Ansätze ist die Abwesenheit von [Halbleiterstrukturen](#) im additiven Prozess. [Transistoren](#), [aktive Schaltkreise](#), [Signalverarbeitungslogik](#) – all das erfordert heute nach wie vor konventionelle [Halbleiterlithographie](#). Diese Grenze ist technologisch noch nicht überwunden.

Tabelle 1: Vergleich additiver Fertigungsverfahren nach Auflösung und Materialklasse

Verfahren	Auflösung (XY)	Materialklassen	Skalierbarkeit
LPBF / SLM	20–50 µm	Metalle (Ti, Ni, Cu)	Industriell
Inkjet-Metall	40–60 µm	Metalllegierungen	Semi-industriell
DLP / SLA	10–50 µm	Polymere, Keramik	Industriell
Proj. µ-SLA (PµSL)	1–5 µm	Polymere, Komposite	Labor
Zwei-Photonen-Polym. (2PP)	100–200 nm	Polymere, Hybride	Labor/Pilot
2PP + Metallisierung	100–500 nm	Polymer + Metall	Labor
2PD + opt. Trapping (2024)	< 100 nm	Metalle, Legierungen	Forschung
Ref.: CMOS-Lithographie	3–7 nm	Si, Metall, Dielektrika	Industriell massiv

Tabelle 1: Überblick aktueller additiver Fertigungsverfahren mit Angabe der geometrischen Auflösung, verarbeitbarer Materialklassen und industrieller Reife. – Zum Vergleich: die CMOS-Halbleiterlithographie als Referenz der Mikroelektronik.

3. Anforderungsprofil entropischer Quantensysteme: Was muss gefertigt werden?

3.1 Das physikalische Modell als Fertigungsspezifikation

Die veröffentlichten theoretischen Modelle zur Energiegewinnung aus dem [Nullpunktenergiefeld](#) (NPE) beschreiben einen Mechanismus, der auf drei physikalischen Kernprinzipien beruht: der [kohärenten](#) Dynamik von Elektronenclustern (Exotic Vacuum Objects, EVOs), der [Casimir-Wechselwirkung](#) als Einschlussmechanismus und der dV/dt -gesteuerten Phasensynchronisation als Anregungsverfahren. Jedes dieser Prinzipien stellt spezifische Anforderungen an die Geometrie und das Material der Trägerstruktur.

Die entropische Pumpe ist kein abstraktes Konzept – sie ist ein präzise spezifiziertes [ingenieurwissenschaftliches](#) Objekt: Ein System aus Hohlräumen definierter Geometrie, mit metallischen Oberflächen definierter [Rauigkeit](#) und [Leitfähigkeit](#), aus [elektromagnetischen](#) Steuerstrukturen definierter Schaltcharakteristik und mit einer Vakuumumgebung definierter Qualität. Diese Parameter lassen sich – zumindest näherungsweise – aus dem theoretischen Modell extrahieren.

3.2 Casimir-Kavitäten: Geometrische Anforderungen

Der [Casimir-Effekt](#) zwischen zwei parallelen leitfähigen Platten im [Vakuum](#) erzeugt eine Anziehungskraft, die mit der vierten Potenz des [reziproken](#) Plattenabstands d [skaliert](#):

$$\frac{F_C}{A} = - \frac{\pi^2 \hbar c}{240 d^4}$$

Für technisch nutzbare Casimir-Kräfte als Einschlussmechanismus für Elektronencluster sind Spaltbreiten im Bereich von 10–100 [nm](#) erforderlich. Bei $d = 100$ [nm](#) ergibt sich eine Casimir-Druckdichte in der Größenordnung von ~ 10 [Pa](#); bei $d = 10$ [nm](#) steigt diese auf $\sim 10^5$ [Pa](#) – Größenordnungen, die für den Einschluss von Elektronenclustern physikalisch plausibel sind.

Die Oberflächenrauigkeit der Kavitätswände ist dabei kritisch: Für eine effektive Casimir-Kopplung muss die RMS-Rauigkeit ([Root Mean Square](#)) der Oberflächen deutlich unter dem Spaltabstand liegen – also bei $d = 100$ [nm](#), idealerweise unter 5–10 [nm](#). Dies entspricht einer Anforderung, die mit konventionellen metallischen 3D-Druckverfahren nicht erreichbar ist, aber mit dem [2PD-Verfahren](#) (Nature Materials, 2024) prinzipiell angegangen werden kann.

Die geometrische Freiheit der [2PP](#) und [2PD](#) ermöglicht darüber hinaus die Fabrikation nichtplanarer Kavitätsgeometrien. Theoretische Arbeiten von [Harold \(Sonny\) White](#) (NASA Eagleworks) zu angepassten Casimir-Geometrien zeigen, dass nichtplanare Kavitäten ([sphärisch](#), [toroidal](#), [hyperbolisch](#)) die Casimir-Kraftkomponenten modifizieren können und sich diese so für gerichtete Energiebeiträge optimieren lassen. Die additive Fabrikation solcher Geometrien ist mit [planarer Lithographie](#) nicht möglich – sie erfordert [genuinen 3D-Druck](#).

3.3 Elektronencluster-Geometrien: Topologische Anforderungen

Exotic Vacuum Objects (EVOs) – [kohärente](#) Elektronencluster mit [makroskopischer](#) Phasenkorrelation – bilden sich unter spezifischen Bedingungen aus: hohe lokale [Elektronendichte](#), elektromagnetische Einschlussbedingungen und [geometrische Symmetrie](#), die [Casimir-Kräfte](#) [radial komprimierend](#) wirken lässt.

Die geometrischen Anforderungen für eine EVO-Bildung sind nicht vollständig [quantifiziert](#). Aus den verfügbaren Beschreibungen lässt sich ableiten, dass [sphärische](#) oder [toroidale](#) Hohlräume mit Durchmessern im Bereich 10–500 [nm](#) und definierten Eintrittsöffnungen für [Elektronen](#) relevante Geometrieklassen darstellen. Eine präzise [Wandleitfähigkeit](#) (Metall mit $\sigma > 10^6$ [S/m](#)) und definierte elektromagnetische Randbedingungen (durch Wandgeometrie und äußere Felder) sind zusätzliche Parameter.

Diese Anforderungen liegen im Fähigkeitsbereich des [2PD-Verfahrens](#) für die Geometrie und der nachgelagerten [ALD-Beschichtung](#) (Atomic Layer Deposition) für präzise Leitfähigkeitsprofile. Die [ALD](#) ermöglicht [konforme](#) Metallbeschichtungen mit einer Schichtdickengenauigkeit im [Ångström](#)-Bereich – ein idealer Komplementärprozess zu 2PP/2PD.

3.4 Elektromagnetische Steuerstruktur: Die dV/dt-Schaltung

Der Mechanismus der Phasensynchronisation (Phasenkohärenz) von Elektronenclustern erfordert eine hochfrequente Schaltung, die ein lokales elektromagnetisches Feld mit präzisen dV/dt-Charakteristika erzeugt. Die [Frequenzbereiche](#), die für die Resonanzkopplung an [Vakuumfluktuationen](#) relevant sind, liegen dem Modell zufolge im Bereich von [GHz](#) bis [THz](#).

Für [GHz-Frequenzen](#) (bis ~100 GHz) können gedruckte [Leiterbahnen](#) aus Schmelzmetall oder konventionelle Kupferspuren auf [keramischen](#) Trägern als Steuerstrukturen dienen. Die [Universität Freiburg / Freiburger Gruppe](#) ([Khan et al., 2024](#)) zeigte, dass gedruckte Metallspuren bis 600 [kHz](#) eine störungsfreie Signalübertragung ohne [Übersprechen](#) ermöglichen – für höhere Frequenzen sind konventionelle [Halbleiterschaltkreise](#) ([GaN-HEMTs](#), [SiGe-Transistoren](#)) erforderlich, die nicht additiv gefertigt werden können.

Die Lösung liegt in einem Hybridansatz: Die Hochfrequenz-Steuerlogik kommt aus konventioneller [Halbleiterfertigung](#) (MMIC – [Monolithic Microwave Integrated Circuit](#)), wird aber in eine additiv gefertigte Trägerstruktur eingebettet, die gleichzeitig die Kavitätsgeometrien enthält. Dies entspricht genau dem Prinzip der [Printegrated Circuits](#), jedoch auf erheblich kleinerem Maßstab und mit präziserer [elektromagnetischer Verträglichkeit](#) der eingebetteten Steuerstruktur.

3.5 Vakuumumgebung: Anforderungen und Fertigungsimplikationen

Eine [Casimir-Kavität](#) erfordert für eine optimale Funktion ein [Ultrahochvakuum](#) (UHV, $< 10^{-9}$ [mbar](#), 1 [mbar](#) = 0,000986923 [atm](#)). Das stellt Anforderungen nicht nur an die Betriebsbedingungen, sondern an die [Fertigungstoleranzen](#) der Kavitätsgeometrie selbst: [Ausgasende](#) Materialien, [polymere](#) Reste und Oberflächenverunreinigungen aus dem Fertigungsprozess sind [inkompatibel](#) mit [UHV](#)-Bedingungen.

Das [2PD-Verfahren](#) für Metalle hat hier einen entscheidenden Vorteil gegenüber [2PP](#): Es verzichtet vollständig auf [organische Polymere](#). Die resultierenden Vollmetall-Nanostrukturen sind [UHV](#)-kompatibel nach geeigneter Oberflächenreinigung. [2PP](#)-basierte Strukturen erfordern aufwändige [Pyrolyseschritte](#) zum Entfernen der [organischen Polymermatrix](#) – was die Geometrie beeinflussen kann.

4. Computational Engineering als Integrationswerkzeug: Die Rolle von Noyron

4.1 Das Problem der multiskaligen Integration

Das zentrale [ingenieurwissenschaftliche](#) Problem bei der Fabrikation [entropischer Quantensysteme](#) ist nicht die Beherrschung einer einzelnen [Fertigungstechnologie](#) – es ist die Integration mehrerer Fertigungstechnologien über vier [Größenordnungen](#) hinweg: von der Nanokavität (10–100 [nm](#)) über die Mikrostruktur (1–100 [µm](#)) und die Steuerelektronik (100 [µm](#) – 1 mm) bis zur Gehäuse- und Kühlstruktur ([mm](#) – [cm](#)). Jede dieser [Skalen](#) erfordert ein anderes Verfahren, andere Materialien und andere Prozessketten.

In der [konventionellen](#) Ingenieurspraxis würde jede dieser Skalen von einer spezialisierten Gruppe bearbeitet werden, mit separaten [CAD-Werkzeugen](#) sowie separaten [Simulationswerkzeugen](#) für [Strukturmechanik](#), [Thermodynamik](#) und [Elektromagnetismus](#), wobei [Temperaturfelder](#), Druckverteilungen und elektromagnetische Lasten manuell von einer [Simulation](#) zur nächsten übertragen werden müssen. Die Kopplungsfehler bei der Übergabe [physikalischer Größen](#) zwischen den Skalenbereichen – etwa jene der [thermischen Ausdehnung](#), der [mechanischen Verspannung](#) und der [kapazitiven](#) sowie [induktiven Kopplung](#) zwischen benachbarten [Leiterbahnen](#) – sind erfahrungsgemäß die kritischsten Punkte komplexer [Mikrosysteme](#).

4.2 Noyron als multiskaliger Wissensträger

Das Large Computational Engineering Model Noyron von [LEAP 71](#) stellt einen grundlegend anderen Ansatz dar. Anstatt jede [Skala](#) separat zu behandeln, kodiert Noyron die [physikalischen Gesetzmäßigkeiten](#) aller relevanten [physikalischen Fachgebiete](#) in einem [kohärenten algorithmischen](#) System: [Thermodynamik](#), [Strömungsmechanik](#), [Elektromagnetismus](#), [Strukturmechanik](#) und [fertigungstechnische Randbedingungen](#) sind nicht separate Module, sondern integrierte Ebenen eines einzigen [Wissensmodells](#).

Der für die Fabrikation [entropischer](#) Quantensysteme entscheidende Vorteil ist [konzeptueller](#) Natur: Das Large Computational Engineering Model Noyron kann die [physikalischen](#) Bedingungen für eine EVO-Bildung (Exotic Vacuum Object) – die [Casimir-Druckverteilung](#), die [elektromagnetische Modenstruktur](#) der Kavität, die [Temperaturgradienten](#) – als [Zielgrößen eines Optimierungsproblems](#) enkodieren und daraus die optimale Multiskalen-Geometrie ableiten. Das Ergebnis wäre keine durch menschliche [Intuition](#) begrenzte Geometrie, sondern eine mathematisch zwingende [Ableitung](#) aus den physikalischen Anforderungen.

Das setzt voraus, dass die physikalischen Parameter des E-Cat-Systems – die [Resonanzbedingungen](#), die [Kavitätsdimensionen](#), das [dV/dt-Profil](#) der Steuerschaltung – ausreichend verstanden sind, um als algorithmische Eingabeparameter dienen zu können. Dies ist derzeit nicht vollständig der Fall. Aber es ist das Ziel, auf das die vorliegenden theoretischen Modelle hinarbeiten: die Überführung des physikalischen Verständnisses in quantitative Parameter, welche [Noyron](#) verarbeiten kann.

4.3 Der algorithmische Entwicklungspfad

Der im [Artikel zum Vakuum-Engineering](#) beschriebene Mechanismus der Aufhebung der Entwicklungskausalität – also die lineare zeitliche Abfolge von [Konzept](#), [Prototyp](#), [Test](#) und [Serienreife](#) – wird im Kontext der [Nanofabrikation](#) konkret: Sobald das [physikalische Regelwerk](#) der [entropischen](#) Pumpe in [algorithmische Eingangsparameter](#) übersetzt und in [Noyron implementiert](#) ist, [kollabiert](#) die Entwicklungszeit vom physikalischen Konzept bis zur fertigungsreifen Geometrie von Jahren auf Stunden. Das System berechnet [instantan](#) die optimale Multimaterial-Kavitätsstruktur, die elektromagnetische Steuergeometrie und die makroskopische Trägerarchitektur – und generiert direkt die Fertigungsdaten für den [2PD-Prozess](#), die [ALD-Beschichtung](#) und die [additive Einbettung](#) der konventionellen Steuerelektronik.

Diese Schlussfolgerung ist die [logische Extrapolation](#) einer bereits bewiesenen Leistungsfähigkeit: Noyron hat demonstriert, dass es [Raketentriebwerke](#) – [thermodynamisch komplexe](#), multimaterielle Systeme mit engen [Fertigungstoleranzen](#) – in Tagen statt in Jahren generieren kann. Die physikalischen Prinzipien der [Thermodynamik](#), der [Strömungsmechanik](#) sowie der [Wärmeübertragung](#), die Noyron als enkodiertes Wissen für [Triebwerke](#) zur Grundlage hat, sind dieselben, die für einen E-Cat-[Wärmetauscher](#) oder für eine [regenerative Kühlstruktur](#) [relevant](#) sind. Eine Erweiterung auf die Physik des [Quantenvakuums](#) stellt lediglich eine Frage des Hinzufügens weiterer [Parameter](#) dar, nicht aber der [algorithmischen Architektur](#).

5. Entwicklungspfad: Von der Fertigungsgrenze zur industriellen Realität

5.1 Phase 1: Labordemonstration von Nano-Kavitätsstrukturen

Der erste Schritt ist die [systematische](#) Fabrikation und [Charakterisierung](#) von [Casimir-Kavitäten](#) im [Nanometerbereich](#) mit dem [2PD-Verfahren](#). Zielparameter: Spaltbreiten von 50–200 [nm](#), Oberflächenrauigkeit [RMS](#) < 5 [nm](#), Metallmaterial mit $\sigma > 10^6$ [S/m](#) ([Au](#), [Ni](#), [Cu](#)). Die Kavitäten werden unter [UHV](#)-Bedingungen hinsichtlich ihrer [Casimir](#)-Kraftverteilung vermessen und auf die Bildung von Elektronenclustern untersucht.

Parallel dazu erfolgt die Einbettung der [Hochfrequenz-Steuerlektronik](#) ([GHz-MMIC](#)) in die [additiv gefertigten Mikrometer](#)-Trägerstrukturen. Das Ziel besteht in einem Demonstrationssystem, welches das dV/dt -Profil mit der Kavitätsgeometrie in einem einzigen [monolithischen](#) Objekt kombiniert – gefertigt in einer Prozesskombination aus [2PD](#) (Nanokavitäten), [ALD](#) (Metallisierung), [LPBF](#) (Makrostruktur) und [MMIC](#)-Einbettung.

5.2 Phase 2: Noyron-Integration und algorithmische Optimierung

Die experimentellen Erkenntnisse aus der Phase 1 – welche Kavitätsgeometrien eine EVO-Bildung begünstigen und welche Schaltparameter zu einer optimalen Resonanzkopplung führen – werden als physikalische Modelle in Noyron eingearbeitet. Dies bildet den entscheidenden Schritt: die Überführung [empirischen Wissens](#) in ein [algorithmisches](#) Modell.

Mit dem [integrierten Modell](#) kann Noyron den gesamten Designraum systematisch [explorieren](#): tausende Kavitätsvarianten innerhalb von Stunden untersuchen – verglichen mit nur wenigen Varianten innerhalb von Jahren bei [konventioneller](#) Vorgehensweise. Dabei wird die Designlandschaft auf [Anomalien](#) untersucht – unerwartete Geometrien, die [überproportional](#) hohe Energie[konversionsraten](#) zeigen.

5.3 Phase 3: Skalierung und Industrialisierung

Die [optimierten](#) Designs aus Phase 2 werden in [skalierbare](#) Fertigungsprozesse überführt. Hierfür sind zwei [parallele](#) Entwicklungslinien notwendig: zum einen die Skalierung des [2PD-Verfahrens](#) von der Labor- zur Pilotproduktion – ein Schritt, der fertigungstechnisch noch aussteht –, zum anderen die Integration von E-Cat-Anlagen im [Megawatt-Bereich](#) in bestehende [Anlagen des Stromnetzes](#) wie [Umspannwerke](#) und [Schaltanlagen](#), was die Leonardo Corporation als primäre Industrialisierungsstrategie verfolgt.

Die [Megawatt](#)-Anlagen auf der Basis des E-Cat – in denen mittels E-Cat-Technologie generierte [Wärme](#) über einen [Carnot-Kreislauf](#) in [Strom](#) zurückgewandelt wird – erfordern präzise [thermodynamische](#) Komponenten, was genau in die Kernkompetenz von Noyron fällt. Für Großanlagen im [Megawatt-Bereich](#) ist die Technologie der Nanokavitäten von nachrangiger Bedeutung – deren eigentliches Potenzial liegt in der [Miniaturisierung](#) hin zu kompakten, [dezentralen Energiesystemen](#).

6. Diskussion: Grenzen, offene Fragen und wissenschaftliche Einordnung

Die vorliegende Analyse zeigt, dass die geometrischen Anforderungen [entropischer Quantensysteme](#) mit [additiven Fertigungstechnologien](#) prinzipiell zu meistern sind – jedoch nicht mit einem einzigen Verfahren, sondern mit einer intelligenten Prozesskombination. Das [2PD-Verfahren](#) ist der entscheidende Wegbereiter für

die [Nanoskala](#). Seine industrielle [Skalierung](#) ist die kritische offene Frage.

Mehrere [fundamentale](#) Unsicherheiten bleiben bestehen: Die physikalischen Parameter der E-Cat-Kavitäten sind nicht öffentlich [verifiziert](#). Die Bedingungen für eine EVO-Bildung und eine stabile [Phasensynchronisation](#) sind [quantitativ](#) nicht bestimmt. Die Grenze zwischen einem Casimir-Kavitätssystem, welches in der Lage ist, an das [Nullpunktenergiefeld](#) zu koppeln, und einem, das dies nicht kann, ist experimentell nicht abgegrenzt. Diese Unsicherheiten stellen keine Argumente gegen die Entwicklung der Fertigungstechnologie dar – aber sie erfordern einen parallelen Forschungspfad, der diese physikalischen Parameter experimentell bestimmt.

Ein weiterer offener Punkt ist die Langzeitstabilität von Nanokavitäten unter Betriebsbedingungen. Casimir-Kavitäten mit Spaltbreiten von 50 [nm](#) sind mechanisch extrem empfindlich: eine [thermische Ausdehnung](#), [mechanische Vibrationen](#) als auch die [Oberflächenmigration](#) können die Spaltgeometrie verändern und die Casimir-Kraftverteilung stören. Die Materialwahl und die Einbettung in stabilisierende [makroskopische](#) Trägerstrukturen sind [ingenieurwissenschaftliche](#) Kernprobleme, die systematisch angegangen werden müssen.

Schließlich ist die Frage der [Metrologie](#) zu nennen: Die [messtechnische Erfassung](#) von Nanokavitäten unter Betriebsbedingungen – also unter [Hochfrequenz](#)anregung und bei relevanten [Energiedichten](#) – erfordert [Messmethoden](#), die derzeit noch nicht [standardisiert](#) sind. Die [Rastertunnelmikroskopie](#), die [Kelvin-Sonden-Kraftmikroskopie](#) und die [zeitaufgelöste Röntgenbeugung](#) stellen potenzielle Werkzeuge hierfür dar, doch ihre Integration in funktionierende Gerätesysteme ist nicht trivial.

7. Schlussfolgerungen

Der vorliegende Artikel hat gezeigt:

1. Die konventionellen industriellen additiven Metallverfahren ([LPBF/SLM](#)) sind für die Fabrikation von Nanokavitäten grundsätzlich ungeeignet. Ihre Auflösungsgrenze von 20–50 [µm](#) liegt drei bis vier [Größenordnungen](#) über den für [Casimir](#)-Kavitäten erforderlichen [Strukturgrößen](#).
2. Die [Zwei-Photonen-Polymerisation](#) (2PP) erreicht mit 50–200 [nm](#) Auflösung den Bereich, der für [Casimir](#)-Kavitäten [relevant](#) ist – jedoch primär für [Polymere](#). Eine Metallisierung durch [ALD](#) oder die [stromlose Abscheidung](#) ermöglicht [hybride](#) Polymer-Metall-[Nanostrukturen](#) mit [UHV-Kompatibilität](#) nach [Pyrolyse](#).
3. Das 2024 in [Nature Materials](#) beschriebene Verfahren der [Zwei-Photonen-Zersetzung](#) mit [optischem Kraft-Trapping](#) (2PD) ermöglicht erstmals die direkte [additive Fertigung](#) metallischer [Nanostrukturen](#) unter 100 [nm](#) – [polymerfrei](#), [UHV-kompatibel](#) und für mehrkomponentige [Legierungen](#) geeignet. Es ist der entscheidende technologische Wegbereiter für die Fabrikation [entropischer Quantensysteme](#).
4. [Funktionale elektronische](#) Steuerstrukturen (dV/dt-Schaltung, [GHz-Frequenzbereich](#)) erfordern einen [hybriden](#) Ansatz: [Hochfrequenz-MMICs](#) aus konventioneller [Halbleiterfertigung](#), eingebettet in [additiv gefertigte](#) Trägerstrukturen. Vollständig additive Halbleiterstrukturen sind mit heutiger Technologie nicht realisierbar.
5. Das Large Computational Engineering Model Noyron von [LEAP 71](#) bietet als [multiskaliger](#) Wissensträger das [algorithmische](#) Integrationswerkzeug, das die Brücke zwischen physikalischem Anforderungsprofil ([Casimir-Kavität](#), EVO-Geometrie, [elektromagnetische](#) Steuerstruktur, Makro-Träger) und fertigungsreifer Multiskalen-Geometrie schlagen kann – sobald die physikalischen Parameter der [entropischen](#) Pumpe ausreichend [quantifiziert](#) sind.
6. Ein Entwicklungspfad in drei Phasen – Labordemonstration von [Nano-Kavitätsstrukturen](#) / [Noyron](#)-Integration und [algorithmische Optimierung](#) / [Skalierung](#) und [Industrialisierung](#) – ist technologisch [plausibel](#) und erfordert keine Durchbrüche in den [Grundlagenwissenschaften](#), sondern die systematische Anwendung und Kombination bereits verfügbarer Verfahren.

Die [Auflösungsgrenze](#) zur [Mikroelektronik](#) ist nicht überwunden – sie wird möglicherweise auch nicht überwunden werden müssen. Der Weg zu industriellen [entropischen Quantensystemen](#) führt nicht über die [Transistorfertigung](#) im [Nanometerbereich](#), sondern über die präzise [additive Fabrikation](#) von Vakuumkavitäten und deren intelligente Integration mit konventioneller Steuerelektronik. Die Werkzeuge dafür existieren.

Quellenverzeichnis

[1] Vyatskikh, A. et al. (2018): Additive manufacturing of 3D nano-architected metals. Nature Communications 9, 593. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03071-9>

- [2] Pingali R., Kim H., Saha S. K. (2024): A Computational Evaluation of Minimum Feature Size in Projection Two-Photon Lithography for Rapid Sub-100 nm Additive Manufacturing. *Micromachines* 15(1), 158. <https://doi.org/10.3390/mi15010158>
- [3] He Z. et al. (2024): Free-space direct nanoscale 3D printing of metals and alloys enabled by two-photon decomposition and ultrafast optical trapping. *Nature Materials* 23, 1645–1653. <https://doi.org/10.1038/s41563-024-01984-z>
- [4] Khan Z. et al. (2024): Hybrid Printing of Conductive Traces from Bulk Metal for Digital Signals in Intelligent Devices. *Micromachines* 15(6), 750. <https://doi.org/10.3390/mi15060750>
- [5] Khan Z. et al. (2024): Iterative printing of bulk metal and polymer for additive manufacturing of multi-layer electronic circuits. *npj Advanced Manufacturing* 1, 1. <https://doi.org/10.1038/s44334-024-00001-0>
- [6] Amruth C. et al. (2024): Micro-3D Printed Conductive Polymer Composite via Two-Photon Polymerization for Sensing Applications. *Advanced Materials Technologies* 9, 2400290. <https://doi.org/10.1002/admt.202400290>
- [7] Moughames J. et al. (2023): Ultra-resolution scalable microprinting. *Microsystems & Nanoengineering* 9, 65. <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00537-9>
- [8] Advancements in Two-Photon Polymerization (2PP) for Micro and Nanoscale Fabrication (2025). *Micro* 6(1), 1. <https://doi.org/10.3390/micro6010001>
- [9] Child O. et al. (2026): Printegrated Circuits: Personal Fabrication of 3D Printed Devices with Embedded PCBs. *TEI 2026 Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3731459.3773307>
- [10] Casimir H. B. G. (1948): On the attraction between two perfectly conducting plates. *Proc. Kon. Ned. Akad. Wet.* 51, 793–795.
- [11] White H. et al. (2020): Dynamic vacuum model and Casimir cavity experiments. *JBIS* 73, 5.
- [12] White H. et al. (2021): Worldline numerics applied to custom Casimir geometry generates unanticipated intersection with Alcubierre warp metric. *European Physical Journal C* 81, 677. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09484-z>
- [13] Lissner J., Kayser L. (2023–2026): LEAP 71 / Noyron — Large Computational Engineering Model. <https://leap71.com>
- [14] Puthoff H. E. (1993): Extracting energy and heat from the vacuum. *Physical Review A* 47, 3454. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.47.3454>
- [15] Dmitriyeva O., Moddel G. (2012): Test of zero-point energy emission from gases flowing through Casimir cavities. *Physics Procedia* 38, 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.08.007>

Abgerufen von „https://lenr.wiki/index.php?title=Nanofabrikation_im_Dienst_des_Quantenvakuums&oldid=8271“

Diese Seite wurde zuletzt am 16. Juni 2026 um 13:30 Uhr bearbeitet.