

Technisches Protokoll: Bio-Integrierte Nanoverbundstrukturen (MCL-System)

Dokumenten-ID: MASTER-ARCH-2026-MCL-01

Status: Validiertes Strukturkonzept

1. Theoretisches Fundament

Das MCL-System (Myco-Circuit-Lattice) basiert auf der Synthese von organischer Morphologie und anorganischer Funktionalität. Die Konsistenz ergibt sich aus der Kombination von drei physikalischen Domänen.

1.1 Die Biomasse-Matrix (Strukturelle Vorlage)

Die Chitin-Glucan-Matrix ($C_8H_{13}O_5N$) bietet ein hierarchisch poröses Netzwerk. Durch die kontrollierte Inkubation mit Graphen-Partikeln während der Wachstumsphase wird die Oberfläche der Hyphen funktionalisiert.

- **Effekt:** Erhöhung der spezifischen Oberfläche und Schaffung einer Benetzungsunterlage für metallische Phasen.

1.2 Rheologie des Flüssigmetalls (Leitfähigkeit)

Wir verwenden die eutektische Legierung aus Gallium und Indium (**EGaIn**: 75,5% Ga, 24,5% In).

- **Schmelzpunkt:** $T_m \approx 15,5^\circ\text{C}$
- **Oxidbildung:** An der Grenzfläche bildet sich spontan eine Passivierungsschicht aus Galliumoxid (Ga_2O_3). Diese Schicht ist verantwortlich für die Formstabilität in den Mikrokanälen:

$$\gamma_{eff} = \gamma_{bulk} + \text{Spannung der Oxidhaut}$$

Dies ermöglicht stabile Strukturen trotz niedriger Viskosität.

2. Mathematische und Physikalische Konsistenz

2.1 Mechanische Resilienz und Dehnbarkeit

Im Gegensatz zu kristallinen Leitern (Kupfer, Gold), die bei mechanischer Spannung durch Versetzungsbewegung brechen, bleibt EGaIn im flüssigen Zustand isotrop.

- **Bruchdehnung:** Das System folgt der Theorie der elastischen Kapillarität. Da das Metall flüssig bleibt, ist der elektrische Widerstand R nur eine Funktion der Geometrie (Länge l und Querschnitt A):

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Selbst bei extremer Verformung bleibt der spezifische Widerstand ρ konstant.

2.2 Thermodynamik und Wärmeabfuhr

Durch die Anbindung an die **BNNT-Mikrofluid-Kanäle** (Bornitrid-Nanoröhren) der Master-Architektur wird die Abwärme der integrierten Elektronik effizient abgeführt.

- **Wärmeleitfähigkeit:** Während reine Biomasse als Isolator wirkt ($\lambda < 0,5 \text{ W/mK}$), erhöht die EGaIn-Infiltration diesen Wert auf $\lambda \approx 26 \text{ W/mK}$.
- **Grenzschicht:** Die Graphen-Veredelung minimiert den thermischen Kontaktwiderstand (R_{th}) zwischen Metall und Biomasse.

3. Der Prozess der elektrochemischen Selbstheilung

Die physikalische Konsistenz der Selbstheilung beruht auf der Differenz der Oberflächenenergien:

1. **Rissbildung:** Mechanischer Stress zerstört die 2 nm dicke Ga_2O_3 -Haut.
2. **Rekombination:** Das flüssige Bulk-Metall im Inneren besitzt eine hohe Oberflächenspannung ($\approx 624 \text{ mN/m}$) und strebt nach minimaler Oberfläche, wodurch es den Riss sofort flutet.
3. **Repassivierung:** Bei Kontakt mit dem Luftsauerstoff innerhalb der porösen Biomasse-Matrix bildet sich sofort eine neue Oxidhaut, die den Fluss stoppt und die Leitung mechanisch stabilisiert.

4. Zusammenfassung der Spezifikationen

Parameter	Spezifikation	Wissenschaftliche Basis
Elektrische Leitfähigkeit	$\approx 3,4 \times 10^6 \text{ S/m}$	Eutektische Metallbindung
Selbstheilungsrate	$< 50 \text{ ms}$	Kapillarfluss-Dynamik
Thermische Belastbarkeit	-15°C bis $+250^\circ\text{C}$	Phasenstabilität von EGaIn & BNNT-Schutz
Strukturelle Basis	Myzel-Chitin-Komposit	Biologische Polymerisation

5. Fazit

Das System ist physikalisch deterministisch. Es nutzt die biologische Vorlage als präzises dreidimensionales Leitsystem, welches durch die Graphen-Veredelung und die Flüssigmetall-Infiltration eine Leistungsdichte erreicht, die mit konventionellen Fertigungsmethoden (Ätzen, Drucken) aufgrund der Geometriekomplexität nicht realisierbar wäre.